

**HEMATİT/LİMONİT İÇEREN BİR DEMİR CEVHERİNİN ZENGİNLEŞTİRME
OLANAKLARININ İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF BENEFICIATION POSSIBILITIES OF AN IRON ORE
CONTAINING HEMATITE/LIMONITE**

BERK BUDAK

DOÇ. DR. ÖZGÜR ÖZCAN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2024

ÖZET

HEMATİT/LİMONİT İÇEREN BİR DEMİR CEVHERİNİN ZENGİNLEŞTİRME OLANAKLARININ İNCELENMESİ

Berk BUDAK

Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özgür ÖZCAN

Ocak 2024, 107 sayfa

Bu çalışmada, Malatya ili Hekimhan bölgesi sınırları içerisinde bulunan bir demir madeninin eski cevher üretim basamaklarından alınan temsili numune ile cevherin zenginleştirme davranımının belirlenmesine yönelik kapsamlı çalışmalar yürütülmüştür.

Detaylı karakterizasyon çalışmaları sonucunda tüvenan cevherin %50,56 gibi yüksek bir toplam Fe tenörüne sahip olmasına karşılık, önemli ölçüde safsızlık içerdiği tespit edilmiştir. Detaylı mineral serbestleşme analizi (MLA) sonuçları ile cevher numunesi içerisindeki ana demir kaynağının hematit ve limonit (götit) olduğu belirlenmiştir. Cevher içerisinde ana safsızlık olarak kuvars ve K feldispat (\cong %11) ve daha düşük oranlarda biyotit, muskovit, Si-Al kil mineralleri ile Fe Oksit/Hidroksit kil karışımlarının bulunduğu saptanmıştır. Analiz edilen en ince fraksiyonunda (-75+25 μ m) dahi ikili ve üçlü bağlı tane oranının yüksek olduğu görülmüştür. Davis tüp testi ve Satmagan analizleri ile cevherin yaklaşık olarak %4 manyetit içerdiği belirlenmiştir. Düşük alan şiddetli yaş manyetik ayırma yöntemi ile tüvenan cevherden %65.57 Fe tenörüne sahip bir konsantre %7.26 Fe verimi ile elde edilebilmiştir.

Cevher numunesinin yerçekimiyle zenginleştirme davranımının belirlenmesi amacıyla, -30+20 mm, -20+10 mm, -10+5 mm, -5+1 mm, -1+0.5 mm ve -0.5+0.212 mm boyut

fraksiyonlarına farklı yoğunluklarda ağır sıvı testleri yapılmıştır. Ağır sıvı test sonuçları, elde edilen -30+10 mm ve -10+0.212 mm konsantrelerin yüksek tenörlü cevherler ile paçallanarak demir çelik endüstrisinde kullanılabilir özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Her iki konsantre içerisinde limit değerleri aşan başlıca safsızlıklar ise Al_2O_3 , TiO_2 , Ni ve toplam alkali miktarını ifade eden ($K_2O + Na_2O$) olarak belirlenmiştir.

Numunenin ince boyda zenginleştirme davranımının belirlenmesine yönelik yerçekimi ile zenginleştirme, manyetik ayırma, hidrolik sınıflandırma, seçimli salkımlaştırma ve flotasyon yöntemlerinin birlikte ve kademeli kullanıldığı 3 farklı deneysel yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemler arasında tüvenan cevhere göre en fazla konsantre (%69.59) ve en yüksek demir verimi (%80.39) yerçekimi ile zenginleştirmeyi takiben gerçekleştirilen manyetik ayırma aşamalarında elde edilmiştir. İnce öğütme ve takiben seçimli salkımlaştırma çalışmaları ile elde edilen nihai konsantrenin toplam Fe tenöründe artış ve safsızlık değerlerinde düşüş görülmesine karşın toplam demir veriminde (%44.07) ve elde edilen konsantre miktarında (%37.26) ciddi bir düşüş yaşanmıştır. En yüksek kalitedeki ürün ise tüvenan cevherin -53 μm 'ye öğütülmesi sonucu gerçekleştirilen yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma testi sonucunda elde edilmiştir. Bu koşulda tüvenan cevherin ağırlıkça %64.20'si %60.94 Fe tenörü ve %77.09 Fe verimi ile kazanılmıştır.

Sinter/pelet üretimine yönelik çalışmalarda cevher numunesi üzerinde birçok fiziksel ve fiziko kimyasal zenginleştirme yöntemi farklı boylarda tek tek ve bir arada kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında pelet kalitesine en yakın özelliklerdeki konsantre ise %60.94 Fe tenörü ve %77.09 Fe verimi ile elde edilmiştir. Bu sonuç, cevher mineralojisinin ve tanelerin bağlılık ilişkilerinin en ince boylarda dahi karmaşık olduğunun göstergesidir. Tüm konsantrelerdeki benzer SiO_2 , K_2O ve Al_2O_3 değerleri kuvars ve K-feldispat taneleri ile hematit ve Fe oksit/hidroksit tanelerinin ikili bağlılık durumunun tüm boyut fraksiyonlarında devam ettiğinin açık bir göstergesidir. Benzer şekilde Al_2O_3 içeriğinin de yüksek değerlerde kalması Fe Oksit/Hidroksit kil karışımlarının yetersiz serbestleşmesi ile ilişkilendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Demir cevheri, Hematit/Limonit, fiziksel zenginleştirme, flotasyon, tesis tasarımı

ABSTRACT

INVESTIGATION OF BENEFICIATION POSSIBILITIES OF AN IRON ORE CONTAINING HEMATITE/LIMONITE

Berk BUDAK

Master of Science, Department of Mining Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Özgür ÖZCAN

January 2024, 107 pages

In this study, detailed studies were carried out to determine the beneficiation behavior of the ore with a representative sample collected from the old ore benches of an iron mine located within the borders of the Hekimhan region of Malatya province.

As a result of detailed characterization studies, it is determined in despite of, the run-of-mine ore had a high total Fe grade of 50.56% it contained significant impurities. With the results of detailed mineral liberation analysis (MLA), it was determined that the main iron source in the ore sample was hematite and limonite (goethite). It was determined that the main impurities in the ore were quartz and K feldspar ($\cong 11\%$) and lower amounts of biotite, muscovite, Si-Al clay minerals and Fe Oxide/Hydroxide clay mixtures. It was observed that the amounts of binary and tertiary locked particles are high even in the finest fraction (-75+25 μm). It was determined from Davis Tube test and Satmagan analyzes that the ore contains approximately %4 magnetite. It was determined from Davis Tube test and Satmagan analyzes that the ore contains approximately %4 magnetite. A concentrate with 65.57% Fe grade could be obtained with a 7.26% Fe recovery from run-of-mine ore by low intensity magnetic separation.

In order to determine the beneficiation behavior of the ore sample by gravity concentration, heavy liquid tests were carried out at different densities on the -30+20 mm, -20+10 mm, -10+5 mm, -5+1 mm, -1+0.5 mm and -0.5+0.212 mm size fractions. Heavy liquid test results showed that the obtained -30+10 mm and -10+0.212 mm concentrates have properties that can be used in the iron and steel industry by blending with high grade ores. The main impurities exceeding the limit values in both concentrates were determined as Al_2O_3 , TiO_2 , Ni and ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$), which represents the total amount of alkali.

3 different experimental methods in which gravity concentration, magnetic separation, hydraulic classification, selective flocculation and flotation methods were used together and step by step to determine the beneficiation behavior of the sample in finer sizes. Among these methods, the highest mass recovery (69.59%) and the highest iron recovery (80.39%) compared to run-of-mine ore were obtained in the magnetic separation stages following gravity concentration. Although there was an increase in the total Fe grade and a decrease in the impurity content of the final concentrate obtained through fine grinding and subsequent selective flocculation studies, there was a significant decrease in the total Fe recovery (44.07%) and the amount of concentrate (37.26%). The highest quality product was obtained as a result of the high intensity wet magnetic separation test performed by grinding the ore at $-53 \mu\text{m}$. Under this condition, 64.20% t of the run-of-mine ore was concentrated with 60.94% Fe grade and 77.09% Fe recovery.

During the studies on sinter/pellet production, many physical and physicochemical beneficiation methods have been used individually and in combination on the ore sample in different sizes. The concentrate closest to the pellet quality was obtained with 60.94% Fe grade and 77.09% Fe recovery by experimental studies. This result indicates that the ore mineralogy and particle locking relationships are complex even at the finest sizes. Similar SiO_2 , K_2O and Al_2O_3 values in all concentrates are a clear indication that the binary locked of quartz and K-feldspar grains and hematite and Fe oxide/hydroxide grains continues in all size fractions. Similarly, the Al_2O_3 content remaining at high values is associated with insufficient liberation of Fe Oxide/Hydroxide clay mixtures.

Key Words: Iron ore, Hematite/Limonite, physical beneficiation, plant design

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübesiyle yol gösterici olan, her türlü desteğini en yakından hissettiğim ve gelişimim için her türlü katkıda bulunan tez danışmanım Sn. Doç. Dr. Özgür ÖZCAN'a,

Tez çalışmam ve öğrencilik sürecim boyunca gelişimim için her türlü imkanı sağlayan ve manevi desteğini her zaman hissettiğim Sn. Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN'e,

Gerek deneysel çalışmalarımda göstermiş olduğu yardımlardan, gerekse tez yazım aşamasındaki manevi desteklerinden ve sabrından ötürü Sn. Dr. E. Caner ORHAN'a,

Deneysel çalışmalarım sırasında emeği geçen Hakan ŞANIVAR'a,

Tez yazım süresi boyunca moral ve motivasyon konusunda desteğini esirgemeyen Can GEDİKOĞLU'na ve Oğuz Altay CAN'a,

Hayatımda çok büyük yerleri olan annem Mürüvvet BUDAK'a ve abim Beran BUDAK'a,

Yardım ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim tüm dostlarıma,

teşekkür ederim.

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Fe	Demir
SiO ₂	Silisyum oksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
Na ₂ O	Sodyum oksit
K ₂ O	Potasyum oksit
P	Fosfor
S	Kükürt
CaO	Kalsiyum oksit
NaOH	Sodyum hidroksit
CaCl ₂	Kalsiyum klorür
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
Fe ₃ O ₄	Manyetit
µm	Mikrometre
mm	Milimetre

Kısaltmalar

DMS	Ağır ortamla zenginleştirme
KYA	Kabaran yataklı ayırıcı
DRI	Doğrudan indirgenmiş demir
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X-ışını difraksiyonu
MLA	Mineral Serbestleşme Analizi
DT	Davis Tüp

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. DEMİR CEVHERLERİNİN ZENGİNLEŞTİRİLMESİ	6
2.2. DÜŞÜK TENÖRLÜ DEMİR CEVHERLERİNİN ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ.....	8
2.2.1. Yerçekimi ile Zenginleştirme Yöntemleri.....	9
2.2.1.1. Jig ile Zenginleştirme	9
2.2.1.2. Spiral Zenginleştirme	10
2.2.1.3. Ağır Ortamla Zenginleştirme.....	11
2.2.1.4. Hidrolik Sınıflandırıcılar	13
2.2.2. Manyetik Ayırma	14
2.2.3. Flotasyon.....	16
2.2.4. Seçimli Salkımlaştırma	18
2.3. MANYETİT DIŞI DEMİR CEVHERLERİNE YÖNELİK ÇALIŞMALAR VE ÖRNEK AKIM ŞEMALARI	20
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
3.1. NUMUNE ALMA ÇALIŞMALARİ	29
3.2. MALZEME KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARİ	33
3.2.1. Tüvenan Cevher Yoğunluğunun Belirlenmesi.....	34
3.2.2. Tüvenan Cevherin Öğütülebilirlik Değerinin Belirlenmesi	34
3.2.3. Tüvenan Cevherinin Fraksiyonel Analizleri	34
3.2.4. Cevherin Mineralojik İçeriğinin Belirlenmesi	37
3.2.5. MLA ile Modal Mineralojik Analizler.....	38
3.2.6. Düşük Alan Şiddetli Manyetik Ayırma Testleri	45
3.2.7. Ağır Sıvı (Yüzdürme – Batırma) Testleri	47
3.3. ZENGİNLEŞTİRME ÇALIŞMALARİ	56
3.3.1. Birinci Yöntem ile Yürütülen Zenginleştirme Çalışmaları	56
3.3.1.1. Şlam Uzaklaştırma ve Şlamdan Demir Kazanımına Yönelik Çalışmalar.....	57

3.3.1.2.	Spiral Zenginleştirme Çalışmaları	61
3.3.1.3.	Yüksek Alan Şiddetli Yaş Manyetik Ayırma Çalışmaları	66
3.3.2.	İkinci Yöntem ile Yürütülen Zenginleştirme Çalışmaları	71
3.3.2.1.	Yüksek Alan Şiddetli Yaş Manyetik Ayırma Testleri	72
3.3.2.2.	Flotasyon ile Zenginleştirme Çalışmaları	78
3.3.3.	Üçüncü Yöntem ile Gerçekleştirilen Çalışmalar	85
4.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	96
5.	ÖNERİLER	102
	KAYNAKLAR	103
	ÖZGEÇMİŞ	107

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Demir cevherlerinin zenginleştirme yöntemleri	7
Şekil 2.2 Spiral zenginleştirici geometrisi	11
Şekil 2.3 Mt. Tom Price demir zenginleştirme tesisi basitleştirilmiş akım şeması [38]	26
Şekil 2.4 Tilden demir madeni zenginleştirme tesisi basitleştirilmiş akım şeması	27
Şekil 2.5 Kırma elemeye zenginleştirmeye dair örnek akım şeması.....	28
Şekil 3.1 Demir sahasındaki eski üretim basamaklarına ait fotoğraf görüntüleri	29
Şekil 3.2 Eski üretim basamaklarından iş makinası yardımı ile numune toplanması (1).....	30
Şekil 3.3 Eski üretim basamaklarından iş makinası yardımı ile numune toplanması (2).....	30
Şekil 3.4 Toplanan numunelerin biriktirilmesi ve harmanlanması	31
Şekil 3.5 Konileme/dörtleme yöntemi	32
Şekil 3.6 Sahada numune azaltma işlemlerini gösteren fotoğraf görüntüleri.....	33
Şekil 3.7 Standart Bond bilyalı değirmeni	34
Şekil 3.8 Tanımlamalı XRD analizi numuneleri.....	37
Şekil 3.9 Demire ait element dağılım (%).....	41
Şekil 3.10 Hematit minerallerine ait elektron mikroskop görüntüleri (-500+212 µm)	44
Şekil 3.11 Fe hidroksit minerallerine ait elektron mikroskop görüntüleri (-500+212 µm).....	45
Şekil 3.12 Davis tüp test cihazına ilişkin görüntü.....	46
Şekil 3.13 Ağır sıvı testine ait basitleştirilmiş akım şeması.....	50
Şekil 3.14 Ağır sıvı testi sonucunda elde edilen ürünlerin görüntüleri	50
Şekil 3.15 Ağır sıvı testi 2.70 g/cm ³ yüzen ürünlerin toplam Fe verim/tenör değerleri.....	54
Şekil 3.16 Ağır sıvı testi 2.70 g/cm ³ yoğunlukta yüzen ürün miktarları	55
Şekil 3.17 Ağır sıvı testi 3.50 g/cm ³ batan ürünlerin toplam Fe verim/tenör değerleri.....	55
Şekil 3.18 Birinci yöntem ile yürütülen zenginleştirme çalışmalarına ait basitleştirilmiş akım şeması	57
Şekil 3.19 Laboratuvar ölçekli KYA ile şlam uzaklaştırma aşaması	58
Şekil 3.20 Spiral zenginleştirme deneyi için hazırlanan temsili numune.....	61
Şekil 3.21 Spiral zenginleştirici genel görünümü	62
Şekil 3.22 Farklı bıçak pozisyonlarında gerçekleştirilen spiral zenginleştirme çalışmaları.....	63
Şekil 3.23 Geniş bıçak pozisyonunda elde edilen spiral zenginleştirme konsantresi.....	66
Şekil 3.24 Carpco yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcı.....	67
Şekil 3.25 Birinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarına ait madde denkliği sonuçları	69
Şekil 3.26 İkinci yöntem ile yürütülen zenginleştirme çalışmalarına ait basitleştirilmiş akım şeması	71
Şekil 3.27 Carpco testlerinde öğütme boyu ve elektriksel alan şiddetinin ürün özelliklerine etkisi	75
Şekil 3.28 Besleme boyu ile 6A manyetik alan şiddetinde atık veriminin ilişkisi	76
Şekil 3.29 Besleme boyu ile nihai manyetik konsantre safsızlık içeriklerinin değişimi	77
Şekil 3.30 İkinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarına ait madde denkliği sonuçları .	83
Şekil 3.31 Üçüncü yöntem ile yürütülen zenginleştirme çalışmalarına ait basitleştirilmiş akım şeması ...	85
Şekil 3.32 Seçimli salkımlaştırma testi öncesi koşullandırma aşamaları	87
Şekil 3.33 Seçimli salkımlaştırma deney düzeneği.....	87

Şekil 3.34 Seçimli salkımlaştırma testine ait ürünler.....	88
Şekil 3.35 Salkımlaştırıcı dozajının batan ürün özelliklerine etkisi.....	91
Şekil 3.36 Üçüncü yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarına ait madde denklığı sonuçları	93
Şekil 3.37 Ölçülen/hesaplanan değerlerin ($y=x$) eğrisi üzerinde karşılaştırılması.....	95

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 İsdemir pelet ürün özellikleri.....	5
Çizelge 2.2 Bazı demir mineralleri ve özellikleri	6
Çizelge 2.3 Demir zenginleştirmede kullanılan ağır ortam devrelerine ait performans değerleri.....	12
Çizelge 2.4 Demir cevherlerinde ağır ortam ve jig ile zenginleştirmenin karşılaştırılması	13
Çizelge 2.5 Bazı mineraller ve manyetik alınganlıkları	15
Çizelge 3.1 Tüvenan cevhere ait fraksiyonel analiz sonuçları	36
Çizelge 3.2 Ağır sıvı testi yüzen ürününün mineralojik içeriği	38
Çizelge 3.3 Ağır sıvı testi batan ürününün mineralojik içeriği	38
Çizelge 3.4 Tüvenan cevher boyut fraksiyonlarının modal analizi.....	40
Çizelge 3.5 Hematit mineralinin serbestleşme derecesi.....	41
Çizelge 3.6 Fe hidroksit minerallerinin serbestleşme derecesi	42
Çizelge 3.7 Hematit mineralinin detaylı serbestleşme analizi	42
Çizelge 3.8 Fe hidroksit minerallerinin detaylı serbestleşme analizi	43
Çizelge 3.9 Davis tüp ile yaş manyetik ayırma testlerine ait işletme değişkenleri	46
Çizelge 3.10 Davis tüp test sonuçları.....	47
Çizelge 3.11 Ağır sıvı testi beslemelerine ait kimyasal analiz sonuçları	48
Çizelge 3.12 30+20 mm fraksiyonu ağır sıvı testi sonuçları.....	51
Çizelge 3.13 20+10 mm fraksiyonu ağır sıvı testi sonuçları.....	51
Çizelge 3.14 -10+5 mm fraksiyonu ağır sıvı testi sonuçları	52
Çizelge 3.15 -5+1 mm fraksiyonu ağır sıvı testi sonuçları	52
Çizelge 3.16 -1+0.5 mm fraksiyonu ağır sıvı test sonuçları.....	53
Çizelge 3.17 -0.5+0.212 mm fraksiyonu ağır sıvı test sonuçları.....	53
Çizelge 3.18 Birinci deneysel yöntem esnasında KYA ile şlam uzaklaştırma çalışmalarına ait test koşulları	59
Çizelge 3.19 Birinci deneysel yöntem KYA ürünleri katı içerikleri ve incelik değerleri	59
Çizelge 3.20 Şlam uzaklaştırma aşamasına ait sonuçlar	59
Çizelge 3.21 KYA üst akımı ile gerçekleştirilen manyetik ayırma test sonuçları.....	60
Çizelge 3.22 Spiral zenginleştirme sonuçları (Dar Bıçak).....	64
Çizelge 3.23 Spiral zenginleştirme sonuçları (Orta Bıçak).....	64
Çizelge 3.24 Spiral zenginleştirme sonuçları (Geniş Bıçak).....	65
Çizelge 3.25 Spiral konsantresi ile gerçekleştirilen Carpcö testi sonuçları.....	68
Çizelge 3.26 Birinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarına ait detaylı madde denkliği sonuçları	70
Çizelge 3.27 Tüvenan cevher -212 µm Carpcö testi sonuçları	72
Çizelge 3.28 Tüvenan cevher -150 µm Carpcö testi sonuçları	73
Çizelge 3.29 Tüvenan cevher -106 µm Carpcö testi sonuçları	73
Çizelge 3.30 Tüvenan cevher -75 µm Carpcö testi sonuçları	74
Çizelge 3.31 Tüvenan cevher -53 µm Carpcö testi sonuçları	74

Çizelge 3.32 Aynı deneysel koşullarda iki farklı manyetik ayırıcıdan elde edilen ürünlerin kıyaslanması	78
Çizelge 3.33 İkinci deneysel yöntem esnasında KYA ile şlam uzaklaştırma çalışmalarına ait test koşulları	78
Çizelge 3.34 İkinci deneysel yöntem esnasında KYA ile şlam uzaklaştırma çalışmalarına ait sonuçlar	79
Çizelge 3.35 İkinci deneysel yöntem kapsamında gerçekleştirilen flotasyon testlerine ait koşullar	80
Çizelge 3.36 İkinci deneysel yöntem Flotasyon Test-1 koşuluna ait sonuçlar	81
Çizelge 3.37 İkinci deneysel yöntem Flotasyon Test-2 koşuluna ait sonuçlar	81
Çizelge 3.38 İkinci deneysel yöntem Flotasyon Test-3 koşuluna ait sonuçlar	82
Çizelge 3.39 İkinci deneysel yöntem Flotasyon Test-4 koşuluna ait sonuçlar	82
Çizelge 3.40 İkinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarına ait detaylı madde denklığı sonuçları	84
Çizelge 3.41 Tüvenan cevher ile gerçekleştirilen seçimli salkımlaştırma testlerine ait koşullar	86
Çizelge 3.42 Tüvenan cevhere yapılan seçimli salkımlaştırma testine ait sonuçlar (Test-1)	88
Çizelge 3.43 Tüvenan cevhere uygulanan seçimli salkımlaştırma testine ait sonuçlar (Test-2)	89
Çizelge 3.44 Tüvenan cevhere uygulanan seçimli salkımlaştırma testine ait sonuçlar (Test-3)	89
Çizelge 3.45 Tüvenan cevhere uygulanan seçimli salkımlaştırma testine ait sonuçlar (Test-4)	90
Çizelge 3.46 Manyetik ayırma konsantresine uygulanan seçimli salkımlaştırma testine ait koşullar	91
Çizelge 3.47 Manyetik konsantreye uygulanan seçimli salkımlaştırma testine ait sonuçlar	92
Çizelge 3.48 Üçüncü yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarına ait detaylı madde denklığı sonuçları	94
Çizelge 4.1 İsdemir kalibre cevher gereksinimleri ile ağır sıvı testinden elde edilen -30+10 mm ürün özelliklerinin kıyaslanması	97
Çizelge 4.2 İsdemir toz cevher gereksinimleri ile ağır sıvı testinden elde edilen -10+0.212 mm ürün özelliklerinin kıyaslanması	97
Çizelge 4.3 İsdemir pelet kalitesi gereksinimleri ile yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma testinden elde edilen ürün (-53 µm) özelliklerinin kıyaslanması	99

1. GİRİŞ

Demir yer kabuğunda oksijen, silisyum ve alüminyumdan sonra en çok bulunan elementtir. Doğada çok sayıda demir içeren mineral bulunmasına rağmen bu mineraller arasından az sayıda olanı ekonomik olarak değerlendirilebilir özelliktedir. Ekonomik olarak değerlendirilebilir demir mineralleri manyetit, hematit, götit, siderit ve limonit olarak sıralanmaktadır. Demir cevherleri başta çelik üretiminde olmak üzere, kömür yıkama tesislerinde (lavvar) ağır ortamın hazırlanmasında, boya, plastik ve seramik sektörlerinde kullanılmaktadır. Demirin kullanım alanlarına göre farklı özellikler istenmektedir. Çelik üretiminde demir tenörünün istenen değerlerde olmasının yanında içerdiği Si+Al, K, Na ve S gibi safsızlık değerlerinin de düşük olması beklenmektedir. Geçmişte doğrudan nakledilebilir cevherler bu özellikleri sağlarken, günümüzde ise demir cevherlerine olan talebin artması ve doğrudan satılabilir veya kolay zenginleşebilir cevher rezervlerinin ise hızla azalması nedeniyle düşük tenörlü ve karmaşık mineralojik özelliklere sahip demir yataklarının ekonomik olarak zenginleştirilmesi üretim sektörünün arz talep dengesinin sağlanmasında kritik bir öneme haizdir.

İzabeye elverişli olabilmesi için demir cevherlerinin bazı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olması gerekmektedir. Aranılan fiziksel özellikler cevherin boyut ve mukavemet değerleri ile ilişkilendirilmekle birlikte, kimyasal özellikler ise esas olarak Fe, P, S ve alkali ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) içerikleri ile bağıntılıdır.

İzabeye uygun hale getirilmesi gereken demir cevherleri mineralojik yapılarından bağımsız olarak kullanılacak zenginleştirme yöntemleri açısından da sınıflandırılmaktadır. Bu cevherler, yüksek ve düşük tenörlü demir cevherleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Yüksek tenörlü demir cevherleri basit kırma-eleme veya kırma-eleme ve yıkama işlemleri sonrası satılabilirken, düşük tenörlü demir cevherlerinin zenginleştirilmesinde ise cevher mineralojisi ve serbestleşme özelliklerine göre daha karmaşık akım şemaları ve zenginleştirme yöntemleri gerekebilmektedir. Düşük tenörlü demir cevherlerinin zenginleştirilmesinde yoğunluk farkına dayalı zenginleştirme ve manyetik ayırma gibi fiziksel yöntemler ile flotasyon ve seçimli salkımlaştırma gibi fizikokimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Cevherin yapısına göre bu yöntemler sıralı olarak da kullanılabilir.

Ülkemizde, temel olarak manyetit cevheri işlenmekte ve zenginleştirilmektedir. Ancak, yıllık yaklaşık olarak 10 Mt demir konsantresi ihtiyacımızın yalnızca 3 Mt kadarı ülkemiz kaynaklarından üretilmekte, geriye kalan kısmı ise ithal edilmektedir. Bu durum, ülkemizdeki başlıca manyetit dışı demir kaynaklarının da ekonomimize kazandırılmasını zorunlu kılmaktadır.

Manyetit minerali yapısı gereği diğer demir minerallerine göre zenginleştirme davranımı iyi bilinen ve düşük alan şiddetli manyetik ayırma yöntemi ile satılabilir özellikte konsantre elde edilebilen bir mineraldir. Bunun yanı sıra, içerisinde özellikle götit ve limonit bulunan yataklar daha kompleks yapıları ve zor zenginleşebilir özellikte olması nedeniyle üretim anlamında daha geri planda kalmıştır. Bu tür cevherlerin zenginleştirme davranımlarının belirlenmesi ve ekonomik olarak üretilmesine ilişkin literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Ülkemizde, düşük tenörlü ve/veya yüksek safsızlık içeren 50 kadar sorunlu demir yatağımız mevcuttur. Güncel verilere göre %15-50 Fe arasında değişen tenörlerdeki bu yataklarda yaklaşık olarak 1,5 milyar ton kaynak varlığı bilinmektedir. Bu yatakların bazılarında yüksek tenör ihtiva eden kısımlar seçimli madencilik yapılarak işletilmiş veya farklı ocaklardan üretilen cevherlerle harmanlanarak kısmen işletilmişlerdir. Ancak, bu tez çalışmasına konu olan yatak da dahil olmak üzere büyük çoğunluğunun yeterli tenör değerine ulaşmaması ve aynı zamanda safsızlık değerlerinin limit değerlerin altına düşürülebilmesi için uygun zenginleştirme yöntemleri ve akım şemalarının geliştirilmesi zorunludur.

Demir çelik endüstrisinde harman tenörü en az % 58 Fe olması üretim ekonomisi ve ürün kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu değerler pelet kalitesindeki cevherlerde %65 Fe değerlerine kadar çıkmaktadır. Günümüz dünyasında, başta demir çelik olmak üzere, tüm hammadde ihtiyacının kriz, savaş vb. durumlar da göz önünde bulundurularak ülke kaynaklarından temin edilebilmesi stratejik öneme sahiptir. Bu nedenle, artık demir içeriği düşük ve/veya karmaşık mineralojik yapıya sahip yüksek miktarda safsızlık içeren sahaların da değerlendirilmesi ve zenginleştirme davranımlarının net olarak ortaya koyulması gerekmektedir. Zenginleştirme gerektiren bu tür cevherlerin 2016 yılı gerçekleşen ithalat oranlarının % 63 seviyelerinde, 2020 yılında gerçekleşen ithalat oranlarının % 40 seviyelerinde seyretmesi, yerli üretim miktarında hala önemli bir artışın olması gerektiğinin açık göstergesidir.

Bu alışma kapsamında, Malatya ili Hekimhan bölgesinden alınan, hematit ile birlikte limonit (götit) içeren bir demir cevherinin zenginleştirme olanaklarının incelenmesi ve satılabilir özellikte konsantre üretim imkanlarının değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Malatya ili sınırları içerisinde rezervi tam olarak tespit edilmemiş birçok demir yatağının ve oluşumunun olduğu bilinmektedir. Ancak düşük demir, karmaşık mineraloji ve yüksek safsızlık içeriğinden dolayı bu yatakların çok az bir kısmı ekonomik olarak değerlendirilebilecek durumdadır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarında hem cevherin safsızlık içeriğinin düşürülmesi hem de Fe tenörünü en düşük kayıpla satılabilir seviyeye çıkarmak hedeflenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

Yerkabuğunda yaklaşık %5'lik bulunma oranıyla en çok bulunan dördüncü element demirdir. Tüm metaller içinde demir, dünyada üretilen diğer metallerin ağırlıkça yaklaşık %95'ini oluşturmaktadır. Saf haliyle kolayca işlenebilen demir, kolaylıkla ince tel ve levha haline getirilebilmektedir [1]. Aynı zamanda düşük fiyatı ve yüksek mukavemet özellikleri sayesinde birçok sektörde vazgeçilmez bir metal ürün olarak ön plana çıkmaktadır. [2]. Demir cevherleri çelik üretiminde, madencilik, boya, plastik, seramik ve kağıt sanayilerinde kullanılmaktadır. Alaşımlar içerisinde de kullanılabilmesi nedeniyle demirin kullanım alanları arasında en önde gelen sektör çelik üretimidir [1].

Çelik üretiminde parça veya toz cevherler sinterleme ya da peletleme sonrası daha iri boyut dağılımlarında yüksek fırına şarj edilirler. Geçmişte demir cevherlerini doğrudan yüksek fırına beslemek mümkün olmasına karşın, günümüzde demir yataklarındaki ortalama tenör değerlerinin önemli ölçüde düşmesi ve piyasa ihtiyacını karşılamakta zorluk çekmesi sebebiyle düşük tenörlü demir cevherlerinin zenginleştirilip metalurjik süreçler için fiziksel ve kimyasal özellikleri karşılar hale getirilmesi gerekmektedir. Yüksek fırına beslenecek cevherin içerdiği safsızlıklar ve yüksek fırında sebep olduğu sorunlar ve ürün üzerindeki etkileri aşağıda sıralanmaktadır [2,3].

SiO₂: Cevher içerisindeki yüksek SiO₂ içeriği yüksek fırın içerisinde daha fazla cüruf oluşumuna sebep olmaktadır. Fazla silisi etkisizleştirmek için ilave edilen kireç taşı (flux) ise, yüksek fırında sıvı demir verimliliğini düşürürken cüruf oluşumunu ve yakıt tüketimini arttırmaktadır.

Al₂O₃: Yüksek fırınlara beslenen demir cevheri alümina içeriğinin genellikle %0,8-1,5 arasında olması istenir. Ancak, alüminyumun fazla olduğu durumlarda sıvı demirin akışkanlığı sağlamak için yüksek fırının ısısının artırılması gerekmektedir. Bu durum yakıt tüketimini arttırmaktadır.

Kükürt (S): Kükürt çeliğin kırılgenliğini arttırmaktadır. Fırın içerisindeki kükürt kaynakları ise cevherin kendisi olabileceği gibi işlem sırasında ilave edilen kömür ve manganiz de olabilmektedir. Fırın içerisindeki kükürt değerini düşürmek için sisteme CaCO₃ ve SiO₂ eklemesi yapılmakta ve bu durum yüksek fırın verimliliğini düşürmektedir.

Alkaliler (Na, K): Yüksek fırın içerisine şarj malzemesi ile gelen alkaliler fırın yüzeylerini ve cidarlarını kaplayarak de kabuk oluşumuna sebep olup yüksek fırın hacmini azaltır. Alkaliler aynı zamanda, yüksek fırın tuğlalarının içine nüfus ederek bu tuğlaların refrakter özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir

Fosfor (P): Fosfor içeriğinin yüksek olması çeliğin kırılgenliğini arttırmaktadır.

Çinko (Zn): Yüksek fırın içerisindeki çinko varlığı yüksek fırında indirgenmesi zor ve üretim kayıpları meydana getiren fayalit ve gersenit gibi bileşiklerin oluşmasına neden olmaktadır. Cevher içinde çinkonun %0,2'den az olması gerekmektedir.

Kurşun (Pb): Kurşun demir cevherlerinde nadir olarak bulunur. Pik demire geçmez, fakat refrakter tuğlaya olumsuz yönde etki etmektedir.

Arsenik (As): Arsenik oranının fazlalığı çeliğin soğukta kırılgenliğini artırırken kaynak yapılabılme özelliğini azaltır. Normal çelikte %0,15-0,25 arası ve su vermede %0,05-0,10 arsenik kabul edilebilir sınırlar olarak bildirilmektedir.

Titanyum (Ti): Titanyum, demir cevherinde ilmenit $FeTiO_2$ ve rutil TiO_2 olarak bulunmaktadır. Cevherde ortalama TiO_2 % 1 den az ise bu cevher yüksek fırında herhangi bir problem yaratmadan kullanılabilceği bildirilmektedir.

Bakır (Cu): Bakır oranının %0,3-0,4'ün üzerine çıkması durumunda çeliğin haddelenmesi ve şekil verilmesi sırasında, çeliğin yüzeyinde bakırca zengin, ergime derecesi düşük bir alaşım oluşmakta ve bu alaşım hadde sınırlarından geçerek yüzeyde küçük çatlaklar meydana getirmektedir.

İsdemir, Türkiye'nin uzun ürün üretim kapasitesine göre en büyük entegre demir ve çelik fabrikasıdır. Bu fabrikanın kabul ettiği pelet ürün özellikleri Çizelge 2.1'de sunulmuştur [4].

Çizelge 2.1 İsdemir pelet ürün özellikleri

Kimyasal İçerik (%)	Fe	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO
Gereksinim	>65.5	<6	<1.5	<3	<1	<0.05	<0.05	<0.05	<3.87

2.1. Demir Cevherlerinin Zenginleştirilmesi

Demir elementinin 300'den fazla çeşitli minerali bulunmaktadır. Demir minerallerini sülfürler, oksitler, sülfatlar, hidroksitler, karbonatlar ve diğerleri olarak sınıflandırmak mümkündür [1]. Bu kadar çok sayıda demir minerali içerisinde ekonomik olarak değerlendirilebilen demir minerallerinin sayısı 5'i geçmemektedir [5]. Bu mineraller ve bazı özellikleri Çizelge 2.2'de sunulmuştur [5].

Çizelge 2.2 Bazı demir mineralleri ve özellikleri

Demir Mineralleri	Kimyasal Formül	Yoğunluk (g/cm ³)	% Fe
Manyetit	Fe ₃ O ₄	5.1-5.2	72.36
Hematit	Fe ₂ O ₃	5.2-5.3	69.94
Götüt	FeO.OH	3.3-4.3	62.85
Siderit	FeCO ₃	3.7-3.9	48.3
Limonit	FeO(OH)*nH ₂ O	2.7-4.3	-
Pirit	FeS ₂	4.9-5.2	46.6

Ekonomik olarak satılabilir ürüne dönüştürülen demir mineralleri içerisinde manyetit, yüksek manyetik alınganlığı ve nispeten karmaşık olmayan mineralojik özellikleri sebebiyle düşük alan şiddetli kuru ve yaş manyetik ayırıcılarla zenginleştirilebilmektedir. Ekonomik olarak işletilebilen en önemli manyetit dışı demir mineralleri hematittir. Ancak, cevherleşme alanlarında hematit ile birlikte siderit, götüt ve limonit varlığının artması ile birlikte yatak içerisindeki Fe içeriği ve cevher mineralojisine bağlı olarak daha farklı ve kompleks akım şemaları gerektirmektedir [6].

