Kromit Zenginleştirme Tesis Verilerinin Benzetim Çalışmalarında Kullanılmasının Araştırılması

Betül GÜVENKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık 2024

Investigating the Use of Chromite Beneficiation Plant Data in Simulation Studies

Betül GÜVENKAYA

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mining Engineering

December 2024

Kromit Zenginleştirme Tesis Verilerinin Benzetim Çalışmalarında Kullanılmasının Araştırılması

Betül GÜVENKAYA

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Cevher Hazırlama Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Halil İPEK

İkinci Danışman: Doç. Dr. Yakup UMUCU

Aralık 2024

ONAY

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Betül GÜVENKAYA'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Kromit Zenginleştirme Tesis Verilerinin Benzetim Çalışmalarında Kullanılmasının Araştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Halil İPEK

İkinci Danışman : Doç. Dr. Yakup UMUCU

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Halil İPEK

Üye: Prof. Dr. Ferihan GÖKTEPE

Üye: Prof. Dr. Ali UÇAR

Üye: Doç. Dr. Yakup UMUCU

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Y. Hakan GÜRSOY

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……..…….. tarih ve ….....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. ....

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Halil İPEK ve Doç. Dr. Yakup UMUCU danışmanlığında hazırlamış olduğum "Kromit Zenginleştirme Tesis Verilerinin Benzetim Çalışmalarında Kullanılmasının Araştırılması" başlıklı Yüksek Lisans özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.16/12/2024

Betül GÜVENKAYA

İmza

ÖZET

Kromit, modern endüstriyel uygulamalarda vazgeçilmez bir mineraldir. Paslanmaz çelik üretiminden metal kaplamaya, ahşap korumadan katalizör üretimine kadar birçok alanda kritik bir rol oynamaktadır. Yüksek dayanıklılık, korozyon direnci ve kimyasal kararlılık gibi özellikleri nedeniyle kromit, sanayinin birçok alanında temel bir bileşen olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, kromit madenciliği ve işlenmesi, dünya ekonomisi ve endüstrisi için büyük öneme sahiptir.

Cevher zenginleştirme tesislerinin verimliliğini ve performansını artırmak için düzenli ölçümler yapılmalı ve bu ölçümler sürekli olarak analiz edilmelidir. Performans göstergeleri, tesisin zayıf noktalarını ve iyileştirme fırsatlarını belirlemek için kullanılabilir. Bu analizler, proses optimizasyonu, enerji verimliliği, maliyet azaltma ve çevresel etkilerin yönetimi gibi alanlarda stratejik kararların alınmasına yardımcı olmaktadır. Bu nedenle, cevher zenginleştirme tesislerinde ileri teknoloji ve otomasyon sistemlerinin kullanımı, eğitimli personelin istihdamı ve sürekli iyileştirme yaklaşımlarının benimsenmesi önemlidir. Bu adımlar, tesislerin rekabet gücünü artıracak ve sürdürülebilir bir şekilde faaliyet göstermelerini sağlayacaktır.

MODSIM'ın cevher zenginleştirme çalışmalarında kullanımı, proseslerin detaylı bir şekilde analiz ve optimize edilmesini sağlamaktadır. Bu, işletme verimliliğini, maliyet etkinliğini ve çevresel sürdürülebilirliği artırmaktadır. Ayrıca, operatörlerin ve mühendislerin eğitimini ve gelişimini desteklemekte, riskleri minimize etmekle ve stratejik karar verme süreçlerini güçlendirmektedir.

Bu çalışmanın amacı, bir kromit zenginleştirme tesisinde kullanılan Jig ünitesinde farklı ayırma yoğunlukları çalışması gerçekleştirilmesi sonucu Jigin çalışma verimliliğinin değerlendirilmesidir. Bununla birlikte tesis verileri kullanılarak MODSIM'de Jig çalışmalarında kullanılan farklı ayırma yoğunlukları üzerinde benzetim çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında Jig üzerinde değiştirilen parametrelerin ayırmaya çok fazla bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Ancak MODSIM'de parametre değişikliğinin Jig benzetimine etki ettiği bu çalışmayla ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kromit, zenginleştirme, jig, benzetim, MODSIM

SUMMARY

Chromite is an indispensable mineral in modern industrial applications. It plays a critical role in many areas, from stainless steel production to metal coating, from wood protection to catalyst production. Due to its properties such as high durability, corrosion resistance and chemical stability, chromite is considered an essential component in many areas of industry. Therefore, chromite mining and processing is of great importance to the world economy and industry.

To increase the efficiency and performance of ore beneficiation facilities, regular measurements should be made, and these measurements should be constantly analyzed. Performance indicators can be used to identify facility weak points and improvement opportunities. These analyzes help make strategic decisions in areas such as process optimization, energy efficiency, cost reduction and environmental impact management. Therefore, it is important to use advanced technology and automation systems, employ trained personnel and adopt continuous improvement approaches in ore enrichment facilities. These steps will increase the competitiveness of the facilities and enable them to operate sustainably.

The use of MODSIM in ore beneficiation studies enables processes to be analyzed and optimized in detail. This increases operating efficiency, cost effectiveness and environmental sustainability. It also supports the training and development of operators and engineers, minimizing risks and strengthening strategic decision-making processes.

The purpose of this study is to evaluate the operating efficiency of Jig by performing different separation intensities in the Jig unit used in the chromite enrichment facility. In addition, simulation studies were carried out on different separation densities used in Jig studies in MODSIM using facility data. In the light of the data obtained, it was determined that the parameters changed on the Jig did not have much effect on the separation. However, this study has shown that parameter changes in MODSIM affect the Jig simulation.

Keywords: Chromite, beneficiation, jig, simulation, MODSIM.

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında, bana yol gösteren, desteklerini esirgemeyerek araştırmaya teşvik eden değerli hocalarım Prof. Dr. Halil İPEK ve Doç. Dr. Yakup UMUCU'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Gerek deneysel çalışmalarda gerekse araştırma aşamasında değerli vaktini, görüşlerini, fikirlerini ve katkılarını esirgemeyen, örneklerin hazırlanmasında ve tesis çalışmalarında Dedeman Madencilik yönetici ve teknik personeline teşekkürlerimi sunarım.

Zenginleştirme çalışmaları sırasında sağladığı imkanlardan dolayı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olduğunu hissettiren, hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan tüm aileme teşekkür ederim. Sabırla ve hoşgörüyle her zaman neşe saçarak beni motive eden sevgili eşim ve oğluma sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi

SUMMARY vii

TEŞEKKÜR viii

İÇİNDEKİLER ix

ŞEKİLLER DİZİNİ xiii

ÇİZELGELER DİZİNİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xvi

1. GİRİŞ ve AMAÇ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 4

2.1. Kromit Cevher Yapısı, Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri 4

2.2. Türkiye'de Mevcut Durum 7

2.3. Rezervler… 9

2.4. Üretim… 10

2.5. Üretim Yöntemi ve Teknolojileri 10

2.6. Ürün Standartları 12

2.7. Kromit Zenginleştirme 14

2.7.1. Elle ayıklama (tavuklama, triyaj) 17

2.7.2. Özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme 17

2.8. Jig İle Zenginleştirme 21

2.8.1. Jiglerin çalışma prensibi 21

2.8.2. Jig işleminde tabakalaşma 22

2.8.3. Jig prosesinde ayırma yoğunluğu 23

2.8.4. Jig işleminin avantajları… 28

2.8.5. Uygulama alanları… 28

2.8.6. Jig çeşitleri 28

2.9. Endüstride Kullanılan Jigler 29

2.9.1. Hareketli elekli jigler 29

İÇİNDEKİLER

Sayfa

2.9.2. Sabit elekli jigler 30
2.9.3. Hidrolik (sulu) jigler 31
2.9.4. Pistonlu jigler 35
2.9.5. Diyaframlı jigler 36
2.9.6. Basınçlı su ile çalışan jigler 40
2.9.7. Basınçlı hava ile çalışan jigler 41
2.9.8. Pnömatik (havalı) jigler 42
2.9.8.1. Basınçlı hava ile çalışan jigler ve pnömatik jiglerin karşılaştırılması 44
2.9.9. Ağır–sıvı jigleri 45
2.10. Jiglerde Zenginleştirmeyi Etkileyen Faktörler 46
2.11. Sallantılı Masalarla Zenginleştirme 47
2.11.1. Sallantılı masalarda zenginleştirmeyi etkileyen faktörler 49
2.12. Multi Gravite Ayırıcısı (MGS) İle Zenginleştirme 50
2.13. Knelson Konsantratörü İle Zenginleştirme 52
2.14. Manyetik Ayırma ile Zenginleştirme 53
2.14.1. Kromitin manyetik duyarlılığı 54
2.14.2. Gang minerallerinin özellikleri 55
2.14.3. Cevherde manyetit bulunması 55
2.15. Elektrostatik Ayırma İle Zenginleştirme 55
2.16. Flotasyon İle Zenginleştirme 56
2.17. Proses Akım Şeması 56
2.18. MODSIM ve Benzetim 58
3. MATERYAL VE YÖNTEM 61
3.1. Materyal… 61
3.1.1. Mineralojik-petrografik analizler 61
3.2. JİG İle Zenginleştirme ve Tesis Analizi 65
3.2.1 Bendelari jigi 65
3.2.2. Tesis analizi 66

İÇİNDEKİLER

Sayfa

4. BULGULAR VE TARTIŞMA 71
4.1. MODSIM'de Benzetim Çalışmaları 71
4.2. Benzetim ve Tesis Verilerinin Karşılaştırılması 78
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 81
KAYNAKLAR DİZİNİ 84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1. Bir jigin yapısal unsurları ve çalışma prensibi....22
2.2. (a) Denver veya Harz Jigi, (b) Baum Jigi, (c) Batac Jigi, (d) Hat İçi Basınç Jigi Ayırma Farkları….27
2.3. Hidrolik Jig....32
2.4. Hidrolik jigin genel şeması (yan görünüm)....32
2.5. Hidrolik jigin genel şeması (ön görünüş)....34
2.6. Bazı pistonlu ve diyaframlı jiglerin şeması....37
2.7. Farklı jigglerin tipik pulsasyon diyagramları. (a) Sinüzoidal, (b) Trapezoidal, (c) Hızlı yukarı hareketli "testere dişi", ve (d) Hızlı aşağı hareketli "testere dişi"....38
2.8. Diyaframlı jig ve jig hazne içi…....39
2.9. Pnömatik jig (ön kesit)….44
2.10. Akan Su Tabakasında Katı Hareketi Üzerindeki Eşik Etkisi….48
2.11. Üç Katlı Sallantılı Masa....49
2.12. MGS Ünitesi Şematik Gösterimi....52
2.13. Knelson Ayırıcısı ve Şematik Görünüşü....53
2.14. Knelson Ayırıcısının Düşey Kesiti....53
2.15. Sanayi Tipi Manyetik Ayırıcı....54
2.16. Manyetik Ayırıcı Çalışma Prensibi....54
2.17. Elektrostatik Ayırma Prensibi....56
3.1. Proses Akım Şeması (Triyaj ve Jig Tesisi)....57
3.2. Proses Akım Şeması (KonsantratörTesisi)....57
3.3. Deneysel süreçlerin şematik gösterimi....61
3.4. Ocakları ve mostraları gösterir harita....62
3.5. Taştepe Ocak Kromit Cevheri Örnekleri.....63
3.6. Dedeman Madencilik Eskişehir Jig Tesisi-a....67
3.7. Dedeman Madencilik Eskişehir Jig Tesisi-b….....67
3.8. JİG'e beslenen cevherin tane boyutu ile miktarların değişimleri....68
3.9. JİG'e beslenen cevherin tane boyutu ile tenör değişimleri....68
3.10. Jig için farklı ayırma yoğunluklarında beslenen ve elde edilen konsantre için tenörsel değişim....69