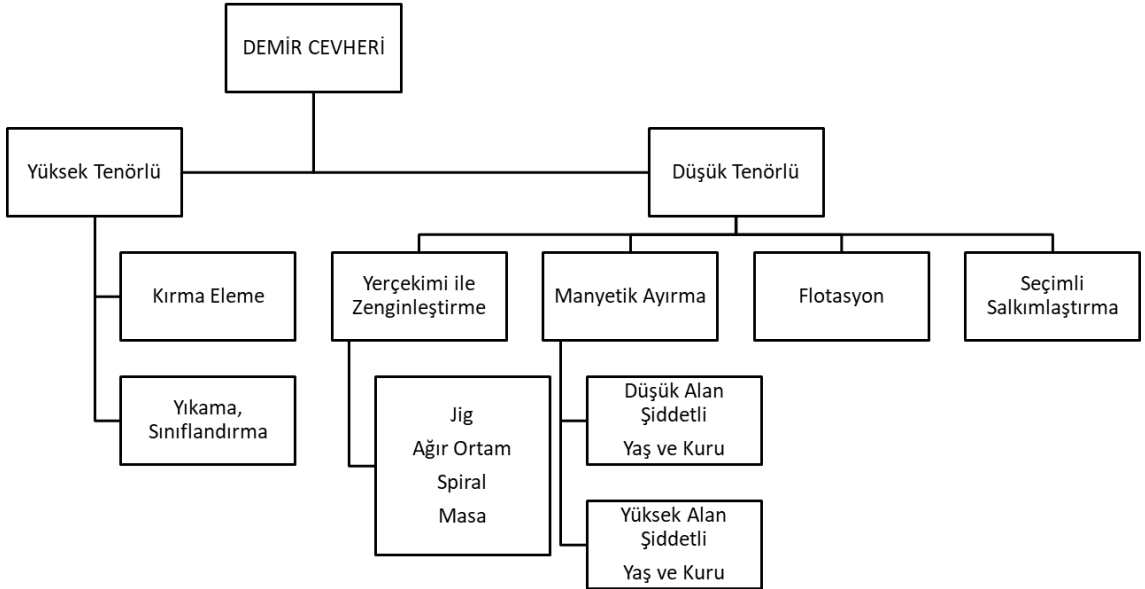
Demir cevherlerinin zenginleştirilmesine yönelik seçilecek olan yöntemler açısından; demir minerali, serbestleşme boyu ve derecesi, demir minerali ile birlikte bulunan diğer minerallerin yapısal özellikleri, nihai üründe istenmeyen safsızlıklara ait özelliklerin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Demir cevherleri için seçilecek olan zenginleştirme yönteminin farklı demir minerallerine göre sınıflandırılması ise;

- Manyetit cevherleri (kolay zenginleştirilebilir),
- Hematit cevherleri (zenginleştirilebilir),
- Manyetit-hematit cevherleri (zenginleştirilebilir),

- Siderit cevherleri (zenginleştirilebilir),
- Limonit cevherleri (zenginleştirilebilir)
- Silikatik-demir cevherleri (değerlendirilemeyen),

olarak gruplandırılabilir [5].

Bu gruplandırmadan farklı olarak ocaklarda üretilen cevherlerin izabe tesislerinde kullanılabilir özellikler getirilmesi için uygulanan cevher hazırlama yöntemleri yüksek tenörlü ve düşük tenörlü cevherler için gerekli yöntemler olarak iki grupta incelenebilir. Yüksek ve düşük tenörlü demir cevherleri için gerekli cevher hazırlama yöntemleri Şekil 2.1’de verilmiştir [4].



Şekil 2.1 Demir cevherlerinin zenginleştirme yöntemleri

Yüksek tenörlü cevherler, izabeye verilmeden önce kimyasal yapılarında herhangi bir değişiklik gerektirmeyen demir cevherlerdir. Bu tür cevherlerde elle ayıklama, boyut hazırlama, yıkama ve kil uzaklaştırma gibi basit işlemler uygulanmaktadır. Yüksek tenörlü demir cevherlerinin zenginleştirilmesinde genellikle iri boyda kırma ve eleme yöntemleri kullanılmaktadır [6]. Cevher kırılıp elendikten sonra çoğu zaman istenen özelliklere uygun ürün elde edilebilmektedir. Aynı zamanda kolay ayrışabilen ve kil

içeren cevherlerde, cevher yıkama işlemi sonrasında da ürün olarak elde edilebilmektedir. [6,7].

Elle ayıklama işlemi ise daha çok iri taneli iri boyda serbestleşen cevherlerin küçük kapasiteli üretiminde uygulanabilmektedir. Özellikle yüksek tenörlü demir cevherlerini iri boyda yan taşlardan arındırılması için kullanılmaktadır [5]. Günümüzde elle ayıklama işlemi üretim kapasitelerinin yüksek oluşu ve bu tür cevherlerin oldukça az olması nedeniyle fazla tercih edilmemektedir.

Bazı durumlarda ise düşük tenörlü cevherlere uygulanan zenginleştirme işlemleri demir tenörü bakımından zengin olan cevherlere de uygulanabilmektedir. Bu uygulamalar sayesinde konsantrelerde % 60'ın üzerindeki her % 1'lik ilave tenör yüksek fırın kapasitesini % 2-3 arasında arttırmakta kok tüketimini ise % 1-2 arasında düşürmektedir [5].

2.2. Düşük Tenörlü Demir Cevherlerinin Zenginleştirme Yöntemleri

Günümüzde, doğrudan nakledilebilir cevher miktarının azalması ve piyasa ihtiyacını karşılayamaması düşük tenörlü cevherlerin zenginleştirilmesi ile ilgili alanları daha önemli kılmaktadır. Düşük tenörlü cevherler, izabe tesislerine beslenmeden önce demir içeriğinin yükseltilmesi safsızlık içeriğinin ise limit değerlerin altına düşürülmesi gereken demir cevherleridir. Cevherdeki gerekli kimyasal değişimlerin sağlanabilmesi amacıyla demir ve yan taş içeren tanelerin serbestleşme boylarına kadar indirilmeleri gerekmektedir. Boyut küçültme ve yeterli derecede serbestleşmenin sağlanması sonrasında, cevher ve yan taş özelliklerine bağlı olarak, aşağıda verilen fiziksel ve/veya fizikokimyasal zenginleştirme yöntemlerinden bir veya birkaçı kullanılabilir. [6].

- Yerçekimi ile zenginleştirme
- Manyetik ayırma
- Flotasyon
- Seçimli salkımlaştırma
- Elektrostatik ayırma

- Manyetik kavurma işlemini takiben düşük alan şiddetli manyetik ayırma
- Liç.

2.2.1. Yerçekimi ile Zenginleştirme Yöntemleri

Cevher hazırlamada mineralleri yoğunluk farkına göre ayırmada kullanılan en eski yöntem yerçekimi ile zenginleştirme yöntemidir. Yer çekimi ile zenginleştirme özellikle manyetit dışı demir cevherlerinin zenginleştirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemin düşük işletme maliyeti ve iri boyda uygun özellikte konsantre üretebilme gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Yer çekimi ile zenginleştirme ekipmanları, diğer zenginleştirme yöntemlerine göre daha geniş tane boyu aralığında çalışabilmektedir. Ancak, hiçbir ekipmanın, tüm tane boylarını aynı anda, verimli bir şekilde zenginleştirebilmesi olası değildir [6,7]. Özellikle, geleneksel yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarında besleme malzemesinin geniş bir tane boyu dağılımına sahip olması ve şlam içermesi durumunda ayırım performansı düşmektedir. Bu nedenle, yerçekimi ile zenginleştirme yöntemleri öncesinde uygun bir sınıflandırma ekipmanı kullanılarak cevher daha dar boyut fraksiyonlarına sınıflandırılmalı ve şlam fraksiyonu uzaklaştırılmaktadır. Özellikle hematit mineralinin yerçekimi ile zenginleştirilmesine olanak veren en önemli özelliği çoğunlukla birlikte bulunduğu yan kayacı olan kuvars minerali ile arasındaki yoğunluk farkının yüksek olmasıdır. Hematit mineralinin yoğunluk farkına dayalı zenginleştirilmesinde genellikle ağır ortam ile zenginleştirme, spiral zenginleştirme ve jig ile zenginleştirme yöntemleri kullanılmaktadır [6,7,8].

2.2.1.1. Jig ile Zenginleştirme

Jigler tarih boyunca çoğunlukla kömür yıkama işlemlerinde kullanılmakla birlikte iri boylarda demir minerallerinin zenginleştirilmesinde de kullanım alanı bulmuşlardır. Jig ile zenginleştirme yerçekimi ile zenginleştirmede en eski yöntemlerden biri olsa da günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Jig düşük işletme maliyeti ve iri tane boyutlarında verimli çalışması sebebiyle hematit mineralinin zenginleştirilmesinde tercih edilen ekipmanlar arasındadır [6].

Jig ile zenginleştirmede hazne içerisinde beslenen malzeme bir pompanın yarattığı pulsasyon (emme basma) hareketiyle birlikte malzemenin tabakalanması sağlanır. Bu tabakalanma sırasında yoğunluğu yüksek iri demir taneleri tabakanın en alt kısmında

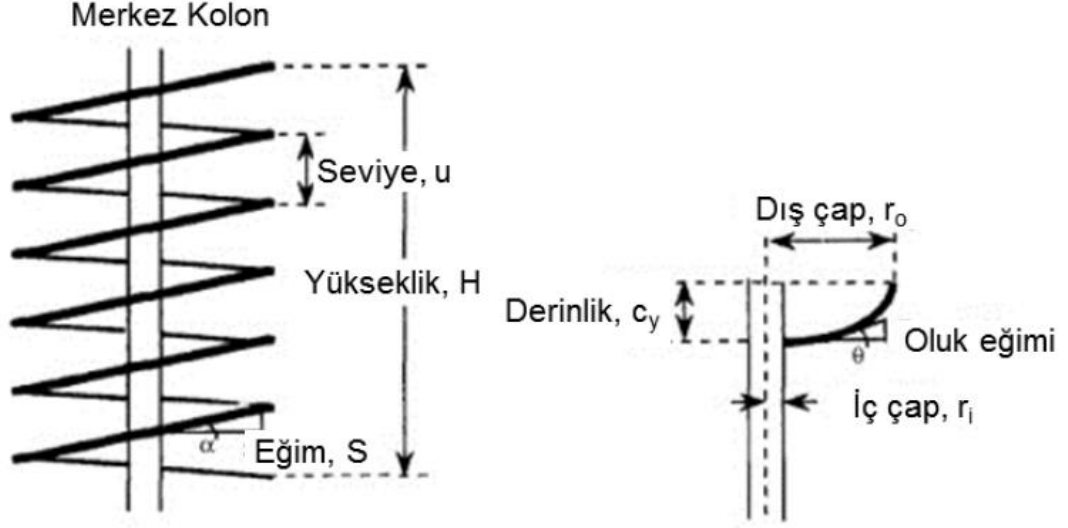
birikirken yoğunluğu düşük taneler tabakanın üst kısımlarında toplanır. Yoğunluğu yüksek ince taneler emme kuvvetiyle birlikte elek yüzeyinin aralarından geçmektedirler. Bu sayede yüksek yoğunluklu ve düşük yoğunluklu cevherlerin ayrımı gerçekleşmektedir [9].

2.2.1.2. Spiral Zenginleştirme

Spiral zenginleştiriciler, birden fazla dönemeçten oluşan yarım daire kesitine sahip ve çamur akışına uygun bir oluğun, merkezi destek oluşturan bir kolon etrafına sarılmasıyla oluşan ve akan sıvı filmi prensibi ile zenginleştirme yapan ekipmanlardır. Bu ekipmanlar kömür ve mineraller arasındaki yoğunluk farkına dayalı zenginleştirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Spiral zenginleştiriciler, kullanım kolaylığı ve düşük maliyetleri sebebiyle cevher hazırlama alanında hızla kabul görmüşlerdir. Kısa zaman içerisinde, sahil kumu, demir ve volframit cevherleri için de üretim tesislerinde spiral ünitelerinin kullanımına başlanmıştır. Humphrey tarafından tek profilli şekilde tasarlanan spiraller demir ve kromit cevherlerinin zenginleştirilmesinde kullanım imkanı bulmuştur [12]. Yıllar içerisinde, spirallerin yapımında kullanılan malzeme (PVC, fiberglas, poliüretan), spiralin çapı, boyu, olukların eğimi, oluklar arasında bulunan mesafe, sarmal sayıları, başlangıç sayıları ve yıkama suyu gibi pek çok değişken özelliğe göre farklı tasarımlarda spiraller üretilerek kullanıma sunulmuştur [12,13].

Spiral zenginleştiriciler cevher ve yan kayaç arasındaki yoğunluk farkının yüksek olduğu durumlarda düşük maliyetli olması ve kullanım kolaylığı nedeniyle özellikle hematit mineralinin zenginleştirilmesinde ve yaygın şekilde kullanılmaktadır. Farklı özellikte ve daha kompleks yapıdaki hematit cevherlerinde ise spiral zenginleştirme yöntemi ile birlikte ağır ortam tamburları ve siklonları, jig ve yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma yöntemleri de kullanılmaktadır [6].

Şekil 2.2’de verilen spiral kesit alanının yapısı, oluğun çapı, sarmalın eğimi, sarmal sayısı, spiralin uzunluğu, spiralin yüzey özellikleri, bölücü bıçak pozisyonları ve yıkama suyu spiral zenginleştiricilerin başlıca tasarım parametreleri olarak bilinmektedir [14].



Şekil 2.2 Spiral zenginleştirici geometrisi

2.2.1.3. Ağır Ortamla Zenginleştirme

Ağır ortam ile zenginleştirme, yerçekimi ile zenginleştirme yöntemlerinden biri olup yüzme batma temel prensibine dayanmaktadır [6]. Ağır ortam ayırımı farklı mineraller arasındaki özgül ağırlık farkına dayalı bir ayırma yöntemidir. Yöntem, genellikle kömür yıkama alanında uygulanmakla birlikte başta demir olmak üzere, kurşun-çinko, krom, manganez gibi çeşitli cevherlerin zenginleştirilmesinde de kullanılmaktadır. Bu yöntemde ayırım su ile birlikte ince öğütülmüş yüksek yoğunluklu bir katının karışımından oluşan ağır bir ortam içerisinde gerçekleşmektedir. Burt (2015) Anon (1963)'a göre Amerika'da özellikle bir zamanlar demir cevherinin işlenmesinin önemli bir işlem olduğunu ve kömür dışı uygulamaların yarısını oluşturduğunu ve bu dönemde demir zenginleştirme için hem statik hem de dinamik ağır ortam ekipmanlarının kullanıldığını bildirmiştir. Demir cevherlerinin zenginleştirilmesinde kullanılan ağır ortam devrelerinin tipik performans değerleri Çizelge 2.3'te sunulmuştur [16].

Çizelge 2.3 Demir zenginleştirmede kullanılan ağır ortam devrelerine ait performans değerleri

Ekipman	Cevher Tipi	Tane Boyu (mm)	S.G.	Besleme Fe%	Konsantre % Ağırlık	% Fe	Verim %
Ağır Ortam Tamburu	Siderit	100-10	2.95	28	87	31.08	97.7
Ağır Ortam Siklonu	Oolit	8-3	2.64	26	72	32.7	84
Ağır Ortam Siklonu	Hematit	60-6	3.08	35	64	49	94
Ağır Ortam Siklonu	Götit	3-0.5	2.71	47	73	57	91

ISCOR firmasına ait Sishen zenginleştirme tesisi, ağır ortam ile demir zenginleştirme uygulamaları için en iyi örneklerden biridir. Bu maden 1953 yılında kurulmuş olup, dünyanın yedinci en büyük açık maden ocağıdır. Sishen demir zenginleştirme tesisi -25+8 mm, -11+5 mm ve -5+0.2 mm olmak üzere 3 farklı konsantre üretmektedir. Tesisin yıllık toplam üretim kapasitesi 20 Mt'dur. Tesiste üretilen ilk iki iri konsantrenin ortalama Fe tenörü %65.3, en ince konsantrenin Fe tenörü ise ortalama olarak %66.2 değerini almaktadır. Tesiste tüvenan cevher üç kademe kırma sonrasında -90 mm boyuta indirilmekte ve beş farklı boyut fraksiyonu elde etmek için elenmektedir. Bu fraksiyonlardan dördü statik ağır ortam banyoları ile dinamik ağır ortam siklonlarında zenginleştirilirken sonuncu ve en ince fraksiyon ise şlam olarak atık barajına gönderilmektedir. Tesiste ağır ortam atomize ferrosilikon kullanılarak hazırlanmakta ve ayırım yoğunluğu 3.0 – 3.1 g/cm³ olarak ayarlanmaktadır [17].

Özellikle minerallerin zenginleştirme aşamasında ağır ortam ile zenginleştirme ekipmanlarının jig ile zenginleştirmeye göre daha iyi bir ayırım performansına sahip olduğu bildirilmektedir [9]. Demir cevherleri için ağır ortam ve jig ile zenginleştirme uygulamalarının karşılaştırılması Çizelge 2.4'te sunulmuştur [18].

Çizelge 2.4 Demir cevherlerinde ağır ortam ve jig ile zenginleştirmenin karşılaştırılması

DMS	Jig
Yüksek Operasyonel Maliyet	Düşük Operasyonel Maliyet
Alt tane boyuna bağlı	Dar tane boyu aralığı
Yüksek Ayrım Performansı	Düşük Ayrım Performansı
Verim ve konsantre miktarı optimize edilebilir.	Verimden kayıp
Düşük atık tenörü	Yüksek atık tenörü

Çizelge 2.4’te görüldüğü üzere demir cevherlerinin zenginleştirilmesinde ağır ortam siklonlarının konvansiyonel jiglere oranla daha yüksek verim değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun başlıca, ayırımın sulu bir ortamdan farklı olarak yüksek yoğunluklu bir ortamda gerçekleşiyor olmasından, aynı zamanda ağır ortam siklonlarının “konvansiyonel jiglerden farklı olarak ayırım esnasında merkezkaç kuvvetinden yararlanmasından kaynaklandığı bildirilmektedir [6,9].

Ağır ortam ile şlam fraksiyonunun varlığının, ağır ortamın viskozitesini olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir [9]. Aynı zamanda hem ağır ortam tamburları hem de ağır ortam siklonlarına diğer yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarına benzer olarak dar tane boyut aralığına sahip besleme yapılması gerekmektedir. Bu sebeple, endüstriyel uygulamalarda besleme öncesinde şlam uzaklaştırma ve sınıflandırma işlemleri yapılmaktadır.

Demir cevherlerinin zenginleştirilmesi uygulamalarında ağır ortam tamburlarında besleme tane boyut aralığı genellikle -100+10 mm iken, ağır ortam siklonlarında ise -10+0.5 mm aralığında olmaktadır. Hematit zenginleştirme uygulamalarında ise parça cevher ve toz cevher konsantreleri elde edilebilmektedir.

2.2.1.4. Hidrolik Sınıflandırıcılar

Yerçekimi ile zenginleştirme yöntemlerinde geniş tane boyut fraksiyonuna sahip ve şlam uzaklaştırılmamış cevherin beslenmesi ayırımı etkilemektedir. İnce tane boyutuna sahip cevherlerde hidrolik sınıflandırıcılar eleğe göre daha verimli olarak çalışmaktadır. Bu sebeple hidrolik sınıflandırıcılar demir cevherlerinin yerçekimi ile zenginleştirilmesi

öncesinde cevherin sınıflandırılmasında ve cevherin içerdiği safsızlıkların uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır [9].

Hidrolik sınıflandırıcılar temel olarak yukarı yönde verilen ayırım suyuna karşılık beslemenin yerçekimi etkisi altında ve engelli çökme koşulları içerisinde çöklediği, çökme esnasında tanelerin boyut ve yoğunluk farklarından yararlanılarak ayrıldığı ekipmanlardır. Çalışma anında, çökme hızı yukarı yönlü su hızına yakın olan taneler ayırıcı içerisinde birikerek ağır ortam gibi davranan akışkan bir malzeme yatağı oluşturmaktadır. Akışkan yatak içerisinde biriken ve ağır ortam gibi davranan bu malzeme yatağının varlığı nedeniyle, ayırıcıya beslenen tanelerin çökme hızları da düşmektedir. Sistem içerisinde biriken ve nispeten malzeme yatağının üst bölgelerinde kalan yoğunluğu düşük/ince taneler yıkama suyunun hidrolik taşıma kuvveti ile üst akıma sevk edilirken, malzeme yatağının alt bölgelerinde kalan yoğunluğu yüksek/iri taneler ise hem yatak ağırlığının hem de yerçekiminin etkisi ile alt akımdan alınırlar [19].

2.2.2. Manyetik Ayırma

Manyetik ayırma, bir mıknatısın oluşturduğu manyetik alanda farklı kuvvetlerin etkisi altında manyetik ve manyetik olmayan tanelerin birbirinden ayrılması işlemidir. Doğada bulunan bütün mineraller belirli derecede manyetik özelliğe sahiptir. Demir minerallerinin manyetik özellikleri değişken olup, bu minerallerden manyetit kuvvetli, siderit, hematit ve limonit zayıf manyetik özelliğe (paramanyetik mineraller) sahiptir. Pirit ise manyetik olmayanlar grubundadır. Demir cevherlerinde bulunan silis, feldspat ve kalsit gibi mineraller ise manyetik olmayanlar grubunda yer almaktadır. Bu minerallere ait manyetik özellikler Çizelge 2.5'te sunulmuştur [9].

Çizelge 2.5 Bazı mineraller ve manyetik alınganlıkları

Mineral	Manyetik Alıngalık ($10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$)	Kimyasal İçerik
Manyetit	625-1156	Fe_3O_4
Martit	6.2-13.5	Fe_2O_3
Hematit	0.6-2.16	Fe_2O_3
Spekülerit	3.70	Fe_2O_3
Limonit	0.31-1.0	-
Siderit	0.7-1.5	FeCO_3
İlmenit	0.34-5	FeTiO_3
Kuvars	0.0025-0.126	SiO_2
Feldspat	0.06	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8, \text{NaAlSi}_3\text{O}_8,$
Kalsit	0.0038	CaCO_3
Biyotit	0.5-6.5	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH,Fe})_2$
Pirit	0.34	FeS_2
Apatit	0.007-0.142	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,OH,Cl})$

Manyetik ayırıcılar, oluşturulan alan şiddetine göre yüksek veya düşük alan şiddetli manyetik ayırıcılar, ayırım ortamının su veya hava olmasına göre kuru veya yaş manyetik ayırıcılar olarak dört ana grupta sınıflandırılabilirler. Bir manyetik ayırıcı içerisinde oluşturulan alan şiddetine göre 2000 Gauss ve daha altında ise düşük alan şiddetli, 10000-20000 Gauss arasında ise yüksek alan şiddetli olarak ifade edilmektedir. İri tane boylarında genellikle kuru, ince tane boylarında ise yaş manyetik ayırma tercih edilmektedir [20].

Manyetit kuvvetli manyetik özellik (ferromanyetik) gösteren bir mineral olması sebebiyle düşük alan şiddetli kuru ve yaş manyetik ayırıcılarla zenginleştirilebilmektedir. Manyetit dışı ekonomik değeri olan hematit, götit, siderit gibi demir mineralleri ise daha zayıf manyetik özelliklere sahip olmaları nedeniyle yüksek alan şiddetine sahip manyetik ayırıcılarla zenginleştirilmektedir. Manyetik ayırma, yüksek verim değerlerinde ayırım yapılabilmesi, nispeten düşük işletme maliyetlerinde çalıştırılabilmesi ve basit olması sebebiyle demir minerallerinin zenginleştirmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Manyetik alınganlığı düşük olan hematit, limonit, götit gibi minerallerin yan kayaçlarının çoğunlukla kuvars olduğu bildirilmektedir. Bu nedenle, bu tür cevherlerin zenginleştirilmesinde yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcılar kullanım alanı bulmaktadır.

Endüstriyel uygulamalarda özellikle manyetit dışı demir cevherlerinin zenginleştirilmesinde SLon tipi yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcıların sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir [9].

Demir cevherlerinin zenginleştirilmesinde manyetik ayırma ile birlikte alternatif olarak kavurma yöntemi de kullanılabilir. Günümüzde, çalışmakta olan bazı madenlerde hematit, siderit ve götit gibi düşük manyetik alınganlığa sahip cevherler işlenmektedir. Bu nedenle, bu tip düşük manyetik alınganlığa sahip demir cevherlerinin yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcılarla zenginleştirilebilmesi için manyetik özelliklerinin değiştirilmesi gerekmektedir. Bu tip cevherler manyetik özelliklerinin değiştirilebilmesi amacıyla kavurma fırınlarına beslenmektedir. Fırın içerisinde yükselen sıcaklığın etkisiyle birlikte cevher indirgenerek ferromanyetik bir mineral olan yapay manyetite veya metalik demire dönüştürülmektedir. Bu işlem sonrasında da manyetik ayırıcılar kullanılarak zenginleştirme yapılmaktadır [9].

2.2.3. Flotasyon

Demir minerallerinin zenginleştirilmesinde her ne kadar fiziksel yöntemler tercih edilse de tane serbestleşmesinin çok ince boylarda gerçekleşmesi ve kompleks mineralojik yapıya sahip cevherlerde fiziksel yöntemler tek başına yetersiz kalabilmektedir. Bu tür durumlarda ise satılabilir özelliklerde konsantre elde edilmesi amacıyla flotasyon yöntemi kullanılmaktadır. Demir minerallerinin zenginleştirilmesinde flotasyon yönteminin kullanılmasına dair çalışmalar son 30 yıl içerisinde hız kazanmakla birlikte günümüzde ana zenginleştirme yöntemi olarak kullanılmasına dair çalışmaların sayısı artmıştır. Özellikle, hematit zenginleştirilmesinde cevherin tek başına flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesi ve diğer fiziksel yöntemlerle birlikte kullanımı yaygınlaşmaktadır [21].

Genel olarak demir cevherlerinin zenginleştirilmesi üzerinde yapılan çalışmalarda doğrudan flotasyon ile demir minerallerin yüzdürülmesi hedeflenmiştir. Günümüzdeki çalışmalar da ise demir minerallerinin bastırılması amacıyla geliştirilen seçimli kimyasalların da yardımı ile ters flotasyon yöntemi de kullanılmaktadır [22].

Hematit mineralinin flotasyon ile zenginleştirilmesi konusunda yapılan ilk çalışmalarda anyonik ve katyonik toplayıcılar yardımıyla cevherin doğrudan flotasyon ile zenginleştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. pH 3-6.7 arasında hematit

mineralinin yüzey yükü pozitif, ana safsızlık minerali olan kuvarsın yüzey yükü ise negatiftir. Bu pH aralığında yağ asidi türevi anyonik toplayıcılar kullanarak hematit minerali yüzdürülebilmektedir. Anyonik toplayıcılar iyonlaştıklarında ortama negatif yüklü aktif iyonlar veren toplayıcılar olup, demir cevherlerinin yüzdürülmesinde yağ asitleri en çok tercih edilen toplayıcı türüdür [23,24].

Günümüzde ise hematit mineralinin flotasyon ile zenginleştirilmesinde diğer yöntemler ile birlikte bütünleşmiş şekilde ters flotasyon yöntemi kullanılmaktadır[21]. Bu durumun başlıca sebebi ise pH 3-6.7 aralığında hematit ve silisli minerallerin farklı yüzey yüklerine sahip olmasıdır. pH 3-6.7 aralığında uygulanan doğrudan flotasyon esnasında silisli mineraller hematit mineralinin yüzeylerini kapladığı, bu durumun ise verim ve konsantre tenörünü düşürdüğü bildirilmektedir[21]. Ters flotasyon yönteminde, yan taş (gang) minerallerinin yüzdürülerek demir minerallerinden ayrılması hedeflenmektedir. Bu koşulu sağlamak için demir mineralleri için seçimli bastırıcılar kullanılmaktadır. Ters flotasyon yöntemi, kuvars ve silikat minerallerinin hematitten uzaklaştırılmasında kullanılan en yaygın yöntemdir. Ters flotasyon, katyonik ters flotasyon ve anyonik ters flotasyon olarak ikiye ayrılmaktadır [21,25,26].

Ters katyonik flotasyon daha çok Amerika'da, ters anyonik flotasyon ise daha çok Çin'de tercih edilmektedir. Her iki flotasyon yöntemi de avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Ters anyonik flotasyonda kullanılan yağ asidi türevli toplayıcılar, ters katyonik flotasyonda kullanılan amin tipi toplayıcılara göre daha düşük maliyetlidir. Ancak ters katyonik flotasyon anyonik flotasyona kıyasla işletme anlamında daha kolay bir yöntemdir. Bunun temel sebebi ise ters anyonik flotasyon esnasında kuvarası canlandırmak için sisteme Ca, Mg iyonlarının eklenme gerekliliğidir. Eklenen canlandırıcı miktarının fazla olması durumunda flotasyonun olumsuz şekilde etkilenebildiği bildirilmiştir [21]. Ayrıca, katyonik ters flotasyon, düşük sıcaklık direnci, basit reaktif sistemi, yüksek flotasyon verimliliği vb. gibi avantajlara sahiptir [26].

Ters katyonik flotasyonda pH 9.5-10.5 arasında hem hematit mineralinin hem de kuvars mineralinin yüzey yükü negatiftir. Bu pH'larda mısır nişastası, dextrin kullanarak demir mineralleri bastırılarak amin tipi katyonik toplayıcı ile gang mineralleri yüzdürülebilmektedir. Ters anyonik flotasyonda ise pH 11-12 aralığında hematit minerali, nişasta veya dextrin ile bastırılmaktadır. Silisli minerallerin yüzeyini aktive etmek amacıyla sisteme CaO, CaOH, Ca(CO₃) gibi canlandırıcılar da eklenmektedir.

Canlandırıcı ile silisli minerallerin yüzey yükü pozitif yapıldıktan sonra yağ asidi tipi anyonik toplayıcılar kullanılarak silisli mineraller yüzdürülmektedir. Ters flotasyonda ayrıca şlam uzaklaştırma işlemi de yapılmaktadır. Bunun sebebi, çamur içerisindeki şlamın bazı durumlarda kimyasal tüketimini önemli ölçüde arttırması ve flotasyon verimini düşürmesidir [21,27].

2.2.4. Seçimli Salkımlaştırma

Günümüzdeki endüstriyel uygulamalarda manyetik ayırma yöntemleri hematit ve silis içerikli safsızlıkları etkili biçimde ayırmaktadır. Ancak, besleme boyutunun çok ince olduğu durumlarda gerçekleştirilen yüksek alan şiddetli manyetik ayırma uygulamalarında kuvarsın çok kolay şekilde hematit konsantresine kaçak yapabilmekte ve birçok durumda kuvars demir içeren mineraller ile kirletilmektedir [28].

Aşırı ince tane boyu, hematitin kuvarstan flotasyon ile ayrılması uygulamalarında da iki önemli soruna neden olmaktadır. Bu sorunlardan ilki çok ince hematit ve kuvars tanelerinin birbirlerinin yüzeylerini kolayca kaplama eğiliminde olmasıdır. Diğer taraftan, her bir ince hematit taneciğinin nispeten küçük hacmi ve kütlesi palp içerisindeki momentumunun da son derece düşük olduğu anlamına gelir. Bu durum, hematitin hava kabarcıklarıyla çarpışma olasılığını ve flotasyon kinetiğini düşürmektedir. Bu da mineralin işlenmesini zorlaştırır [29]. Sonuç olarak ince hematitin geleneksel manyetik ayırma ve flotasyon yöntemleri ile zenginleştirilmesi zorlaşmaktadır.

İnce demir minerallerin flotasyon sürecindeki temel sorunlarının aşılması amacıyla çok sayıda temel araştırma yapılmış ve birçok teknolojik geliştirme projesi yürütülmüştür [30,31]. Yürütülen çalışmalarda ana yaklaşım, parçacıkların görünen tane boyutunu irileştirmek için ince minerallerin ön işleme tabi tutulmasını ve böylece çok ince taneciklerin daha iri tanelere dönüştürülmesini içermektedir [32]. Tanelerin dönüştürülmesi için seçimli kimyasallar olan topaklaştırıcılar (flokülanlar) salkımlaştırma ve flotasyon aşamalarında çok önemli rol oynamaktadır. Topaklaştırıcılar, dağılmış çamur içerisinde eklenerek hedef mineral üzerine adsorbe olmakta ve onları diğer taneler çamur içerisinde dağılmış halde iken salkımlaştırmaktadır. Nişastanın hematit tanelerinin salkımlaştırılması ve bastırılmasında kullanılan en önemli kimyasal olduğu bilinmektedir [33]. Seçimli salkımlaştırma işlemi hematit mineralinin zenginleştirilmesinde genellikle flotasyon yöntemi ile kullanılmaktadır.

Seçimli salkımlaştırmayı takiben flotasyon yöntemi, ince demir atıklarının geri kazanılması süreçlerinde de etkin şekilde kullanılmaktadır. Örnek olarak, Hindistan'da her yıl %45-55 Fe içerikli 10-15 milyon ton malzeme atık barajlarında depolanmaktadır. Bu atıkların geri kazanılmasında seçimli salkımlaştırma yöntemi oldukça önemli bir yer oynamaktadır [34].

Günümüzde demir cevherleri de dahil olmak üzere tüm yataklarda serbestleşme boyları düşmekte ve daha ince öğütmeye olan ihtiyaç artmaktadır. Uygulanan yoğun öğütme işlemi sonucu oldukça fazla şlam ortaya çıkması kaçınılmaz olmaktadır. Flotasyonda şlam varlığı, çok ince tanelerin mineral yüzeyine kaplanması ve su ile köpük fazına taşınması gibi nedenler ile flotasyon verimini düşürmektedir. Bunun yanında toplayıcıların yüksek oranda ince tanelere soğurulmasıyla birlikte kimyasal tüketimi de önemli ölçüde artmaktadır.

Kimyasal tüketimi ve mineral yüzeyine şlam kaplanması gibi sorunlar dışında ince taneler flotasyonda suyla taşınmaya da elverişlidir [21,35]. Bu sebeple hematit mineralinin flotasyonla zenginleştirilmesi öncesinde şlam fraksiyonu, cevherin içerisinden uzaklaştırılmaktadır. Şlam uzaklaştırma işleminde ise ince tane boyutlu hematit minerallerinin de şlam olarak atılmasıyla demir kaybı artmaktadır. Bu sebeple demir minerallerinin seçimli olarak topaklanması ile çökelme hızlarının arttırılması sağlanırken, çok ince tane boyutuna sahip gang minerallerin şlam olarak atılma imkanı sağlanmaktadır.

Cevherin içerisinde ince tane boyutuna sahip kil mineralleri bulunduğu anda flotasyonda reaktif tüketimi oldukça artmaktadır. Bu sebeple flotasyon öncesinde kil minerallerinin uzaklaştırılması amacıyla da bu yöntem kullanılmaktadır. Seçimli salkımlaştırmada seçimli şlam uzaklaştırma işlemi sırasında tanelerin dağıtılmasını sağlamak amacıyla, sodyum silikat, sodyum hegzametaz meta fosfat gibi dağıtıcı kimyasallar kullanılırken, salkımlaştırıcı olarak nişasta, poliakrilamid gibi kimyasallar kullanılmaktadır [35,36,37].

2.3. Manyetit Dışı Demir Cevherlerine Yönelik Çalışmalar ve Örnek Akım Şemaları

Dünyada birçok ülkede manyetit dışı demir cevherlerinin zenginleştirilmesi ve tesis ölçekli uygulanmasına dair cevherin yapısal ve dokusal ve mineralojik farklılıklarına göre farklı akım şemaları geliştirilmektedir. Örneğin, Hindistan'daki yüksek tenörlü hematit cevherleri basit kırma eleme sonrası zenginleştirilmektedir. Ancak SiO₂ ve Al₂O₃ değerlerinin yüksek olduğu veya hematit mineralinin yanında limonit ve götit içeren demir oksit/hidroksitlerin bulunduğu bölgelerde ise hem götit/limonit varlığı ile demir tenörlerinin düşmesi hem de demir hidroksitlerin alümina içeren kil ve jipsit gibi safsızlıklar barındırması nedeniyle farklı zenginleştirme yöntemlerinin kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Bazı durumlarda, bu tip cevherlerden yüksek kalite bir konsantre elde etmek için limonit ve götit safsızlık olarak kabul edilebilmekte ve cevherin içerisinden uzaklaştırılmaktadır[38].

Hindistan'daki düşük tenörlü ve kompleks mineralojiye sahip hematit yatakları 3 gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

1. <20% limonit/götit ve diğer gang mineralleri içeren hematit cevherleri,
2. 20-40 % arasında limonit/götit ve diğer gang mineralleri içeren hematit cevherleri,
3. >40% limonit/götit ve diğer gang mineralleri içeren hematit cevherleridir.

Birinci sıradaki cevherlerde limonit/götit ile bağlı olan gang minerallerden kaynaklı safsızlıklar %20'den düşük olduğundan cevherin zenginleştirilmesi sonucu yüksek kalite (>65% Fe) parça, sinter ve pelet konsantresi elde etmek mümkün olmaktadır.

İkinci durumda ise limonit/götit ile bağlı olan gang minerallerden kaynaklı safsızlıklar sınırdadır. Bu cevherlerden yüksek kalite konsantre elde etmek zorlaşmakta, ancak orta kalite (>62% Fe) konsantre elde edilebilmektedir.

Son durumda ise cevherin içerdiği safsızlıklar %40'ın üzerinde olduğundan orta kalite konsantre elde etmek zorlaşmaktadır. Bu durumda da limonit/götit ile bağlı mineralleri uzaklaştırmak için yapılan işlemler sonucunda atıktaki Fe içeriği limonit/götit minerallerinin de uzaklaştırılması sebebiyle yüksek olmaktadır.

Hindistan'daki hematit mineral rezervlerinin büyük kısmının, orta ve yüksek tenörlü (>%62) Fe içeriğine sahip olmasından dolayı doğrudan yüksek fırın veya DRI (direct reduced iron) tesislerine parça, sinter veya pelet ürün olarak gönderilmektedir[38].

Hindistan'da demir minerallerinin zenginleştirilmesinde kuru ve yaş yöntemler kullanılmaktadır. Yüksek tenörlü, kil/kuvars içeren hematit cevherinin zenginleştirilmesinde kademeli kırma-eleme sonrası parça cevher (-30+6 mm) konsantresi elde edilebilmektedir. Ancak ince fraksiyonlarda cevherin içerdiği alümina değerlerini düşürmek amacıyla, -6+0.5 mm fraksiyonu ağır ortamla veya jig ile zenginleştirilirken, -0.5+0.150 mm fraksiyonu ise, spiral, sallantılı masa, yüksek alan şiddetli manyetik ayırma veya hidrolik sınıflandırıcılarla zenginleştirilmektedir [38].

Kil/kuvars içeren orta tenörlü hematit mineralinin zenginleştirilmesinde ise kademeli kırma sonrası, aşındırılmalı karıştırma ile parça ve toz cevher elde edilebilmektedir. Yıkanan cevherin sınıflandırılması (-6+0,5 mm) sonrası ağır ortamla zenginleştirme devresine beslenmesiyle yüksek tenörlü konsantre elde edilebilmektedir. İnce ürün manyetik ayırma veya şlam uzaklaştırma işlemi sonrasında spiral zenginleştirici, sallantılı masa veya hidrolik sınıflandırıcılarla zenginleştirilmektedir.

Hindistan'da düşük tenörlü hematit mineralinin zenginleştirilmesinde çoğunlukla yerçekimi ile zenginleştirme yöntemleri kullanılsa da manyetik ayırma, flotasyon ve seçimli salkımlaştırma yöntemleri de kullanılmaktadır [38].

Manyetik ayırma ve flotasyon ile zenginleştirmeye ilişkin yapılan bir çalışmada Hindistan bölgesinden %42.22 Fe, %34.21 SiO₂, %1,98 Al₂O₃ içeriğine sahip bir cevherden satılabilir pelet özelliklerine sahip bir ürün elde edilmesi hedeflenmiştir. Aynı çalışma kapsamında kimyasal dozajlarındaki değişimin konsantre kalitesi üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Çalışmada, 3 farklı tane boyutuna öğütülen cevhere, yaş yüksek alan şiddetli manyetik ayırma ve flotasyon testleri yapılmış olup, optimum boyda farklı kimyasal dozajlarında flotasyon testleri gerçekleştirilmiştir. D₈₀= 82 µm'ye öğütülen cevhere yapılan manyetik ayırma sonrasında, manyetik ayırma konsantresine yapılan flotasyon testlerinde, toplayıcı dozajındaki artışın Fe içeriğini de arttırdığı, bastırıcı dozajının artması durumunda ise ana gang mineral kaynağı olan SiO₂ de bastırıldığından konsantredeki Fe tenörünün düştüğü gözlemlenmiştir. Yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırmayı takiben yapılan ters katyonik flotasyon yöntemi ile pH 10'da 500 g/t bastırıcı

(nişasta) ve 250 g/t (amin tipi) katyonik toplayıcı dozajlarında %64.6 Fe, %3.12 SiO₂, %1.00 Al₂O₃ içeriğine sahip peletlemeye uygun bir konsantre elde edildiği bildirilmiştir [39].

Hindistan'da demir zenginleştirme tesislerinde tüvenan cevherin yaklaşık olarak %10-20'si şlam olarak atılmaktadır. Son yıllarda birçok araştırmacı ultra ince tane boyutundaki demir minerallerinin konvansiyonel zenginleştirme yöntemleriyle (yerçekimi ile zenginleştirme, manyetik ayırma, flotasyon) kazanımı üzerine çalışmalar yapmıştır. Ancak geleneksel zenginleştirme yöntemleri ultra ince tane boyutlarında yetersiz kalmaktadır. Seçimli salkımlaştırma ise geleneksel zenginleştirme yöntemlerine alternatif olmaktadır [37].

Hindistan'da bir demir zenginleştirme tesisinden alınan numune ile yapılan seçimli salkımlaştırma deneylerinde yapay hematit-kaolinit karışımı hazırlanmış olup, atıklardan demir kazanılması hedeflenmiştir. Tesisten alınan numune D₉₀=72 µm tane boyutuna öğütülmüş, yapılan kimyasal analizlerde numunenin %67.57 Fe, %2.04 Al₂O₃ ve %0.88 SiO₂ olduğunu göstermektedir. Yapay karışım, %18.12 Al₂O₃, %46.43 SiO₂, %13.17 Fe içeren kaolinit ve tesisten elde edilen numune ile hazırlanmıştır. Yapay karışımın hematit:kaolinit oranları ise 60:40, 70:30 ve 50:50 olarak belirlenmiştir. Bu oranlara göre hazırlanan yapay karışımların Fe içeriklerinin sırasıyla %44.6, %47.06 ve %37.65 olduğu görülmüştür. Yapılan deneylerde dağıtıcı olarak sodyum silikat, salkımlaştırıcı olarak ise buğday nişastası kullanılmıştır. 70:30 oranıyla hazırlanan karışıma yapılan testler sonucunda elde edilen besleme malzemesinden %80 Fe verimiyle, %65 Fe içeren bir konsantre elde edildiği bildirilmiştir. Benzer şekilde tesis atıklarına yapılan seçimli salkımlaştırma deneylerinde Fe içeriğinin %50.98'den yaklaşık olarak %63'e çıktığı gözlemlenmiştir [40].

Türkiye'de demir çelik sektörü için yüksek kalite ürün talebinin artması ve yüksek tenörlü doğrudan nakledilebilir cevherlerin azalmasıyla birlikte, düşük tenörlü ve kompleks yapıdaki cevherlerin zenginleştirilmesi ile ilgili çalışmalarda hız kazanmıştır. Türkiye'de düşük tenörlü demir cevherlerinin zenginleştirilmesine yönelik ilişkin yapılan bir çalışmada, 21.91% Fe, 26.25% SiO₂, 20.48% MgO, 5.85% CaO ve 1.86% Al₂O₃ içeriğine sahip tüvenan cevher ile manyetik ayırma ve yerçekimi ile zenginleştirme çalışmaları yürütülmüştür. Çalışmalardan elde edilen veriler sonucunda akım şeması geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan kimyasal analizlerde tüvenan cevherin içerisindeki ana

safsızlıkların silis ve magnezyum olduğu görülmüştür. Aynı zamanda yapılan fraksiyonel analizlerde ise cevherin içerisindeki demir ve silis minerallerinin %80'den fazlasının +212 µm tane boyutunda olduğu görülmüştür. Cevherde ana demir kaynağı olarak manyetit ek olarak ise hematit ve götit mineralleri tespit edilmiştir. Tüvenan cevherden düşük alan şiddetli manyetik ayırma ile kazanılabilir demir içeriğinin belirlenebilmesi amacıyla Davis Tube testleri uygulanmıştır. -75 µm tane boyutuna öğütülmüş cevhere uygulanan Davis Tube testi sonucunda konsantredeki Fe% içeriği 21.91%'den 65.33%'e çıkarken, SiO₂ değeri ise 26.25%'den 3.20%'e düşmüştür[41].

-6 mm boyutunda farklı manyetik alan şiddetlerinde yapılan düşük alan şiddetli kuru manyetik ayırma testlerinde, manyetik alan şiddeti arttıkça manyetik ürüne gelen malzeme miktarının arttığı, ürün kalitesinin ise düştüğü gözlenmiştir. Kuru manyetik ayırma çalışmaları sonucunda elde edilen konsantre içerisinde %30 Fe ve >22 %SiO₂ olması sebebiyle +1 mm tane boyutunda düşük alan şiddetli kuru manyetik ayırma işleminin bu cevhere uygun olmadığı bildirilmiştir[41].

Tüvenan cevherin -6+1.8 mm fraksiyonuna ise 2.85 gr/cm³ ve 3.30 gr/cm³ yoğunluklu sıvılarda yüzme batma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda beslemenin ağırlıkça 89.03%'ünün 3.30 gr/cm³ yoğunlukta yüzen ürüne gittiği gözlemlenmiş olup, besleme içerisindeki silisin yaklaşık 95%'inin atıldığı görülmüştür. 3.30 gr/cm³ yoğunlukta dahi batan ürünün 11.20% SiO₂ içeriğine sahip olması konsantrede hala bağlı gang minerallerin olduğu şeklinde yorumlanmıştır. 24.04% Fe verimiyle ağır sıvı konsantresinde 47.46% Fe, 11.20% SiO₂ içerikli bir ürün elde edilmiştir. Ağır sıvı testi sonuçlarına göre bu cevherden iri boylarda uygun özelliklere sahip bir konsantre elde edilemeyeceği görülmüştür[41].

Bir diğer yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanı olan jigle zenginleştirme deneyleri sonucunda %33.10 Fe, %19.20 SiO₂ ve %15.60 MgO içeriğine sahip bir konsantre elde edildiği görülmüştür. Ağır sıvı testlerinde de öngörüldüğü gibi bu cevherden +1 mm fraksiyonundan yüksek kaliteye sahip bir konsantre elde edilemeyeceği görülmüştür[41].

-1 mm fraksiyonuna yapılan sallantılı masa testleri için önce hidrosiklon ile şlam uzaklaştırma işlemi yapıp, ardından iri ve ince malzeme fraksiyonu hazırlamak için kabaran yataklı ayırıcı (KYA) kullanılmıştır. KYA beslemesinin ağırlıkça %60'lık kısmı iri akıma gitmiştir. KYA iri akımına giden ürünün tane boyutu d₈₀ 0.83 mm, üst akımın

ise $d_{80}=0.28$ mm olduğu görülmüştür. İri fraksiyona yapılan sallantılı masa testleri sonucunda beslemenin %7.37'sinin %65.72 Fe ve %2.46 SiO₂ içeriğine sahip konsantre olarak elde edildiği görülmüştür. Ancak beslemenin ağırlıkça yaklaşık %75'i toplam demirin %71.92'si ise ara ürüne gitmiştir. Atığa giden demir miktarının ise oldukça düşük olduğu görülmüştür[41].

İnce fraksiyona yapılan sallantılı masa testlerinde de yüksek tenörlü bir konsantre elde edilebileceği görülmüştür. Beslemenin ağırlıkça %12.32'sinin konsantre olarak elde edildiği görülmüştür. Bu konsantrenin içeriğinin ise %64.65 Fe ve %2.16 SiO₂ olduğu görülmüştür. Bu testler sonucunda akım şeması geliştirme çalışmaları yapılmıştır [41].

Yapılan bir başka çalışmada %35.29 Fe, %49.12SiO₂ ve %1.96 Al₂O₃ içeriğine sahip tüvenan cevherin zenginleştirilmesine ilişkin çalışmalar yapılmıştır. Bu cevherin karakterizasyon çalışmalarında yapılan serbestleşme analizinde iri tane boyutunda (+100 µm) 60% bağıllık gözlenirken, -100+75 µm tane boyutunda dahi demir ve silisli minerallerin 50% bağılı olduğu belirtilmiştir. Bu cevherin zenginleştirme çalışmalarında sallantılı masa, Falcon santrifüj zenginleştirici, yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma ve flotasyon yöntemleri kullanılmıştır. -1 mm tane boyutuna öğütülen malzemeye yapılan sallantılı masa testleri sonucunda %49 Fe içeriğine sahip bir konsantre elde edilmiştir. Yapılan temizlemeli santrifüjle zenginleştirme testlerinde ise %60.01 Fe, %10.08 SiO₂ %13.70 Al₂O₃ içeriğine sahip konsantre elde edilmiştir. Yerçekimi ile zenginleştirme testlerinde elde edilen ürünlerin içeriklerinin istenen özelliklere uygun olmaması sebebiyle manyetik ayırmayı takiben flotasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Manyetik ayırma testi sonrasında ise %61.03 Fe %5.36 SiO₂ ve %10.7 Al₂O₃ içeriğine sahip bir konsantre elde edilmiş olup, manyetik ayırma konsantresine yapılan ters anyonik flotasyon testlerinde ise %63.47 Fe, %2.7 SiO₂ ve %2.3 Al₂O₃ içeriğine sahip bir konsantre elde edilmiştir [42].

Bir diğeri çalışmada ise düşük tenörlü bir demir cevherinin fiziksel yöntemlerle zenginleştirilmesi incelenmiştir. Yapılan kimyasal analize göre tüvenan cevherin içerisinde %42.98 Fe, %10.69 SiO₂, %12.25 Al₂O₃ ve %2.52 MnO₂ bulunmaktadır. Yapılan mineralojik analizde bu cevherin içerisinde %7.69 manyetit, %34.97 hematit, %40.94 götit ve %9.67 kuvars olduğu görülmüştür. Fraksiyonel analizde ise Fe içeriğinin bütün fraksiyonlarda eşit olarak dağıldığı görülmüştür. -1 mm tane boyutuna kırılan cevhere yapılan fraksiyonel analizde cevher içerisindeki demirin de boyut fraksiyonlarına

eşit olarak dağıldığı görülmüştür. Yapılan XRD çalışmasında manyetit, hematit ve götit minerallerinin demir kaynağı olduğu görülürken, kaolinit mineralinin alüminyum kaynağı ve kuvars mineralinin de silisyum kaynağı olduğu görülmüştür. Bu karakterizasyon çalışmaları sonrasında cevhere yüzme-batma, kuru ve yaş manyetik ayırma testleri yapılmıştır [42].

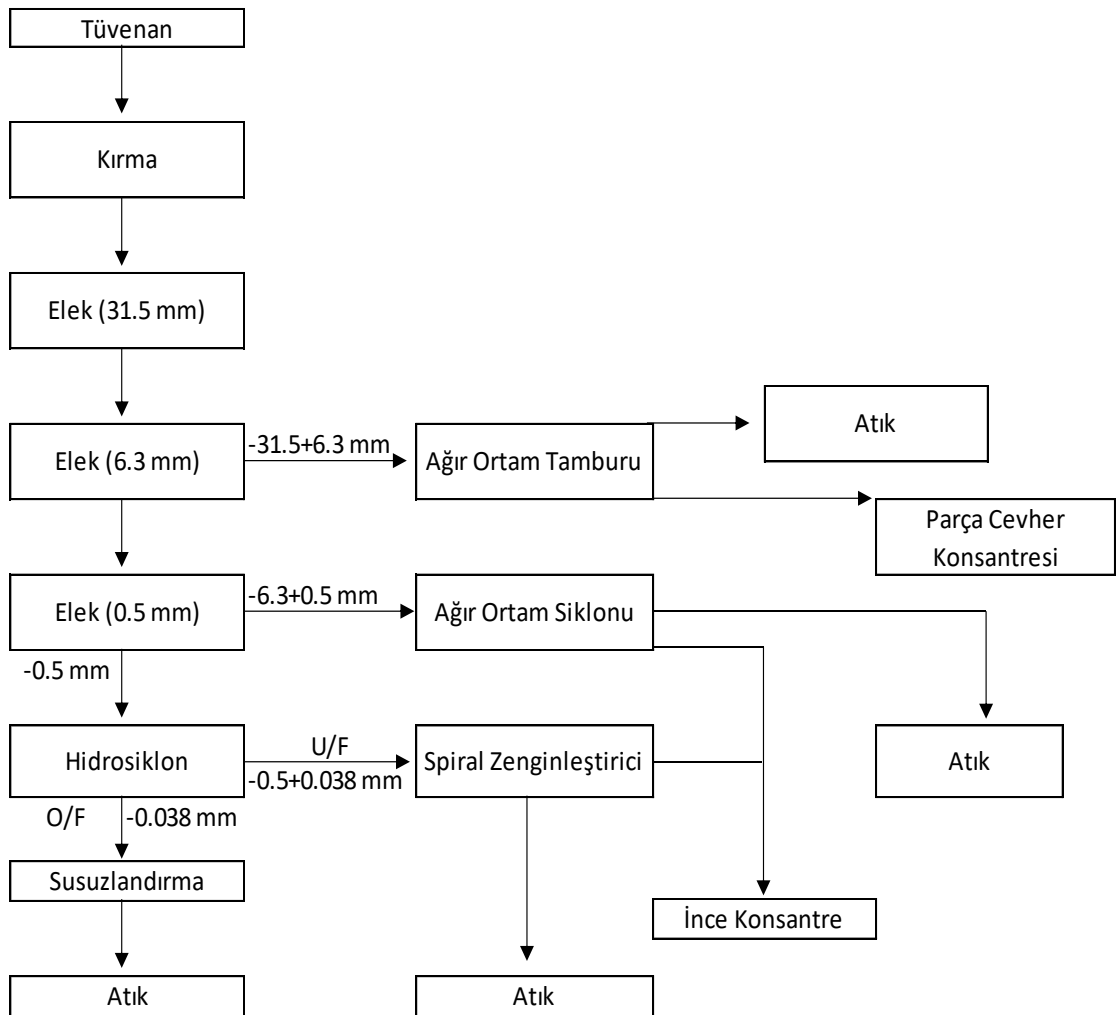
-1 mm tane boyutuna kırılan cevherin -1+0.5 mm, -0.5+0.250 mm, -0.250+0.125 mm, -0.125+0.075 mm ve -0.075+0.045 mm fraksiyonlarına 2.87 gr/cm³ yoğunlukta yapılan ağır sıvı testleri sonucunda yüzen ürünlerdeki demir içeriğine bakıldığında silikatların yeterli derecede serbestleştiği görülmüş olsa da batan üründe %53 Fe içeriğine sahip bir konsantre elde edilmiştir [42].

Kuru manyetik ayırma testlerinde kalıcı mıknatıslı rulo tipi kuru manyetik ayırıcı (Permroll) kullanılmıştır. Farklı fraksiyonlara yapılan testlerde 1+0.5 mm fraksiyonu konsantresinde %62.27 Fe, 0.5+0.25 mm fraksiyonu konsantresinde %61.99 Fe, -0.25+0.125 mm ve -0.125+0.075 mm fraksiyonu konsantrelerinde yaklaşık %65 Fe içeriğine sahip konsantreler elde edilmiştir. Kuru manyetik ayırma testi ürünlerine yapılan XRD çalışmasında bunun sebebinin iri tane boyunda kuvars ve kaolinitin, manyetit, hematit ve götit ile bağlı olmasından kaynaklı olduğu görülmüştür. İri tane boyut fraksiyonlarındaki ara ürünlerde yaklaşık %55 Fe içeriği görülürken, ince tane boyut fraksiyonlarında konsantredeki Fe içeriğinde artış ara ürünlerdeki Fe içeriğinde ise düşüş olduğu görülmüştür. Kuru manyetik ayırma sonrasında %30 Fe verimiyle %60.2 Fe içeriğine sahip bir ürün elde edildiği görülmüştür. Aynı zamanda yapılan mineralojik analiz sonrası cevherin içerisinde yaklaşık %7 manyetit olması sebebiyle cevhere -212 µm ve -100 µm tane boyutunda düşük alan şiddetli yaş manyetik ayırma testleri uygulanmıştır. Bu testler sonucunda -212 µm ve -100 µm tane boylarında konsantrelerdeki %Fe içeriği sırasıyla %67.44 ve %69.78 iken Fe verimlerinin sırasıyla 10.93 ve 10.33 olduğu görülmüştür. Düşük alan şiddetli manyetik ayırma atıklarında Fe içeriğinin ise sırasıyla %39.28 Fe ve %40.05 Fe olması sebebiyle bu ürünlere yüksek alan şiddetli manyetik ayırma testleri de uygulanmıştır. Bu testler sonucunda ise düşük alan şiddetli manyetik ayırmayı takiben yüksek alan şiddetli manyetik ayırma ürünlerinden %41.35 Fe verimiyle %54 Fe içeriğine sahip bir ürün elde edildiği görülmüştür [43].

Bu çalışmaların yanında manyetit dışı demir cevherlerinin zenginleştirildiği önemli tesisler bulunmaktadır. Mt. Tom Price demir zenginleştirme tesisi Batı Avustralya'nın

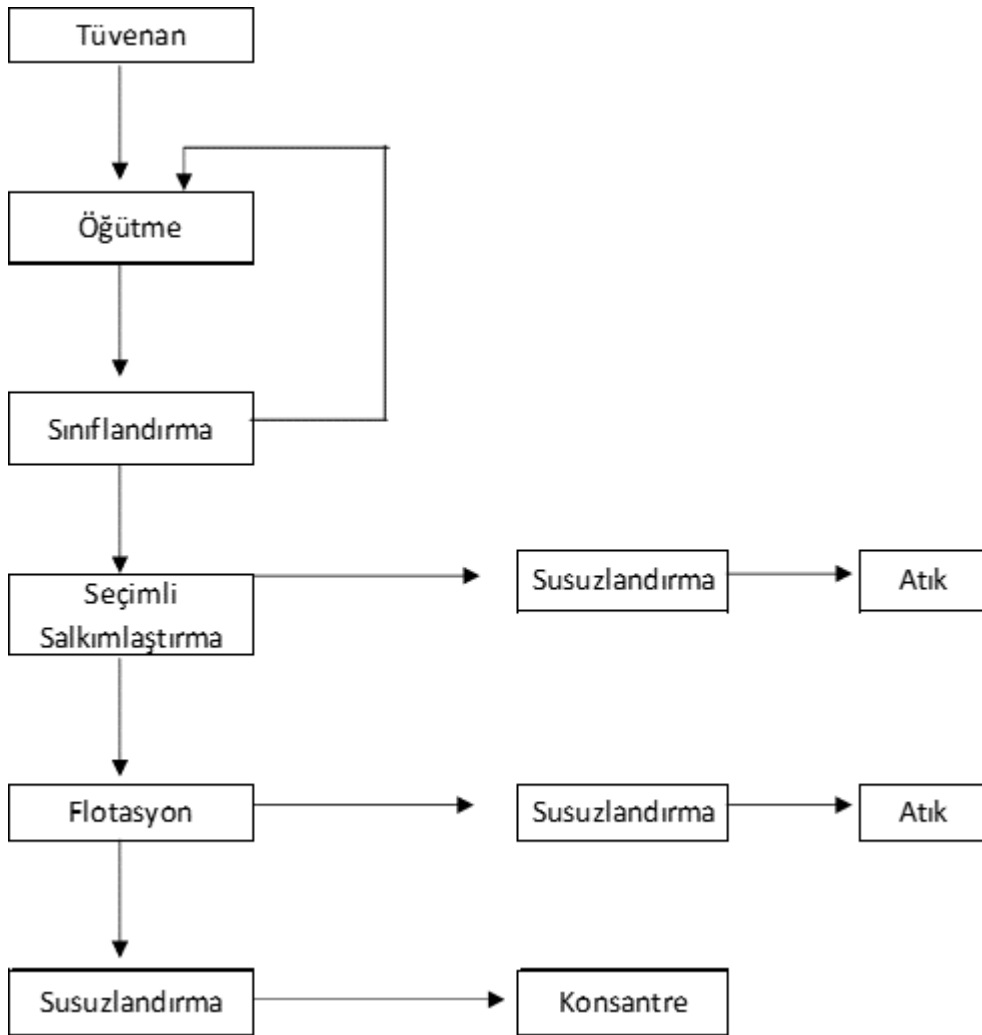
Pilbara bölgesinde bulunan ve düşük tenörlü demir cevheri zenginleştiren örnek bir tesistir.

Tesiste tüvenan cevher kapalı devre kırma eleme sonrası $-31.5+6.3$ mm, $-6.3+0.5$ mm fraksiyonlarına ayrılmaktadır. Bu fraksiyonlar sırasıyla ağır ortam tamburu ve ağır ortam siklonlarına beslenmektedir. -0.5 mm fraksiyonu ise şlam uzaklaştırma işlemini takiben spiral zenginleştiriciye beslenmektedir. Ağır ortam tamburundan parça cevher konsantresi, ağır ortam siklonları ve spiral zenginleştiriciden ise ince konsantre elde edilmektedir. Bu tesiste ağır ortam olarak öğütülmüş ferrosilikon kullanılmaktadır. Ağır ortamın geri kazanılması için de yaş manyetik ayırıcılar kullanılmaktadır. Tesise ait basitleştirilmiş akım şeması Şekil 2.3'te verilmektedir.



Şekil 2.3 Mt. Tom Price demir zenginleştirme tesisi basitleştirilmiş akım şeması [38]

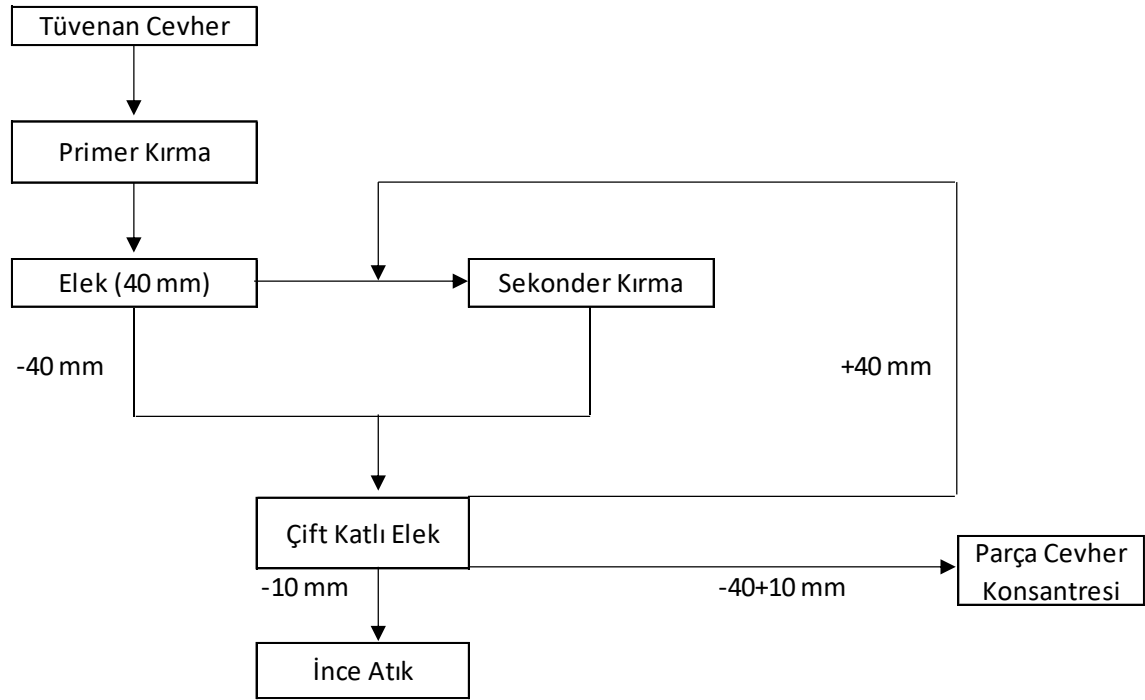
Tilden demir cevheri sahası 1840'lı yılların başında yüksek tenörlü demir cevherlerinin işletmesiyle faaliyete başlamıştır. Detaylı çalışmalarla 1952 yılında açık ocak madenciliği, zenginleştirme tesisi ve aglomerasyon tesisi operasyonlarına başlamıştır. Serbestleşme için gereken ince öğütme nedeniyle, sıradan şlam uzaklaştırma ve flotasyon yöntemleri demir kayıplarına ve konsantredeki demir tenörünün yetersiz seviyelerde kalmasına neden olmuştur. Bu sebeple 1960'lı yıllarda yapılan çalışmalarla cevherin seçimli salkımlaştırma işlemiyle şlam uzaklaştırılmasını takiben ters katyonik flotasyonla zenginleştirme akım şeması ortaya konmuştur [6] (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Tilden demir madeni zenginleştirme tesisi basitleştirilmiş akım şeması

Hindistan'da yüksek tenörlü (<math>< 65\% \text{ Fe}</math>) demir cevherlerinin üretilmesinde en çok kullanılan yöntemlerden bir tanesi kırma eleme işlemidir. Cevherin boyut özelliklerini sağlamak amacıyla kademli kırma eleme işlemi sonrasında parça ve sünger demir

konsantreleri elde edilmektedirken, ince malzeme ise atık olarak stoklanmaktadır [38] (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Kırma elemeyle zenginleştirmeye dair örnek akım şeması

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde sahadan numune alma çalışmaları, malzeme karakterizasyon çalışmaları, deneysel çalışmalar ve madde denkliği/simülasyon çalışmalarına ait detaylar alt başlıklar halinde sunulmuştur.

3.1. Numune Alma çalışmaları

Sahadan numune alma çalışmalarının ilk aşamasında daha önce üretim yapılan her bir basamakta 4 farklı noktadan olmak üzere toplam seçilen 16 noktadan iş makinası yardımı ile yarmalar açılarak bu noktadaki tüm malzeme kazılmıştır.

Numune alma işlemlerinin gerçekleştirildiği eski üretim basamakları Şekil 3.1’de iş makinası yardımı ile numune toplama çalışmalarına ait fotoğraf görüntüleri ise sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’te verilmektedir.



Şekil 3.1 Demir sahasındaki eski üretim basamaklarına ait fotoğraf görüntüleri



Şekil 3.2 Eski üretim basamaklarından iş makinası yardımı ile numune toplanması (1)



Şekil 3.3 Eski üretim basamaklarından iş makinası yardımı ile numune toplanması (2)

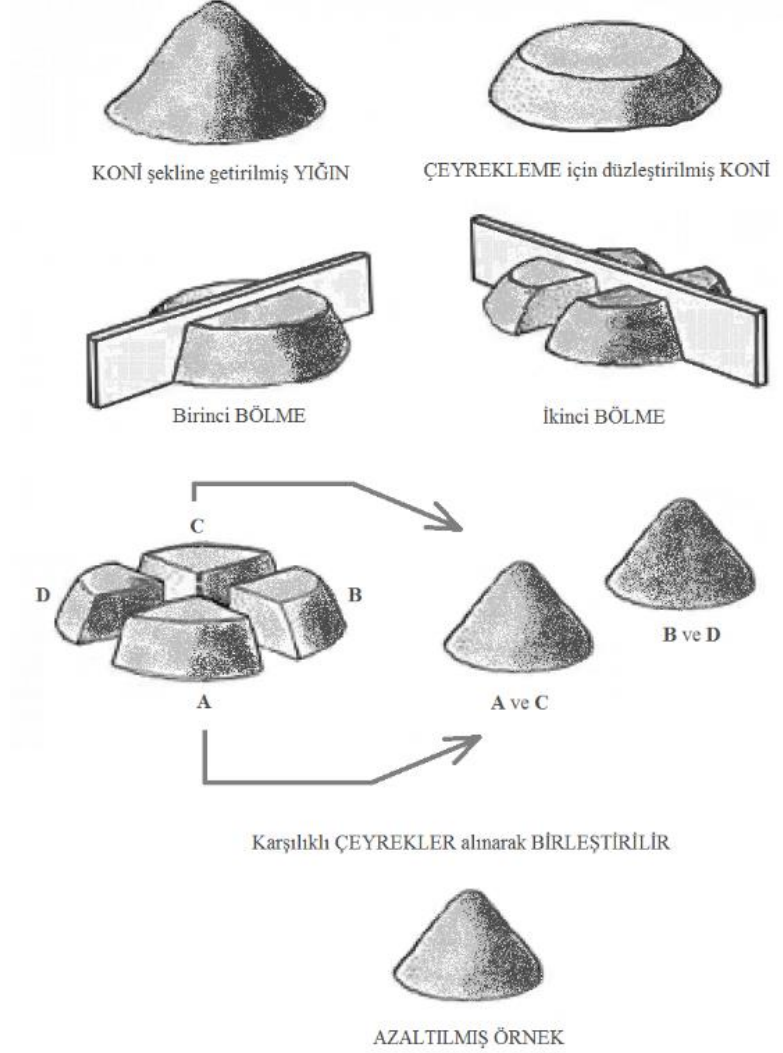
İş makinası yardımıyla her bir numune alma noktasından alınan yaklaşık 16 ton malzeme ardından alandaki uygun bir yerde biriktirilmiş ve temsiliyetin sağlanabilmesi için harmanlanmıştır (Şekil 3.4). Bu esnada çok büyük kaya parçaları da mümkün olduğunca iş makinası ile kırdırılmıştır.



Şekil 3.4 Toplanan numunelerin biriktirilmesi ve harmanlanması

Numune yığınının oluşturulması ve harmanlanmasının ardından numune azaltma işlemine geçilmiştir. Bu aşamada da miktarın çok fazla olması nedeniyle iş makinası

kullanılmıştır. Sahada numune azaltma işleminde konileme-dörtleme yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin basitleştirilmiş akım şeması Şekil 3.5'te sahada uygulanmasına ilişkin fotoğraf görüntüleri ise Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5 Konileme/dörtleme yöntemi



Şekil 3.6 Sahada numune azaltma işlemlerini gösteren fotoğraf görüntüleri

Sahadan alınan ve Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'ne sevk edilen yaklaşık 800 kg numune ile malzeme karakterizasyonu ve zenginleştirme çalışmalarında kullanılacak temsili numuneler hazırlanmıştır.

Laboratuvara sevki sağlanan temsili numune ilk olarak tamamı 30 mm'nin altına kırılarak harmanlanmış ve Şekil 3.5'te basitleştirilmiş akım şeması verilen yöntem ile gerekli numuneler hazırlanmıştır.

3.2. Malzeme Karakterizasyon Çalışmaları

Malzeme karakterizasyon çalışmaları kapsamında kırılmış tüvenan cevherden alınan temsili numuneler kullanılarak tüvenan cevherin yoğunluk ve öğütülebilirlik değerleri belirlenmiştir. Tüvenan cevherden yaş eleme yapılarak elde edilen tüm boyut fraksiyonlarının kimyasal analizleri yaptırılmıştır. Ayrıca, cevherin içerdiği safsızlıkların karakterize edilmesi, sayısallaştırılması, serbestleşme durumunun ortaya konulması ve proses mineralojisi açısından değerlendirilmesi amacıyla detaylı mineral serbestleşme

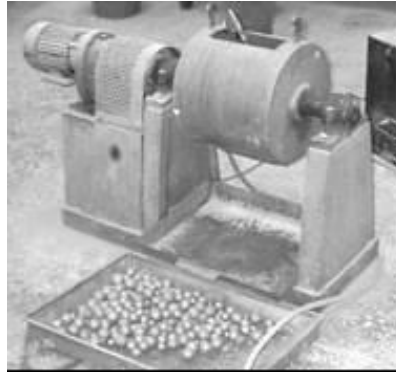
analizleri (MLA) yaptırılmıştır. Çalışmalara ait detaylar ve sonuçlar alt başlıklar halinde sunulmuştur.

3.2.1. Tüvenan Cevher Yoğunluğunun Belirlenmesi

Tüvenan cevher ile yürütülen karakterizasyon çalışmaları kapsamında yoğunluk değeri standart sıvı piknometresi yöntemi ile belirlenmiştir. Deneysel hatalardan kaynaklanan sapmaları engellemek için deney 4 kez tekrarlanmış ve ortalama değer bulunmuştur. Tüvenan cevhere ait yoğunluk değeri 3.851 g/cm^3 olarak ölçülmüştür.