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

3.11. Jig için farklı ayırma yoğunluklarında beslenen ve elde edilen konsantre için üretim miktarı ve elektrik sayaç değeri değişim..... 70
4.1. MODSIM ana giriş platformu..... 72
4.2. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim platformu 72
4.3. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetimde bilgi girişleri platformu 73
4.4. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetimde gerekli bilgilerin modül girişleri-a.....73
4.5. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetimde gerekli bilgilerin modül girişleri-b..... 74
4.6. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim sonucunda elde edilen veriler-a 74
4.7. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim sonucunda elde edilen veriler-b. 75
4.8. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim sonucunda ayırma yoğunluğuna bağlı elde edilen partisyon katsayısı değişimi 76
4.9. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim sonucunda elde edilen ayırma etkinliği ve performansının yoğunluğa bağlı değişimi 76
4.10. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim sonucunda farklı yoğunluklarda elde edilen konsantre kazanma miktarı değişimi..... 77
4.11. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim sonucunda farklı yoğunluklarda elde edilen krom tenörü kazanma verimi ilişkisi.....77
4.12. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim sonucunda farklı yoğunlukları her birinde elde edilen fraksiyonel (krom dağılımları) değişim ilişkisi… 78
4.13. MODSIM ve Tesiste farklı yoğunluklarda elde edilen konsantre kazanma miktarı değişimi..... 79

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

2.1. Kullanım Alanlarına Göre Türkiye' de Üretilen Krom Cevherlerinin Özellikleri 8

2.2. Uygulama Alanı Bulabilen Kromit Zenginleştirme Yöntemi Sınıflandırması 16

2.3. Özgül Ağırlık Farkına Dayalı Zenginleştirme Yöntemleri ve Yaklaşık Uygulama Boyutları 18

3.1. Taştepe Ocaktan üretilen kromitlerin ve yan kayaçların yoğunluk değerleri 64

3.2. Ocaktan üretilen cevherin genel kimyasal analizi 65

3.3. JİG'e beslenen cevherin elek analizi ve tenör değerleri… 68

3.4. Farklı yoğunluklarda ayırım yapan jig için işletme koşulları… 70

4.1. Farklı yoğunluklarda krom zenginleştirme için gerçek ve simülasyon zamanında elde edilen sonuçların istatiksel analizi. 80

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
Cr	Krom
μm	Mikro metre
$	Dolar
dk	Dakika
kg	Kilogram
gr/cm^3	Santimetre küpte gram
°	Derece
ppm	Milyonda bir
A	Amper
V	Volt
KEÜ	Kümülatif elek üstü
KEA	Kümülatif elek altı
LOI	Loss on ignition (Kızdırma Kaybı)
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Kromit, endüstride geniş bir kullanım alanına sahip olan değerli bir mineraldir. Paslanmaz çelik üretiminden metal kaplamaya, seramiklerden boya ve vernik endüstrisine kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kromit, paslanmaz çelik üretiminde kritik bir bileşendir; bu malzeme, korozyona dayanıklı, sağlam ve estetik olarak çekici özellikleri ile otomotiv, inşaat, ev aletleri ve diğer birçok endüstriyel uygulamada tercih edilmektedir. Aynı zamanda, metal kaplama işlemlerinde de önemli bir rol oynar, metal yüzeylerin korozyona karşı korunmasını sağlar ve dayanıklılığını artırarak estetik bir görünüm kazandırır. Kromit, ahşap koruma endüstrisinde de önemli bir yere sahiptir; krom asidi (potasyum kromat ve sodyum kromat) olarak bilinen bir kimyasalın ana bileşeni olarak, ahşabın çürümesini önler ve böcek zararlarını engelleyerek ahşabın ömrünü uzatır. Bunun yanı sıra, krom, katalizörlerin üretiminde de önemli bir elementtir ve petrokimya ile kimyasal üretim süreçlerinde kullanılarak reaksiyon hızını artırır. Seramik endüstrisinde ve refrakter malzemelerin üretiminde de yer alan kromit, yüksek sıcaklıklara dayanıklı seramiklerin yapımında kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, kromitin endüstriyel önemi büyüktür ve birçok farklı uygulamada sürekli olarak artmaktadır.

Kromit cevherleri, %32-34'ün üzerinde Cr_2O_3 içeren parça cevherler olarak doğrudan kullanılabilirken, %32'den düşük Cr_2O_3 içeren cevherlerin endüstrinin ihtiyaçlarına uygun hale getirilmesi için zenginleştirilmesi gerekmektedir (Güney, 1990). Eşlik eden gang minerallerine göre yüksek yoğunluğu nedeniyle, kromit, serbestleşme tane boyutuna bağlı olarak gravite ayırma yöntemi kullanılarak en iyi şekilde zenginleştirilir. Cevher iri tane boyutlarında serbestleşe biliyorsa ayırma ağır ortam veya jig kullanılarak gravite ile zenginleştirme gerçekleştirilebilir. Eğer cevher iri boyutlarda serbestleşiyorsa, ağır ortam veya jig ile ayırma işlemi yapılabilir. Daha ince boyutlardaki serbestleşmelerde ise sallantılı masa kullanılarak zenginleştirme işlemi tercih edilmektedir (Ağaçayak, 2004). Bu süreçler, kromit cevherlerinin ekonomik ve verimli bir şekilde işlenebilmesi için kritik öneme sahiptir ve endüstriyel uygulamalarda verimliliği artırmaktadır.

Krom zenginleştirme süreçlerinin simülasyonu, krom cevherlerinin verimli bir şekilde işlenmesi ve krom konsantresinin optimum kalitede üretilmesi için önemlidir. Bu süreçler genellikle öğütme, flotasyon, yoğunluk farkına göre ayırma ve konsantre temizleme

gibi aşamalardan oluşur. Krom zenginleştirme benzetim çalışması, bu aşamaların optimize edilmesine, süreç performansının değerlendirilmesine ve yeni işletme stratejilerinin geliştirilmesine yardımcı olabilir. Bazı durumlarda, krom cevherlerinin yoğunluk farkına göre ayırma yöntemiyle zenginleştirilmesi tercih edilir. Simülasyon, farklı yoğunluk farkına göre ayırma devreleri ve parametrelerinin performansını değerlendirebilir ve işlem verimliliğini artırabilir. Elde edilen krom konsantresinin temizlenmesi ve saflaştırılması önemlidir. Simülasyon, farklı temizleme aşamalarını değerlendirebilir ve krom konsantresinin kalitesini optimize edebilir. Simülasyon, krom zenginleştirme tesislerinin proses kontrol sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için bir araç olarak da kullanılabilir. Otomasyon sistemlerinin performansını değerlendirebilir ve iyileştirebilir. Ayrıca simülasyon, enerji ve diğer kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlayarak işletme maliyetlerini düşürebilir ve çevresel etkileri azaltabilir.

Eskişehir bölgesi krom madenciliğinin Türkiye krom madenciliğine etkisi çok büyüktür. Dedeman Madencilik ‘in yeraltı krom madenleri arasında yer alan ve yüksek Cr/Fe oranı nedeniyle ekonomik olarak değerlendirilmesi zor olan Taştepe bölgesi cevherleri pazara önemli katkı sağlamaktadır. Bu nedenle Türkiye'deki tüm krom rezervlerinin yetkin bir şekilde değerlendirilmesi garanti altına alınmıştır. Dedeman Madencilik Eskişehir Krom İşletmeleri tesisinde cevher zenginleştirme işlemleri, yüksek ve düşük tenörlü cevherler için iki bölümde yürütülmektedir. Bu bölümler;

Yüksek Tenörlü Cevherler için:

- Elle Ayıklama (Tavuklama- Triyaj)
- Jig

Düşük Tenörlü Cevherler için:

- 24 adet ana ürün sallantılı masa
- 6 adet ara ürün sallantılı masa

Çalışma kapsamında tesiste kullanılan jigden farklı ayırma yoğunluklarında yapılan zenginleştirme işleminden elde edilen ürünler üzerinde tenör ve miktarsal ölçümler yapılmıştır. Bununla birlikte MODSIM’de de aynı akım şeması kurularak benzetim

yapılmıştır. Elde edilen veriler karşılaştırılmalı olarak sunuluştur. Sonuçlar detaylıca yorumlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Kromit Cevher Yapısı, Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

1797'de Fransız kimyager Louis Nicolas Vauquelin, Sibirya'da bulunan bir cevher örneğinde kromu keşfetti. Ancak krom, Birinci Dünya Savaşı'na kadar yaygın olarak kullanılan bir metal değildi. 1913'te İngiliz bilim adamı Harry Brierley, top namlularının dökümünde kullanılan çeliği araştırırken, hurdalığındaki çeliğin birkaçı dışında tamamının paslandığını fark etti. Birkaç parçayı test etti ve bunların %14 krom içerdiğini buldu. Bu buluş bıçak, çatal, kaşık vb. imalatında kullanılan paslanmaz çeliğin üretilmesine olanak sağlamıştır (Bayat, 2009).

Krom, Yunanca renk anlamına gelen krom kelimesinden türetilmiş olup, sert, parlak, gümüşi bir metale verilen isimdir. Cilalı ve paslanmaz çelik araba parçalarına İngilizce ve Türkçe'de "chrome" adı verilmektedir. Daha sonra Türkçede krom kelimesi doğada oksitler halinde bulunan kromit ve krom cevherinin adı olmuştur (Ağaçayak, 2004).

Yer kabuğunun doğal bir bileşeni olan krom; Metalurji, kimya ve termal endüstrilerdeki temel unsurlardan biridir. Kromit spinel grubuna ait bir mineral olup kübik sistemde kristalleşir. Teorik formülü $FeCr_2O_4$ olmasına rağmen doğal olarak oluşan kromit mineralinin formülü $(Mg, Fe)(Cr, Al, Fe)_2O_4$'tür (DPT, 2001).