3.2.2. Tüvenan Cevherin Öğütülebilirlik Değerinin Belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında öğütülebilirlik testi gerçekleştirilecek temsili numunenin tamamı kırılarak, 3.35 mm'nin altına indirilmiştir. Deney TS 7700 standartlarında belirlenen standart Bond bilyalı değirmeninde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Standart Bond bilyalı değirmeni

Standart Bond bilyalı değirmen testi sonucunda tüvenan cevherin öğütülebilirlik değeri (iş indeksi) 12.51 kWh/t olarak hesaplanmıştır.

3.2.3. Tüvenan Cevherinin Fraksiyonel Analizleri

Zenginleştirme testlerinde kullanılan numunelerin kimyasal analizleri uluslararası akredite bir laboratuvarında (SGS Türkiye) yaptırılmıştır. Kimyasal analiz sürecinde numunelerin elementel toplam Fe analizleri titrasyon yöntemi ile S içerikleri LECO yöntemi ile ve diğer kimyasal analizler ICP yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Zenginleştirme testlerinde kullanılmak üzere tamamı $-500 \mu\text{m}$ olacak şekilde hazırlanan besleme numunesinin fraksiyonel kimyasal analizi sonuçları Çizelge 3.1'te

sunulmaktadır. -500 μm 'ye kırılan tüvenan cevherin fraksiyonel analiz sonuçları incelendiğinde en ince boyut fraksiyonu olan -25 μm boyut fraksiyonu dışında toplam demir tenörlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Boyut fraksiyonlarında SiO_2 dışındaki tüm safsızlıkların tenör değerleri ise ince boylara gidildikçe artış göstermektedir. SiO_2 tenörleri ise tüm boyut fraksiyonlarında hemen hemen aynı değerleri almaktadır. Boyut fraksiyonlarının ağırlık ve tenör değerleri ile hesaplanan değerler ile tüvenan cevher analiz sonuçları birbiri ile uyum göstermektedir.

38 μm 'den ince fraksiyonlarda potasyum, kükürt ve fosfor tenörlerinin yüksek olması ve bu safsızlıkların yaklaşık olarak üçte birinin bu boylarda yer alması özellikle spiral zenginleştirme aşamasından önce şlam fraksiyonunun uzaklaştırılması gerektiği şeklinde yorumlanmıştır.

Çizelge 3.1 Tüvenan cevhere ait fraksiyonel analiz sonuçları

Boyut Fraksiyonu (μm)	Ağırlık %	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
-500+425	1.90	52.19	14.62	2.42	0.87	0.05	0.12	0.14
-425+300	14.47	52.57	14.46	2.11	0.83	0.04	0.12	0.17
-300+212	15.51	52.69	13.99	2.19	0.90	0.04	0.12	0.16
-212+150	13.12	52.80	13.97	2.27	0.92	0.05	0.13	0.15
-150+106	9.87	52.81	12.96	2.47	0.89	0.04	0.15	0.16
-106+75	8.35	52.51	13.63	2.28	0.98	0.05	0.15	0.18
-75+53	6.76	52.75	12.30	2.35	0.97	0.05	0.16	0.20
-53+38	5.81	52.38	12.91	2.91	1.08	0.05	0.16	0.24
-38+25	3.11	52.96	11.33	2.71	1.01	0.06	0.20	0.21
-25	21.09	46.17	15.90	5.39	1.46	0.06	0.28	0.28
Tüvenan	100.00	51.29	14.08	2.97	1.03	0.05	0.17	0.20
Tüvenan (Analiz)	-	50.56	15.17	3.10	1.06	0.05	0.15	0.20

Boyut Fraksiyonu (μm)	Ağırlık %	Dağılım (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
-500+425	1.90	1.93	1.97	1.55	1.60	1.82	1.38	1.36
-425+300	14.47	14.84	14.87	10.28	11.67	12.09	10.50	12.58
-300+212	15.51	15.93	15.41	11.43	13.49	13.93	11.44	12.68
-212+150	13.12	13.51	13.02	10.02	11.70	13.43	9.83	10.06
-150+106	9.87	10.16	9.09	8.20	8.48	8.66	8.64	8.07
-106+75	8.35	8.54	8.08	6.40	7.88	8.54	7.35	7.68
-75+53	6.76	6.95	5.91	5.35	6.31	6.64	6.28	6.91
-53+38	5.81	5.94	5.33	5.69	6.09	6.07	5.68	7.13
-38+25	3.11	3.21	2.50	2.83	3.03	3.70	3.63	3.34
-25	21.09	18.99	23.82	38.25	29.75	25.11	35.27	30.19
Tüvenan	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

3.2.4. Cevherin Mineralojik İçeriğinin Belirlenmesi

Tüvenan cevherin detaylı mineralojik yapısının belirlenmesi amacıyla cevherden kırma, öğütme ve yaş eleme tönemleri ile hazırlanan -500+212 µm boyut fraksiyonuna Rietveld yöntemi ile krom anoda sahip Rigaku D/Max 2200 Powder X-ray Diffractometer, kullanılarak tanımlamalı (kantitatif) XRD analizi yaptırılmıştır. Rietveld analizinde düşük yoğunluklu ışına yapan minerallerde ağırlıkça %2'nin altındaki değerlerinin ölçümünde hata olma ihtimali ve düşük ve yüksek yoğunluklu minerallerin daha net tanımlanabilmesi için numune ilk olarak 3.00 g/cm³ yoğunluk değerinde ağır sıvı testine tabi tutulmuştur. Bu yoğunluk değerinde yüzen ve batan ürünler ile ayrı ayrı tanımlamalı XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Tanımlamalı XRD numunelerinin elde edilmesi için gerçekleştirilen ağır sıvı testine ait ürünlerin fotoğraf görüntüsü Şekil 3.8'da verilmektedir.



Şekil 3.8 Tanımlamalı XRD analizi numuneleri

Tanımlamalı XRD analiz sonuçları ağır sıvı yüzen ve ağır sıvı batan numuneleri için sırasıyla Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te sunulmaktadır.

Çizelge 3.2 Ağır sıvı testi yüzen ürününün mineralojik içeriği

Mineral	Kimyasal Formülü	Oran (%)
Kuars	SiO ₂	37.50
Alkali Feldspat	K(AlSi ₃ O ₈)	22.50
Muskovit	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	21.50
Limonit (Götite)	FeO (OH)	18.5
Toplam		100.00

Çizelge 3.3 Ağır sıvı testi batan ürününün mineralojik içeriği

Mineral	Kimyasal Formülü	Oran (%)
Hematit	Fe ₂ O ₃	47.20
Kuars	SiO ₂	10.20
Limonit (Götite)	FeO (OH)	42.60
Toplam		100.00

Tanımlamalı XRD analizine göre cevher numunesi içerisinde yoğunluğu düşük mineraller olarak kuvars, alkali feldspat ve muskovit bulunmaktadır. Ancak ağır sıvı testi sonucunda 3.00 g/cm³ yoğunluk değerinde yüzen üründe %18.50 oranında limonit minerali de tespit edilmiştir. Limonit mineralinin ortalama yoğunluğunun 3.80 g/cm³ olduğu düşünüldüğünde yüzen üründeki limonit mineralinin diğer mineraller ile bağlı olduğu düşünülmektedir. Cevher içerisindeki ana demir kaynaklarının ise hematit ve götite mineralleri olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, bu minerallerin cevher içerisindeki oranları birbirine yakındır. 3.00 gr/cm³ yoğunlukta yapılan ağır sıvı testi batan ürününde %10.20 oranında kuvars minerali olduğu da tespit edilmiştir.

3.2.5. MLA ile Modal Mineralojik Analizler

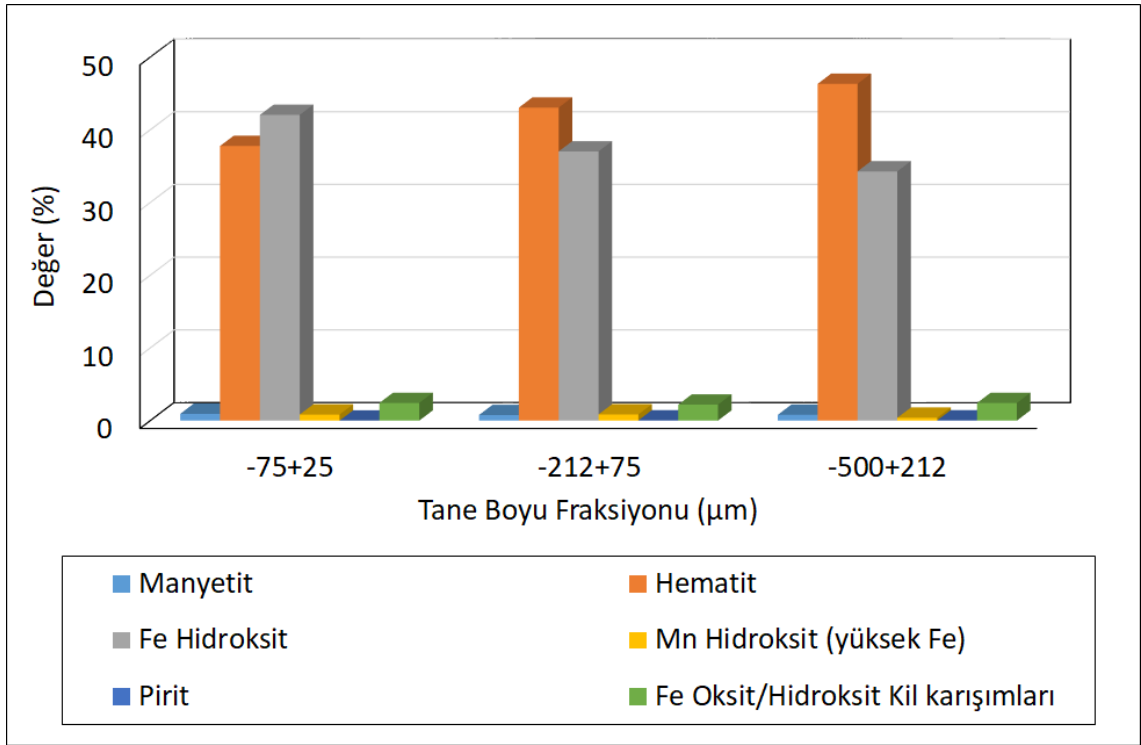
Demir cevherlerinin mineralojisi sadece demirin değil aynı zamanda safsızlıkların da ayırım verimi için önemli bir role sahiptir. Bu nedenle, cevherin içerdiği safsızlıkların karakterize edilmesi, sayısallaştırılması, serbestleşme ve bağlılık durumlarının ortaya konulması ve proses mineralojisi açısından detaylı değerlendirilmesi amacıyla tüvenan cevherden hazırlanan -500+212 µm, -212+75 µm ve -75+25 µm boyut fraksiyonlarına

Kanada merkezli Northwest Geochemical Consulting Services laboratuvarında MLA analizi (Mineral Liberation Analysis) yaptırılmıştır. MLA sistemi, Avustralya'da Queensland Üniversitesi'nde JKMRC (Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre) Araştırma Merkezi'nde 1996 yılında geliştirilmiş ve 2000 yılında ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistem, mineral tane sınırlarının görüntüsünü oluşturmak için bir taramalı elektron mikroskopunda enerji-saçınımli X-ışını dedektöründen (Energy Dispersive X-ray Detector) elde edilen geri saçınımli (back-scattered-BS) elektron sinyallerini kullanmaktadır [52]. BSE görüntüsünden işlem yapıldığı için, QEMSCAN yöntemine göre işlem daha hızlı gerçekleşmekte ve daha çok tane analiz edilmektedir [53]. Bununla birlikte, bu sistemde daha doğru sonuçlar verebilen de-aglomerasyon özelliği de bulunmaktadır. Analiz edilen tane boyu aralığının 10 µm ile 1 mm arasında olması ve örneklerin dar fraksiyonda hazırlanması tercih edilmekte olup analiz hassasiyeti 10 µm'dan daha ince taneler için azalmaktadır. MLA sisteminde, operatör desteği olmadan bir gecede 16 adet standart örnek ölçümü yapılabilmektedir [54]. Tüvenan cevher boyut fraksiyonlarının modal analizi Çizelge 3.4'te sunulmaktadır. Bu sonuçlar demir içeren minerallerin serbestleşme dereceleri ve bağlılık durumları ile birlikte tüvenan cevher içerisindeki safsızlıkların detaylı tanımlama ve serbestleşme analizlerinin yapılabilmesi açısından büyük önem arz etmektedir.

Çizelge 3.4 Tüvenan cevher boyut fraksiyonlarının modal analizi

Mineral Adı	Fraksiyonel Bazda Dağılım (%)		
	-75+25 μm	-212+75 μm	-500+212 μm
Manyetit	0.93	0.76	0.80
Hematit	37.77	43.04	46.32
Fe Hidroksit	42.04	37.02	34.27
Mn Hidroksit (yüksek Fe)	0.83	0.85	0.39
Rutil	0.14	0.08	0.07
İlmenit	0.06	0.04	0.05
Kuvars	5.45	6.97	7.48
K-Feldispat	4.86	4.36	4.09
Plajiyoklaz	0.06	0.05	0.04
Muskovit	0.54	0.43	0.43
Biyotit	1.36	1.18	1.15
Amfibol	0.19	0.11	0.12
Garnet	0.03	0.04	0.00
Klinoklor	0.07	0.04	0.03
Si-Al Kil mineralleri	0.91	0.53	0.57
Manyezit	0.00	0.01	0.01
Kalsit	0.45	0.51	0.31
Parisit	0.01	0.00	0.00
Pirit	0.00	0.03	0.02
Kalkopirit	0.00	0.00	0.00
Sfalerit	0.01	0.00	0.01
Barit	0.07	0.05	0.12
Jarosit	0.63	0.62	0.41
Apatit	0.13	0.11	0.04
Fe Oksit/Hidroksit Kil karışımları	2.42	2.19	2.41
Mn Hidroksit Kil karışımları	0.15	0.16	0.07
Diğer	0.87	0.80	0.77
Toplam	100.00	100.00	100.00

Tüvenan cevherin modal analiz sonuçlarının tanımlamalı XRD sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Demir içeren mineraller için sadeleştirilmiş modal mineralojik analiz sonuçları incelendiğinde, tüm fraksiyonlarda demir taşıyan ana minerallerin hematit ve Fe hidroksitler olduğu belirlenmiştir. Demirin elementel bazda dağılım verileri incelendiğinde tüm numunelerde toplam Fe değerinin büyük bir kısmının hematit ve Fe hidroksit minerallerinden, daha az bir kısmının Fe Hidroksit / hidroksit kil karışımlarından ve çok az miktarlarda değişen oranlarda manyetit, pirit ve yüksek Fe içerikli Mn hidroksitlerden kaynaklı olduğu görülmektedir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Demire ait element dağılım (%)

Tüvenan cevherin MLA ile modal analizi sonucunda da cevher içerisinde kayda değer miktarda manyetit tespit edilememiştir. Cevher içerisinde daha ince boya gidildikçe hematit oranı bir miktar azalmakta, buna karşılık Fe hidroksit miktarı bir miktar artış göstermektedir. Cevher içerisinde ana safsızlık olarak kuvars ve K feldispat (\cong %11) ve daha düşük oranlarda biyotit, Muskovit, Si-Al kil mineralleri ile Fe Oksit/Hidroksit Kil karışımları bulunmaktadır. Serbestleşme verileri de numunelerdeki ana demir kaynakları olan hematit ve Fe hidroksit mineralleri üzerinden değerlendirilmiştir. Hematit ve Fe hidroksit minerallerine ait serbestleşme dereceleri sırasıyla Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da sunulmuştur.

Çizelge 3.5 Hematit mineralinin serbestleşme derecesi

Boyut (μm)	Yüksek Derecede Bağlı					Düşük Derecede Bağlı				Serbest	
	<=10 %	<=20 %	<=30 %	<=40 %	<=50 %	<=60 %	<=70 %	<=80 %	<=90 %	<100 %	100 %
-75+25	1.6	2.8	4.1	5.2	7.2	10.7	14.5	20.7	24.3	8.8	0.2
-212+75	2.1	3.2	5.2	6.2	9.0	12.1	16.9	22.2	19.1	4.0	0.0
-500+212	3.0	5.5	6.7	11.4	8.4	19.2	15.0	18.8	9.7	2.3	0.0

Çizelge 3.5'te görüleceği üzere -500+212 µm fraksiyonunda hematit mineralinin yaklaşık %54 oranında yüksek bağlı olduğu, tane boyunun incilmesi ile bu değer %31.6'ya kadar düştüğü görülmüştür. Çizelge 3.5'te, gerek iri gerekse ince fraksiyonlarda serbest hematitin çok az miktarda olduğu hematit mineralinin çok büyük oranda düşük dereceli bağlı taneler halinde kaldığı göze çarpmaktadır. Diğer yandan, en ince boyut fraksiyonunda dahi serbest hematit tanelerinin miktarı %9 oranında kalmıştır.

Çizelge 3.6 Fe hidroksit minerallerinin serbestleşme derecesi

Boyut (µm)	Yüksek Derecede Bağlı						Düşük Derecede Bağlı				Serbest
	<=10	<=20	<=30	<=40	<=50	<=60	<=70	<=80	<=90	<100	100
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
-75+25	1.0	3.9	5.2	5.2	5.4	6.1	6.6	8.4	12.2	26.9	19.3
-212+75	0.9	3.8	5.8	5.6	6.6	6.5	7.7	10.3	13.1	31.2	8.5
-500+212	0.2	1.7	4.7	5.8	10.6	6.4	7.2	9.2	19.0	27.0	8.2

Çizelge 3.6'da görüldüğü gibi, cevher içerisindeki serbest Fe hidroksitlerin oranının serbest hematitlere göre oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak, en ince boyut fraksiyonu olan -75+25 µm boyut aralığında dahi bağlı Fe hidroksitlerin oranı %53.8'dir.

Hematit ve Fe oksit minerallerin hangi minerallerle ne şekilde bağlı olduğunu gösteren sonuçlar sırasıyla Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'de sunulmaktadır.

Çizelge 3.7 Hematit mineralinin detaylı serbestleşme analizi

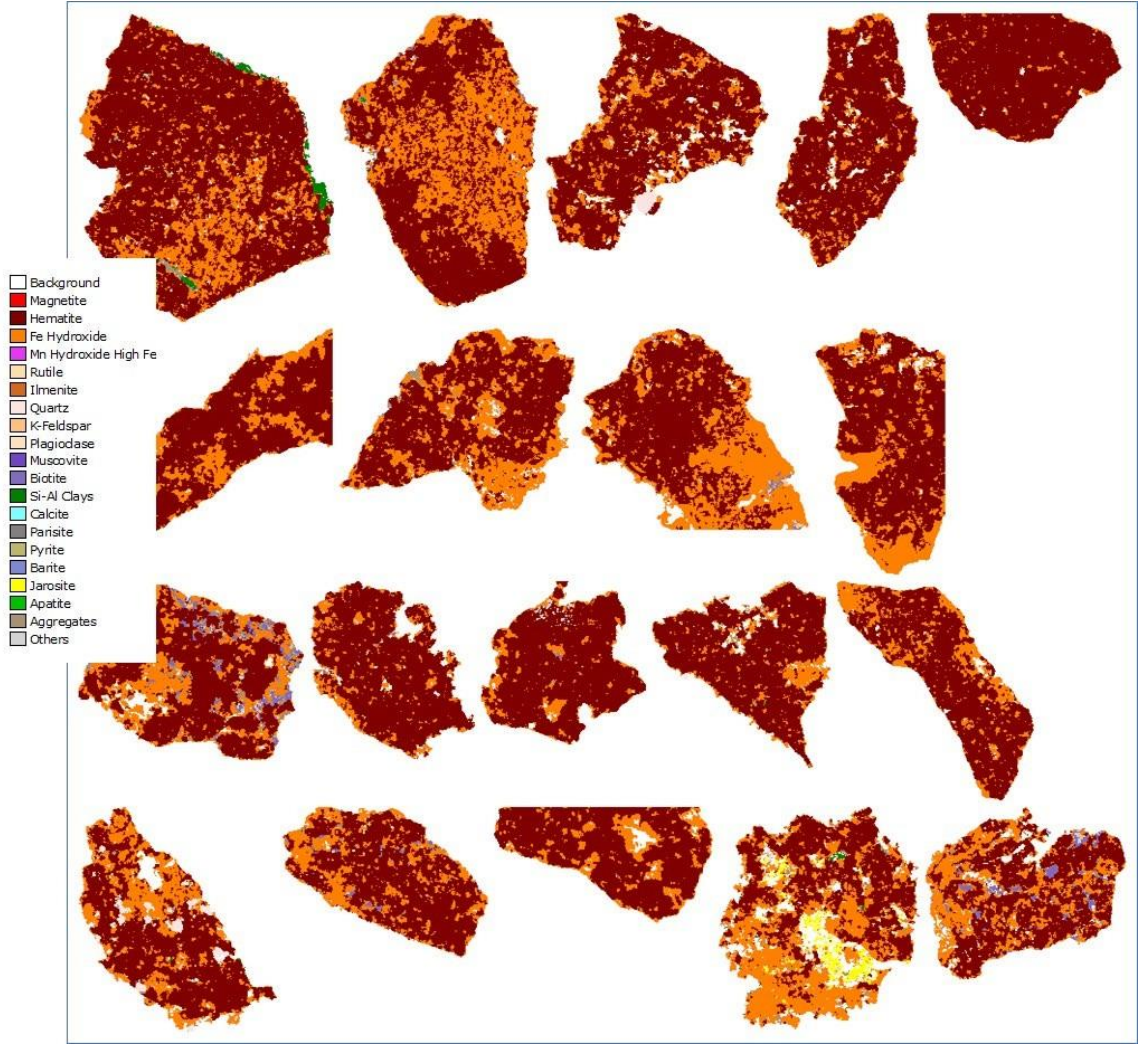
Boyut (µm)	Serbest	İkili Bağlı						Üçlü Bağlı
		Fe hidroksit	Mn hidroksit	Kuvars	Biyotit	Muskovit	Jarosit	Diğer
-75+25	9.0	80.9	0.0	0.6	0.1	0.0	0.2	9.0
-212+75	4.0	83.7	0.1	0.7	0.0	0.0	0.1	11.3
-500+212	2.3	85.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.2

Çizelge 3.8 Fe hidroksit minerallerinin detaylı serbestleşme analizi

Boyut (μm)	Serbest	İkili Bağlı						Üçlü Bağlı
		Hematit	Mn Hidroksit	Kuvars	K Feldispat	Biyotit	Jarosit	
	Serbest							Diğer
-75+25	46.2	38.8	0.7	1.6	0.4	1.7	0.3	7.9
-212+75	39.7	42.5	1	3.4	0.7	1.2	0.3	9.5
-500+212	35.2	50.5	0.3	2.7	0.1	1.2	0.1	9

MLA sonuçlarına göre hem hematit hem de Fe hidroksit mineralleri ikili veya üçlü kenetlenmeleri tüm fraksiyonlarda başlıca birbirleri ile yapmaktadır. Cevher içerisindeki serbest halde ve Fe hidroksitler ile bağlı hematitler, toplam hematit miktarının yaklaşık olarak %89 oranında iken, serbest Fe hidroksit ve hematitle bağlı Fe hidroksitlerin oranı da toplam Fe hidroksitlerin yaklaşık olarak %85'i oranındadır. Hem hematit hem de Fe oksit minerallerinin geriye kalan kısımları da büyük oranda safsızlık içeren taneler ile üçlü bağlı şekildedir. Serbestleşme analizleri için elektron mikroskobu ile çekilen örnek fotoğraf görüntüleri Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de sunulmuştur.

MLA analiz sonuçları cevher oluşum sürecinde kayaçların bozunmaya uğradığı, yer değiştirme mekanizmalarına maruz kaldığını göstermektedir. Bu sonuçlar, bozunma ve yer değiştirme mekanizmaları sonucunda cevherleşmenin karmaşık bir yapıya dönüştüğü şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 3.10 Hematit minerallerine ait elektron mikroskop görüntüleri (-500+212 µm)



Şekil 3.11 Fe hidroksit minerallerine ait elektron mikroskop görüntüleri (-500+212 µm)

3.2.6. Düşük Alan Şiddetli Manyetik Ayırma Testleri

Davis tüpü (DT), çok az miktarda numune kullanarak manyetik cevher içeren örnekleri güçlü manyetik ve zayıf manyetik fraksiyonlara ayırmak için tasarlanmış laboratuvar ölçekli bir cihazdır. Ekipman zaman içerisinde manyetik özelliğe sahip cevherlerin düşük alan şiddetli manyetik ayırıcılar ile zenginleştirilmesinin değerlendirilmesinde kullanılan standart bir laboratuvar ekipmanı haline gelmiştir.

Tüvenan cevher numunesi ile gerçekleştirilen tanımlamalı XRD ve MLA analizleri sonrasında cevher içerisinde kayda değer miktarda manyetit bulunmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca MLA analizleri cevherin farklı boyut fraksiyonlarındaki manyetit miktarının %0.76 ile %0.93 arasında değiştiğini göstermiştir. Cevher içerisinde çok az miktarda olduğu bilinen manyetit zenginleştirme davranımının belirlenmesine yönelik laboratuvar ölçekli düşük alan şiddetli manyetik ayırıcı olan Davis tüp cihazı ile 1500 Gauss manyetik alan şiddeti ve 75 µm öğütme boyunda manyetik zenginleştirme testi

yapılmıştır. Test sonucunda elde edilen ürünlerin tamamı kurutularak hem kimyasal analize gönderilmiş hem de manyetit (FeO_4) içeriğinin tespiti için Satmagan analizi yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan Davis tüp test cihazına ait görüntü Şekil 3.12’de çalışma koşulları ise Çizelge 3.9’da sunulmaktadır.



Şekil 3.12 Davis tüp test cihazına ilişkin görüntü

Çizelge 3.9 Davis tüp ile yaş manyetik ayırma testlerine ait işletme değişkenleri

İşletme Değişkeni	Değer
Numune Miktarı (g)	10
Yıkama Suyu Miktarı (ml/dk.)	500
Tüp Turu (dev/dk.)	75
Test Süresi (dk.)	5
Manyetik Alan Şiddeti (Gauss)	1500
Tüp Açısı (derece)	45

Tüvenan cevherden alınan temsili bir numunenin tamamının $75 \mu m$ 'den ince olacak şekilde öğütülmesini takiben gerçekleştirilen düşük alan şiddetli yaş manyetik ayırma testine ait sonuçlar Çizelge 3.10’da sunulmaktadır.

Çizelge 3.10 Davis tüp test sonuçları

Ürün	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe ₃ O ₄	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S
Konsantre	5.60	14.49	65.57	3.02	0.81	0.1	0.02	0.07
Atık	94.40	3.14	49.72	17.11	3.52	1.13	0.1	0.2
Besleme (Hesap)	100.00	3.78	50.61	16.32	3.37	1.07	0.09	0.19
Besleme (Analiz)		3.93	50.73	15.66	3.23	1.12	0.05	0.15

Ürün	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe ₃ O ₄	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S
Konsantre	5.60	21.49	7.26	1.04	1.35	0.52	1.21	1.91
Atık	94.40	78.51	92.74	98.96	98.65	99.48	98.79	98.09
Besleme	100.00	100	100	100	100	100	100	100

Çizelge 3.10'da görüleceği üzere tüvenan cevherin düşük alan şiddetli yaş manyetik ayırma ile zenginleştirilmesi durumunda beslemenin ağırlıkça %5.60'ı yüksek toplam Fe içerikli bir konsantre olarak elde edilmektedir. Ancak, öğütme boyunun 75 µm olduğu düşünüldüğünde elde edilen konsantre miktarı ve toplam Fe verimi oldukça düşük değerlerde kalmaktadır. Düşük alan şiddetli yaş manyetik ayırma testi sonucunda elde edilen konsantrenin toplam demir tenörünün %65.57 olmasına karşılık manyetit içeriği Satmagan yöntemi ile %14.49 olarak ölçülmüştür. Ayrıca, Satmagan analizine bakıldığında besleme manyetit miktarının yaklaşık olarak %4 olduğu görülmektedir. Hem MLA hem de tanımlamalı XRD analizlerinde tüvenan cevher içerisinde kayda değer manyetit görülememesinin bu yöntemlerdeki hematit-manyetit ayrımının hassa sşekilde yapılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Düşük alan şiddetli yaş manyetik ayırma sonucu elde edilen atık içerisindeki manyetit kaybı detaylı MLA analizleri ile birlikte değerlendirildiğinde, tüvenan cevher içerisindeki manyetitin diğer demir oksit mineralleri ile (hematit, götit, vb.) yüksek oranda bağlı olduğu şeklinde yorumlanmaktadır. Elde edilen sonuçlar aynı zamanda, yüksek tenör ve düşük safsızlık içeriğine sahip bir konsantre elde edilmesi koşulunda konsantre miktarının ve toplam Fe veriminin istenilen ölçülerde olamayacağını da bir göstergesidir.

3.2.7. Ağır Sıvı (Yüzdürme – Batırma) Testleri

Ağır sıvı testleri, cevherlerin farklı tane boylarında yer çekimine dayalı zenginleştirme yöntemleri uygulandığında elde edilebilecek en uygun ürünlerin içerikleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Özellikle demir zenginleştirme uygulamalarında,

endüstriyel boyutta uygulanacak yöntemin niteliğine ve performans karakteristiğine göre (jigler, spiraller, sallantılı masalar, ağır ortam devreleri veya bunların bir kombinasyonlarının kullanımı vb.) elde edilecek ürünlerin tenör ve verim değerleri farklılık gösterecektir.

Tez çalışması kapsamında kullanılan demir cevherinin yerçekimi ile zenginleştirme davranımının belirlenebilmesi amacıyla tüvenan cevherden yaş eleme yöntemi ile elde edilen 30+20 mm, -20+10 mm, -10+5 mm, - 5+1 mm, -1+0.5 mm ve -0.5+0.212 mm boyut fraksiyonlarına farklı yoğunluklarda ağır sıvı testleri uygulanmıştır. Ağır sıvı testi besleme fraksiyonlarına ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.11’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.11 Ağır sıvı testi beslemelerine ait kimyasal analiz sonuçları

Boyut Fraksiyonu (mm)	Ağırlık (%)	Tenör (%)							
		Fe	Fe ²⁺	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S
-30+20	33.87	53.35	0.74	0.95	11.12	2.39	0.87	0.04	0.21
-20+10	19.25	52.89	0.32	0.41	12.09	2.86	0.98	0.04	0.17
-10+5	13.75	50.53	0.54	0.69	14.72	3.4	1.26	0.05	0.13
-5+1	14.35	49.36	0.48	0.62	16.02	2.91	1.16	0.05	0.12
-1+0.5	3.61	48.82	1.17	1.51	16.27	2.82	1.16	0.05	0.12
-0.5+0.212	3.95	47.32	<0.2	<0.2	18.50	3.10	1.32	0.06	0.14
-0.212*	11.21	40.91	<0.2	<0.2	18.44	6.30	1.88	0.07	0.23
Besleme (Hesap)	100.00	50.50	0.50	0.64	13.80	3.18	1.13	0.05	0.17
Besleme (Analiz)	-	50.56	0.85	1.10	15.17	3.10	1.06	0.05	0.15

Boyut Fraksiyonu (mm)	Ağırlık (%)	Dağılım (%)							
		Fe	Fe ²⁺	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S
-30+20	33.87	35.77	48.87	49.18	27.28	25.49	26.16	30.06	40.94
-20+10	19.25	20.16	12.02	12.07	16.86	17.34	16.73	17.09	18.58
-10+5	13.75	13.76	14.48	14.5	14.67	14.72	15.35	14.53	9.99
-5+1	14.35	14.03	13.44	13.6	16.66	13.15	14.74	13.95	9.68
-1+0.5	3.61	3.49	8.24	8.33	4.26	3.21	3.71	3.74	2.43
-0.5+0.212	3.95	3.70	0.77	0.60	5.30	3.86	4.62	4.76	3.19
-0.212*	11.21	9.08	2.19	1.71	14.98	22.24	18.68	15.87	15.18
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

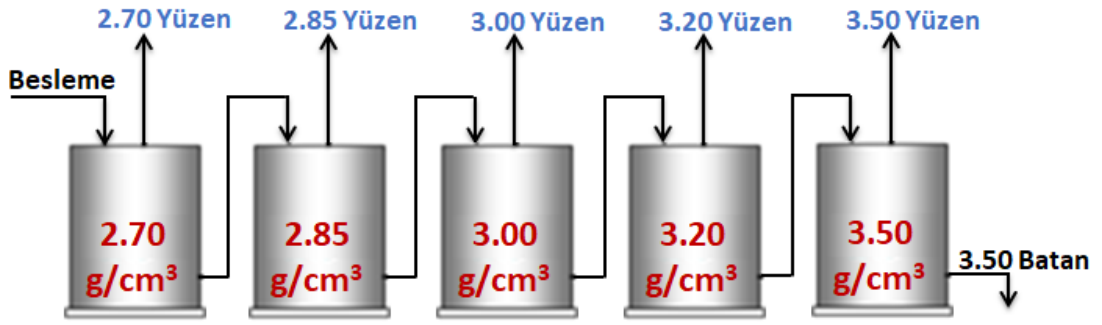
*Ağır sıvı testinde kullanılmamıştır.

Ağır sıvı besleme fraksiyonlarına ait kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde tane boyunun incilmesi ile toplam Fe tenörünün düştüğü, safsızlık tenörlerinin ise arttığı görölmektedir. Fe⁺² analizleri ağır sıvıya beslenecek malzeme içerisinde neredeyse hiğ manyetit olmadığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle besleme tenörleri yüksek olmasına rağmen iri boylarda ağır sıvı testine alternatif olarak düşük alan şiddetli kuru manyetik ayırma (cobbing) alternatifi değerlendirilmemiştir.

Ağır sıvı beslemesi içerisindeki toplam demirin yaklaşık olarak %10'u teste dahil edilmeyen -212 μ m boyutunda kalmaktadır. Buna karşılık cevher içerisindeki toplam demirin yaklaşık olarak %84'ü 1 mm'den daha iri fraksiyonda yer almaktadır. Cevher içerisindeki toplam safsızlıkların aynı fraksiyondaki oranı ise %70 ila %85 arasında değerismektedir.

Ağır sıvı testlerinde cevherin karmaşık mineralojik yapısı ve düşük serbestleşmesi göz önüne alınarak 2.70, 2.85, 3.00, 3.20 ve 3.50 g/cm³ yoğunluklarında geniş bir aralıktaki ağır sıvı serisi hazırlanmıştır. Özellikle, iri boyda satılabilir bir ürün elde edilemeyeceğinin belirlenmesi amacıyla laboratuvar koşullarında elde edilebilecek en yüksek yoğunluk değereri olan 3.50 g/cm³ yoğunluğa sahip ağır sıvı da hazırlanmıştır. Ağır sıvıyı hazırlamak için suda yüksek çözünürlüğe sahip (730 g/L, 20°C) ve düşük viskoziteli SPT (Sodium polytungstate - Hexasodium tungstate hydrate, Na₆H₂W₁₂O₄₀) çözeltisi kullanılmıştır.

Ağır sıvı (yüzdürme-batırma) testlerinde arka arkaya sıralanmış farklı özgül ağırlıklara sahip sıvılar kullanılmıştır. Test kapsamında, numune önce en düşük özgül ağırlığa sahip sıvı içine konulup yüzen ürün ayrılmıştır. Daha sonra batan kısım süzölerek daha yüksek özgül ağırlığa sahip ikinci sıvının içine aktarılmıştır. Bu özgül ağırlıkta yüzen malzeme de ayrılmıştır. Bu işlem hazırlanan tüm sıvılar içinde tekrarlanarak her bir özgül ağırlık aralığında yüzen ürünler ayrı ayrı toplanmıştır. Daha sonra bu ürünler kurutulup tartılarak toplam numune iğerindeki oranları hesaplanmıştır. Ağır sıvı testine ait basitleştirilmif akım şeması şekil 3.13'te sunulmaktadır.



Şekil 3.13 Ağır sıvı testine ait basitleştirilmiş akım şeması

Ağır sıvı testi ve test sonucunda elde edilen ürünlere ait örnek fotoğraf görüntüleri Şekil 3.14'te, ağır sıvı besleme fraksiyonlarına ait kimyasal analiz sonuçları ise her bir boyut fraksiyonu için sırasıyla Çizelge 3.12 ile Çizelge 3.17 arasında sunulmaktadır.



Şekil 3.14 Ağır sıvı testi sonucunda elde edilen ürünlerin görüntüleri

Çizelge 3.12 30+20 mm fraksiyonu ağır sıvı testi sonuçları

-30+20 mm			Batan Ürün			
Yoğunluk (g/cm³)	Ağırlık (%)	Birikimli Ağırlık (%)	Fe (%)	Fe Dağılımı (%)	Birikimli Fe (%)	Birikimli Fe Dağılımı (%)
3.50B	52.20	52.20	57.11	59.49	57.11	59.49
3.50Y 3.20B	19.08	71.28	53.68	20.44	56.19	79.93
3.20Y 3.00B	3.24	74.52	46.37	3.00	55.76	82.92
3.00Y 2.85B	8.57	83.09	47.26	8.08	54.89	91.00
2.85Y 2.70B	8.20	91.29	35.88	5.87	53.18	96.87
2.70Y	8.71	100.00	17.98	3.13	50.11	100.00
Besleme (Hesap)	100.00		50.11	100.00		
Besleme (Analiz)	-	-	53.35	-	-	-

Çizelge 3.13 20+10 mm fraksiyonu ağır sıvı testi sonuçları

-20+10 mm			Batan Ürün			
Yoğunluk (g/cm³)	Ağırlık (%)	Birikimli Ağırlık (%)	Fe (%)	Fe Dağılımı (%)	Birikimli Fe (%)	Birikimli Fe Dağılımı (%)
3.50B	51.04	51.04	56.74	60.04	56.74	60.04
3.50Y 3.20B	18.64	69.68	51.21	19.79	55.26	79.83
3.20Y 3.00B	2.69	72.37	45.59	2.54	54.9	82.37
3.00Y 2.85B	8.74	81.11	45.49	8.24	53.89	90.62
2.85Y 2.70B	7.20	88.31	34.74	5.18	52.33	95.8
2.70Y	11.69	100.00	17.33	4.2	48.24	100.00
Besleme (Hesap)	100.00		48.24	100.00		
Besleme (Analiz)	-	-	52.89	-	-	-

Çizelge 3.14 -10+5 mm fraksiyonu ağır sıvı testi sonuçları

-10+5 mm	Batan Ürün					
	Ağırlık (%)	Birikimli Ağırlık (%)	Fe (%)	Fe Dağılımı (%)	Birikimli Fe (%)	Birikimli Fe Dağılımı (%)
Yoğunluk (g/cm³)	(%)	Ağırlık (%)	(%)	Dağılımı (%)	(%)	Dağılımı (%)
3.50B	56.00	56.00	57.60	66.56	57.60	66.56
3.50Y 3.20B	15.17	71.17	50.71	15.88	56.13	82.44
3.20Y 3.00B	1.50	72.67	46.74	1.45	55.94	83.88
3.00Y 2.85B	8.76	81.43	43.37	7.84	54.59	91.72
2.85Y 2.70B	6.19	87.62	35.96	4.59	53.27	96.32
2.70Y	12.38	100.00	14.42	3.68	48.46	100.00
Besleme (Hesap)	100.00		48.46	100.00		
Besleme (Analiz)	-	-	50.53	-	-	-

Çizelge 3.15 -5+1 mm fraksiyonu ağır sıvı testi sonuçları

-5+1 mm	Batan Ürün					
	Ağırlık (%)	Birikimli Ağırlık (%)	Fe (%)	Fe Dağılımı (%)	Birikimli Fe (%)	Birikimli Fe Dağılımı (%)
Yoğunluk (g/cm³)	(%)	Ağırlık (%)	(%)	Dağılımı (%)	(%)	Dağılımı (%)
3.50B	57.37	57.37	59.24	70.52	59.24	70.52
3.50Y 3.20B	16.23	73.60	50.27	16.93	57.26	87.45
3.20Y 3.00B	2.58	76.19	42.10	2.26	56.75	89.71
3.00Y 2.85B	7.90	84.09	37.64	6.17	54.95	95.88
2.85Y 2.70B	5.30	89.39	23.37	2.57	53.08	98.45
2.70Y	10.61	100.00	7.04	1.55	48.19	100.00
Besleme (Hesap)	100.00		48.19	100.00		
Besleme (Analiz)	-	-	49.36	-	-	-

Çizelge 3.16 -1+0.5 mm fraksiyonu ağır sıvı test sonuçları

-1+0.5 mm	Batan Ürün					
	Yoğunluk (g/cm ³)	Ağırlık (%)	Birikimli Ağırlık (%)	Fe (%)	Fe Dağılımı (%)	Birikimli Fe (%)
3.50B	64.68	64.68	60.51	79.27	60.51	79.27
3.50Y 3.20B	12.11	76.8	49.73	12.20	58.81	91.47
3.20Y 3.00B	3.36	80.16	38.65	2.63	57.96	94.10
3.00Y 2.85B	5.10	85.26	33.48	3.46	56.50	97.56
2.85Y 2.70B	5.11	90.37	15.11	1.56	54.16	99.12
2.70Y	9.63	100.00	4.50	0.88	49.38	100.00
Besleme (Hesap)	100.00		49.38	100.00		
Besleme (Analiz)	-	-	48.82	-	-	-

Çizelge 3.17 -0.5+0.212 mm fraksiyonu ağır sıvı test sonuçları

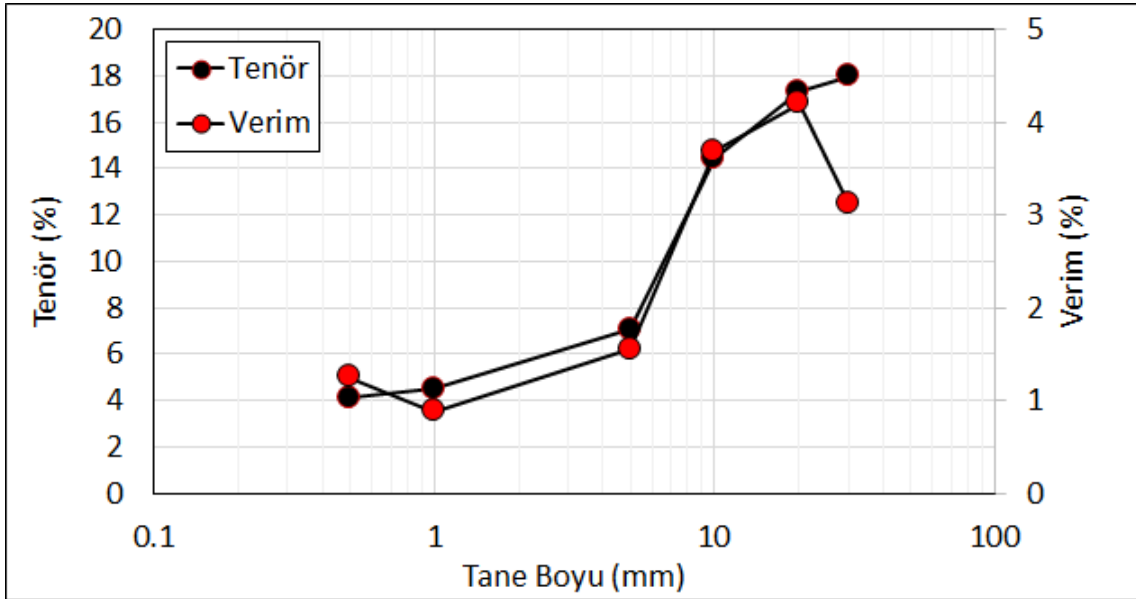
-0.5+0.212 mm	Batan Ürün					
	Yoğunluk (g/cm ³)	Ağırlık (%)	Birikimli Ağırlık (%)	Fe (%)	Fe Dağılımı (%)	Birikimli Fe (%)
3.50B	50.93	50.93	61.66	66.31	61.66	66.31
3.50Y 3.20B	21.71	72.64	52.72	24.17	58.99	90.49
3.20Y 3.00B	5.60	78.24	38.06	4.50	57.49	94.99
3.00Y 2.85B	3.40	81.64	33.44	2.40	56.49	97.39
2.85Y 2.70B	3.94	85.58	16.31	1.36	54.64	98.75
2.70Y	14.42	100.00	4.11	1.25	47.35	100.00
Besleme (Hesap)	100.00		47.35	100.00		
Besleme (Analiz)	-	-	47.32	-	-	-

Ağır sıvı test sonuçları incelendiğinde her bir boyut fraksiyonunda toplam besleme malzemesinin ağırlıkça önemli bir bölümünün 3.5 g/cm³ yoğunluk değerinde batan üründe kaldığı görülmektedir. Tane boyut fraksiyonunun incelenmesi ile -1+0.5 mm fraksiyonuna kadar 3.5 g/cm³ yoğunluk değerinde batan ürün miktarı da önemli ölçüde artmaktadır. Ardından, en ince boyut fraksiyonu olan -0.5+0.212 mm fraksiyonunda 3.5 g/cm³ yoğunluk değerinde batan ürün miktarı %50.93'e düşmektedir.

-30+5 mm arasındaki boyut fraksiyonlardaki ağır sıvı davranımının birbirine daha yakın olduğu ve besleme malzemesinin yaklaşık olarak %50-55 arasında bir kısmının yaklaşık olarak %56-58 toplam Fe tenörü ile kazanılabildiği görülmektedir. -5 mm tane boyu fraksiyonu itibarıyla ise besleme malzemesinin incelenmesi ve beklendiği üzere

serbestleşmenin iyileşmesi ile elde edilen konsantre miktarının ve tenör değerlerinin kayda değer şekilde yükseldiği görülmektedir.

Ağır sıvı test sonuçları en düşük yoğunlukta yüzen ve en yüksek yoğunlukta batan ürünler için boyuta bağlı toplam Fe verim/tenör eğrileri üzerinden değerlendirilmiştir. Ağır sıvı testi 2.70 g/cm^3 yoğunlukta yüzen ürünlerin boya bağlı verim/tenör eğrileri Şekil 3.15'te verilmektedir.

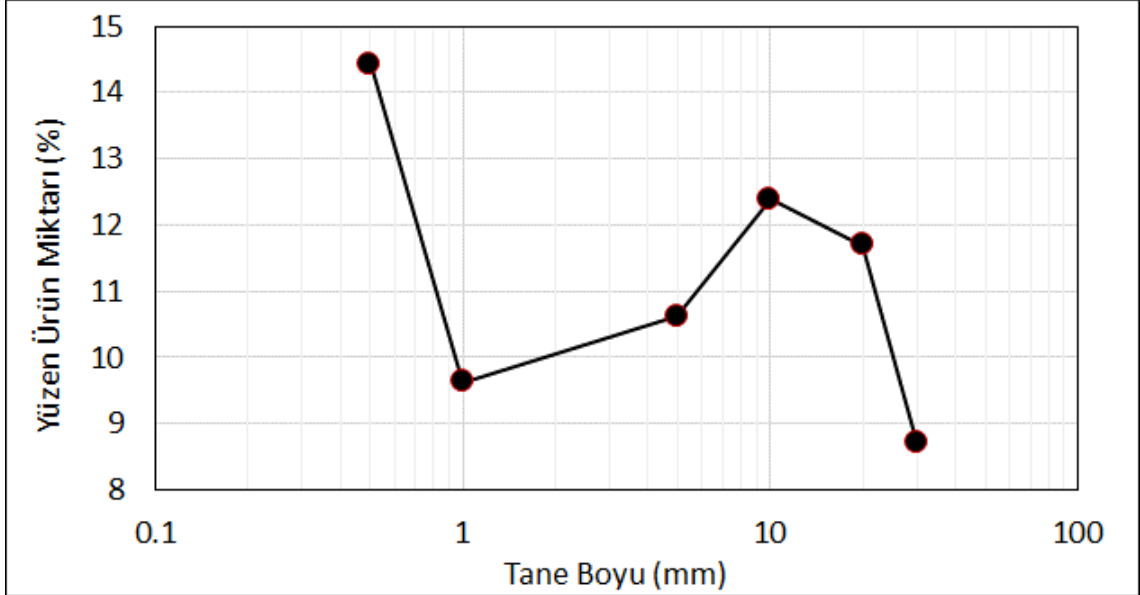


Şekil 3.15 Ağır sıvı testi 2.70 g/cm^3 yüzen ürünlerin toplam Fe verim/tenör değerleri

Şekil 3.15 incelendiğinde ağır sıvı testinde besleme boyu inceldikçe en düşük yoğunlukta yüzen ürün toplam Fe tenörlerinin %18 Fe değerinden %4.11 Fe değerine kadar düştüğü, bununla birlikte en düşük yoğunlukta yüzen ürün içerisinde kalan toplam Fe miktarının da azaldığı görülmektedir. Özellikle 10 mm'nin altındaki fraksiyonlarda besleme içerisindeki toplam demirin %2'sinden daha azı en düşük yoğunlukta yüzen ürün içerisinde kalmaktadır.

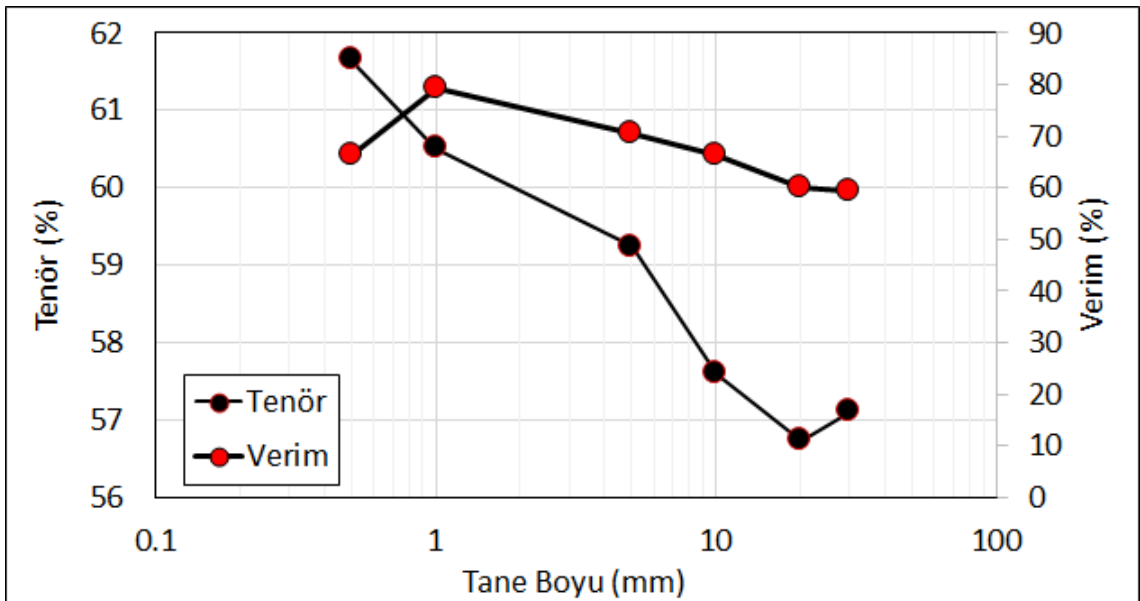
En düşük yoğunluk değerinde uzaklaştırılan malzeme içerisindeki toplam Fe kaybının düşük değerlerde olmasına karşılık bu fraksiyonda yüzen ürün miktarı benzer bir davranış sergilememekte ve 2.70 g/cm^3 yoğunluk değerinde yüzen malzeme miktarı ise %8.71 ile %14.42 arasında değişmektedir (Şekil 3.15). En düşük yoğunlukta yüzen ürün miktarı tane boyunun incilmesi ile bir miktar artış göstermesine karşın en ince boyut fraksiyonu olan $-500+212 \mu\text{m}$ boyut fraksiyonu dışında yakın değerler almaktadır. Bu sonuç, tüvenan

cevherden iri boyda ve düşük yoğunluk değerlerinde kayda değer miktarda bir malzemenin uzaklaştırılmayacağını göstermekte olup, bir diğer deyişle cevherin ağır ortam ile ön zenginleştirmeye çok elverişli olmadığı şeklinde yorumlanmaktadır.



Şekil 3.16 Ağır sıvı testi 2.70 g/cm³ yoğunlukta yüzen ürün miktarları

Ağır sıvı testi 3.50 g/cm³ yoğunlukta batan ürünlerin boya bağlı verim/tenör eğrileri Şekil 3.17’de verilmektedir.



Şekil 3.17 Ağır sıvı testi 3.50 g/cm³ batan ürünlerin toplam Fe verim/tenör değerleri

Şekil 3.17 incelendiğinde ağır sıvı testinde besleme boyu inceldikçe en yüksek yoğunlukta batan ürün toplam Fe tenörlerinin %57.11 Fe değerinden %61.66 Fe değerine doğru sınırlı bir şekilde arttığı, buna paralel olarak serbestleşmedeki kısmi artış ile birlikte toplam Fe verimlerinin de yükseldiği görülmektedir. Özellikle 1 mm'den ince fraksiyonlarda en yüksek yoğunluk değeri olan 3.5 g/cm³'te batan ürünlerin toplam demir tenörleri %60 Fe değerini geçmektedir. Bu koşulda besleme içerisindeki toplam demirin -1+0.5 mm fraksiyonunda %79.27'si, -0.5+0.212 mm fraksiyonunda ise %66.31'i en yüksek yoğunlukta batan ürün içerisinde kazanılmaktadır.

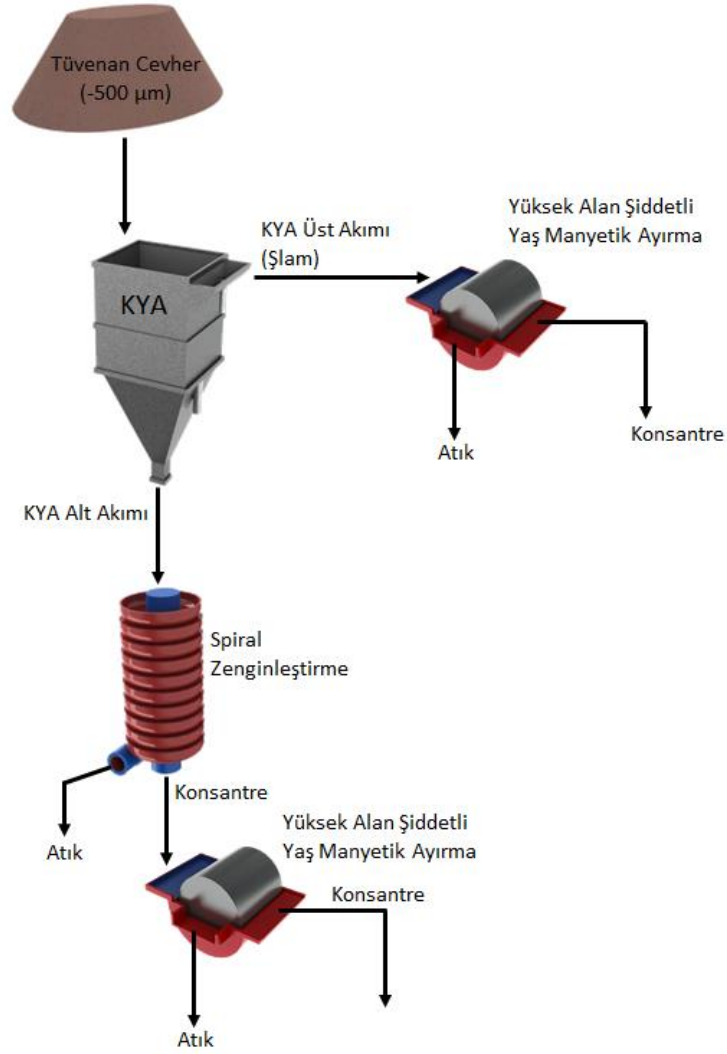
3.3. Zenginleştirme Çalışmaları

Detaylı karakterizasyon çalışmaları ve iri boyda gerçekleştirilen ağır sıvı testlerinin ardından numunenin daha ince boyda zenginleştirme davranımının belirlenmesine yönelik yerçekimi ile zenginleştirme, manyetik ayırma, hidrolik sınıflandırma, seçimli salkımlaştırma ve flotasyon yöntemlerinin birlikte ve kademeli kullanıldığı 3 farklı deneysel yöntemin uygulanmasına karar verilmiştir. MLA analizlerinde görülen serbestleşme durumu ve yöntemlerin boyut sınırları birlikte değerlendirilerek her bir yöntem değişikliğinde farklı incelik değerlerinde cevher numunesi kullanılmıştır.

İlk deneysel yöntemde, cevherin yerçekimi ile zenginleştirmeyi takiben manyetik ayırma ile zenginleştirme davranımının, ikinci yöntemde, manyetik ayırmayı takiben flotasyon ile zenginleştirme davranımının, üçüncü ve son yöntemde ise seçimli salkımlaştırma ile zenginleştirme sonrası flotasyon davranımının belirlenmesi hedeflenmiştir. Zenginleştirme çalışmaları ve sonuçlarına ait detaylar alt başlıklar halinde sunulmaktadır.

3.3.1. Birinci Yöntem ile Yürütülen Zenginleştirme Çalışmaları

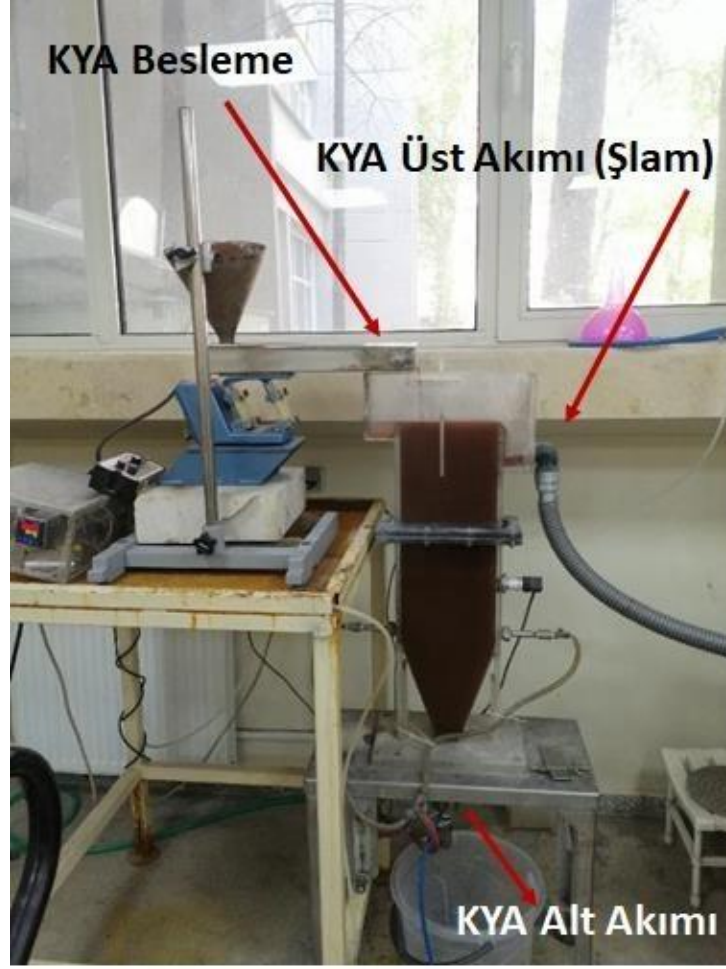
Tüvenan cevher ile yürütülen birinci kademe çalışmalara şlam uzaklaştırma ile başlanmış olup şlam içerisindeki demirin kazanımına yönelik manyetik ayırma testleri de yapılmıştır. Şlam atma işleminden sonra elde edilen malzeme ise farklı koşullarda spiral zenginleştirme testlerine tabi tutulmuştur. Birinci kademe çalışmalarının son aşamasında ise nihai konsantre elde etmek amacıyla en uygun spiral konsantresi ile yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma testleri yapılmıştır. Tüvenan cevher ile yürütülen birinci kademe çalışmalarına ait basitleştirilmiş akım şeması Şekil 3.18'de verilmektedir.



Şekil 3.18 Birinci yöntem ile yürütülen zenginleştirme çalışmalarına ait basitleştirilmiş akım şeması

3.3.1.1. Şlam Uzaklaştırma ve Şlamdan Demir Kazanımına Yönelik Çalışmalar

Malzeme karakterizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlar ile ince boylarda artan safsızlık tenörleri (Çizelge 3.1) ve spiral zenginleştirme yönteminin ince boylarda veriminin düşmesi nedeniyle tüvenan cevherden yeni nesil hidrolik sınıflandırma ekipmanları arasında yer alan kabaran yataklı ayırıcı (KYA) ile şlam uzaklaştırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 Laboratuvar ölçekli KYA ile şlam uzaklaştırma aşaması

Şlam uzaklaştırma işlemi sırasında özellikle KYA üst akımında boyut kontrolü için gerekli su hızı ve basınç set değeri ayarlanmış ayrıca üst akımdan taşan numunenin en üst boyu elek yardımı ile kontrol edilmiştir. KYA ile şlam uzaklaştırma çalışmalarında su hızı 2.65 g/cm^3 yoğunluk değerine sahip $38 \mu\text{m}$ 'lik bir tanenin çökme hızını yenebilecek çizgisel hızın hesaplanması ile belirlenmiştir. bu koşuldaki basınç set değeri ise birimsiz bir değişken olup ekipman içerisindeki malzeme yatağının olduğu durumda sabitlenmiştir. Birinci deneysel yöntem esnasında KYA şlam uzaklaştırma çalışmalarına ait test koşulları

Çizelge 3.18'de sunulmaktadır. Şlam atma işlemi sonrasında elde edilen ürünler toplanarak kurutulmuş ve tartılmıştır. Ayrıca, KYA ürünlerinin boyut dağılımları belirlenmiştir (Çizelge 3.19). KYA ile şlam uzaklaştırma çalışmalarından elde edilen ürünlerin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.20'de sunulmaktadır.

Çizelge 3.18 Birinci deneysel yöntem esnasında KYA ile şlam uzaklaştırma çalışmalarına ait test koşulları

İşletme Değişkeni	Değer
Besleme Hızı (g/dk)	500
Yıkama Suyu Miktarı (l/dk)	3.20
Basınç Set Değeri	126
Besleme Katı İçeriği (%)	50

Çizelge 3.19 Birinci deneysel yöntem KYA ürünleri katı içerikleri ve incelik değerleri

Ürün	Katı İçeriği	İncelik Değeri
	(%)	P80 (µm)
Besleme	50.00	306
KYA Alt Akımı	76.14	409
KYA Üst Akımı	20.26	32

Çizelge 3.20 Şlam uzaklaştırma aşamasına ait sonuçlar

Ürün	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
KYA Üst Akımı	25.68	46.48	16.85	4.78	1.51	0.06	0.21	0.31
KYA Alt Akımı	74.32	52.23	14.20	2.57	0.91	0.04	0.13	0.16
Besleme (Hesap)	100.00	50.75	14.88	3.14	1.06	0.05	0.15	0.20
Besleme (Analiz)	-	50.56	15.17	3.10	1.06	0.05	0.15	0.20

Ürün	Ağırlık (%)	Dağılım (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
KYA Üst Akımı	25.68	23.52	29.08	39.12	36.37	32.68	36.22	40.10
KYA Alt Akımı	74.32	76.48	70.92	60.88	63.63	67.32	63.78	59.90
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tüvenan cevherden şlam uzaklaştırma işlemi sonucunda besleme malzemesinin yaklaşık olarak %74'ü KYA alt akımından alınarak spiral zenginleştirme beslemesi olarak ayrılmıştır. Şlam uzaklaştırma sonucu şlam uzaklaştırılmış ürünün toplam demir tenöründe bir miktar iyileşme ile birlikte özellikle potasyum, kükürt ve fosfor değerlerinde de düşüş gözlenmiştir. Uzaklaştırılan şlam malzemesinin safsızlık verimleri incelendiğinde ise alümina ve fosforun yaklaşık olarak %40'ının, silisin yaklaşık olarak

%30'unun ve diğer safsızlıkların yaklaşık olarak %33-36'sının şlam malzemesi ile uzaklaştırıldığı görülmektedir. Besleme içerisindeki toplam demirin ise yaklaşık olarak %23'ü şlam içerisinde kalmaktadır. Bu durum alt akımdan nispeten daha yüksek yoğunluk değerine sahip ve toplam Fe tenörü yüksek tanelerin alındığını ve alt akım ürün kalitesini arttırdığını göstermektedir.

Birinci deneysel yöntem içerisinde yapılan çalışmalar kapsamında KYA üst akımı (şlam) içerisinde kalan demirin de kazanılmasına yönelik yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma (Carpco) testleri yapılmıştır. Carpco testleri %25 besleme katı oranıyla gerçekleştirilmiştir. Testler, kaba zenginleştirmeyi takiben temizleme aşamalarından oluşmaktadır. Bu kapsamda, besleme numunesi ilk olarak en yüksek manyetik alanda zenginleştirilmiş (4A), ardından, bu aşamadan elde edilen konsantre daha düşük manyetik alan şiddetlerinde (2A ve 1A) temizlenerek nihai konsantre elde edilmiştir. Deneysel çalışmaların her bir aşamasından elde edilen ürünler süzülüp kurutulduktan sonra tartımları alınmıştır. Ardından tüm ürünler kimyasal analize yollanmıştır. KYA üst akımı ile gerçekleştirilen Carpco testlerine ait sonuçlar Çizelge 3.21'de sunulmaktadır.

Çizelge 3.21 KYA üst akımı ile gerçekleştirilen manyetik ayırma test sonuçları

Ürün	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
4A Atık	16.13	22.13	40.49	12.16	3.54	0.17	0.31	0.52
2A Atık	13.63	28.82	31.94	9.62	3.18	0.20	0.35	0.39
1A Atık	8.12	36.79	25.01	6.45	2.34	0.09	0.31	0.38
Nihai Konsantre	62.12	56.86	7.13	1.91	0.48	0.02	0.18	0.22
Besleme (Hesap)	100.00	45.81	17.34	4.98	1.49	0.08	0.23	0.30
Besleme (Analiz)	-	46.48	16.85	4.78	1.51	0.06	0.21	0.31
Ürün	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
4A Atık	16.13	7.79	37.65	39.36	38.26	35.69	21.23	27.54
2A Atık	13.63	8.58	25.1	26.32	29.02	36.35	20.47	17.46
1A Atık	8.12	6.52	11.7	10.51	12.74	9.74	10.86	10.13
Nihai Konsantre	62.12	77.11	25.54	23.81	19.99	18.22	47.45	44.88
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

KYA üst akımı ile gerçekleştirilen yüksek alan şiddetli manyetik ayırma test sonuçları incelendiğinde manyetik alan şiddetinin düşmesi ile elde edilen konsantrenin toplam demir tenörünün yaklaşık olarak %46 Fe değerinden %56.86 Fe değerine kadar yükseldiği görülmektedir. Ancak, bu koşulda dahi nihai konsantre SiO₂ tenörü %7.13'te kalmaktadır. Nihai konsantre içerisindeki diğer safsızlık tenörlerinin de yüksek olduğu görülmektedir. Bu koşulda %23.52'si KYA üst akımında kaybedilen toplam demirin %77.11'inin tekrar kazanılabildiği görülmektedir. Şlam fraksiyonunun yaklaşık olarak 40 µm'den ince olduğu göz önünde bulundurulduğunda, düşük serbestleşme ve demir minerallerinin safsızlık içeren mineraller ile yüksek bağlılık derecesinin konsantredeki safsızlık değerlerinin düşmesine engel olduğu düşünülmektedir. Manyetik konsantre içerisindeki K₂O değerleri MLA bulguları ile örtüşmekte K-feldispat taneleri ile Fe oksit/hidroksit tanelerinin ikili bağlılık durumunun devam ettiğinin açık bir göstergesidir. Benzer şekilde Al₂O₃ içeriğinin de yüksek değerlerde kalması Fe Oksit/Hidroksit kil karışımlarının yetersiz serbestleşmesi ile ilişkilendirilmektedir. Bu boyda elde edilen bir konsantrenin yaklaşık olarak sinter/pelet özellikleri olan %65 Fe tenörü ve %3-5 SiO₂ içeriğinden uzak olması tek başına satılabilir bir ürün olarak değerlendirilemeyeceğini göstermektedir.

3.3.1.2. Spiral Zenginleştirme Çalışmaları

KYA ile etkin şekilde şlam fraksiyonu uzaklaştırılan ve yaklaşık olarak -500+38µm boyut aralığında sınıflandırılan malzeme ile spiral zenginleştirme testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20 Spiral zenginleştirme deneyi için hazırlanan temsili numune

Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği spiral zenginleştirici, 600 mm çapında ve 5 m uzunluğunda olup, spiral etrafında 7 tam tur yapan sarmaldan oluşmaktadır. Sarmalların eğimi, merkez kolona yakın olan kısımda 18° iken dış çepere yakın olan kısımda 10° 'dir. 2 farklı hareket eden bölücü bıçağı bulunan bu spiralde bıçak ayarı değiştirilerek ürün bantlarından farklı özelliklerde konsantre, ara ürün ve atık elde edilebilmektedir (Şekil 3.21).

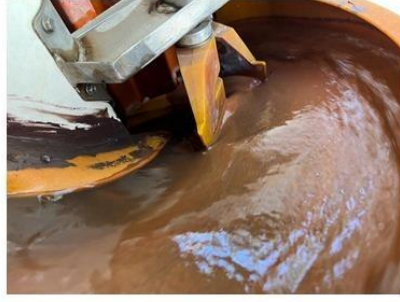


Şekil 3.21 Spiral zenginleştirici genel görünümü

Spiral zenginleştirme testleri esnasında her bir turda yaklaşık 30 kg malzeme %35 katı içerecek şekilde kapalı devre deney düzeneğinin karıştırılmalı tank haznesinde hazırlanmış ve ardından pompa yardımı ile spiral zenginleştiriciye beslenmiştir. Yapılan tüm bu numune alma çalışmaları, sabit bir debi ayarında gerçekleştirilmiştir. Test esnasında, gerekli bıçak ayarlarının yapılmasının ardından devrenin kararlı duruma gelmesi beklenmiş ve üç farklı bıçak koşulunda konsantre, ara ürün ve atık akışlarından eş zamanlı numuneler toplanmıştır. Tüm testlerden elde edilen numuneler kurutulup tartılarak kimyasal analize gönderilmiştir. Spiral zenginleştirme testlerinde kullanılan bıçak ayarlarını gösteren fotoğraf görüntüleri Şekil 3.22'de verilmiştir.



Dar bıçak



Orta bıçak



Geniş bıçak

Şekil 3.22 Farklı bıçak pozisyonlarında gerçekleştirilen spiral zenginleştirme çalışmaları

Spiral zenginleştirici ürün çıkışında yer alan ve toplanan ürünlerin miktarını belirlemek için konumlandırılabilen bölücü bıçakların pozisyonları değiştirilerek farklı özelliklerde ürün alınması sağlanabilmektedir. Bölücü bıçakların pozisyonları spiral zenginleştirme deneylerinde ana işletme değişkeni olarak belirlenmiştir. Dar bıçak pozisyonunda hedef, yüksek tenör elde etmek olduğundan; bölücü bıçaklar, merkez kolona daha yakın şekilde konumlandırılmıştır. Orta ve geniş bıçak pozisyonlarında ise konsantre içerisindeki toplam Fe veriminin artırılması hedeflendiğinden; bölücü bıçaklar, konsantre bandını daha geniş alacak şekilde konumlandırılmıştır. Spiral zenginleştirme testlerine ait sonuçlar dar bıçak, orta bıçak ve geniş bıçak koşulları için sırasıyla Çizelge 3.22, Çizelge 3.23 ve Çizelge 3.24'de sunulmaktadır.