Kromit, kompakt granüler bir kütle halinde ve nadiren oktahedral bir kristal halinde oluşur, çatlamaz. Rengi kahverengi çizgili siyahtan koyu kahverengiye kadardır. Kromit bileşiminde magnezyum içerir ve bunun sonucunda cevher tenörü %40'a düşer. Bu cevherlerde magnezyum demirin yerini alır ve pikotit olarak adlandırılır. Ayrıca Ti, Mn, Zn, Ni ve Co elementlerine de rastlanmıştır (Ağaçayak, 2004).

Aleve zümrüt yeşili rengini verir. Toz halinde Na_2CO_3 ile çözülürse manyetik bir madde açığa çıkarır (Turgut, 1995). Dünyada 50'ye yakın krom mineralinin keşfedildiği bilinmesine rağmen ekonomik değeri olan ve krom yataklarının temelini oluşturan tek mineral kromittir.

Cevher önce saf krom okside dönüştürülür. Bu oksit daha sonra alüminyum ile karıştırılarak bir fırında ısıtılır. Termit yöntemi olarak bilinen bu işlem, erimiş kromu açığa çıkarır. Krom ayrıca elektroliz yoluyla da elde edilebilir. Krom cevherinin sodyum kromat ile ısıtılıp, daha sonra elde edilen karışımın elektrik akımından geçirilmesiyle krom elde edilir (Bayat, 2009).

Krom cevherinin kimyasal bileşimi, cevherin sanayide kullanım alanlarını belirlemektedir. Kimyasal analizlerde SiO_2, Cr_2O_3, Al_2O_3 yüzdeleri ve Cr/Fe oranı çok önemlidir. Doğada bilinen en yüksek kromit minerali Cr_2O_3 içeriği %68'dir.

Krom cevherinin endüstrideki uygulama alanlarına bağlı olarak kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri açısından sınırlamaları bulunmaktadır. Cevherin kimyasal bileşiminin neden olduğu kullanım kısıtlamaları, teknoloji ilerledikçe daha da esnek hale gelmektedir. Modern teknoloji, metalurji sektöründe bir tür yüksek demirli krom cevheri olan kimyasal cevher için yeni kullanımlara imkân vermektedir (DPT, 2001).

Kromit mineralleri ve yatakları için orijinal ana kaya ultrabazik bir kayaçtır. Serpantinit ve dunit gibi ultrabazik kayalarda, kromit kristalleri çekirdekte veya bantta gömülü olarak bulunur ve birlikte cevheri oluştururlar. Görünümlerine, bileşimlerine ve çevredeki malzemelerdeki kromit kristalleri ve taneciklerinin miktarına göre, kromit cevheri büyük, dağınık, nodüler, halkasal, bantlı, geniş bantlı ve geniş bantlarla temsil edilmektedir. Mg, Cr, Fe ve Al kromiti oluşturan elementler olmasına rağmen, gang mineralinden elde edilen silika, krom cevheri analizinin önemli bir parçasıdır (DPT, 2001).

Dünya üzerindeki çok sayıda krom yatakları detaylı olarak incelendiğinde, kromitin kristalleşmenin erken safhasında peridotit haline farklılaşması sonucu ayrılarak kristalleştiği tespit edilmiştir. Bileşimi kısaca şöyle anlatılmaktadır: Bilindiği gibi magma; Doğada bulunan tüm elementleri içeren, bir araya getirilmiş, yüksek basınç ve sıcaklıklarda dengelenmiş, fiziksel ve kimyasal olarak sıvı bir maddedir. Sıcaklık ve basıncın düşmesi (jeolojik olaylar sonucu) gibi fiziksel ve kimyasal koşullardaki değişiklikler magmanın stabilitesini bozar ve sıcaklıktaki bu azalma ilk refrakter minerallerin oluşumunu sağlar (yüksek sıcaklıklarda kristalleşme). Örneğin kromit, ilmenit ve manyetit, yerçekiminin

etkisi altında magma içinde kristalleşip hareket ederek, magma minerallerinin yoğunluğunun dengede olabileceği alanlarda (tabakalaşma) belirli yüzeyler oluşturur. Sıvı magmanın farklılaşmasıyla oluşan bu yataklara maden yatakları adı verilmektedir. Magma yerleştikten sonra tektonik olaylar sonucu stratigrafik katmanlar kırılıp parçalanabiliyorsa (cepler), doğrusal tipte bir katman (podiform katman) oluşturur. Kristalleşme ve farklılaşma sonucu oluşan magmalardan oluşan bu minerallere en iyi örnek, suprabazik, nadiren bazik formlarda ortaya çıkan krom yataklarıdır (Gülman, Fethiye, Bursa, Eskişehir bölgeleri - Türkiye, Bushwild - Güney Afrika).

Alp tipi cevherler, tabakalı cevherlere göre daha yüksek Cr/Fe oranları nedeniyle 1970'li yıllara kadar metalurjide yaygın olarak kullanıldı. Bu nedenle yüzyılın ilk üççeyreğinde kromit çoğunlukla Alp yataklarından üretildi. Düşük Cr_2O_3 içeriği ve Cr/Fe oranı ile yüksek FeO içeriğine sahip tabakalı yataklardan üretilen cevher, 1970'li yıllara kadar kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanıldı.

Ancak Alp yataklarındaki yatakların tespit edilmesinin zorluğu ve uzun vadeli ticaret bağlantılarının kurulamaması gibi nedenler, özellikle metalurji endüstrisinde tabakalı yataklardan krom cevheri çıkarılmasına olanak tanıyan teknolojilerin geliştirilmesini zorlamıştır. Elde edilen olumlu sonuçlara bağlı olarak bu tip yataklardan krom cevheri üretimi artış eğilimi göstermeye başlamıştır (DPT, 2001).

Podiform tip yataklar Alp orojenezinin etkisi altındaki bölgelerde oluştuklarından "Alpin tip" yataklar olarak da anılırlar. Tektonik hareketleri büyük ölçüde etkilemesi nedeniyle küçük, düzensiz bir mercek şeklinde görünür ve tabanının uzunluğu birkaç on metreyi aşmaz, mercekler, yığınlar ve torbalar halindedir. Kromit blokları ultramafik kayaçlarda oluşur ve bu kayaçlar genellikle pürüzlüdür.

Tabakalı kromit yatakları dünyada bilinen tüm kromit kaynaklarının %98'ini oluşturmaktadır (ancak dünyada üretilen kromitin yarısı uzamış, diğer yarısı tabakalıdır). Magmatik kompleksler bantlı yapılarıyla yüksek simetri gösterirler. Kromit alanları bazen tamamen kilometrelerce uzanır. Bazen silt oluşumlarında kromit kümeleri görülür. Her banttaki kromitin kalınlığı birkaç milimetreden bir metreye kadar değişir ve çok büyüktür. Gabroik magmaları oluşturan piroksenler, dünit ve peridotitler kromatik yüzeylerin dışında

ve bantların arasında yer alır. Tabakalı yatakların en belirgin örnekleri Bushveld yatakları (Güney Afrika), Stillwater (Montana - ABD) ve Great Dyke krom yatakları (Rodezya)'dır. Bu tip cevher genellikle %40'ın altında Cr_2O_3 tenörleri içerir. Her yüksek derece ve alt derece için. Cr/Fe oranı 2 civarındadır (Deniz, 1992).

2.2. Türkiye'de Mevcut Durum

Krom yatakları içeren ve peridotit olarak bilinen ultrabazik kayaçlar Türkiye'nin geniş alanlarını kaplamaktadır. Peridotit ofiyolit grubuna ait bir kayadır ve Alp kuşağı boyunca yer alır. Türkiye'de bulunan peridotit ve içindeki krom yatakları Alpin tip (podiform tip) olarak sınıflandırılmaktadır.

Alp tipi asma yataklarının karmaşık bileşimsel ilişkileri, doku özellikleri ve nispeten küçük boyutları bunların ayırt edici özellikleridir. Krom yatakları genellikle düzensiz şekilli merceklerden, bantlardan veya kümelerden oluşur. Kromit bloklarının uzunlukları birkaç santimetreden 100 metrenin üzerine kadar değişse de uzunluk genellikle 4-5 metre civarındadır. Bazı durumlarda kalınlığının 5 metreyi aştığı bilinse de genellikle bu değer 2-3 metre civarındadır.

Alp tipi krom yatakları yatak boyutları bakımından tabakalı yataklara göre çok daha küçüktür. Alp tipi kromit yataklarının sayısı 1 milyon tonu aşan rezervlerle sınırlıdır. Alp tipi kromit yataklarında Cr_2O_3 derecesi tabakalı yataklara göre daha geniş bir aralıkta değişirken, FeO (toplam demir) içeriği çok fazla değişmez. Bu yataklardan üretilen krom cevheri metalurji ve termal endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Türkiye'deki krom yatakları ultrabazik kayaçlar içerisinde belirgin bir dağılım göstermeden ülke geneline yayılmaktadır. Türkiye'de bilinen 800'e yakın ayrı veya birleşik krom yatağı ve krom cevheri sahası bulunmaktadır. Coğrafi olarak krom yataklarının dağılımı altı bölgeye ayrılabilir. Bunlar önem sırasına göre şu şekilde sıralanabilir:

- Guleman (Elazığ) yöresi
- Fethiye-Köyceğiz-Denizli yöresi
- Bursa-Kütahya-Eskişehir yöresi

- Mersin-Karsantı-Pınarbaşı yöresi
- Erzincan-Kopdağ yöresi
- İskenderun-Kahramanmaraş yöresi

Bu altı bölgenin dışında, dağınık bazı krom yataklarının varlığı bilinmektedir.

Türkiye'deki üç ana ofiyolit kuşağı;

- Kuzey ofiyolit kuşağı (İzmir – Bursa – Ankara – Erzincan – Erzurum)
- Orta Ofiyolit kuşağı (Muğla – Antalya – Beyşehir – Mersin – Pozantı – Pınarbaşı – Erzincan)
- Güney ofiyolit kuşağı (Antalya – Elazığ – Soridağ – Van Gölü'nün güneyi)

Türkiye krom yatakları ile ilgili rezerv bilgilerinin çok sınırlı olmasına karşın, Türkiye pazar koşullarının uygun olduğu durumlarda, bugüne kadar talebi karşılamakta pek sıkıntı çekmemiştir.

Çizelge 2.1.Kullanım Alanlarına Göre Türkiye' de Üretilen Krom Cevherlerinin Özellikleri (www.mta.gov.tr)

Cevher Çeşitleri	Cr_2O_3 **(%)**	**Cr/Fe**	**Boyut**
Metalurjik Parça	34-40	(en az)2,5/1	0-300 mm
Metalurjik Parça	40 veya üstü	(en az)2/1	0-300 mm
Metalurjik Konsantre	46-48	(en az)2,6/1	0-2 mm
Metalurjik Jig Ürünü	36 ve üstü	(en az)2,5/1	0-25 mm
Kimyasal Konsantre	40 ve üstü	(en az)1,5/1	0-2 mm
Refrakter Parça	(en az) % 48 Cr_2O_3, (en çok) % 4 SiO2		
Refrakter Parça	Cr_2O_3+ Al2O3= % 60 (en az) (en çok) % 4 SiO2		
Refrakter Konsantre	(en az) % 50 Cr_2O_3 (en çok) % 2 SiO2		
Döküm Kumu	Cr_2O_3 (en az) % 44, SiO2 (en çok) % 4 Fe2O3 (en çok) % 26, CaO (en çok) % 0,5		

Kullanım alanlarına göre Türkiye' de üretilen krom cevherlerinin özellikleri Çizelge 2.1.' de verilmiştir. Türkiye'deki krom yataklarıyla ilgili rezerv bilgileri sınırlı olmasına

rağmen, pazar koşullarının uygun olduğu dönemlerde Türkiye, bugüne kadar talebi karşılamakta genellikle bir sorun yaşamamıştır.

Dünyanın ilk krom cevheri üretimi 1797 yılında Ural Dağları' nda gerçekleşti. Türkiye'de krom cevherinin ilk kez 1848 yılında Harmanlar (Bursa) bölgesinde bulunduğu bilinmektedir. Krom cevherinin keşfiyle Türkiye, dünya krom pazarlarında önemli bir konuma geldi. Türk üretimi bazı yıllarda dünyada birinci sırada yer alsa da genel olarak üçüncü ile altıncı sıradaki yerini korumuştur (DPT, 2001).

2.3. Rezervler

Kromit, özellikle paslanmaz çelik üretiminde kritik bir rol oynayan bir mineraldir. Dünya genelindeki krom rezervleri, endüstriyel gelişim ve ekonomik büyüme açısından büyük öneme sahiptir.

Güney Afrika, dünya çapındaki krom rezervlerinin çoğunluğuna ev sahipliği yapmaktadır. Bu ülke, dünya çapındaki krom arzının yaklaşık %70'ini sağlamaktadır (Smith ve Wang, 2022). Kazakistan, Hindistan ve Türkiye de önemli kromit rezervlerine sahip ülkeler arasındadır, bu rezervler dünya talebinin önemli bir kısmını karşılamaktadır (Kumar ve Özdemir, 2023). Krom rezervlerinin bu dağılımı, dünya ekonomisi üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir (Chen, 2021).

Kromit cevherlerinin kalitesi, içerdikleri krom oksit oranına göre değişmektedir. Güney Afrika ve Kazakistan'daki cevherler yüksek kaliteli olarak kabul edilirken, diğer bölgelerdeki cevherler daha düşük krom oksit içeriğine sahip olabilir (Garcia ve Patel,2023). Madencilik maliyetleri ve kromun piyasa fiyatı, rezervlerin ekonomik değerini etkilemektedir. Maliyetler, çıkarılacak cevherin kalitesine, madencilik teknolojilerine ve çevresel düzenlemelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Hughes, 2022). Ayrıca, madencilik faaliyetleri çevresel açıdan çeşitli etkilere sahiptir. Bu nedenle, sürdürülebilir madencilik uygulamalarının geliştirilmesi önemlidir (Green ve Thompson, 2023).

Teknolojik gelişmeler, kromit madenciliğinde verimliliği artırabilir ve çevresel etkileri azaltabilir. Öte yandan, alternatif malzemelerin geliştirilmesi ve geri dönüşüm uygulamaları, gelecekte krom talebini etkileyebilir (Lee ve Gupta, 2021).

2.4. Üretim

Bu bölümde, dünya genelindeki kromit üretimi ve bu sürecin anahtar yönleri ele alınmaktadır.

Kromit madenciliğinde kullanılan temel teknikler yeraltı ve açık ocak madenciliğidir. Madenin işlenmesi, cevherin kalitesine ve bölgesel özelliklere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Teknolojik yenilikler, özellikle verimliliği artırmak ve çevresel etkileri azaltmak için önemlidir (Thurner ve Zhao, 2022).

Güney Afrika, dünyanın en büyük kromit üreticisidir ve global üretimin büyük bir kısmını sağlar. Kazakistan, Hindistan ve Türkiye de önemli üreticiler arasındadır. Yıllık üretim rakamları ve trendler, talep ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak değişmektedir (Meyer ve Reddy, 2023; Singh ve Öztürk, 2021).

Kromit üretimi, jeopolitik etkiler ve uluslararası ticaret politikalarından büyük ölçüde etkilenmektedir (Johnson ve Wang, 2022). Doğal kaynakların sürdürülebilir yönetimi ve madencilik faaliyetlerinin çevresel etkileri, sektörün önemli zorlukları arasındadır (Sullivan ve Kumar, 2023).

Kromit üretimi, dünya ekonominin önemli bir parçasıdır. Üretim süreçleri, jeopolitik etkiler ve çevresel sürdürülebilirlik, bu sektörün geleceğini şekillendirecek anahtar faktörlerdir. Gelecekteki araştırmaların, üretim tekniklerinin iyileştirilmesi, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir kaynak kullanımına odaklanması beklenmektedir.

2.5. Üretim Yöntemi ve Teknolojileri

Türkiye'de krom madenciliği ilk yıllarda kıyıya yakın, kolay ulaşılabilen alanlarda madencilik yapılarak başlamıştır. Bu faaliyetler, kromit bant ve merceklerinin kalınlığına,

tenörüne ve sürekliliğine bağlı olarak patlatmalı açık ocak madenciliği esas alınarak ileri aşamada yer altı madenciliğine dönüştürülmüştür.

1950'li yıllara kadar Türkiye'de krom madenciliği üretimi genellikle yer altı galeri ve açık ocak madenciliği yöntemleriyle yapılmaktaydı.1960'lı yıllardan itibaren, açık ocak madencilik yöntemleriyle elde edilebilecek krom cevheri miktarının giderek azalmasına karşılık, krom yataklarının yer altı madencilik yöntemleriyle işletilmesi giderek artmaya başlamıştır. Günümüzde Türkiye'de el değmemiş, işletilebilir özelliğe sahip krom mostraları bulma imkânı oldukça sınırlıdır. Açık ocak madenciliği yoluyla çıkarılabilecek krom yataklarının sayısı geçmişe göre daha azdır. Şu anda çoğu krom cevheri yeraltı madencilik yöntemleriyle üretilmektedir.

Açık ocakların derinliği genellikle birkaç on metreyi geçmez. Geçmişte açık ocak yöntemiyle çalışılan Gülalan (Gülman, Elazığ) yatağı yaklaşık 40 m derinliktedir. Köpdağ bölümünde (Erzincan ve Erzurum) Çivlik, Armutlu, Gircek, Doğu İzan, Battı İzan, Bal ve Solugak yataklarını kapsayan ve madencilik faaliyetleri devam eden Büyük İzan açık ocağının uzunluğu 1.750 metredir. Genişliği 800 metre, derinliği ise 200 metredir. Gülalan ve Büyük İsan gibi büyük açık ocak madenlerinin boyutları, Türkiye'deki krom madenlerinde tipik olarak bulunan açık ocak madenlerinin boyutlarından çok daha büyüktür.

Krom, açık ocaktan çıkarıldığı yatakların boyutları genellikle birkaç on metre civarındadır ve yıllık üretim miktarı birkaç bin ton ile birkaç on bin ton arasında değişmektedir. Ancak, Büyük İsan (Kobdağ) krom yatağı, 1981-1993 yılları arasında yıllık ortalama 300 bin ton cevher üreterek, hacim bakımından Türkiye'nin krom yatakları arasında en önemli yerlerden birini almaktadır. Kromit merceklerinin eğim yönü, genellikle 12 derecelik bir süreklilikten daha az bir değişkenlik göstermektedir. Bu durum, kromit yataklarının eğimlerinin belirli bir düzlemde sürekli bir yön izlemekten ziyade, daha düzensiz ve karmaşık bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, kromit yataklarındaki eğimlerin tutarlılığı ve yönü, madenin oluşum sürecindeki jeolojik faktörlere bağlı olarak önemli bir varyasyon göstermektedir. Örneğin, Gilman (Elazığ) bölgesindeki Tepebaşı, Uzun Fen ve Batı Kef krom yataklarındaki kromit merceklerinin doğrultu sürekliliği sırasıyla 1350 m, 1600 m ve 1000 m olarak belirlenmiştir. Bu mercekler, nispeten düzenli yapısal ilişkiler sergilemesine rağmen, trendin devamı 485 m, 340 m ve 350 m olarak gözlemlenmiştir.

Bu normal konuma uymayan ve magma oluşum süreçlerinde kanal dolgusu olarak geliştiği düşünülen 'boru' şeklindeki kromit yataklarında, dip yönelimli kromit, sürekli bir mercek dizisi oluşturmaktadır. Bu yatakların mineralojik sürekliliği, daha fazla jeolojik özellik göstermektedir. En yaygın örneklerden biri olan Camaşırlık krom yatağı (Mihalıççık, Eskişehir) içerisinde, Çamaşırlık 2 mercekleri yamaç boyunca 130 m sürekliliğe ve yamaç yönünde 400 m (33 m) farka sahiptir (DPT, 2001).

2.6. Ürün Standartları

Krom cevherleri ticari olarak yalnızca Cr_2O_3 içeriğine göre değil aynı zamanda kimyasal bileşimlerine ve fiziksel özelliklerine göre de sınıflandırılabilir. Yalnızca Cr_2O_3 içeriğini düşünün; Birinci, ikinci ve üçüncü kalite olarak sınıflandırılırlar.

- Cr_2O_3 içeriği %40'dan az olanlar (3. kalite),
- Cr_2O_3 içeriği %40-46 arasında olanlar (2. kalite),
- Cr_2O_3 içeriği %46'dan fazla olanlar (1. kalite)

Ayrıca ana malzemeleri dikkate alınarak kimyasal bileşimlerine ve fiziksel özelliklerine göre metalurji, kimya, enerji ve metal işleme endüstrilerinde kullanılmak üzere sınıflandırılırlar.

Krom cevherinin kimyasal bileşimi, kromit mineralinin kimyasal bileşimi ve tipik olarak olivin, piroksen ve serpantin minerallerinden oluşan kromitin bulunduğu safsızlıkların kimyasal bileşimi tarafından kontrol edilir. Cr, Al, Fe(III), Fe(II) ve Mg kromitten kaynaklanır. Si, Mg, Ni ve Ca safsızlıklardan kaynaklanan elementlerdir. Krom cevherinin kimyasal bileşimi incelenirken Cr_2O_3, Al_2O_3, Fe_2O_3, FeO, MgO ve SiO_2 değerleri dikkate alınmalıdır. Öte yandan nispeten düşük olmakla birlikte Ca, P ve S içeriklerinin de krom cevherinin uygulama alanlarını etkileyen unsurlar olarak ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekebilir.