Çizelge 3.22 Spiral zenginleştirme sonuçları (Dar Bıçak)

Ürün	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Konsantre	1.91	60.37	6.14	1.29	0.34	0.03	0.11	0.13
Ara Ürün	77.90	54.07	11.90	1.91	0.77	0.04	0.12	0.17
Atık	20.19	43.05	20.04	4.77	1.71	0.07	0.2	0.25
Besleme (Hesap)	100.00	51.97	13.43	2.48	0.95	0.05	0.13	0.19
Besleme (Analiz)	-	52.23	14.20	2.57	0.91	0.04	0.13	0.16

Ürün	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Konsantre	1.91	2.22	0.87	1.00	0.69	1.31	1.6	1.34
Ara Ürün	77.90	81.05	69.01	60.10	63.05	65.58	67.51	71.43
Atık	20.19	16.73	30.12	38.90	36.26	33.1	30.89	27.23
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Çizelge 3.23 Spiral zenginleştirme sonuçları (Orta Bıçak)

Ürün	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Konsantre	15.27	60.14	6.77	1.29	0.35	0.03	0.1	0.13
Ara Ürün	65.23	51.90	15.77	2.47	0.91	0.04	0.11	0.18
Atık	19.50	36.44	30.17	5.61	2.32	0.09	0.18	0.24
Besleme (Hesap)	100.00	50.14	17.20	2.90	1.10	0.05	0.12	0.18
Besleme (Analiz)	-	52.23	14.20	2.57	0.91	0.04	0.13	0.16

Ürün	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Konsantre	15.27	18.31	6.01	6.79	4.89	7.95	12.58	10.78
Ara Ürün	65.23	67.52	59.8	55.52	53.97	56.15	59.54	63.79
Atık	19.50	14.17	34.19	37.69	41.13	35.91	27.88	25.42
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Çizelge 3.24 Spiral zenginleştirme sonuçları (Geniş Bıçak)

Ürün	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Konsantre	65.37	55.49	10.87	1.95	0.68	0.04	0.12	0.15
Ara Ürün	18.99	45.92	21.47	2.90	1.29	0.06	0.13	0.20
Atık	15.64	43.35	19.81	5.26	1.69	0.07	0.21	0.29
Besleme (Hesap)	100.00	51.77	14.28	2.65	0.95	0.05	0.14	0.18
Besleme (Analiz)	-	52.23	14.20	2.57	0.91	0.04	0.13	0.16

Ürün	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Konsantre	65.37	70.65	46.76	45.45	41.28	47.90	57.46	55.66
Ara Ürün	18.99	16.52	30.26	21.88	28.26	26.90	18.52	20.21
Atık	15.64	12.84	22.98	32.67	30.46	25.20	24.02	24.13
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

KYA alt akım numunesi ile farklı bıçak konumlarında gerçekleştirilen spiral zenginleştirme testlerinde bıçak konumunun dardan geniş doğru hareketi ile konsantre miktarı ağırlıkça %1.91 değerinden %65.37 değerine kadar yükselmiştir. Bıçak konumunun artması aynı deneysel koşullarda spiral kesit alanı üzerindeki daha fazla miktarda malzemenin konsantre haznesine gelmesine neden olmuştur.

Beklendiği üzere bölücü bıçak pozisyonu merkez kolondan uzaklaştıkça, toplam Fe verim değerlerinde artış gerçekleşmiştir. Ancak, bıçak konumunun dardan geniş doğru hareketi ile konsantre safsızlık değerleri de hızlı şekilde artmıştır. Spiral zenginleştirme deneylerinde elde edilen en yüksek toplam Fe verimi en geniş bıçak konumunda %70.65 olarak hesaplanmıştır.

Beklendiği üzere verim değerlerinin aksine en yüksek konsantre toplam Fe tenörü ise en dar bıçak pozisyonunda ölçülmüştür. En dar bıçak pozisyonunda konsantre toplam Fe tenörü %60.37 Fe değerine çıkmıştır. Bıçak konumunun açılması, bir başka deyişle spiral kesit alanı içerisinde daha düşük yoğunluk değerine sahip tanelerin de konsantreye alınması ile toplam Fe tenörü orta bıçak ayarında %60.14 Fe değerine en geniş bıçak ayarında ise %55.49 Fe değerine düşmüştür.

Spiral zenginleştirme deneylerinde yüksek tenörlü (>%60 Fe) bir konsantre hedeflenmesi durumunda besleme malzemesinin ağırlıkça %2'sinin konsantre olarak alınabildiği bu

koşuldaki toplam demir veriminin ise oldukça düşük bir değeraldığı görülmektedir. Konsantre demir veriminin artırılması amacıyla kontrollü şekilde dar bıçak pozisyonundan orta bıçak pozisyonuna geçildiğinde ise konsantre toplam Fe tenörü bir miktar azalmakla beraber konsantre safsızlık içerikleri hızlı şekilde artış göstermiştir. Geniş bıçak konumunda konsantre toplam demir tenörü %55.49 Fe, SiO₂ tenörü ise %10.87 değerini almaktadır. Bu sonuç, yetersiz serbestleşme ve safsızlık içeren mineraller ile Fe oksit/hidroksit minerallerinin yüksek bağlılık dereceleri ile ilişkilendirilmektedir.

3.3.1.3. Yüksek Alan Şiddetli Yaş Manyetik Ayırma Çalışmaları

Spiral zenginleştirme testlerinden elde edilen konsantrenin özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik en geniş bıçak açıklığında toplanan konsantre ile yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23 Geniş bıçak pozisyonunda elde edilen spiral zenginleştirme konsantresi

Manyetik ayırma deneyleri Şekil 3.24'te gösterilen Carpco marka HIMS model çelik bilya matrisli laboratuvar tipi cihaz ile yapılmıştır. Bu cihazda alan şiddeti 0 - 20000 gauss (0-6 amper) arasında değiştirilebilmekte ve manyetik alanın dağıtılmasında matris olarak çelik bilyalar kullanılmaktadır. Yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma deneylerinde manyetik alan şiddetinin ürün özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 3.24 Carpco yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcı

Test esnasında şlam numunesi ile gerçekleştirilen çalışmaya benzer şekilde yüksek alan şiddetinden düşük alan şiddetine doğru temizleme aşamaları uygulanarak nihai konsantre elde edilmiştir. %25 besleme katısıyla gerçekleştirilen yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma (Carpco) testleri sırasıyla 6A, 4A ve 2A alan şiddetlerinde her bir aşamanın beslemesi bir önceki aşamanın konsantresi olacak şekilde planlanmıştır. Her bir test esnasında matris sabit hızda ve miktarda (2 litre) yıkama suyu kullanarak temizlenmiştir. Yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma sonucu elde edilen her bir konsantre ve atık numunesi 105 °C sıcaklıktaki etüvde kurutulmuştur. Ardından, tüm numunelerden kimyasal analizlerde kullanılmak üzere, numune bölücü ile yeterli miktarda numune alınmıştır. Spiral konsantresi ile yürütülen Carpco testlerine ait sonuçlar Çizelge 3.25'te sunulmaktadır.

Spiral testinden elde edilen konsantre ile kademeli gerçekleştirilen manyetik ayırma testi sonunda besleme malzemesinin ağırlıkça %11.48'i manyetik olmayan atık olarak uzaklaştırılabildiği görülmüştür. Manyetik alan şiddetinin kademeli düşürülmesi sonucunda %59.46 Fe tenörlü bir konsantre elde edilmiştir. Manyetik ayırma sonucu uzaklaştırılan miktarın az olması nihai manyetik konsantre içerisindeki safsızlık değerlerinin yüksek kalmasına neden olmuştur. Bu durum spiral zenginleştirme aşamasına benzer şekilde yetersiz serbestleşme ve safsızlık içeren minerallerin özellikle Fe Oksit/hidroksit mineralleri ile yüksek oranda ikili bağlı olmasının bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 3.25 Spiral konsantresi ile gerçekleştirilen Carpco testi sonuçları

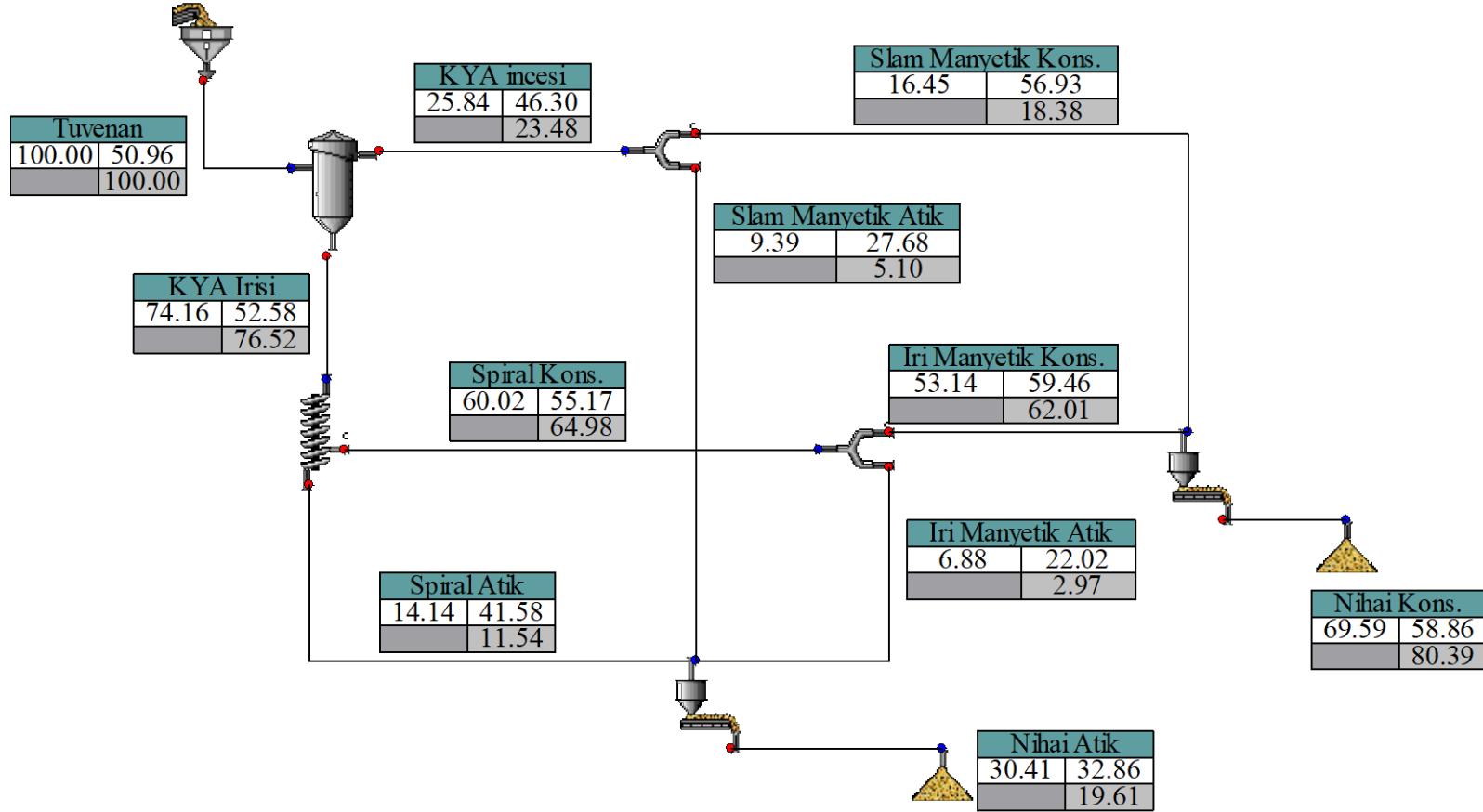
Ürün	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
6A Atık	2.19	11.55	63.26	6.44	3.96	0.58	0.41	0.36
4A Atık	4.37	15.40	57.32	6.12	3.45	0.43	0.31	0.34
2A Atık	4.92	24.35	47.96	5.24	2.93	0.23	0.23	0.22
Nihai Konsantre	88.52	59.46	7.68	1.43	0.33	0.03	0.09	0.14
Besleme	100.00	54.76	13.05	1.93	0.67	0.07	0.11	0.16
Besleme (Analiz)	-	55.49	10.87	1.95	0.68	0.04	0.12	0.15

Ürün	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
6A Atık	2.19	0.46	10.60	7.29	12.93	18.77	7.89	5.00
4A Atık	4.37	1.23	19.21	13.85	22.55	27.77	11.92	9.44
2A Atık	4.92	2.19	18.08	13.34	21.52	16.50	9.99	6.87
Nihai Konsantre	88.52	96.12	52.11	65.53	43.00	36.96	70.20	78.70
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Herhangi bir numune alma işlemi sırasında, sistemin dinamik yapısından, fiziksel koşullardan, ölçüm ve analiz işlemlerinden ve insan faktöründen kaynaklanan bazı hatalar ortaya çıkmaktadır. Madde denkliği, ham verilerin istatistiksel olarak hatalardan arındırılarak, devre etrafındaki akışların ve tenör değerlerinin en iyi şekilde tahmin edilmesini kapsamaktadır.

Birinci, ikinci ve üçüncü yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme testlerinden elde edilen numunelerin ölçülen ağırlıkları ve kimyasal analiz sonuçları kullanılarak her bir yöntem için madde denkliği ve metalürjik denklik oluşturulmuştur. Madde denkliği ve metalürjik denklik sonucunda elde edilen ve istatistiksel olarak hatalardan arındırılan tenör ve akış değerleri ile sonuçların değerlendirilmesi aşamasında kullanılan nihai veriler elde edilmiştir. Madde denkliği esnasında tüm numunelerin ölçülen ağırlıkları ile Fe, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, S ve P₂O₅ tenörleri kullanılarak madde denkliği ve metalürjik denklik sağlanmıştır. Deneysel çalışmalar bölümünde detayları verildiği üzere birinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmaları şlam atma, spiral zenginleştirme ve son olarak manyetik ayırma aşamalarını içermektedir. Birinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmaları sonucu hesaplanan ürün miktarları ile her bir üründeki toplam Fe tenörü ve verimi Şekil 3.25 ve Çizelge 3.26'da sunulmaktadır.

TPH - Solids (Bal)	Assay - Fe (Bal)
No Selection	Rec - Fe (Bal)



Şekil 3.25 Birinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarına ait madde denklığı sonuçları

Çizelge 3.26 Birinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarına ait detaylı madde denkliği sonuçları

Akış Kolu	Akış Miktarı (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Tüvenan	100.00	50.96	14.59	3.13	1.06	0.05	0.15	0.20
KYA incesi	25.84	46.30	16.97	4.82	1.47	0.07	0.22	0.30
KYA Irisi	74.16	52.58	13.76	2.54	0.92	0.05	0.13	0.16
Spiral Atik	14.14	41.58	24.31	5.02	1.95	0.08	0.19	0.24
Spiral Kons	60.02	55.17	11.28	1.96	0.68	0.04	0.12	0.15
Ince Man. Kons.	16.45	56.93	7.14	1.90	0.48	0.02	0.17	0.22
Iri Man. Kons.	53.14	59.46	7.68	1.43	0.33	0.03	0.09	0.14
Iri Man. Atik	6.88	22.02	39.11	6.05	3.38	0.11	0.33	0.20
Ince Man. Atik	9.39	27.68	34.19	9.93	3.21	0.15	0.31	0.44
Nihai Konsantre	69.59	58.86	7.55	1.54	0.37	0.03	0.11	0.16
Nihai Atik	30.41	32.86	30.71	6.77	2.66	0.10	0.26	0.29

Akış Kolu	Akış Miktarı (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Tüvenan	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
KYA incesi	25.84	23.48	30.05	39.78	35.78	33.53	37.13	39.13
KYA Irisi	74.16	76.52	69.95	60.22	64.22	66.47	62.87	60.87
Spiral Atik	14.14	11.54	23.57	22.67	25.92	21.30	17.25	16.83
Spiral Kons	60.02	64.98	46.39	37.55	38.30	45.17	45.62	44.04
Ince Man. Kons.	16.45	18.38	8.05	10.01	7.46	6.40	18.44	18.26
Iri Man. Kons.	53.14	62.01	27.95	24.26	16.45	30.43	30.94	37.17
Iri Man. Atik	6.88	2.97	18.43	13.29	21.85	14.74	14.68	6.87
Ince Man. Atik	9.39	5.10	22.00	29.77	28.32	27.13	18.69	20.87
Nihai Konsantre	69.59	80.39	36.00	34.27	23.91	36.83	49.38	55.43
Nihai Atik	30.41	19.61	64.00	65.73	76.09	63.17	50.62	44.57

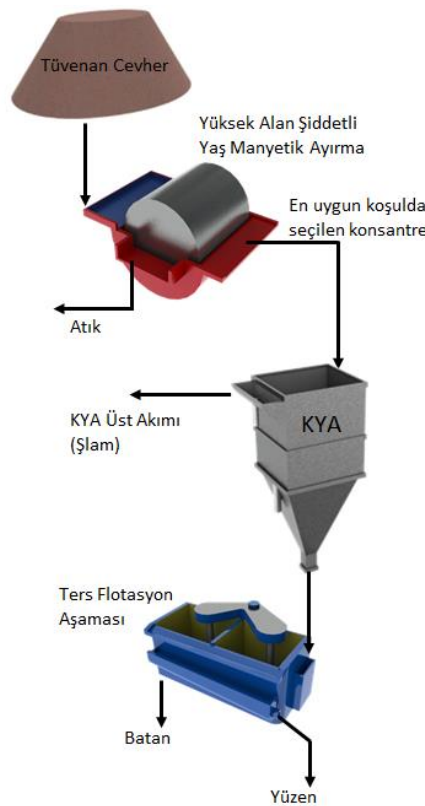
Çizelge 3.26 incelendiğinde birinci deneysel yöntem ile -500 µm boyunda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda besleme malzemesinin ağırlıkça %69.59'unun nihai konsantre olarak kazanıldığı belirlenmiştir. Madde denkliği sonucu hesaplanan nihai konsantrenin toplam Fe tenör ve verimi ise sırasıyla %58.86 Fe ve %80.39 şeklindedir. Birinci deneysel yöntemde beslemedeki toplam demirin yaklaşık olarak %80'i nihai konsantrede kazanılmıştır. Çalışmada fiziksel zenginleştirme

yöntemleri için uygun boylarda deneyler yapılmasına karşın malzeme karakterizasyon çalışmaları aşamasında da net olarak görülen yetersiz serbestleşme sonucu SiO_2 , Al_2O_3 ve K_2O içerikleri yüksek değerlerde kalmaktadır.

3.3.2. İkinci Yöntem ile Yürütülen Zenginleştirme Çalışmaları

Birinci yöntem kapsamında -500 μm tüvenan cevher ile yürütülen çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve serbestleşme analizleri birlikte değerlendirilerek ikinci yöntem kapsamında tüvenan cevher daha ince boylara öğütülmüş ve doğrudan yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma testlerine tabi tutulmuştur.

Tüvenan cevherin doğrudan yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma ile zenginleştirilmesi aşamasında, tane boyu ve manyetik alan şiddetinin ürün özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Manyetik ayırma testlerinde en uygun koşulda elde edilen konsantre ile şlam uzaklaştırma aşamasını takiben kapsamlı flotasyon testleri gerçekleştirilmiştir. İkinci yöntem ile yürütülen zenginleştirme çalışmalarına ait basitleştirilmiş akım şeması Şekil 3.26'da verilmektedir.



Şekil 3.26 İkinci yöntem ile yürütülen zenginleştirme çalışmalarına ait basitleştirilmiş akım şeması

3.3.2.1. Yüksek Alan Şiddetli Yaş Manyetik Ayırma Testleri

İkinci deneysel yöntem kapsamında gerçekleştirilen yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma testlerinde sırasıyla tamamı -212 µm, -150 µm, 106 µm, 75 µm ve 53 µm'ye öğütülen temsili tüvenan cevher numuneleri kullanılmıştır.

Test esnasında diğer çalışmalara benzer şekilde yüksek alan şiddetinden düşük alan şiddetine doğru temizleme aşamaları uygulanarak nihai konsantre elde edilmiştir. %25 besleme katısıyla gerçekleştirilen yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma (Carpco) testleri sırasıyla 6A, 3A ve 1A alan şiddetlerinde her bir aşamanın beslemesi bir önceki aşamanın konsantresi olacak şekilde planlanmıştır. Her bir test esnasında matris sabit hızda ve miktarda (2 litre) yıkama suyu kullanarak temizlenmiştir Yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma sonucu elde edilen her bir konsantre ve atık numunesi 105 °C sıcaklıktaki etüvde kurutulmuştur. Ardından, tüm numunelerden kimyasal analizlerde kullanılmak üzere, numune bölücü ile yeterli miktarda numune alınmıştır. Tüvenan cevher ile farklı öğütme boylarında gerçekleştirilen Carpcö testlerine ait sonuçlar Çizelge 3.27 ile Çizelge 3.31 arasında sunulmaktadır.

Çizelge 3.27 Tüvenan cevher -212 µm Carpcö testi sonuçları

Ürün	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
6A Atık	5.77	16.96	50.07	9.72	3.59	0.37	0.43	0.55
3A Atık	3.57	20.34	42.60	9.86	3.97	0.41	0.41	0.50
1A Atık	11.44	27.46	35.18	7.20	3.36	0.21	0.32	0.34
Nihai Konsantre	79.22	57.85	7.90	1.89	0.47	0.04	0.16	0.18
Besleme (Hesap)	100.00	50.68	14.69	3.23	1.11	0.09	0.20	0.23
Besleme (Analiz)	-	50.56	15.17	3.10	1.06	0.05	0.15	0.20

Ürün	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
6A Atık	5.77	1.93	19.67	17.35	18.72	24.58	12.38	13.74
3A Atık	3.57	1.43	10.34	10.88	12.80	16.58	7.46	7.72
1A Atık	11.44	6.20	27.39	25.47	34.68	27.17	18.18	16.83
Nihai Konsantre	79.22	90.44	42.6	46.31	33.80	31.67	61.98	61.71
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Çizelge 3.28 Tüvenan cevher -150 µm Carpco testi sonuçları

Ürün	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
6A Atık	8.67	15.41	56.35	9.41	4.21	0.19	0.35	0.45
3A Atık	6.21	22.35	44.18	9.08	4.26	0.17	0.29	0.41
1A Atık	8.35	33.15	31.45	6.17	2.62	0.10	0.28	0.28
Nihai Konsantre	76.77	59.28	7.43	1.80	0.35	0.02	0.14	0.18
Besleme (Hesap)	100.00	51.00	15.96	3.28	1.12	0.05	0.18	0.23
Besleme (Analiz)	-	50.56	15.17	3.10	1.06	0.05	0.15	0.20

Ürün	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
6A Atık	8.67	2.62	30.62	24.90	32.6	34.98	16.86	17.26
3A Atık	6.21	2.72	17.19	17.21	23.65	21.95	9.88	11.26
1A Atık	8.35	5.43	16.46	15.72	19.55	17.54	13.05	10.34
Nihai Konsantre	76.77	89.23	35.74	42.17	24.21	25.54	60.21	61.13
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Çizelge 3.29 Tüvenan cevher -106 µm Carpco testi sonuçları

Ürün	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
6A Atık	12.55	19.32	49.01	9.09	3.92	0.17	0.28	0.39
3A Atık	3.09	17.81	51.80	10.34	4.34	0.19	0.26	0.43
1A Atık	9.26	35.56	29.13	5.66	2.43	0.09	0.28	0.30
Nihai Konsantre	75.11	59.20	6.99	1.59	0.35	0.02	0.12	0.13
Besleme (Hesap)	100.00	50.73	15.70	3.18	1.11	0.05	0.16	0.19
Besleme (Analiz)	-	50.56	15.17	3.10	1.06	0.05	0.15	0.20

Ürün	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
6A Atık	12.55	4.78	39.20	35.9	44.29	43.83	21.82	26.09
3A Atık	3.09	1.08	10.18	10.04	12.05	11.76	4.94	7.07
1A Atık	9.26	6.49	17.18	16.48	20.21	17.27	16.15	14.8
Nihai Konsantre	75.11	87.65	33.45	37.58	23.45	27.13	57.09	52.04
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Çizelge 3.30 Tüvenan cevher -75 µm Carpco testi sonuçları

Ürün	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
6A Atık	12.26	21.29	46.69	8.82	3.96	0.17	0.29	0.45
3A Atık	9.17	28.49	36.39	7.90	3.21	0.13	0.29	0.37
1A Atık	10.71	38.75	24.57	5.15	1.97	0.08	0.28	0.35
Nihai Konsantre	67.87	59.97	6.24	1.47	0.28	0.02	0.12	0.18
Besleme (Hesap)	100.00	50.07	15.92	3.35	1.18	0.05	0.18	0.25
Besleme (Analiz)	-	50.56	15.17	3.10	1.06	0.05	0.15	0.20

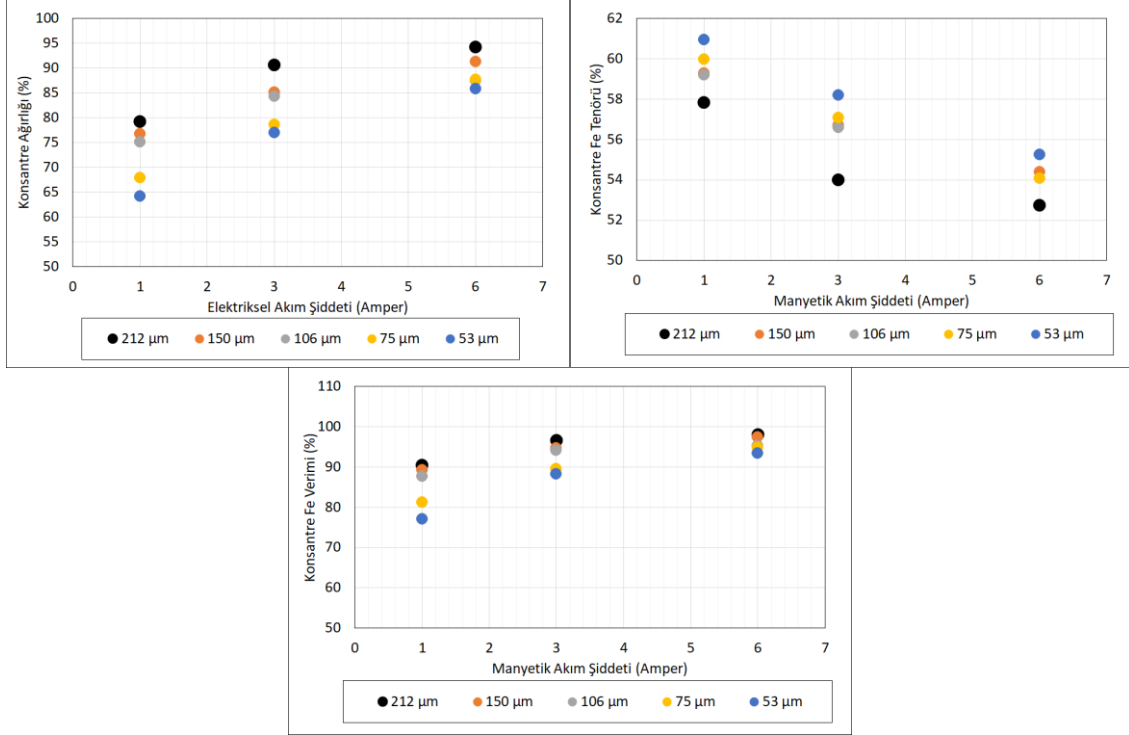
Ürün	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
6A Atık	12.26	5.21	35.93	32.23	41.06	41.07	20.16	22.17
3A Atık	9.17	5.22	20.95	21.59	24.93	22.19	14.97	13.64
1A Atık	10.71	8.29	16.53	16.44	17.86	17.01	17.19	15.07
Nihai Konsantre	67.87	81.28	26.59	29.74	16.16	19.72	47.68	49.12
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Çizelge 3.31 Tüvenan cevher -53 µm Carpco testi sonuçları

Ürün	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
6A Atık	14.15	23.38	44.53	8.90	3.46	0.14	0.27	0.42
3A Atık	8.90	29.91	34.81	7.86	3.15	0.12	0.32	0.36
1A Atık	12.75	44.36	18.35	3.89	1.32	0.05	0.29	0.29
Nihai Konsantre	64.20	60.94	5.51	1.38	0.22	0.01	0.11	0.15
Besleme (Hesap)	100.00	50.75	15.27	3.34	1.08	0.04	0.17	0.22
Besleme (Analiz)	-	50.56	15.17	3.10	1.06	0.05	0.15	0.20

Ürün	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
6A Atık	14.15	6.52	41.24	37.69	45.26	44.80	22.02	26.44
3A Atık	8.90	5.24	20.27	20.93	25.89	23.80	16.45	14.25
1A Atık	12.75	11.15	15.32	14.85	15.61	14.22	20.95	16.46
Nihai Konsantre	64.20	77.09	23.16	26.52	13.23	17.18	40.57	42.85
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Yüksek alan şiddetli manyetik ayırma testlerinde öğütme boyu ve elektriksel alan şiddetinin her bir aşamadaki konsantre miktarı, konsantre Fe tenörü ve verimi ile ilişkileri Şekil 3.27’de verilmektedir.



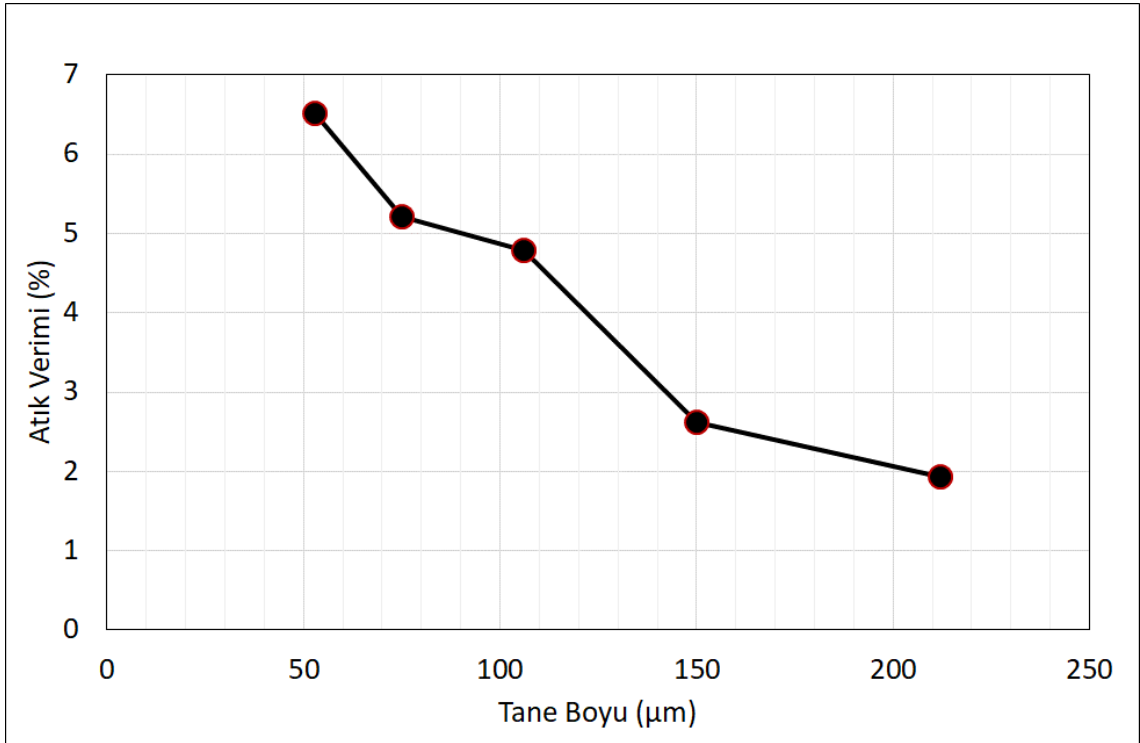
Şekil 3.27 Carpco testlerinde öğütme boyu ve elektriksel alan şiddetinin ürün özelliklerine etkisi

Şekil 3.27 incelendiğinde manyetik alan şiddetinin azalması ile her bir tane boyu fraksiyonu için elde edilen konsantre miktarının da azaldığı görülmektedir. Manyetik alan şiddetinin azalması daha fazla miktarda tanenin manyetik alandan kurtularak yıkama suyu etkisi altında yerçekimi kuvveti yönünde hareket etmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum da konsantreye gelen malzeme miktarını düşürmektedir. Aynı manyetik alan şiddetleri dikkate alındığında ise besleme boyunun incelmesi ile elde edilen konsantre miktarında azalma görülmektedir. Bu durumun tane boyundaki incelme ile beraber serbestleşme derecesindeki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Konsantre Fe tenörü ve verimi beklendiği üzere ters ilişki göstermektedir. Besleme boyunun incelmesiyle yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma testinden elde edilen konsantre miktarı ve demir verimi azalırken, demir tenörünün arttığı görülmektedir. Toplam Fe tenörünün en yüksek değeri, en ince besleme boyu ve manyetik alan şiddetinin en düşük olduğu noktada elde edilmiştir. Buna karşın, toplam Fe verimi tüm besleme

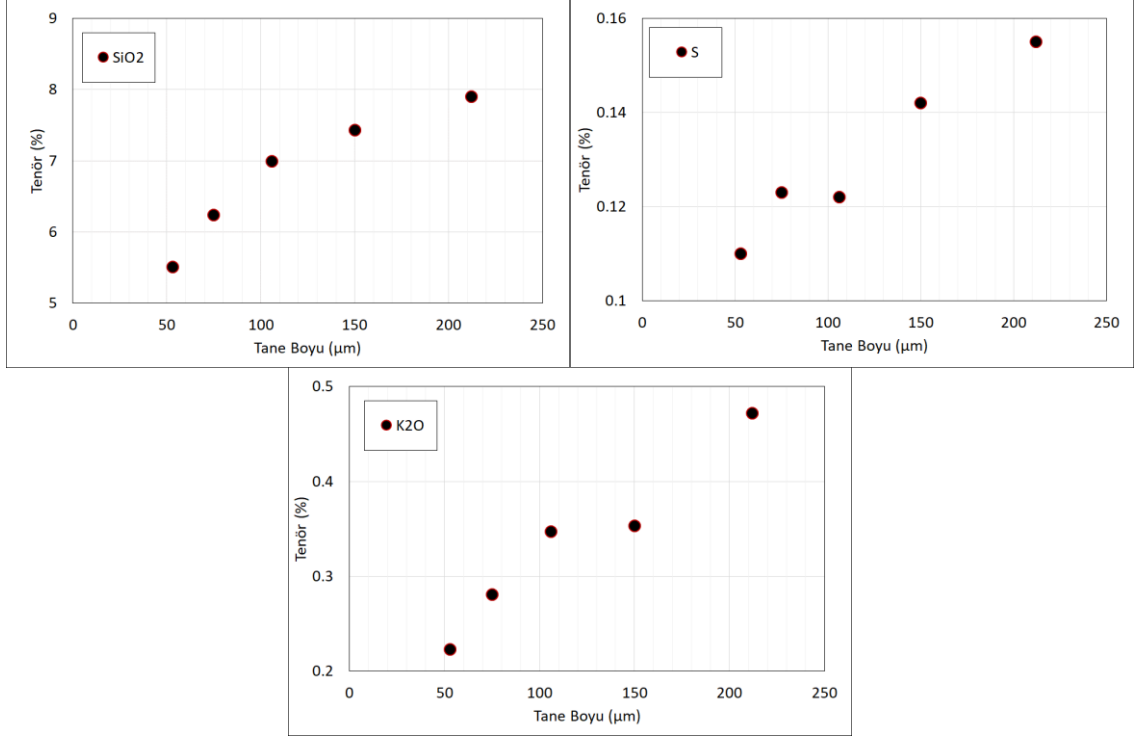
boylarında manyetik alan şiddetinin en yüksek olduğu noktada elde edilmiştir. Bu durum, besleme boyu irileştikçe serbestleşme oranlarının düşmesi ve manyetik alan şiddeti arttıkça düşük manyetik duyarlılığa sahip mineraller ile demirli minerallere bağlı olan serbestleşmemiş tanelerin manyetik ürüne gelme oranının artması ile ilişkilendirilmektedir.

Yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma besleme boyunun 212 μm 'den 53 μm 'ye düşürülmesi sonucunda konsantre toplam Fe tenörü %57.85 Fe değerinden %60.94 Fe değerine yükselebilmektedir. Ancak bu durumda toplam Fe verimi önemli derecede azalmaktadır. -75 μm ve -53 μm inceliklerde gerçekleştirilen çalışmalarda en yüksek alan şiddetinde (6A) atık olarak alınan ürünlerin toplam Fe tenörleri ile aynı alan şiddetindeki daha iri besleme boylarının atık tenörleri arasında ciddi bir fark gözlenmiştir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28 Besleme boyu ile 6A manyetik alan şiddetinde atık veriminin ilişkisi

Tane boyu inceldikçe konsantrenin içerdiği safsızlıklarda düşüş olduğu görülmektedir (Şekil 3.29). Ancak, 106 μm 'den ince tane boylarında konsantre miktarı ve demir veriminde önemli bir kayıp yaşanmaktadır. Bu durumun, ince boylarda düşük manyetik duyarlılığa sahip demirli minerallerin daha fazla miktarda manyetik olmayan ürüne kaçarak toplam Fe verimini düşürmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.29 Besleme boyu ile nihai manyetik konsantre safsızlık içeriklerinin değişimi

Bu sebeple, flotasyon testlerine -106 μm öğütme boyunda ve konsantre toplam Fe verimi yüksek olan 3A alan şiddetinde elde edilen konsantre ile devam edilmesine karar verilmiştir. Flotasyon testlerinde gerekli malzeme miktarını üretebilmek amacıyla akredite bir laboratuvarında bulunan daha yüksek kapasiteli bir manyetik ayırıcı kullanılmıştır.