AOD (argon-oksijen dekarbürizasyonu) gibi ileri yöntemlerin paslanmaz çelik üretim teknolojisine dahil edilmesi, düşük Cr_2O_3 içeriğine ve Cr/Fe oranına sahip krom

cevherlerinin kullanılarak nispeten düşük kaliteli ferrokrom (yüksek karbonlu ferrokrom) üretilmesini mümkün kılmıştır. Bu gelişmelerin ışığında, Cr_2O_3 tenörü %40-46 arasında değişen ve Cr/Fe oranı 1,5/1 olan krom cevherleri, yüksek karbonlu ferrokrom üretiminde kullanılabilir hale gelmiştir.

Öte yandan, düşük karbonlu demir ve krom üretiminde Cr_2O_3 kalitesinin %46'dan büyük ve Cr/Fe oranının 3/1'den büyük olması gereklilikleri halen geçerlidir. Peletleme ve briketleme tekniklerinin krom cevheri ve plazma teknolojisine uygulanması, ferrokrom üretiminde krom cevheri tozunun kullanılmasını mümkün kılmıştır.

Refrakterlerde kullanılan krom cevherinin, Cr_2O_3 tenörünün %30-40, Al_2O_3 içeriğinin %25-32, toplam Cr_2O_3 ve Al_2O_3 (Cr_2O_3 + Al_2O_3) içeriğinin %60, SiO_2 içeriğinin ise %10'un altında olması gerekmektedir. Kırılarak çeşitli ebatlarda elenmiş krom cevheri, manyezit ile karıştırıldıktan sonra bir 'karıştırıcı' (miksere) ile kullanılabilir kaliteye getirilir. Bu karışım daha sonra ısıtılarak krom-manyezit tuğlaları üretimi için şekillendirilir. Ayrıca, refrakter malzeme olarak kromitin tek başına kullanılması durumunda SiO_2 oranının %3'ten az olması gerekmektedir.

Alp tipi krom yatakları, metalurji ve termal endüstride kullanılan krom cevherinin geleneksel olarak üretildiği yataklardır. Kimya endüstrisinde kullanılan krom cevherinin arzu edilen kimyasal özellikler açısından sınırları biraz daha gevşek olmasına rağmen, metalurji endüstrisinde kullanılan krom cevheri, satın alma fiyatının makul olması durumunda maliyet düşürme açısından tercih edilebilir.

Cr_2O_3 içeriği %42 veya daha fazla ve Cr/Fe oranı 2'den az olan ufalanabilir veya toz halindeki cevherler, kimya endüstrisine yönelik geleneksel krom cevherleri olarak tanımlanır. Stratigrafik tip olarak bilinen Prekambriyen krom yataklarında düşük Cr_2O_3 içeriğine ve yüksek FeO içeriğine sahip olan kromit, kimya endüstrisi için tipik cevherler olarak tanımlanmaktadır.

Alp tipi krom yataklarında krom cevherini oluşturan kromit kristalleri tipik olarak yüksek oranda krom ve düşük oranda demir içerir. Bu özelliğe sahip kromit kristallerinin çökeltilmesiyle oluşan dökme mineraller, metalurji endüstrisinde yaygın olarak

kullanılmaktadır. Bugüne kadar Türkiye'nin toplam krom cevheri üretiminin önemli bir kısmını yüksek kaliteli birincil mineraller oluşturmaktadır. Bilinen yüksek kaliteli krom cevheri yataklarının tükenmesi, yeni yüksek kaliteli yatak bulmadaki zorluklar ve uygun piyasa koşulları nedeniyle, düşük kaliteli, kolaylıkla işletilebilen krom yataklarından yararlanmak giderek daha mümkün hale geldi.

Bir zamanlar Cr_2O_3 tenörü %45'in altında olan krom cevherinin işletilmesi mümkün değilken, bugün uygun piyasa koşulları nedeniyle Cr_2O_3 tenörü %8-9 olan kromitin çıkarılabileceği bilinmektedir. Düşük kaliteli kromit, zenginleştirme tesislerinde kırılıp öğütülerek zenginleştirilmekte ve pazarlanmaktadır (DPT, 2001).

Döküm kumu olarak kullanılan krom cevheri aynı zamanda refrakter sanayinde kullanılan krom cevheri olarak da tanımlanabilir. Bu amaçla kullanılan krom cevherinde Cr_2O_3 içeriği en fazla %44, SiO_2 içeriği en fazla %4, Fe_2O_3 (toplam demir) içeriği en fazla %26, CaO içeriği en fazla %26 olmalıdır. %0,5 Bu kimyasal limitlerin dışında, krom cevherinin fiziksel bir özellik olarak tane büyüklüğünün düzgün olması ve köşeli değil düzenli tane şekline sahip olması gerekir (Bayat, 2009).

2.7. Kromit Zenginleştirme

Kromit zenginleştirme, krom cevherinin ekonomik değerini artırmak ve endüstriyel kullanıma uygun hale getirmek için yapılan bir dizi işlemdir. Krom, özellikle paslanmaz çelik üretiminde kullanılan önemli bir metaldir. Kromit zenginleştirme süreçleri, cevherin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte, genellikle kırma, öğütme, sınıflandırma, yoğunluk ayrımı, manyetik ayrım ve flotasyon gibi yöntemleri içerir.

Bilimsel araştırmalar, kromit zenginleştirme süreçlerinin etkinliğini artırmak ve daha sürdürülebilir yöntemler geliştirmek için çeşitli tekniklerin incelenmesine odaklanmıştır. Bu alandaki araştırmalar, örneğin Kavak Bölgesi'ndeki kromit atıklarını zenginleştirmek için MGS kullanan çalışmaları içerir. Bir diğeri, yüksek alan şiddetine sahip yaş manyetik ayırıcı kullanılarak kromit zenginleştirme tesisi atıklarının değerlendirilmesidir. Sonuncusu, Etibank Guleman Kef konsantratör tesisinden gelen kromit atıklarının değerlendirilmesidir

(Özgen, 2020).

Türkiye'nin kromit cevheri rezervleri ve zenginleştirme kapasitesi, ekonomik ve jeopolitik öneme sahip bir konudur. Türkiye, dünya çapında önemli bir krom üreticisi olup, özellikle yüksek kaliteli kromit cevheri rezervleriyle bilinir. Kromit zenginleştirme sürecinin etkinliği hem madencilik maliyetlerini azaltmak hem de kromun ekonomik değerini maksimize etmek açısından kritik öneme sahiptir (Özün ve Girgin, 2023).

Kromit zenginleştirme teknolojileri, madencilik sektörünün sürdürülebilirliğine katkıda bulunacak yenilikçi çözümlerin geliştirilmesi açısından önemlidir. Yeni zenginleştirme tekniklerinin keşfi ve mevcut süreçlerin iyileştirilmesi hem çevresel etkilerin azaltılması hem de krom kaynaklarının daha verimli kullanılması açısından önem taşımaktadır (Aslan, 1996).

Bu bilgiler ışığında, kromit zenginleştirme süreçlerinin geliştirilmesi, madencilik endüstrisinin geleceği için hayati önem taşımaktadır. Araştırmacılar ve endüstri profesyonelleri, daha verimli ve çevre dostu zenginleştirme teknikleri üzerine çalışmaya devam etmelidir. Bu, krom kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlarken aynı zamanda madencilik sektörünün ekonomik verimliliğini de artıracaktır (Aydın, 2001).

Kromit cevherlerinin zenginleştirilmesinde uygulanacak zenginleştirme yöntemini ve yöntem kombinasyonlarını;

- Cevherin serbestleşme tane iriliği,
- Cevherden üretilebilecek konsantredeki Al_2O_3, SiO_2, FeO ve Cr_2O_3 tenörleri, Cr/Fe faktörü
- Gang mineralleri ile kromit mineralinin arasındaki fiziksel ve fizikokimyasal özellik farkları belirler (Çilingir, 1990).

Kromit başlıca dört yöntem kullanılarak zenginleştirilmektedir. Bunlar;

- El ile ayıklama (triyaj)
- Özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme

- Manyetik ayırma ile zenginleştirme
- Flotasyon ile zenginleştirme

Çizelge 2.2. Uygulama Alanı Bulabilen Kromit Zenginleştirme Yöntemi Sınıflandırması (Ağaçayak, 2004)

1. El ile ayıklama	
2.Özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme	1. Oluklar 2. Ağır ortam ayırması 3. Humprey spiralleri 4. Dyna- Ehirpool 5. Jig 6. Sallantılı masa 7. Multi gravite ayırıcısı (MGS)
3.Manyetik ayırma ile zenginleştirme	
4. Elektrostatik ayırma ile zenginleştirme	
5. Flotasyon ile zenginleştirme	1. Klasik flotasyon 2. Kolon flotasyonu 3. Ultra flotasyon 4. Yüksek sıcaklık flotasyonu 5. Jet flotasyonu 6. Yağ flotasyonu 7. Aglomerasyon 8. Elektro flotasyon
6. Kimyasal yöntemlerle zenginleştirme	1. Asit liçi 2. Bazik liç 3. Seçimli gazlı indirgeme yöntemi 4. Katı hal indirgeme yöntemi 5. Ergitme yöntemi

Bu zamana kadar uygulama alanı bulabilen kromit zenginleştirme yöntemleri Çizelge 2.2.'de gösterilmiştir. Kromit cevherinin serbestleşme derecesine, cevher karakterine, gang minerallerinin cinsine bağlı olarak bu yöntemlerin biri veya birkaçının kombinasyonunu kullanmak mümkündür (Ağaçayak, 2004).

2.7.1. Elle ayıklama (tavuklama, triyaj)

Elle ayıklama (tavuklama veya triyaj), madencilikte ve özellikle mineral işlemede kullanılan, cevherden istenmeyen malzemeleri elle seçerek ayırma işlemidir. Bu yöntem, genellikle madenin ilk aşamalarında, daha pahalı ve karmaşık mekanik işlem yöntemlerine gerek kalmadan, düşük tenörlü cevherleri işlemede uygulanır. Elle ayıklama, özellikle küçük ölçekli madenlerde ve kısıtlı teknolojiye sahip bölgelerde, düşük maliyeti ve ekipman gereksinimi nedeniyle popüler bir yöntemdir (Bayat, 2009).

Bu işlem, mineral parçacıklarının boyutu, şekli, renk, yoğunluk ve parlaklık gibi fiziksel özelliklerine dayanarak yapılır. Madenciler veya işçiler, cevheri bir konveyör bant üzerinde veya başka bir düzlemde inceleyerek değerli mineralleri veya cevheri istenmeyen materyallerden (ganga) manuel olarak ayırırlar. Elle ayıklama sırasında, işçiler genellikle eldiven, kürek ve diğer basit aletleri kullanır (Celep vd., 2006).

Elle ayıklamanın avantajları arasında düşük başlangıç maliyeti, basitlik ve özellikle düşük hacimli veya yüksek kaliteli cevherler için uygulanabilirlik bulunur. Ancak, bu yöntem emek yoğun olduğundan ve insan hatalarına açık olduğundan, genellikle yüksek hacimli, endüstriyel ölçekteki madencilik operasyonlarında yeterince etkili veya verimli değildir. Bununla birlikte, bazı durumlarda, modern mekanik ayrıştırma yöntemlerine bir ön işlem olarak veya ek bir safha olarak kullanılabilir (Çelik, 1993).

Günümüzde elle ayıklama, teknolojinin ilerlemesi ve mekanik ayrıştırma tekniklerinin gelişmesi ile birlikte daha az yaygın hale gelmiştir. Ancak hala, özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki bazı küçük ölçekli madencilik faaliyetlerinde ve belirli minerallerin işlenmesinde, örneğin değerli taşların çıkarılmasında kullanılmaktadır. Elle ayıklamanın verimliliği ve etkinliği, çalışanların deneyimi ve becerisine büyük ölçüde bağlıdır (Çınarlıdere, 2012).

2.7.2. Özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme

Özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme, mineral işleme endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, farklı minerallerin yoğunluk (özgül ağırlık)

farklarından yararlanarak, değerli mineral fraksiyonlarını istenmeyen materyallerden (ganga) ayırmayı amaçlar. Genellikle yerçekimi ayırma teknikleri olarak da bilinir ve gravite konsantrasyon işlemleri çerçevesinde değerlendirilir (Çilingir, 1990).

Bu yöntemde; kromit ile gang mineralleri arasındaki özgül ağırlık farklılığının neden olduğu, akışkan ortamdaki hareket farklılığına dayanılarak birbirinden ayrılması ile zenginleştirme gerçekleştirilir (Ağaçayak, 2004).

İçerisinde yan kayaç olarak yüksek oranda peridotit kayaç parçaları ve özellikle olivin (yoğunluğu 3,5 – 4 gr/cm³) içeren cevherin yoğunluğuna göre zenginleştirilmeleri mümkün olmaktadır. Ancak krom cevherindeki olivin oranı az ise özgül ağırlık farkına göre üretilen konsantre, manyetik ayırıcı ile temizlenerek daha yüksek Cr_2O_3 tenörlü nihai konsantre üretilebilir. Olivin mineralinin olmadığı durumlarda kromit ve gang mineralleri arasındaki yoğunluk farkı oldukça fazla olduğundan manyetik zenginleştirme yöntemleriyle zenginleştirme yapılır. Gravite ile zenginleştirmenin verimi konsantrasyon kriterine bağlıdır (Kurşun, 1993).

Çizelge 2.3. Özgül Ağırlık Farkına Dayalı Zenginleştirme Yöntemleri ve Yaklaşık Uygulama Boyutları (Güney, 1999)

Ayırma Yöntemi Ve Aygıtı	**Etkin Tane Boyutu (mm)**
Ağır Ortam	
Statik Tip	2.0-50.0
Dinamik Tip	0.3-20.0
Jig	0.1-20.0
Reichert/Vickers Spiralleri	0.07-1.0
Sallantılı Masalar	0.04-1.0
Yıkama Olukları	0.2-2.0
Bartles Mozley Masası	0.005-0.1
GEC Çift Yüzeyli Masa	0.02-0.1
Santrifüj Ayırıcılar	
Yatay Tip	0.005-0.1
Düşey Tip	-0.4

Özgül ağırlık farkına dayalı zenginleştirme yöntemleri, minerallerin yoğunluk farklarına göre ayrılmasını sağlayan fiziksel süreçlerdir. Bu süreçler, genellikle düşük maliyetli ve çevre dostu uygulamalar olarak öne çıkar. Bu yöntemler, Çizelge 2.3.' de belirtilmiştir. Her bir yöntemin uygulanabilirlik aralığı, besleme malzemesinin tane boyutuna ve mineral yoğunluğu farkına bağlıdır. Örneğin, jigleme yöntemi genellikle 0,1–20 mm boyut aralığındaki malzemelerde etkili olurken, spiral separatörler 0,07–1.0 mm gibi daha ince malzemeler için tercih edilir. Bu tür yöntemler, özellikle kromit, kömür ve demir cevheri gibi yoğunluk farkının belirgin olduğu minerallerin zenginleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Taggart tarafından öne sürülen zenginleştirme (konsantrasyon) kriteri (Taggart, 1951) (k), özgül ağırlık farkı ile zenginleştirmenin hangi boyutlarda ve yöntemlerle uygulanabileceği hakkında bilgi vermektedir. Buna göre:

$$k = (\rho A - \rho) \div (\rho H - \rho)$$

Burada;

ρA= Ağır minerallerin özgül ağırlığı gr/cm³

ρH =hafif minerallerin özgül ağırlığı gr/ cm³

ρ= Akışkan ortamın özgül ağırlıkları gr/cm³

k= Konsantrasyon kriteridir.

k>2,5 ise; ayırma çok küçük boyutlara kadar kolayca uygulanabilir. Serbestleşme boyutuna bağlı olarak bütün gravite yöntemleri kullanılabilir.

2.5> *k* >1.75 ise; ayırma yine kolaydır. Ancak 0,1 mm'ye kadar uygulanabilir. Serbestleşme boyutuna bağlı olarak bütün gravite yöntemleri kullanılabilir.

1.75> *k* >1.50 ise; ayırma güçleşir, alt uygulama boyutu 1 mm'dir. Ağır ortam ve jig kullanılabilir.

1.5> *k* >1.25 ise; ayırma oldukça güçtür. Ancak, çakıl büyüklüğündeki tanelere uygulanabilir. Ağır ortam ve jig kullanılabilir.

k >1.25 ise; ekonomik bir ayırma mümkün değildir. Ancak akışkanın özgül ağırlığı arttırılarak ayırma yapılabilir (Taggart, 1951).

İnce kromit artıklarında (-0,1 mm), jet flotasyonu, kolon flotasyonu, yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcılar ve MGS (Multi Gravity Seperator) gibi yeni teknolojiler kullanılmaktadır. MGS ince çok ince tane boyutlarına ve artıklara kadar kromit kazanımı sağlanabilmektedir (Samanlı, 1998).

Özgül ağırlık farkına dayalı zenginleştirme yöntemleri arasında jigler, sallantılı masalar (shaking tables), spiral ayırıcılar ve ağır ortam ayırıcıları (dense media separation - DMS) bulunmaktadır. Bu teknikler, cevherlerdeki değerli mineralleri farklı yoğunluktaki gang materyalinden ayırmak için tasarlanmıştır (Çilingir, 1996).

Jigler, su içinde yukarı ve aşağı hareket eden bir yatak üzerinde malzemenin stratifikasyonunu (katmanlaşmasını) sağlayarak çalışır. Daha ağır mineraller alt katmanlara yerleşirken, daha hafif mineraller üstte kalır. Bu sayede, yoğunluk farkına göre bir ayırma işlemi gerçekleşir (Deniz, 1992).

Sallantılı masalar, eğimli bir yüzey üzerinde suyun ve mekanik bir hareketin kullanıldığı bir cihazdır. Malzeme, masanın üzerine beslenir ve sallantılı hareket ile birlikte, yoğunluklarına göre farklı yönlerde hareket ederler. Bu yöntem, özellikle ince taneli malzemelerin işlenmesinde etkilidir (Develi, 2014).

Spiral ayırıcılar, döner bir ‘heliks’ şeklindeki kanal kullanılarak malzemeyi ayırır. Yoğunluk farkına göre, daha ağır mineraller spiral kanalın iç kısmına doğru hareket ederken, daha hafif materyaller dışarı doğru taşınır (Ergin vd.,1998).

DMS, belirli bir yoğunluğa sahip bir ortam içinde malzemenin ayırılmasını sağlar. Bu yöntem, özellikle geniş tane boyutu dağılımına sahip ve yüksek yoğunluklu mineralleri içeren cevherlerin işlenmesi için uygundur. Ayırma işlemi, malzemenin yoğun ortam içine batırılmasıyla gerçekleşir; daha yoğun malzemeler dibe çökerken, daha az yoğun olanlar yüzer (Er, 2011).

Bu zenginleştirme yöntemlerinin seçimi, işlenen cevherlerin özelliklerine, hedef mineralin yoğunluğuna, gang materyalin özelliklerine ve ekonomik faktörlere bağlıdır. Özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme yöntemleri, yüksek verimlilik ve düşük işletme maliyeti sağladıkları için madencilik ve mineral işleme sektöründe önemli bir yere sahiptir (Hacıoğlu, 2010).

2.8. Jig ile Zenginleştirme

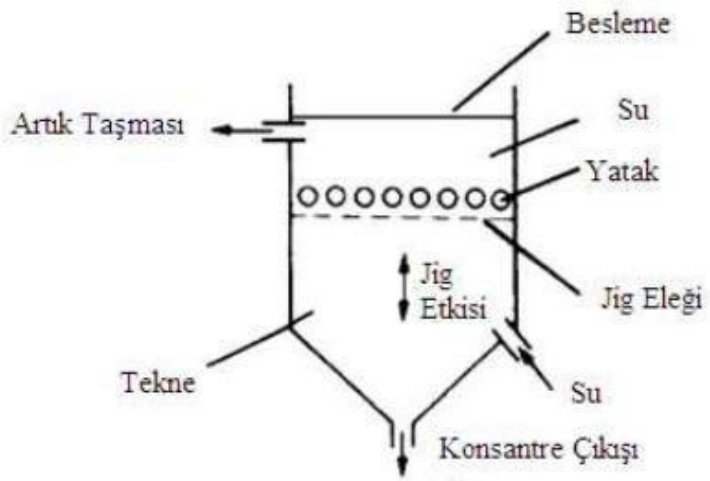
Jig ile zenginleştirme, madencilik ve mineral işleme endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir yerçekimi ayırma yöntemidir. Bu yöntem, özellikle yoğunluk farklarına dayalı olarak mineral ve gang materyallerini ayırmak için kullanılır. Jigler, su akışı ve mekanik hareketi kullanarak, farklı yoğunluktaki malzemeleri özgül ağırlıkları farklı katmanlara gruplama yapması amacıyla tasarlanmıştır (Hamzaçebi ve Kutay, 2003).