Flotasyon testlerinde kullanılmak üzere daha yüksek kapasiteli (YK) manyetik ayırıcıdan elde edilen ürünler ile laboratuvar ölçekli düşük kapasiteli (DK) manyetik ayırıcıdan elde edilen ürünlerin kimyasal içerikleri kıyaslanarak kayda değer bir fark olup olmadığı belirlenmiştir (Çizelge 3.32). İki farklı cihaz ile aynı deneysel koşullarda gerçekleştirilen manyetik ayırma testleri sonucunda hem miktar hem de kimyasal içerikler açısından birbirine oldukça benzer konsantreler elde edilmiş ve flotasyon testleri yüksek kapasiteli manyetik ayırıcıdan elde edilen konsantre ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.32 Aynı deneysel koşullarda iki farklı manyetik ayırıcıdan elde edilen ürünlerin kıyaslanması

Konsantre	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
YK Manyetik ayırıcı	87.45	55.24	10.51	2.33	0.71	0.03	0.14	0.16
DK Manyetik ayırıcı	80.35	55.58	10.01	2.05	0.72	0.05	0.16	0.15

3.3.2.2. Flotasyon ile Zenginleştirme Çalışmaları

İkinci kademe çalışmaları kapsamında yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma testinden elde edilen manyetik konsantre ile değişik koşullarda detaylı flotasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Flotasyon testleri kapsamında ters flotasyon testleri gerçekleştirilmiş olup ters flotasyon koşullarında manyetik konsantreden başta silis olmak üzere safsızlık içeren minerallerin yüzdürülmesi hedeflenmiştir. Flotasyon testleri hem doğrudan manyetik konsantre ile hem de manyetik konsantreden şlam uzaklaştırılması sonrasında yapılarak şlam içeriğinin flotasyon üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

Orijinal manyetik konsantre numunesi ile gerçekleştirilen çok sayıda flotasyon testi sonrasında hiçbir koşulda stabil köpük elde edilememiş olup bu nedenle flotasyon öncesinde KYA ile etkin biçimde şlam uzaklaştırılarak flotasyon testlerine devam edilmiştir. İkinci deneysel yöntem esnasında KYA ile şlam uzaklaştırma çalışmalarına ait test koşulları Çizelge 3.33'te sunulmaktadır. Bu aşamadaki deney düzeneği Şekil 3.19'de verilen deney düzeneği ile aynı şekilde hazırlanmıştır.

Çizelge 3.33 İkinci deneysel yöntem esnasında KYA ile şlam uzaklaştırma çalışmalarına ait test koşulları

İşletme Değişkeni	Değer
Besleme Hızı (g/dk)	500
Yıkama Suyu Miktarı (l/dk)	1.80
Basınç Set Değeri	119
Besleme Katı İçeriği (%)	50

Manyetik konsantreden KYA ile şlam uzaklaştırılması sonucu elde edilen ürünlerin tamamı kurutularak tartılmıştır. Ürünlerden alınan temsili numuneler kimyasal analize gönderilmiştir. Ayrıca şlam olarak uzaklaştırılan fraksiyonun 25 µm elek bakiyesi

ölçülmüştür. Şlam fraksiyonunun %94.68'inin 25 µm'den ince olduğu belirlenmiştir. KYA ile şlam uzaklaştırılması sonucu elde edilen ürünlere ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.34'te sunulmaktadır.

Çizelge 3.34 İkinci deneysel yöntem esnasında KYA ile şlam uzaklaştırma çalışmalarına ait sonuçlar

Ürün	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
KYA Üst Akımı	29.38	49.23	15.69	3.60	1.16	0.06	0.24	0.25
KYA Alt Akımı	70.62	59.01	8.51	1.57	0.41	0.02	0.17	0.16
Besleme (Hesap)	100.00	56.14	10.62	2.17	0.63	0.03	0.19	0.19
Besleme (Analiz)	-	55.24	10.51	2.33	0.71	0.03	0.14	0.16

Ürün	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
KYA Üst Akımı	29.38	25.77	43.41	48.82	54.33	55.93	37.50	39.40
KYA Alt Akımı	70.62	74.23	56.59	51.18	45.67	44.07	62.50	60.60
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

KYA ile sınıflandırma sonucu manyetik konsantrenin ağırlıkça yaklaşık olarak %30'unun şlam fraksiyonu olarak uzaklaştırıldığı görülmektedir. KYA ile şlam uzaklaştırılan malzemenin toplam demir tenörü yaklaşık olarak %56 Fe değerinden yaklaşık olarak %59 Fe değerine yükselmektedir. KYA ile gerçekleştirilen çalışmalarda ana hedef her ne kadar boyut ayrımı olsa da ekipmanın ayırım prensibi nedeniyle yoğunluğu yüksek ince tanelerin alt akıma gelme olasılıkları bulunmaktadır. Beslemedeki toplam demirin %74.23'ünün alt akımdan alınması da bu durumun açık bir göstergesidir. Aynı zamanda, düşük yoğunluklu tanelerin de üst akımdan uzaklaştırılması ile alt akım safsızlık değerlerinde de bir iyileşme görülmektedir. Alt akım toplam Fe tenörü ve veriminde yaşanan bu iyileşme hidrolik sınıflandırmanın boyuta göre sınıflandırma yanında yoğunluk farkına dayalı ayırım yapabilme özelliğinin deneysel çalışmalarda kullanılan demir cevheri üzerinde olumlu etkisi olduğunun açık göstergesidir.

İkinci deneysel yöntem kapsamında KYA ile şlam fraksiyonu uzaklaştırılan malzeme ile gerçekleştirilen flotasyon testlerine ait deneysel koşullar Çizelge 3.35'da sunulmaktadır.

Çizelge 3.35 İkinci deneysel yöntem kapsamında gerçekleştirilen flotasyon testlerine ait koşullar

TEST NO	1	2	3	4
pH	10.5	11.5	10.5	10.5
pH Düzenleyici (NaOH)	+	-	+	+
Canlandırıcı (Kireç)	-	+	-	-
Kostik Nişasta (g/t)	500	-	500	-
Eter Amin (Tomamine) (g/t)	160	-	-	-
Amin (3030 C) g/t	-	-	-	50+100+150+150+150
Amin (Der-AS) (g/t)	-	-	100+100	-
Yağ Asidi (Derna-7) (g/t)	-	220	-	-
Köpürtücü (MIBC) g/t	20	-	20+20	20+20+20

Flotasyon deneyleri, Denver tipi flotasyon cihazı kullanılarak %60 katı oranında koşullandırmayı takiben %30 katı oranında, 10 l/dk. hava akım hızında, 1200 dev/dk. karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir. Flotasyon deneyleri esnasında pH, canlandırıcı, bastırıcı, toplayıcı türü ve miktarının flotasyon testleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında 12 farklı deney yapılmasına karşın stabil köpük Çizelge 3.35’da verilen test koşullarında sağlanabilmiştir. Bu deneylerim her biri tekrarlı yapılmış ve analiz sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak nihai sonuçlar elde edilmiştir. Her bir deneysel çalışmanın sonucunun ayrı ayrı standart hatası hesaplanarak $\pm 0.5-1$ arasında değiştiği belirlenmiştir.

Flotasyon testleri kapsamında Çizelge 3.35’da açıklandığı üzere farklı türde amin ve yağ asidi tipi türü toplayıcılar kullanılmıştır. Ayrıca, pH düzenleme aşamasında NaOH ve kireç, demir minerallerinin bastırılması amacıyla kostik nişasta eklenmiştir. Deneylerde stabil köpük oluşumu içinde köpürtücü eklenerek flotasyon deneyleri tamamlanmıştır.

KYA ile şlam fraksiyonu uzaklaştırılan malzeme ile gerçekleştirilen flotasyon testlerine ait sonuçlar Çizelge 3.35’da verilen koşullar için Çizelge 3.36 ile Çizelge 3.39 arasında sunulmaktadır.

Çizelge 3.36 İkinci deneysel yöntem Flotasyon Test-1 koşuluna ait sonuçlar

Ürün (Test 1)	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO₂	Al₂O₃	K₂O	Na₂O	S	P₂O₅
Yüzen	0.75	48.02	-	-	-	-	-	-
Batan	99.25	59.12	8.43	1.56	0.39	0.03	0.15	0.19
Besleme	100.00	59.04	-	-	-	-	-	-
Besleme (Analiz)	-	59.01	8.51	1.57	0.41	0.02	0.17	0.16

Ürün (Test 1)	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO₂	Al₂O₃	K₂O	Na₂O	S	P₂O₅
Yüzen	0.75	0.61	-	-	-	-	-	-
Batan	99.25	99.39	-	-	-	-	-	-
Besleme	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-

Çizelge 3.37 İkinci deneysel yöntem Flotasyon Test-2 koşuluna ait sonuçlar

Ürün (Test 2)	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO₂	Al₂O₃	K₂O	Na₂O	S	P₂O₅
Yüzen	5.25	50.58	8.35	2.45	0.64	0.07	0.28	0.22
Batan	94.75	59.01	8.13	1.53	0.39	0.03	0.14	0.15
Besleme	100.00	58.57	8.14	1.58	0.40	0.03	0.15	0.15
Besleme (Analiz)	-	59.01	8.51	1.57	0.41	0.02	0.17	0.16

Ürün (Test 2)	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO₂	Al₂O₃	K₂O	Na₂O	S	P₂O₅
Yüzen	5.25	4.53	5.38	8.15	8.26	12.16	10.17	7.51
Batan	94.75	95.47	94.62	91.85	91.74	87.84	89.83	92.49
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Çizelge 3.38 İkinci deneysel yöntem Flotasyon Test-3 koşuluna ait sonuçlar

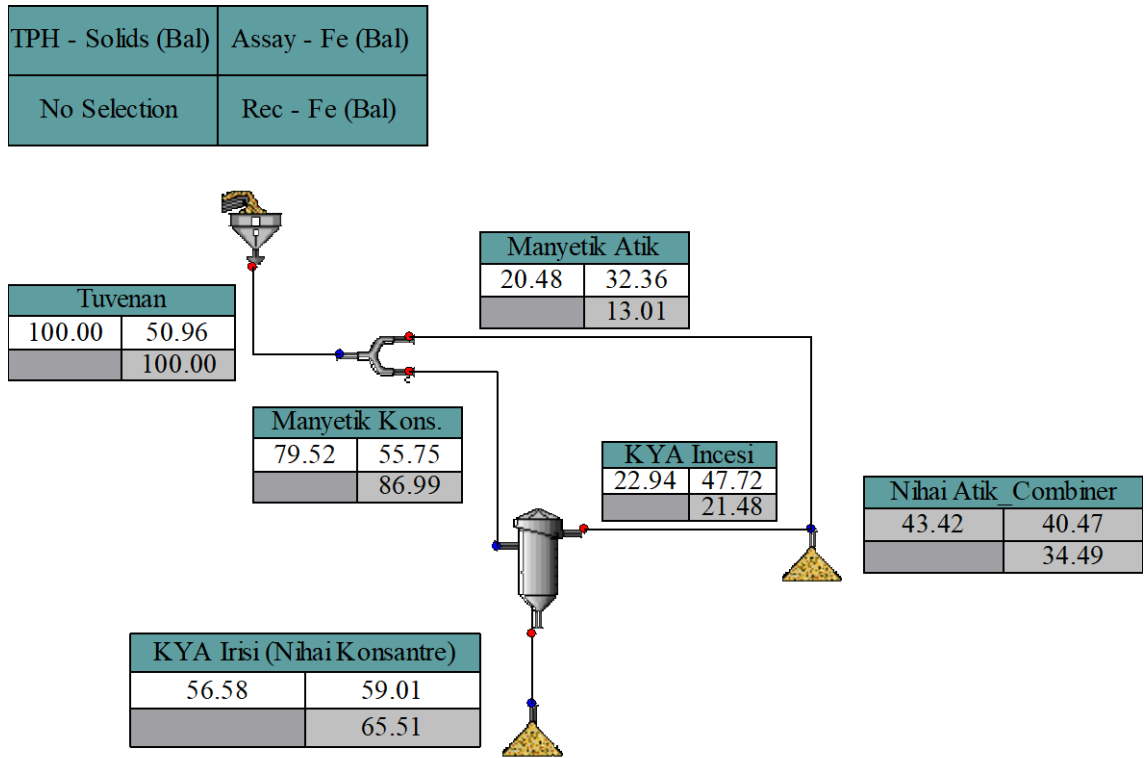
Ürün (Test 3)	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Yüzen	3.14	49.75	14.83	4.30	1.17	0.09	1.00	0.22
Batan	96.86	59.13	8.97	1.46	0.39	0.04	0.09	0.16
Besleme	100.00	58.84	9.15	1.55	0.42	0.04	0.12	0.16
Besleme (Analiz)	-	59.01	8.51	1.57	0.41	0.02	0.17	0.16
Ürün (Test 3)	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Yüzen	3.14	2.65	5.08	8.71	8.78	6.76	26.05	4.27
Batan	96.86	97.35	94.92	91.29	91.22	93.24	73.95	95.73
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Çizelge 3.39 İkinci deneysel yöntem Flotasyon Test-4 koşuluna ait sonuçlar

Ürün (Test 4)	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Yüzen	3.06	53.06	11.59	3.19	0.78	0.09	1.37	0.19
Batan	96.94	59.20	8.06	1.34	0.39	0.04	0.09	0.13
Besleme	100.00	59.01	8.17	1.40	0.40	0.04	0.13	0.13
Besleme (Analiz)	-	59.01	8.51	1.57	0.41	0.02	0.17	0.16
Ürün (Test 4)	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Yüzen	3.06	2.76	4.35	7.00	6.03	6.64	33.24	4.42
Batan	96.94	97.24	95.65	93.00	93.97	93.36	66.76	95.58
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

İkinci deneysel yöntem kapsamında gerçekleştirilen flotasyon testlerine ait yüzen ve batan ürün özellikleri incelendiğinde çalışmanın hedefine uygun olarak köpük içerisindeki safsızlık içeriklerinin bir miktar düştüğü görülmektedir. Ancak, yüzen ürün miktarının sınırlı bir seviyede kalması ve batan ürün içerisindeki nihai toplam Fe tenörlerinde kayda değer bir artış gözlenmemesi flotasyon testlerinin istenilen sonuçları veremediğini göstermektedir.

İkinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarından elde edilen en uygun sonuç doğrultusunda, -106 µm tüvenan cevher doğrudan yüksek alan şiddetli manyetik ayırmaya beslenmiş ve elde edilen manyetik konsantre ile şlam uzaklaştırılması sonucu farklı koşullarda flotasyon testleri gerçekleştirilmiştir. İkinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmaları kapsamında farklı koşullarda flotasyon testleri yapılmasına rağmen konsantre tenöründe herhangi bir iyileşme gözlenmemiştir. Bu nedenle, ikinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarında manyetik ayırmayı takiben KYA ile testine ait madde denkliği sunulmaktadır. İkinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmaları sonucu hesaplanan ürün miktarları ile her bir üründeki toplam Fe tenörü ve verimi Şekil 3.30'da, detaylı ürün özellikleri ise Çizelge 3.40'da sunulmaktadır.



Şekil 3.30 İkinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarına ait madde denkliği sonuçları

Çizelge 3.40 İkinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarına ait detaylı madde denklığı sonuçları

Akış Kolu	Akış Miktarı (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Tüvenan	100.00	50.96	14.59	3.13	1.06	0.05	0.15	0.20
Manyetik Atık	20.48	32.36	31.93	7.17	2.71	0.12	0.20	0.34
Manyetik Konsantre	79.52	55.75	10.12	2.09	0.64	0.03	0.14	0.16
KYA İncesi	22.94	47.72	15.42	3.51	1.18	0.06	0.2	0.23
KYA İrisi (Kons.)	56.58	59.01	7.98	1.52	0.42	0.02	0.11	0.14
Nihai Atık	43.42	40.47	23.20	5.23	1.90	0.09	0.20	0.28

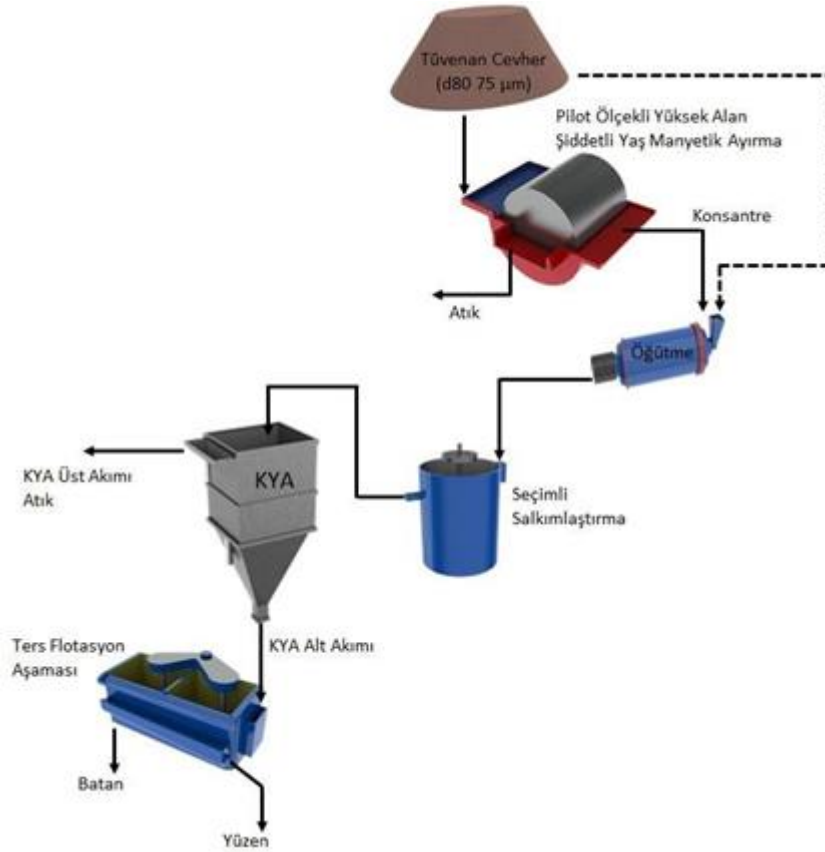
Akış Kolu	Akış Miktarı (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Tüvenan	100.00	100	100	100	100	100	100	100
Manyetik Atık	20.48	13.01	44.82	46.9	52.31	49.82	27.01	34.84
Manyetik Konsantre	79.52	86.99	55.18	53.1	47.69	50.18	72.99	65.16
KYA İncesi	22.94	21.48	24.24	25.71	25.53	27.54	29.85	26.17
KYA İrisi (Kons.)	56.58	65.51	30.94	27.39	22.16	22.64	43.14	38.99
Nihai Atık	43.42	34.49	69.06	72.61	77.84	77.36	56.86	61.01

Çizelge 3.40 incelendiğinde ikinci deneysel yöntem ile -106 µm boyunda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda besleme malzemesinin ağırlıkça %56.58'inin nihai konsantre olarak kazanıldığı belirlenmiştir. Madde denklığı sonucu hesaplanan nihai konsantrenin toplam Fe tenör ve verimi ise sırasıyla %59.01 Fe ve %65.51 şeklindedir. Birinci deneysel yöntemde beslemedeki toplam demirin yaklaşık olarak %80'inin nihai konsantrede kazanılmasına karşın ikinci yöntemde daha düşük ağırlık ve toplam Fe tenöründe benzer özelliklerde bir nihai konsantre elde edilmiştir. Birinci ve ikinci yöntem birlikte değerlendirildiğinde her iki çalışma sonucu elde edilen nihai ürünlerin satılabilir özellikte olmadığı görülmektedir.

Hindistan'da hematit cevheri üzerinde yapılan benzer bir çalışmada [39], manyetik ayırma işlemini takiben ters flotasyon testleri sonucunda %64.6 Fe, %3.12 SiO₂, %1.00 Al₂O₃ içeriğine sahip peletlemeye uygun bir konsantre elde edildiği bildirilmiş olmasına karşılık bu çalışmada benzer koşullarda elde edilen nihai konsantre %59 Fe, %8 SiO₂ değerleri ile elde edilebilmiştir. Bu durumun esas sebebinin iki cevher arasındaki farklı mineraloji olduğu düşünülmektedir.

3.3.3. Üçüncü Yöntem ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Birinci ve ikinci yöntem ile gerçekleştirilen çalışmalardan sonra elde edilen nihai konsantrelerde toplam Fe tenör ve verim değerlerinin yetersiz veya sınır değerlerde kalması nedeniyle hem tüvenan cevher hem de ikinci yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarından elde edilen manyetik konsantre ile seçimli salkımlaştırmayı takiben flotasyon ile zenginleştirme çalışmaları yürütülmüştür (Şekil 3.31).



Şekil 3.31 Üçüncü yöntem ile yürütülen zenginleştirme çalışmalarına ait basitleştirilmiş akım şeması

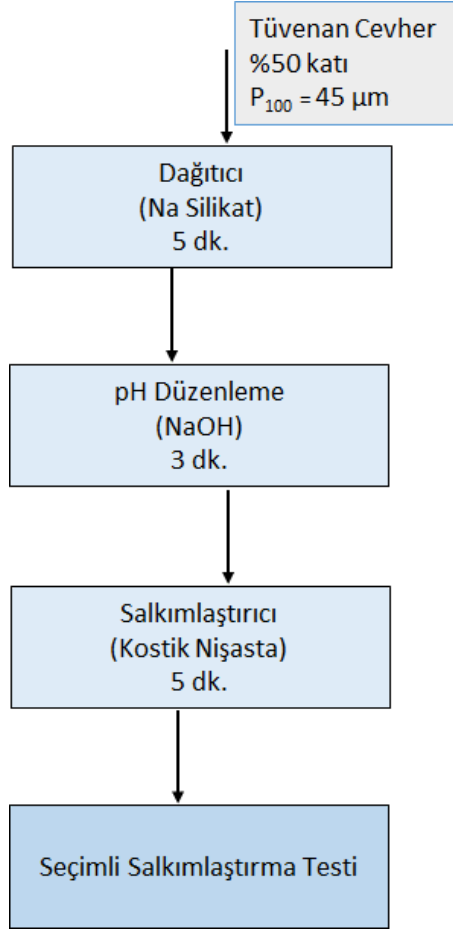
Seçimli salkımlaştırma aşamasında hem tüvenan cevher hem de ikinci yöntemden elde edilen nihai konsantre tamamı 45 µm'den ince olacak şekilde öğütülerek seçimli salkımlaştırma işlemine maruz bırakılmıştır. Seçimli salkımlaştırma yönteminde besleme içerisindeki demirli minerallerin çeşitli kimyasallar ve belirli pH değerlerinde kendi aralarında topaklandırılarak (salkımlaştırılarak), salkımlaşmayan diğer ince tanelere göre çökme hızlarının artırılması hedeflenmiştir. Seçimli salkımlaştırma aşamasından elde edilen en uygun konsantre ise, daha sonra flotasyon la temizlenerek nihai konsantre elde

edilmiştir. Üçüncü yöntem ile gerçekleştirilen seçimli salkımlaştırma çalışmalarına ait basitleştirilmiş test koşulları Çizelge 3.41’de sunulmaktadır.

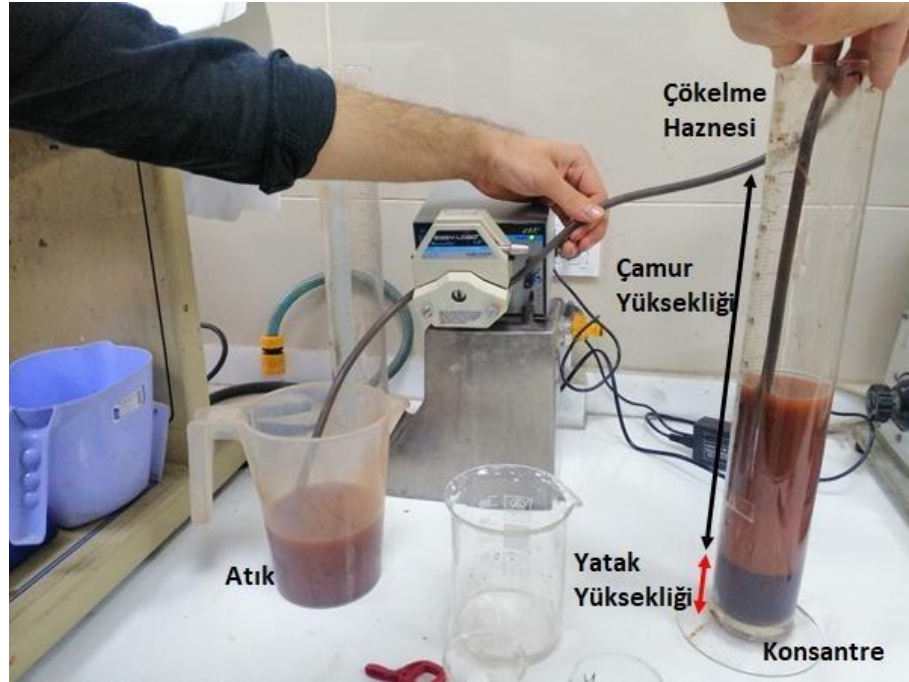
Çizelge 3.41 Tüvenan cevher ile gerçekleştirilen seçimli salkımlaştırma testlerine ait koşullar

Değişkenler	Deney Numarası				
	4				
	1	2	3	1. kademe	2. kademe
pH	7.88	12	12	12	12
pH Düzenleyici (NaOH)	-	+	+	+	+
Dağıtıcı (Sodyum Silikat) (g/t)	-	500	500	500	-
Kostik Nişasta (g/t)	-	1000	2000	3000	1000
Başlangıç Yüksekliği (cm)	36	36	36	36	36
Yatak yüksekliği (cm)	7	7	5	5	5
Çökeltme süresi (dk)	5	5	5	5	1.5

Birinci deneyde cevher numunesi ile doğal pH değeri olan 7.88 değerinde çalışmalar yürütülürken diğer deneylerde pH değeri 12’ye yükseltilmiştir. Seçimli salkımlaştırma deneylerine başlamadan önce besleme malzemesi laboratuvar ölçekli bir flotasyon makinası kullanılarak koşullandırılmış olup, kimyasallar bu aşamada Şekil 3.32’de verilen sırada ve miktarda eklenmiştir Her bir test çalışmasında koşullandırma aşamasının tamamlanmasının ardından numune aynı pH değerinde %20 katı içeriğine düşürülerek cam mezür içerisinde çökmeye bırakılmıştır. Zamana karşı çamur yüksekliği takip edilerek mezür dibinde sabit bir yükseklik oluştuktan sonra askıda kalan kısım bir peristaltik pompa yardımı ile mezür içinden ayrılarak ürünler elde edilmiştir. Seçimli salkımlaştırma deneylerini ve elde edilen ürünleri gösteren fotoğraf görüntüleri sırasıyla Şekil 3.33 ve Şekil 3.34’te verilmektedir.



Şekil 3.32 Seçimli salkımlaştırma testi öncesi koşullandırma aşamaları



Şekil 3.33 Seçimli salkımlaştırma deney düzeneği



Şekil 3.34 Seçimli salkımlaştırma testine ait ürünler

Tüvenan cevher ile gerçekleştirilen seçimli salkımlaştırma testlerine ait sonuçlar sırasıyla Çizelge 3.42, Çizelge 3.43, Çizelge 3.44 ve Çizelge 3.45'te sunulmaktadır.

Çizelge 3.42 Tüvenan cevhere yapılan seçimli salkımlaştırma testine ait sonuçlar (Test-1)

Ürün (Test 1)	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Yüzen	29.28	45.93	19.73	4.48	1.50	0.11	0.26	0.28
Batan	70.72	51.88	14.53	2.18	0.79	0.07	0.13	0.19
Besleme (Hesap)	100.00	51.55	16.05	2.85	1.00	0.08	0.17	0.22
Besleme (Analiz)	-	50.56	15.17	3.10	1.06	0.05	0.15	0.20

Ürün (Test 1)	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Yüzen	29.28	26.82	35.98	45.97	43.96	39.29	45.01	37.89
Batan	70.72	73.18	64.02	54.03	56.04	60.71	54.99	62.11
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Çizelge 3.43 Tüvenan cevhere uygulanan seçimli salkımlaştırma testine ait sonuçlar (Test-2)

Ürün (Test 2)	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO₂	Al₂O₃	K₂O	Na₂O	S	P₂O₅
Yüzen	11.13	36.50	23.45	8.20	2.07	1.18	0.38	0.29
Batan	88.87	52.97	14.83	2.22	0.81	0.14	0.13	0.20
Besleme (Hesap)	100.00	51.14	15.79	2.89	0.95	0.26	0.16	0.21
Besleme (Analiz)	-	50.56	15.17	3.10	1.06	0.05	0.15	0.20

Ürün (Test 2)	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO₂	Al₂O₃	K₂O	Na₂O	S	P₂O₅
Yüzen	11.13	7.94	16.53	31.62	24.22	51.24	27.15	15.37
Batan	88.87	92.06	83.47	68.38	75.78	48.76	72.85	84.63
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Çizelge 3.44 Tüvenan cevhere uygulanan seçimli salkımlaştırma testine ait sonuçlar (Test-3)

Ürün (Test 3)	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO₂	Al₂O₃	K₂O	Na₂O	S	P₂O₅
Yüzen	19.94	39.05	23.89	6.40	2.11	0.74	0.34	0.31
Batan	80.06	54.53	13.39	1.88	0.75	0.12	0.12	0.17
Besleme (Hesap)	100.00	51.44	15.48	2.78	1.02	0.24	0.17	0.20
Besleme (Analiz)	-	50.56	15.17	3.10	1.06	0.05	0.15	0.20

Ürün (Test 3)	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO₂	Al₂O₃	K₂O	Na₂O	S	P₂O₅
Yüzen	19.94	15.14	30.77	45.89	41.06	61.45	41.32	31.24
Batan	80.06	84.86	69.23	54.11	58.94	38.55	58.68	68.76
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Çizelge 3.45 Tüvenan cevhere uygulanan seçimli salkımlaştırma testine ait sonuçlar (Test-4)

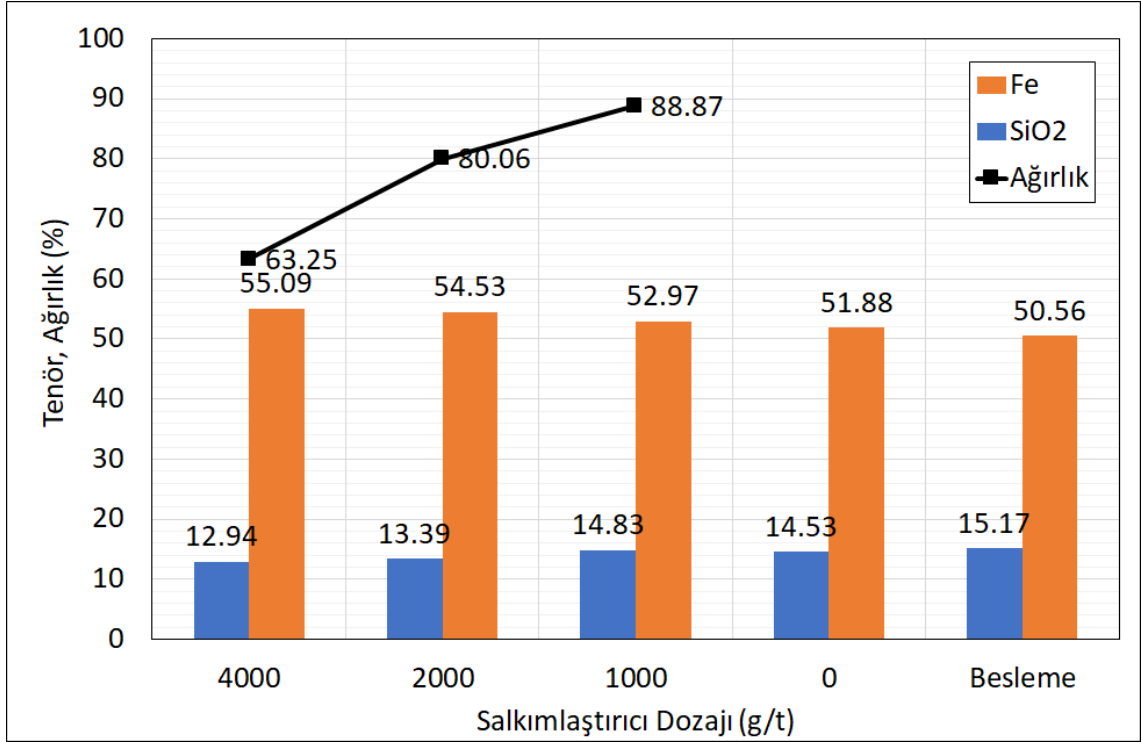
Ürün (Test 4)	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Yüzen-1	30.32	42.87	20.73	5.57	1.61	0.59	0.28	0.27
Yüzen-2	6.44	42.23	21.06	3.59	1.44	2.14	0.44	0.23
Batan	63.25	55.09	12.94	1.55	0.61	0.07	0.1	0.15
Besleme (Hesap)	100.00	50.56	15.82	2.90	0.97	0.36	0.18	0.19
Besleme (Analiz)	-	50.56	15.17	3.10	1.06	0.05	0.15	0.20

Ürün (Test 4)	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Yüzen-1	30.32	25.71	39.71	58.23	50.39	49.81	47.3	42.74
Yüzen-2	6.44	5.38	8.57	7.97	9.58	38.39	16.11	7.73
Batan	63.25	68.92	51.72	33.8	40.03	11.8	36.6	49.53
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

İlk deneysel koşulda cevherin doğal pH değeri ve kimyasal eklenmediği koşulda elde edilen yüzen ve batan ürünlerin kimyasal içerikleri incelendiğinde batan ürünün toplam Fe tenöründe kayda değer bir değişiklik görülmemektedir.

Ortam pH değerinin yükseltilmesi ve her bir deneysel koşulda sabit miktarda dağıtıcı ve artan miktarda bastırıcı eklenmesi sonucunda ise batan ürün miktarının ağırlıkça %88.87'den %63.25'e kadar düştüğü görülmektedir. Aynı deneysel koşullar altında batan ürün miktarının azalması ortam özelliklerinin değiştiği ve daha fazla malzemenin askıda kalarak seçimli tanelerin batan ürüne gittiği şeklinde yorumlanmaktadır. Bu durum, batan ürünlerin toplam Fe tenörünün artması, SiO₂ içeriklerinin ise düşmesi ile de uyumluluk sergilemektedir (Şekil 3.35).

Salkımlaştırıcı dozajının artması ile batan ürün toplam Fe tenörü ve ana safsızlık içeriği olan SiO₂ değerleri en iyi koşulda dahi sinter/pelet kalitesinde bir ürün üretilmesine imkan tanımamıştır.



Şekil 3.35 Salkımlaştırıcı dozajının batan ürün özelliklerine etkisi

Seçimli salkımlaştırma çalışmalarının ikinci aşamasında ise ikinci yöntem ile gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen ve özellikleri Çizelge 3.32’te verilen manyetik konsantre ile çalışmalar yürütülmüştür. Bu kapsamda manyetik konsantrenin tamamı tüvenan cevherde olduğu gibi 45 µm’den ince olacak şekilde öğütülerek seçimli salkımlaştırma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Manyetik konsantre ile gerçekleştirilen seçimli salkımlaştırma deney koşulları Çizelge 3.46’da sunulmaktadır. Deneyler öncesindeki koşullandırma aşaması tüvenan cevhere uygulanan yöntem ile aynıdır (Şekil 3.32).