2.8.1. Jiglerin çalışma prensibi

Jiglerin temel çalışma prensibi, suyun dikey hareketini ve bu hareketin malzeme üzerindeki etkisini kullanmaktır. Jig işlemi sırasında, su yukarı ve aşağı yönlü hareket ettirilir (pulsasyon). Bu su hareketi, malzemenin yoğunluğuna bağlı olarak farklı şekilde yer değiştirmesine ve sonuç olarak daha yoğun malzemenin altta, daha az yoğun malzemenin ise üstte birikmesine neden olur. Bu stratifikasyon, değerli mineralin gang materyalden ayrılmasını sağlar (Işık, 2000).

Şekil 2.1'de, bir jig cihazının temel yapısal unsurları ve çalışma prensibi gösterilmektedir. Jig prosesi, özgül ağırlık farkına dayalı bir zenginleştirme yöntemidir ve malzemelerin stratifikasyonu (tabakalaşması) esasına dayanır. Besleme malzemesi, jig yatağı üzerine su ile birlikte alınır ve burada bir elek tarafından desteklenir. Jig etkisi olarak adlandırılan yukarı-aşağı yönlü hareket, suyun osilasyonunu (dalgalanmasını) sağlar. Bu hareket malzeme yatağı içinde hafif ve ağır partiküllerin ayrışmasına neden olur. Düşük yoğunluklu cevherler yatağın üst kısmında birikirken, yüksek yoğunluklu partiküller altta toplanır ve konsantre çıkışı olarak ayrılır. Artık malzeme ise üstteki taşma yoluyla sistemden çıkar. Bu işlem sırasında, suyun hareketi ve yatağın düzenli stratifikasyonu, yoğunluk

farkına dayalı etkili bir ayırma sürecini mümkün kılar. Jig, özellikle kromit ve kömür gibi yoğunluk farkı belirgin olan minerallerin ayrımında sıkça kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. Bir jigin yapısal unsurları ve çalışma prensibi

2.8.2. Jig işleminde tabakalaşma

Tabakalaşma, jig prosesinin verimliliğini doğrudan etkileyen önemli bir aşamadır. Bu süreçte birçok parametre etkin rol oynar ve her bir parametrenin optimizasyonu, prosesin başarısını belirler. Jig yapısı ve tasarımı, tabakalaşma sürecinin temel unsurlarındandır. Jig tabanının tasarımı, sıvı akışını ve malzeme hareketini etkili bir şekilde yönetmeye olanak tanır. Ayrıca, jig yüzey alanı da malzeme ile etkileşim sürecini doğrudan etkileyerek tabakalaşmanın verimliliğini artırır.

Jig işlemine beslenen cevherin özellikleri de tabakalaşma sürecini şekillendiren diğer önemli faktörlerdendir. Malzemenin özgül ağırlığı, tabakalaşma sürecinin temelini oluşturur ve özgül ağırlık farkları, farklı yoğunluklara sahip malzemelerin ayrımında kritik bir rol oynar. Bunun yanında, malzeme parçalarının boyut dağılımı, jigdeki akış dinamiklerini etkileyerek tabakalaşmanın yönlendirilmesinde etkili olur.

Sıvı akışı parametreleri de tabakalaşmanın etkinliğini belirler. Sıvının debi hızı, malzeme hareketini ve ayrım sürecini etkiler. Yüksek debi hızı, daha hızlı ayrım sağlarken, düşük debi hızı daha hassas bir ayrım yapılmasına olanak tanır. Bunun yanı sıra, sıvının akış yönü de malzeme tabakalaşması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Titreşim parametreleri, jig işleminin hassasiyetini belirleyen diğer unsurlardır. Jigde kullanılan titreşim frekansı, malzeme hareketini ve ayrım etkinliğini doğrudan etkiler. Farklı frekanslar, malzemelerin farklı tabakalarda yerleşmesine neden olabilir. Titreşim amplitüdü ise malzeme tabakalarının kalınlığını ve ayrımın hassasiyetini belirler.

Jigdeki sıvı seviyesi, tabakalaşma sürecini optimize etmek için dikkatle ayarlanmalıdır. Doğru sıvı seviyesi, malzeme akışını düzenleyerek daha iyi bir ayrım sağlanmasına yardımcı olur. Ayrıca, işlem süresi de tabakalaşmanın başarısını belirleyen önemli bir parametredir. Yeterli bir süre, malzemelerin daha etkin bir şekilde ayrılmasını sağlar.

Tabakalaşma süreci üzerindeki dış etkenler, proses verimliliğini etkileyebilir. Özellikle sıcaklık ve basınç gibi koşullar, malzeme özelliklerini ve sıvı davranışını değiştirebilir. Bu nedenle, sıcaklık ve basınç kontrolü, jig prosesinin optimizasyonunda kritik öneme sahiptir. Son olarak, jigde işlenecek malzeme hacmi de sistemin verimliliğini ve ayrım kalitesini doğrudan etkileyen bir faktördür. Yükleme miktarının dikkatle planlanması, jig performansını artıran önemli bir parametredir.

Tüm bu unsurların dikkatlice kontrol edilmesi ve optimize edilmesi, jig prosesinin genel verimliliğini artırarak istenen sonuçların elde edilmesini sağlar.

Jig prosesinin verimliliği, belirtilen parametrelerin uygun şekilde kontrol edilmesiyle artırılabilmektedir. Her bir parametre, cevher özellikleri ve jig tasarımıyla etkileşim içerisinde olup, bu faktörlerin optimize edilmesi, madencilik süreçlerinde başarıya ulaşmanın anahtarıdır.

2.8.3. Jig prosesinde ayırma yoğunluğu

Jigte Ayırma Yoğunluğu madencilikte önemli bir parametredir ve jig cihazında minerallerin yoğunluklarına bağlı olarak ayrılmasını sağlar. Jigleme işlemi sırasında, minerallerin tabakalaşması (stratifikasyonu) için kullanılan temel prensip, parçacıkların yoğunluk, tane boyutu ve şekil farklarından kaynaklanan farklı düşme hızlarıdır.

Jigte ayırma yoğunluğu, bir jig cihazında ayırma işlemi sırasında ağır ve hafif fazların (örneğin, değerli mineral ve gang) birbirinden ayrılmasını sağlayan sınır yoğunluk değeridir. Bu sınır, bir ortamda serbest duran parçacıkların yoğunluk farklarına göre ayrışmaya başladığı kritik noktayı ifade eder.

Jigte ayırma yoğunluğunu etkileyen temel faktörler şunlardır:

- Mineral Yoğunluğu:
    - Ağır mineraller (örneğin, hematit, barit gibi) düşük yoğunluklu gang minerallerinden (örneğin, kuvars) daha kolay ayrılır.
    - Ayırma yoğunluğu, mineral fazlarının yoğunluk farkına göre optimize edilir.

- Tane Boyutu ve Şekli:
    - Daha küçük taneler, akışkanın direncinden daha fazla etkilenir, bu da ayırma yoğunluğunu etkiler.
    - Küresel taneler, düzensiz şekilli tanelere göre daha düzgün bir düşme davranışı sergiler.

- Akışkanın Yoğunluğu ve Viskozitesi:
    - Jiglerde genellikle su veya düşük yoğunluklu ağır sıvılar kullanılır. Akışkanın yoğunluğu arttıkça ayırma yoğunluğu düşer.

- Titreşim Parametreleri:
    - Jig cihazındaki titreşim frekansı ve genliği, parçacıkların hareket dinamiklerini etkiler.
    - Daha düşük frekanslar ağır fazın alt katmanlara yerleşmesini kolaylaştırırken, yüksek frekanslar ince ve hafif tanelerin ayrılmasını sağlar.

- Jig Yükseklik Ayarları:
    - Jig yatağının (deck) eğim ve yükseklik ayarları, parçacıkların hareket yönünü ve stratifikasyonunu kontrol eder.

Ayırma yoğunluğu, hafif minerallerin yukarıda, ağır minerallerin ise aşağıda toplanmasını sağlayan bir referans noktasıdır. Cevher içindeki bir mineralin yoğunluğu, ayırma yoğunluğunun üzerindeyse ağır fazda, altındaysa hafif fazda yer alır.

Ayırma yoğunluğu genellikle ağır ve hafif mineraller arasındaki serbest ayrışma noktasını şu şekilde ifade eder:

$$\rho_c = \frac{\rho_m + \rho_f}{2} \tag{2.1}$$

Bu denklemde:

ρc: Ayırma yoğunluğu (kg/m³),
ρm: Ağır mineral yoğunluğu (kg/m³),
ρf : Hafif mineral yoğunluğu (kg/m³).

Ayırma yoğunluğunu daha ayrıntılı bir formülle ifade etmek için Stokes Yasası ve sıvı dinamiği prensiplerini göz önünde bulundurabiliriz. Ayırma işlemi, partiküllerin sıvı içinde çökelme hızlarının farkına dayanır ve bu da partiküllerin yoğunluğu, viskozite ve boyutuna bağlıdır. Genel formül şu şekilde ifade edilebilir:

$$\rho_c = \rho_f + \frac{d_p \cdot g \cdot (\rho_m - \rho_f)}{18 \cdot \mu \cdot v_s} \tag{2.2}$$

Burada:

ρc: Ayırma yoğunluğu (kg/m³),
ρf: Sıvının yoğunluğu (hafif faz) (kg/m³),
ρm: Ağır fazın (partikül) yoğunluğu (kg/m³),
dp: Partikül çapı (m),
g: Yerçekimi ivmesi (9,81 m/s²),
μ: Sıvının viskozitesi (Pa·s),
v_s: Partikülün çökelme hızı (m/s).

Bu formül, bir sıvı ortamında belirli bir partikül boyutuna ve yoğunluğa sahip malzemenin çökelme davranışını modellemek için kullanılır. Pratikte, bu tür ayrıntılı hesaplamalar, idealizasyonlara veya deneysel verilere dayanarak sadeleştirilir.

Ayırma yoğunluğu, bu hız farkının sıfır olduğu sınır yoğunluğu olarak belirlenir.

Eğer ayırma yoğunluğu mineral fazlarının yoğunluklarına yakın bir değere ayarlanırsa, ağır ve hafif fazlar arasında karışıklık oluşur ve belirsiz tabakalaşma meydana gelir. Net tabakalaşma bozulur ve zenginleştirme işlemi düşük verimle gerçekleşir.

Ayırma yoğunluğu, parçacıkların tabakalaşmasını aşağıdaki fiziksel süreçlerle etkiler:

- Stratifikasyon Hızını Belirleme:
    - Daha düşük bir ayırma yoğunluğu, ağır minerallerin alt tabakaya daha hızlı çökmesine neden olur. Bu durum, tabakalaşmayı hızlandırır.
    - Daha yüksek bir ayırma yoğunluğu, ağır minerallerin çökmesini yavaşlatır ve hafif minerallerle karışma riskini artırır.

- Tane Boyutuna Göre Ayrışma:
    - İnce taneli minerallerin ayrışması, ayırma yoğunluğuna daha duyarlıdır. Yanlış bir yoğunluk seçimi, ince taneli minerallerin tabakalaşmasında yetersizliklere yol açar.