Çizelge 3.46 Manyetik ayırma konsantresine uygulanan seçimli salkımlaştırma testine ait koşullar

TEST-1	1.kademe	2.kademe
pH	12	12
pH Düzenleyici (NaOH)	+	+
Dağıtıcı (Sodyum Silikat) (g/t)	500	-
Kostik Nişasta (g/t)	4000	1000
Başlangıç Yüksekliği (cm)	36	36
Yatak yüksekliği (cm)	3	2
Çökeltme süresi (dk)	5	1.5

Öğütülmüş manyetik ayırma konsantresi ile gerçekleştirilen deneylerde koşullandırma aşamasının tamamlanmasının ardından numune tüvenan cevherde elde edilen en iyi deneysel koşul altında ve pH değerinde %20 katı içeriğine düşürülerek cam mezür içerisinde çökelmeye bırakılmıştır. Zamana karşı çamur yüksekliği takip edilerek mezür dibinde sabit bir yükseklik oluştuktan sonra askıda kalan kısım bir peristaltik pompa yardımı ile mezür içinden ayrılarak ürünler elde edilmiştir. Manyetik ayırma konsantresi ile gerçekleştirilen seçimli salkımlaştırma testine ait sonuçlar Çizelge 3.47’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.47 Manyetik konsantreye uygulanan seçimli salkımlaştırma testine ait sonuçlar

Ürün (Test 1)	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Yüzen-1	47.87	50.42	10.67	2.89	1.05	0.62	0.28	0.22
Yüzen-2	3.66	51.63	7.46	1.78	0.7	1.87	0.38	0.16
Batan	48.47	60.27	5.38	0.84	0.28	0.09	0.10	0.09
Besleme (Hesap)	100.00	55.24	7.99	1.86	0.66	0.41	0.19	0.15
Besleme (Analiz)	-	55.58	9.91	1.85	0.72	0.05	0.16	0.15

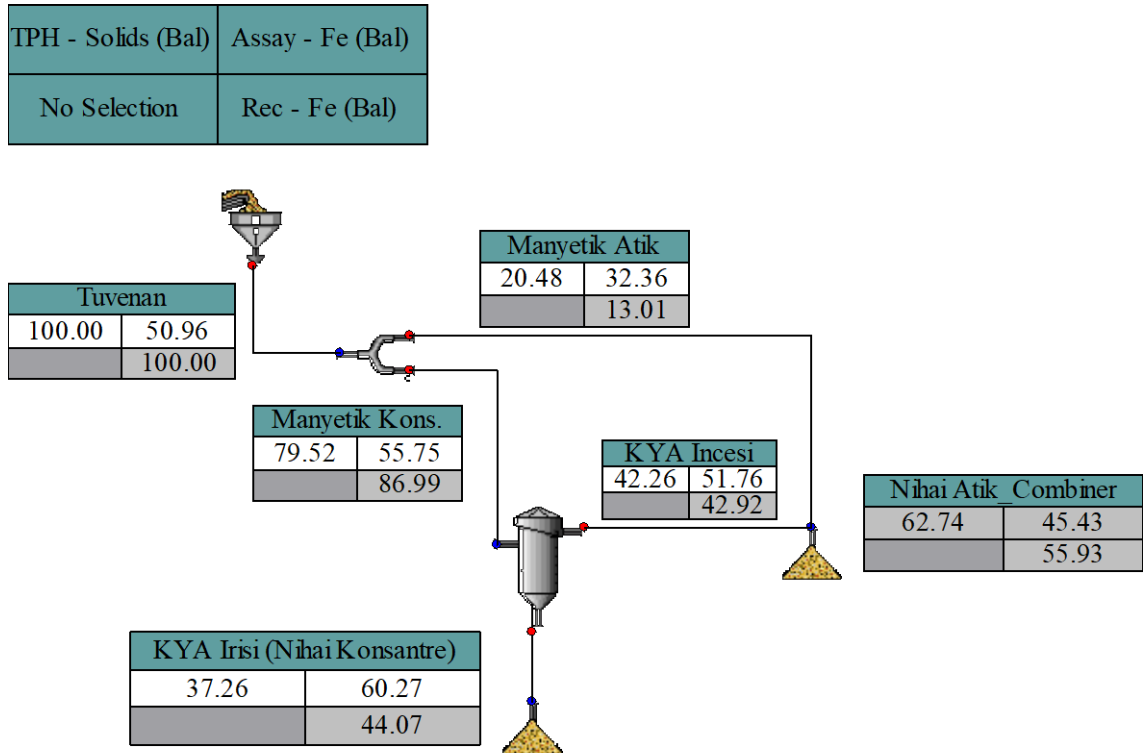
Ürün (Test 1)	Ağırlık (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Yüzen-1	47.87	43.70	63.94	74.55	75.78	72.65	67.7	68.04
Yüzen-2	3.66	3.42	3.42	3.51	3.87	16.69	7.13	3.78
Batan	48.47	52.88	32.64	21.94	20.35	10.66	25.17	28.18
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Manyetik filtre beslemesinin tamamının -45 µm’ye öğütülmesi ve seçimli salkımlaştırma sonrası iki kademede yüzen ürünler sonrası beslemenin toplam Fe tenörü %55 Fe seviyelerinden %60.27 Fe değerine yükselmiştir. Aynı zamanda, seçimli salkımlaştırma testi sonucunda mezür dibinde çöken ürünün safsızlık değerlerinde kayda değer düşüş gerçekleşmiştir.

Manyetik filtre konsantresinin seçimli salkımlaştırılması sonucunda batan üründe toplam demir tenörü yükselmesine rağmen besleme içerisindeki toplam demirin %52.88’i kazanılabilmektedir. Ayrıca besleme malzemesinin yaklaşık olarak yarısı yüksek bir demir tenörü ile atık olarak atılmaktadır.

Üçüncü yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmaları kapsamında tüvenan cevher ve -106 µm besleme boyunda elde edilen manyetik ayırma konsantresi ile öğütme sonrası farklı koşullarda seçimli salkımlaştırma yapılmış olup nihai aşamada flotasyon testleri yapılmıştır. Ancak, seçimli salkımlaştırma testlerinden elde edilen konsantre ile gerçekleştirilen flotasyon testleri sonucunda kararlı köpük oluşumu sağlanamamış ve yüzen ürün neredeyse alınamamıştır.

Tüvenan cevher ile gerçekleştirilen seçimli salkımlaştırma ve flotasyon testlerinde kayda değer bir tenör artışı elde edilememiştir. Manyetik konsantrenin tamamının 45 µm'ye öğütülmesi sonucu gerçekleştirilen seçimli salkımlaştırma testleri sonucunda ise toplam Fe tenöründe artış sağlanmıştır. Ancak, bu aşamada da farklı koşullarda flotasyon testleri yapılmasına karşılık konsantre tenöründe herhangi bir iyileşme gözlenmemiştir. Bu nedenle, üçüncü kademe zenginleştirme çalışmalarında yapılan flotasyon testlerine ait madde denkliği sonuçları sunulmamaktadır. Üçüncü kademe zenginleştirme çalışmaları sonucu hesaplanan akış değerleri ile her bir koldaki toplam Fe tenörü ve verimi Şekil 3.36'te, akış kollarına ait detaylı bilgiler ise Çizelge 3.48'de sunulmaktadır.



Şekil 3.36 Üçüncü yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarına ait madde denkliği sonuçları

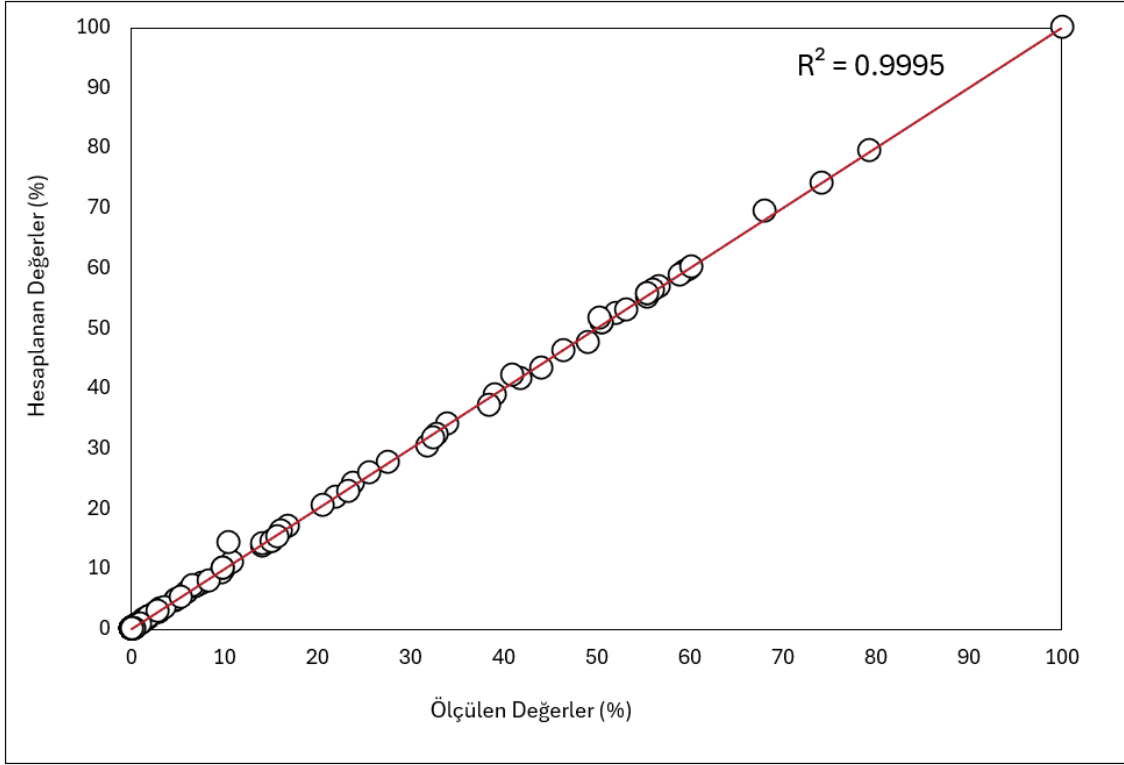
Üçüncü yöntemle gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarına ait madde denkliği sonuçları incelendiğinde tüvenan cevherin ağırlıkça %37.26'sının nihai konsantre olarak elde edildiği görülmektedir. Elde edilen nihai konsantrenin toplam Fe tenörü ve verimi sırasıyla %60.27 ve %44.07'dir (Şekil 3.36). Birinci ve ikinci yönteme kıyasla elde edilen konsantre özelliklerinde iyileşme görülmektedir.

Literatürde yapay hematit-kaolinit karışımı hazırlanarak yapılan bir çalışmada [40], seçimli salkımlaştırma testleri ile besleme malzemesinden %80 Fe verimiyle, %65 Fe içeren bir konsantre elde edildiği, benzer şekilde tesis atıklarına yapılan seçimli salkımlaştırma deneylerinde de toplam Fe içeriğinin %50.98'den yaklaşık olarak %63'e çıktığı bildirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen seçimli salkımlaştırma testlerinden elde edilen atıkları incelendiğinde ise hem atıkların yüksek Fe içeriğine sahip olduğu, hem de konsantre tenörünün benzer bir çalışmaya oranla daha düşük kaldığı görülmektedir. Bu durum, tez çalışmasında kullanılan cevherdeki demir içeren minerallerin ince tane boylarında dahi ikili ve üçlü bağlı bağlı durumda olması ile ilişkilendirilmektedir.

Çizelge 3.48 Üçüncü yöntem ile gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmalarına ait detaylı madde denkliği sonuçları

Akış Kolu	Akış Miktarı (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Tüvenan	100.00	50.96	14.59	3.13	1.06	0.05	0.15	0.20
Manyetik Atık	20.48	32.36	31.94	7.17	2.69	0.13	0.19	0.36
Manyetik Konsantre	79.52	55.75	10.12	2.09	0.64	0.03	0.14	0.16
SS Atık	42.26	51.76	14.3	3.17	0.96	0.00	0.18	0.22
SS Konsantre	37.26	60.27	5.38	0.87	0.28	0.06	0.10	0.09
Nihai Atık	62.74	45.43	20.06	4.47	1.53	0.04	0.18	0.26
Akış Kolu	Akış Miktarı (%)	Verim (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
Tüvenan	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Manyetik Atık	20.48	13.01	44.84	46.90	51.99	52.29	25.78	36.39
Manyetik Konsantre	79.52	86.99	55.16	53.10	48.01	47.71	74.22	63.61
SS Atık	42.26	42.92	41.42	42.73	38.30	0.00	49.38	46.74
SS Konsantre	37.26	44.07	13.74	10.37	9.71	47.71	24.84	16.88
Nihai Atık	62.74	55.93	86.26	89.63	90.29	52.29	75.16	83.12

Tüm deneysel çalışmalar sonucunda ölçülen ve madde denkliği sonucu hesaplanan tenör değerlerinin ($y=x$) eğrisi üzerinde karşılaştırılması Şekil 3.37’de verilmektedir. Ölçülen ve hesaplanan değerlerin ($y=x$) eğrisi üzerindeki uyumu deneysel çalışma, numune alma ve kimyasal analiz süreçlerinin başarılı şekilde tamamlandığını göstermektedir.



Şekil 3.37 Ölçülen/hesaplanan değerlerin ($y=x$) eğrisi üzerinde karşılaştırılması

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Malatya ili Hekimhan bölgesi sınırları içerisinde bulunan bir demir sahanın eski üretim aynalarından alınan temsili numune üzerinde gerçekleştirilen detaylı karakterizasyon ve zenginleştirme çalışmaları sonucunda

Bu çalışma kapsamında, demir çelik sektörü açısından her dönemde stratejik öneme sahip demir cevherlerinin ülke kaynaklarından temin edilebilmesi adına karmaşık mineralojik yapıya sahip yüksek ve miktarda safsızlık içeren bir saha değerlendirilmiş ve zenginleştirme davranımı gerek detaylı karakterizasyon çalışmaları, gerekse kapsamlı zenginleştirme çalışmaları yapılarak net olarak ortaya koyulmuştur.

Tüvenan cevherin farklı boyut fraksiyonları ile gerçekleştirilen ağır sıvı test sonuçları 3.5 g/cm^3 özgül ağırlık değerine kadar yeterli kalitede ürün alınamadığını göstermiştir. Ağır sıvı sonucunda 3.5 g/cm^3 özgül ağırlık değerinde elde edilen batan ürünlerin en yüksek toplam Fe tenörü ve en düşük safsızlık içeriklerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ağır sıvı testlerinde tane boyu incelidikçe toplam Fe tenörünün artması ve safsızlık içeriklerinin düşmesi serbestleşme derecesinin artması ile ilişkilendirilmektedir.

Gerek iri boyda kalibre ve/veya toz cevher, gerekse ince öğütme sonrasında demir çelik endüstrisinde istenilen özelliklerde bir konsantrenin elde edilip edilemediğinin belirlenmesi için elde edilen farklı ürünlerin kimyasal içerikleri İsdemir Demir Çelik fabrikası tarafından belirlenen baz değerler ile karşılaştırılmıştır. İsdemir Demir Çelik fabrikası tarafından kalibre ve toz kalitesi için istenilen değerler ile bu tez çalışması kapsamında elde edilen ürünlerin kimyasal içeriklerinin karşılaştırılması sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.1 incelendiğinde ağır sıvı testi sonucunda 3.5 g/cm^3 yoğunluk değerinde batan -30+20 mm ve -20+10 mm fraksiyonlarının ağırlıkları oranında birleşiminden elde edilen nihai konsantre özelliklerinin büyük oranda kalibre cevher gereksinimlerini karşıladığı görülmektedir. Elde edilen konsantrenin toplam Fe tenörü gereksinimlerden çok az bir miktarda düşük kalmaktadır. Nihai konsantre içerisinde limit değerleri aşan başlıca safsızlıklar ise Al_2O_3 , ve alkali toplamını ifade eden ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) toplamı olarak öne çıkmaktadır.

Çizelge 4.1 İsdemir kalibre cevher gereksinimleri ile ağır sıvı testinden elde edilen -30+10 mm ürün özelliklerinin kıyaslanması

Kalibre cevher	Baz terkip (%)	-30+10 mm konsantre (%)
Fe	>58	56.98
SiO ₂	<8	5.47
Mn	<1	0.07
Al ₂ O ₃	<1.5	1.66
CaO	<1.5	0.50
MgO	<0.7	0.20
P	<0.05	0.02
S	<0.5	0.17
Na ₂ O	<0.15	0.35
K ₂ O	<0.15	0.30
TiO ₂	<0.05	0.08
As	<0.05	0.01
Zn	<0.05	0.01
Ni	<0.05	0.09
Cr	<0.05	0.01
Cu	<0.05	-
Pb	<0.05	-

Çizelge 4.2 İsdemir toz cevher gereksinimleri ile ağır sıvı testinden elde edilen -10+0.212 mm ürün özelliklerinin kıyaslanması

Toz cevher	Baz terkip (%)	-10+0.212 mm konsantre (%)
Fe	>58	59.00
SiO ₂	<6	5.33
Mn	<1	0.10
Al ₂ O ₃	<1.5	1.48
CaO	<1.5	0.32
MgO	<0.7	0.19
P	<0.05	0.03
S	<0.5	0.13
Na ₂ O	<0.15	0.19
K ₂ O	<0.15	0.25
TiO ₂	<0.05	0.10
As	<0.05	0.02
Zn	<0.05	0.02
Ni	<0.05	0.12
Cr	<0.05	0.01
Cu	<0.05	-
Pb	<0.05	-

Çizelge 4.2 incelendiğinde ağır sıvı testi sonucunda 3.5 g/cm^3 yoğunluk değerinde batan $-10+0.212 \text{ mm}$ fraksiyonlarının ağırlıkları oranında birleşiminden elde edilen nihai konsantre özelliklerinin de büyük oranda toz cevher kimyasal içerik gereksinimlerini karşıladığı görülmektedir. Elde edilen toz konsantrenin toplam Fe tenörü baz terkip değerinden yüksektir. Nihai konsantre içerisinde kalibre cevher ile benzer şekilde limit değerlere yakın veya aşan başlıca safsızlıklar ise Al_2O_3 , ve alkali toplamını ifade eden ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) toplamı olarak öne çıkmaktadır. Her iki konsantrede TiO_2 içeriği ve Ni değerleri de limit değerlerin üzerindedir.

Cevher numunesi içerisindeki kuvarsın özellikle Fe Oksit/hidroksit mineralleri ile bağlı taneler şeklinde bulunması iri boylarda gerçekleştirilen zenginleştirme aşamalarında konsantreler içerisindeki benzer SiO_2 içeriğinin başlıca nedeni olarak yorumlanmaktadır. Tane boyunun incilmesi ile K-feldispat - Fe oksit/hidroksit tanelerinin ikili bağlılık oranında önemli bir değişiklik görülmemiş olması da farklı boyutlarda gerçekleştirilen ağır sıvı testlerinden edilen sonucun temel nedeni olarak yorumlanmaktadır.

K-feldispat taneleri ile Fe oksit/hidroksit tanelerinin ikili bağlılık oranı tüm boyut fraksiyonlarında yaklaşık olarak %10 oranındadır. K-feldispat mineralinin de kuvars minerali ile benzer şekilde hem iri hem de ince boylarda Fe Oksit/hidroksit mineralleri ile bağlı taneler şeklinde bulunması konsantrelerdeki toplam alkali içeriğinin yüksek olma sebepleri arasında olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, MLA analizlerindeki tüm fraksiyonlarda tespit edilen Fe Oksit/Hidroksit kil karışımları da hem Al_2O_3 hem de sodyum varlığı ile örtüşmektedir.

Detaylı MLA analizleri tüvenan cevher içerisindeki en önemli kükürt kaynağının jarosit minerali olduğunu ve bu mineralin $-500+212 \text{ }\mu\text{m}$ boyut fraksiyonunda tamamen bağlı taneler şeklinde bulunduğunu göstermiştir. Ancak jarositin fraksiyonlardaki oranının düşük olması ile konsantrelerdeki S değerleri de limit değerlerin altına düşürülebilmektedir.

İnce boyda gerçekleştirilen farklı zenginleştirme yöntemleri arasında en fazla konsantre ve en yüksek demir verimi yerçekimi ile zenginleştirmeyi takiben gerçekleştirilen manyetik ayırma yöntemi ile elde edilmiştir. Üçüncü yöntem olan seçimli salkımlaştırmayı takiben flotasyon ile zenginleştirme çalışmalarında ise ince öğütme ve takiben seçimli salkımlaştırma çalışmaları ile elde edilen nihai konsantrenin demir tenöründe artış ve safsızlık değerlerinde düşüş görülmesine karşın toplam Fe veriminde

ve elde edilen konsantre miktarında ciddi bir düşüş gözlenmiştir. İnce boyda gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında en yüksek tenör değerine sahip konsantre ikinci deneysel yöntem kapsamında en ince öğütme boyu olan 53 μm 'de gerçekleştirilen yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma sonucunda elde edilmiştir. Bu koşulda tüvenan cevherin ağırlıkça %64.20'si %60.94 Fe tenörü ve %77.09 Fe verimi ile kazanılmıştır.

İsdemir Demir Çelik fabrikası tarafından pelet kalitesi için istenilen değerler ile bu tez çalışması kapsamında elde edilen en yüksek kalitedeki konsantrenin kimyasal içeriklerinin karşılaştırılması Çizelge 4.3'te sunulmaktadır.

Çizelge 4.3 İsdemir pelet kalitesi gereksinimleri ile yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma testinden elde edilen ürün (-53 μm) özelliklerinin kıyaslanması

Pelet Kalitesi	Baz terkip (%)	Üretilen Konsantre
Fe	>65.5	60.94
SiO ₂	<6	5.51
MgO	<1.5	0.25
CaO	<3	0.14
Al ₂ O ₃	<1	1.38
Na ₂ O	<0.05	0.01
K ₂ O	<0.05	0.22
TiO ₂	<0.05	0.13
MnO	<3.87	0.19

Çizelge 4.3 incelendiğinde, öğütme inceliğinin 53 μm 'ye düşmesi sonucunda dahi elde edilen konsantrenin toplam Fe tenöründe sınırlı bir iyileşme yaşandığı görülmekte ve pelet kalitesi için gerekli koşulu sağlamamaktadır Ayrıca bu koşulda elde edilen toplam Fe verimi (%77.09) endüstriyel ölçekli bir uygulama için kabul edilebilir değerlerin oldukça altındadır.

Bu duruma ek olarak elde edilen konsantre içerisindeki ana safsızlık olan SiO₂ değeri her ne kadar limit değerlerin altında olsa da kalibre ve toz cevherlerde elde edilen değerlerden aşağı düşürülemediği. K₂O değerleri MLA bulguları ile orantılı şekilde K-feldispat taneleri ile Fe oksit/hidroksit tanelerinin ikili bağlılık durumunun devam ettiğinin açık bir göstergesidir. Benzer şekilde Al₂O₃ içeriğinin de yüksek değerlerde kalması Fe Oksit/Hidroksit kil karışımlarının yetersiz serbestleşmesi ile ilişkilendirilmektedir. Bu

durumun, tüvenan cevher numunesi içerisindeki safsızlıkların ince boylarda bile yeterli ölçüde serbestleşmemesinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar detaylı MLA bulgularıyla da örtüşmektedir.

Günümüzde, demir çelik sektörü pazarda düzenli, uygun fiyatlı ve yüksek kaliteli demir cevherlerini bulmakta güçlük çekmekte ve ürettikleri veya satın aldıkları demir cevherlerini daha yüksek tenörlü cevher konsantresi ile karıştırarak kendi paçal reçetelerini oluşturmaktadırlar.

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen parça ve toz konsantreler de ufak iyileştirmeler ile demir çelik endüstrisinde kullanılabilir özelliklere sahiptir. Günümüzde, demir çelik endüstrisinde harman tenörü değerleri (en az % 58 Fe) göz önünde bulundurulduğunda bu tip cevherlerin, çelik üretiminde harman kalitesini iyileştirici yüksek tenörlü ve uygun kimyasal bileşimdeki cevherlerle paçallanma sonucu kullanılabileceği düşünülmektedir. Cevher kalitesinin paçallama yolu ile artırılması doğal olarak daha pahalı bir cevherin harmana katılması ile sağlanabilecektir. Bu durumda, cevherin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra ekonomik ve lojistik etkenler de göz ardı edilmemelidir.

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen pelet kalitesine en yakın konsantrenin de paçallama ile demir çelik sektöründe kullanılabilir olduğu düşünülmektedir. Ancak, bu koşulda gerek tüm cevherin 53 μm 'ye öğütülmesi için gerekli birim enerji maliyeti, gerekse bu koşulda dahi toplam Fe veriminin kabul edilebilir değerlerin oldukça altında olması bu tür bir konsantrenin fiziksel veya fizikokimyasal yöntemler ile ekonomik şekilde üretilme imkanının olmadığı şeklinde yorumlanmaktadır.

Kapsamlı deneysel çalışmalar sonucunda ortaya çıkan en önemli sonuçlardan bir tanesi de birinci deneysel yöntem kapsamında KYA ile uzaklaştırılan şlam numunesi (-38 μm) ile tüvenan cevherin tamamının 53 μm 'ye öğütülmesi sonucu gerçekleştirilen yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma deneylerinden elde edilmiştir (Çizelge 4.4). Benzer boyut ve kimyasal içeriklere sahip iki numuneden doğal şlam olarak uzaklaştırılan malzemenin aynı koşullarda zenginleştirme davranımının daha zayıf olduğu görülmektedir. Bu sonuç, cevher mineralojisinin en ince boylarda daha da karmaşık hale geldiğini göstermektedir. Modal mineralojik analiz ile ortaya konulan kuvars, K-Feldispat, Si-Al kil mineralleri, Mn Hidroksit kil karışımları ve Fe Oksit/Hidroksit kil karışımlarının karmaşık ilişkileri, bozunma ve yer değiştirme mekanizmaları sonucunda cevherleşmenin özellikle daha ince

boylarda karmaşık bir yapıya dönüştüğü şeklinde yorumlanmaktadır. Bu durum, cevher içerisindeki iri boyut fraksiyonlarının görece daha iyi zenginleştirme performanslarının açıklanmasında serbestleşme verilerinin yanında önemli bir işaret olarak görülmektedir.

Çizelge 4.4 KYA şlamı (-38 µm) ile tüvenan cevherin (-53 µm) yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma test sonuçlarının karşılaştırılması

Ürün	Ağırlık (%)	Tenör (%)						
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P ₂ O ₅
KYA Şlamı	62.12	56.86	7.13	1.91	0.48	0.02	0.18	0.22
Tüvenan Cevher	64.20	60.94	5.51	1.38	0.22	0.01	0.11	0.15

Bu bilgiler ışığında, gerçekleştirilen çalışmanın kolay işletilebilir demir sahaları dışındaki yatakların maden işletme maliyetleri ve demir piyasasının gelecekteki koşulları dikkate alınarak değerlendirilmesine imkan sağlayacağı, karmaşık yapıdaki bir demir cevherinin karakterizasyonu ve zenginleştirme davranımının belirlenmesine yönelik yol haritasına katkı sunacağı ve benzer cevherler ile gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar benzer yapıdaki diğer demir cevherleri için de son derece dikkatli ve detaylı bir karakterizasyon sürecinin gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır. Çalışma, son derece karmaşık bir mineralojiye sahip bu ve benzeri cevherlerde fiziksel yöntemler dışındaki yöntemlerinde maliyet kalemi göz ardı edilmeden değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarması açısından önem arz etmektedir.

2018 yılında Türkiye’de 15,7 milyon tonluk yıllık üretim kapasitesi bulunmaktadır. Bu üretimin büyük bir kısmı entegre demir-çelik fabrikalarında kullanılırken, düşük tenörlü demirler çimento sektöründe farine katılarak klinker (yarı mamül) yapımında, ince öğütülmüş manyetit cevheri ise, kömür zenginleştirme prosesinde ağır ortam yaratmada (lavvar) kullanılmaktadır. Yeni yatakların tespit edilememesi durumunda, mevcut rezerv 15,7 milyon ton yıllık üretim kapasitesine göre 8 yıl sonra tükeneceği gerçeği bu tür cevherlerin de en kısa sürede demir çelik endüstrisinde kullanılması gerekliliğinin en temel göstergesidir.

5. ÖNERİLER

Detaylı karakterizasyon ve zenginleştirme çalışmaları cevherden yüksek demir içeriğine sahip konsantrelerin elde edilmesi için, öğütme inceliğinin çok ince boylara gitmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Ancak çok ince öğütme boylarında dahi fiziksel ve fiziko kimyasal yöntemler ile elde edilen konsantrelerin kalitesinde sınırlı bir iyileşme elde edilebilmiştir. Bu nedenle, çalışmaya konu olan cevherin zenginleştirilmesi amacıyla indirgenmiş kavurma gibi pirometalurjik yöntemlerin veya asit veya alkali liçi gibi hidrometalurjik yöntemlerin kullanılabilirliğinin araştırılması önerilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen konsantreler laboratuvar ortamında ve en uygun fiziksel şartlarda üretilmiştir. Laboratuvar ölçeğinde ideal koşullarda belirlenen yıkanabilirlik verilerinden veya zenginleştirme testlerine ait sonuçlardan yola çıkarak, tesis ölçekli ekipmanların doğası gereği ortaya çıkan verimsizlikler endüstriyel bir uygulamaya gidilmesi durumunda mutlaka dikkate alınmalıdır. Böyle bir durumda gerçekte ortaya çıkacak üretim değerlerinin laboratuvar ölçekli deney sonuçları ve cevher zenginleştirme ekipmanlarının matematiksel modelleri kullanılarak simülasyon yardımı ile yeniden hesaplanması önerilmektedir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar benzer yapıdaki diğer demir cevherleri için de son derece dikkatli ve detaylı bir karakterizasyon sürecinin gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır. Çalışma sonucunda, son derece karmaşık bir mineralojiye sahip bu ve benzeri cevherlerde fiziksel yöntemler dışındaki yöntemlerinde maliyet kalemi ve ekonomik göstergeler göz ardı edilmeden değerlendirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Madencilik Türkiye, Madencilik ve Yer Bilimleri Dergisi, Sanayinin Yapı Taşlarından Demir, 86-88, 2021.
- [2] Dinlen, İ., Dünyada ve Türkiye’de Demir, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Maden Tetkik ve Arama, s. 4-9, 2022.
- [3] Bhagat, R. P., *Agglomeration of Iron Ores*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy.s. 67-70, 2019.
- [4] Sis, H. K. (2021). ENRICHMENT OF LOW-GRADE MAGNETITE ORE BY MAGNETIC AND GRAVITY. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 32-38, 2021.
- [5] Çiçek, T., Yaşar, Ç., Demir Cevherleri ve Zenginleştirme Yöntemleri, 2006.
- [6] Dunne, R. C., Kawatra, S. K., & Young, C. A. (Dü), *SME MINERAL PROCESSING & EXTRACTIVE METALLURGY HANdBOOK, 1755-1794, 2019*.
- [7] Nunna, V., Suthers, S. P., Pownceby, M. I., & Sparrow, G. J., Beneficiation Strategies for Removal of Silica and Alumina from Low-Grade Hematite-Goethite Iron Ores, 1049-1063, 2022.
- [8] Eswaraiah, C., Jeon, H.-S., Mishra, B. K., Angadi, S. I., & Miller, J. D. , Selection of Gravity Separators for the Beneficiation of Uljin Tin Ore, 54-60, 2017.
- [9] Lu, L. (Dü.), *Iron Ore Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability (2)*, 309-451, 2022.
- [10] Hoşten, Ç., Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme Temel İşlemlerinin Tasarımı, Ankara: ODTÜ Basım İşliği, 2002.
- [11] Richards, R. G., & Palmer, M. K., High capacity gravity separators a review of current status. *10(9)*, 973-982, 1997.
- [12] Goodman, R. H., Brown, C. A., & Ritchie, I. C., Advanced gravity concentrators for improvig metallurgical performance. *Minerals and Metallurgical Processing*, 79-86, 1985.
- [13] Çelik, H., İnce Kömürlerin Temizlenmesinde Köpük Flotasyonu ve Ağır Ortam Siklonlarının Entegrasyonu, DEÜ, Fen ve Mühendislik Dergisi, 8, 2, 93-106, 2006.
- [14] Güçbilmez, D., Spiral Zenginleştiricilerde Tane Boyunun Performansa Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 105s., 2013.

- [15] Burt, R. O., Gravity Concentration Technology, Amsterdam-Oxford-New York Tokyo: Elsevier,1984.
- [16] Anon. The Role of Heavy Media Separation- a Survey of Modern Applications. *Eng. Min. J.*, 164(5), 80-87, 1963.
- [17] Krige, J., Heavy Medium separation at Iscor's Sishen. *Dense Medium Operators Conferece* (s. 65-73). The AusIMM Southern Queensland Branch, Dense Medium Operatros Conference, 65-73, 1987.
- [18] King, I., The Latest Developments in Iron Ore Processing, 2014.
- [19] Özcan, Ö., Kabaran Yataklı Ayırıcı ile Farklı Minerallerin Zenginleştirilmesi, *Yerbilimleri*, 38 (2), 179-192, 2017.
- [20] Hopstock, D.M., Fundamental of Magnetic Separation, SME Mineral Processing Handbook, SME/AIME, 626-629,1975.
- [21] Zhang, X., Gu, X., Han, Y., Parra-Alvarez, N., Claremboux, V., & Kawatra, S., Flotation of Iron Ores: A Review, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2-19, 2019.
- [22] Yalçın, T., & Ateşok, G., Demir Cevherlerinin Zenginleştirilmesi. *Scientific Mining Journal*, 18(2), 20-32, 1979.
- [23] Glembotsky, V. A., Reagent for Iron Ore Flotation. *Mineral Processing*, Cannes, 371, 1963.
- [24] Fuerstenau, M. C., Selective flotation of iron oxide. *Trans, AIME*, Haziran, 200, 1967.
- [25] Kapiamba, K. F., & Kimpiab, M., The effects of partially replacing amine collectors by a commercial frother in a reverse cationic hematite flotation. *Heliyon*, 7(3), 2021.
- [26] Tao, D., Wu, Z., & Sobhy , A., Investigation of nanobubble enhanced reverse anionic flotation of hematite and associated mechanisms. *Powder Technology*, 379, 12-25, 2021.
- [27] Frommer, D. W., Iron Ore Flotation: Practice, Problems, and Prospects. Minneapolis, Minnesota: THE JOURNAL OF THE AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY, 270-273, 1967.

- [28] Ray, N., Nayak, D., Dash, N., & Rath, S. S., Utilization of low grade banded hematite jasper ores: recovery of iron values and production of ferrosilicon. *Clean Technol. Envir.*, 20(8), 1761-1771, 2018.
- [29] Ralston, J., The influence of particle size and contact angle in flotation. *Science Direct, Develop. Miner. Process.*, 12(3), 203-224, 1992.
- [30] Mathur, S., Singh, P., & Moudgil, B. M., Advances in selective flocculation technology for solid-solid separations. *Int. J. Miner. Process.*, 58(1-4), 201-222, 2000.
- [31] Shibata, J., & Fuerstenau, D. W., Flocculation and flotation characteristics of fine hematite with sodium oleate. *Int. J. Miner. Process*, 72(1-4), 25-32, 2003
- [32] Forbes, E., Shear selective and temperature responsive flocculation: A comparison of fine particle flotation techniques. *Int. j. Miner. Process*, 99(1-4), 1-10, 2011.
- [33] Shrimali, K., Atluri, V., Wang, Y., Bacchuwar, S., Wang, X., & Miller, J. D., The nature of hematite depression with corn starch in the reverse flotation of iron ore. *J. Colloid Interf. Sci.*, 524, 337-349, 2018.
- [34] Kumar, A., & Singh, O., Indian Iron Ore Scenario : Low Grade Iron Ore Beneficiation.
- [35] Iwasaki, I., Iron Ore Beneficiation in the U.S.A.: Past and Future. Coleraine, Minnesota, USA, 1-9, 2000.
- [36] Termes, S. C., & Wilfong, R. L., *Flocculation of Metal Oxide and Hydroxide Minerals With Cross-Linked Starches Containing Chelating Groups*. UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 2-17, 1985.
- [37] Bretas, P., Otavio, R., & Jose, d., Selective flocculation and floc-flotation of iron bearing mineral slimes. *Research, Society and Development*, 11(5), 1-9, 2022.
- [38] Gundewar, C. S., Iron & Steel Vision 2020. (M. Sumesh, Dü.) *Nagpur: Aqua Process*, 36-87, 2020.
- [39] Swamy, A. K., Nikkam, S., & Palthur, S. K., Recovery of Hematite from Banded Hematite Quartzite of Southern India By Magnetic Separation and Reverse Flotation. *Minerals*, 12, 2-13, 2022.

- [40] Panda, L., Biswal, S. K., Venugopal, R., & Mandre, N. R., Recovery of Ultra-Fine Iron Ore from Iron Ore Tailings. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71, 1-5, 2017.
- [41] Özgür, Ö., Harzanagh, A. A., Orhan, E. C., & Ergün, Ş. L., Beneficiation and flowsheet development of a low grade iron ore: A case study. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 165, 235-250, 2021.
- [42] Nayak, N. P., Das, A., & Pal, B. K., Feasibility Of Beneficiation Of Banded Hematite Jasper Of Eastern India. *IJERT*, 1(9), 1-11, 2012.
- [43] Dwari, R. K., Rao, D. S., & Reddy, P. S., Mineralogical and Beneficiation Studies of a Low Grade Iron Ore Sample. *Journal of Institute of Engineers India Series D*, 95, 115-123, 2014.
- [44] Goodall, W.R.; Scales, P.J.; An Overview of the Advantages and Disadvantages of the Determination of Gold Mineralogy by Automated Mineralogy, *Minerals Engineering*, 2007, 20 (5), 506-517.
- [45] Can, N.M.; Çelik, İ.B.; Proses Mineralojisi: Cevher Hazırlamadaki Önemi, Ölçüm Yöntem ve Araçları-Bölüm 1, *Madencilik Dergisi*, 2009, 48, 43-53.
- [46] Celep, O.; Baş, A; Yazıcı, E; Deveci, H; Altın Cevherlerinin Karakterizasyonunda Kullanılan Mikro Analitik Yöntemler, *Scientific Mining Journal*, 2018, 57(4), 281-298