- Katman Sayısını ve Düzenini Etkileme:
    - Ayırma yoğunluğu optimum bir değere ayarlandığında, mineraller yoğunluk farklarına göre birkaç belirgin katman oluşturur.
    - Yanlış ayarlanan bir yoğunluk değeri, katmanlar arasında belirsizliklere neden olur ve mineraller birbirine karışır.

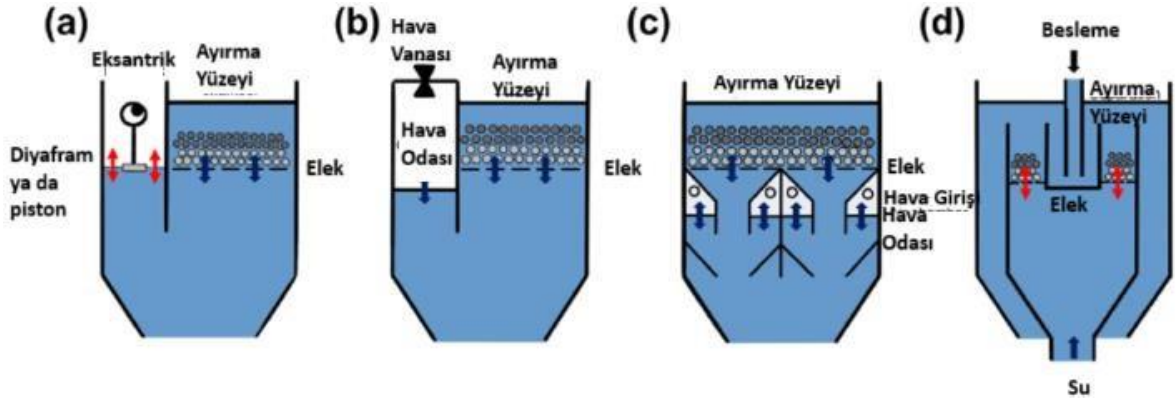
Ayırma yoğunluğunun uygun şekilde ayarlanması, tabakalaşmanın kalitesini artırır ve prosesin verimliliğini yükseltir. Bunun için; yoğunluk farkı yeterinci büyük olmalı ve proses koşulları ile uyumlu olmalıdır. Yoğunluk farkı düşük mineraller (ör. kömür ve kil)

için ayırma yoğunluğunun dikkatle optimize edilmesi gerekir. Titreşim frekansı, akışkan viskozitesi ve akışkanın yoğunluğu gibi faktörler, ayırma yoğunluğunun etkisini değiştirir.

Jig prosesindeki ayırma yoğunluğu, malzeme ayrımını etkileyen önemli bir faktördür. Uygun ayırma yoğunluğunun belirlenmesi ve optimizasyonu, işlem verimliliğini artırarak, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği destekler. Bu nedenle, jig tasarımında ve operasyonlarında ayırma yoğunluğunun doğru yönetilmesi, başarılı bir madencilik süreci için hayati öneme sahiptir.

Tabakalaşma, minerallerin doğal sıralanma süreciyken, ayırma yoğunluğu, bu sıralamanın hangi noktada "düşük yoğunluklu" ve "yüksek yoğunluklu" olarak iki faza ayrılacağını belirler.

Bu iki kavramın doğru anlaşılması ve uygulanması, gravite ile zenginleştirme işlemlerinin verimliliğini ve değerli mineral geri kazanım oranını artırır. Ayırma yoğunluğunun doğru belirlenmesi ve tabakalaşmanın fiziksel süreçlerle optimize edilmesi, madencilikte gravite zenginleştirme işlemlerinin başarısında kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 2.2. (a) Denver veya Harz Jigi, (b) Baum Jigi, (c) Batac Jigi, (d) Hat İçi Basınç Jigi Ayırma Farkları

Şekil 2.2.' de; siyah oklar malzeme akışını, kırmızı oklar mekanik hareketleri, mavi oklar ise su akışını gösterir. Sabit elekli jigler için, Denver veya Harz jigi (Şekil 2.2.a), Baum jigi (Şekil 2.2.b) ve Batac jigi (Şekil 2.2.c) kullanılır. (Feil vd., 2012; Tripathy vd., 2016-b). Denver jigi, mineral işleme işlemlerinde, cevherlerin ayrılması için daha yaygın olarak

kullanılır ve kömür temizliğinde sınırlı bir uygulamaya sahiptir. Baum ve Batac jigleri, hava pulsasyon tipleri kömür temizliğinde daha yaygın olarak kullanılır. Çünkü hava pulsasyonu, Denver jigindeki mekanik diyafram tipine göre daha iyi su pulsasyon kontrolü sağlar (Şekil 2.2.a). Ayrıca, Baum ve Batac jigleri, ağır gang mineralinin çıkarılması için elek üzerinden ve elek altından alınabilirken, Denver jiginde yalnızca elek üzerinden geri kazanım yapabilmektedir. Baum jiginin hava odası, ayırma odasının yanına yerleştirilmiştir (Şekil 2.2.b). Oysa Batac jigleri ilk olarak TACUB (Takakuwa hava odası altında yatak) jigi olarak adlandırılmıştır. Hava odaları (tek veya genellikle 2 hücreli) ayırma odasının altına yerleştirilmiştir (Şekil 2.2.c). Hareketli elekli jigler için, mekanik pulsasyon mekanizmalarına sahip ve elek üzerinden geri kazanım yöntemine sahip en yaygın örnek, hat içi basınçlı jigdir (Şekil 2.2.d) (Mohanta vd., 2019; Shahzad vd., 2015).

2.8.4. Jig işleminin avantajları

Yüksek Verimlilik: Jigler, özellikle belirli yoğunluk aralıklarındaki malzemeler için yüksek ayırma verimliliği sağlar.

Esneklik: Farklı tane boyutlarındaki malzemeler için uygun ayarlamalar yapılarak kullanılabilirler.

Düşük Maliyet: Jigler, diğer ayırma tekniklerine kıyasla nispeten düşük işletme ve bakım maliyetlerine sahiptir.

Çevre Dostu: Kimyasal kullanımı gerektirmez,bu yüzden çevresel etkileri minimumdur.

2.8.5. Uygulama alanları

Jigler, kömür, değerli metaller (altın, gümüş), baz metaller (kurşun, çinko) ve endüstriyel mineraller (fluorspar, barit, vb.) gibi birçok farklı madenin işlenmesinde kullanılır. Ayrıca, hurda işleme ve geri dönüşüm sektörlerinde de uygulamaları bulunmaktadır (Karahan, 2011).

2.8.6. Jig çeşitleri

Panjigler: Genellikle ince malzemelerin işlenmesi için kullanılır.

Bailey Jigleri: Daha kalın malzemeler için uygundur ve yüksek kapasiteli işlemlerde tercih edilir.

Hava Jigleri: Su yerine hava kullanarak ayırma işlemi yaparlar ve özellikle kuru işlemler için uygunlardır.

Jig ile zenginleştirme, madencilik sektöründe yoğunluk temelli ayırma gerektiren geniş bir uygulama yelpazesine sahip etkili bir yöntemdir. Farklı türdeki jigler, işlenen malzemenin özelliklerine ve işletmenin ihtiyaçlarına göre seçilebilir. Bu yöntem, sürdürülebilir madencilik uygulamaları ve maliyet etkinliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Kasman, 2009).

2.9. Endüstride Kullanılan Jigler

2.9.1. Hareketli elekli jigler

Hareketli elekli jigler, mineral işleme ve madencilik endüstrisinde, özellikle yoğunluk farkına dayalı malzeme ayırma işlemlerinde kullanılan ileri teknoloji ayırma ekipmanlarıdır. Bu tür jigler, geleneksel jiglerin işlevselliğini geliştirerek daha yüksek verimlilik ve işleme kapasitesi sunar. Hareketli elek sistemleri, malzemelerin daha etkin bir şekilde stratifiye olmasını (katmanlaşmasını) sağlayarak, daha yüksek yoğunluklu minerallerin alt katmanlara yerleşmesine ve daha düşük yoğunluklu materyallerin üste çıkmasına olanak tanır (Kıdıman, 2009).

Hareketli elekli jiglerin avantajları aşağıdaki gibidir:

Yüksek Ayırma Verimliliği: Hareketli elekli jigler, malzemeleri yoğunluklarına göre daha hassas bir şekilde ayırabilir, bu da daha yüksek saflıkta ürün elde edilmesini sağlar.

Esnek Uygulama Alanları: Çeşitli mineral türleri ve tane boyutları için uygundur, bu sayede farklı madencilik işlemlerinde geniş bir kullanım alanı bulur.

Düşük Operasyon Maliyeti: Yüksek işleme kapasitesi ve verimliliği sayesinde, toplam işletme maliyetlerini düşürme potansiyeline sahiptir.

Çevre Dostu: Kimyasal kullanımını gerektirmeyen bir yöntem olması, çevresel açıdan tercih edilen bir teknoloji olmasını sağlar (Kumar vd., 2009).

Hareketli elekli jiglerin çalışma prensibi, suyun ve mekanik hareketin (genellikle dikey pulsasyon) kombinasyonunu kullanarak malzemenin yoğunluk temelli olarak stratifiye edilmesine dayanır. Hareketli elek sistemi, bu stratifikasyonu daha da iyileştirerek, ayırma işleminin daha etkin gerçekleşmesini sağlar. Malzemeler jig içerisinde ileri geri hareket eden elek üzerinde yerleştirilir ve su pulsasyonu ile birlikte, yoğunluklarına göre ayrılır (Kurşun, 1993).

Hareketli elekli jigler, kömürden altına, elmaslardan diğer değerli minerallere kadar geniş bir yelpazede mineral ayırma işlemlerinde kullanılır. Özellikle, tane boyutu dağılımı geniş olan ve yoğunluk farkı ile ayırma işlemine uygun olan cevherler için idealdir (Kurşun, 2003).

Bu teknoloji, madencilik sektöründe sürekli gelişmekte olan inovasyonların bir parçası olarak, sürdürülebilirlik ve verimlilik standartlarını yükseltmeyi amaçlar. Hareketli elekli jigler, modern madencilik operasyonlarında önemli bir rol oynayarak, daha yüksek kalitede ürün elde etme ve işletme maliyetlerini azaltma konusunda katkı sağlar (Lima vd., 2005).

2.9.2. Sabit elekli jigler

Sabit elekli jigler, madencilik ve mineral işleme endüstrilerinde yoğunluk farkına dayalı malzeme ayırma işlemleri için kullanılan klasik bir ayırma ekipmanıdır. Bu tip jigler, mineral ve gang materyallerini yoğunluklarına göre ayırmak amacıyla tasarlanmıştır ve özellikle ağır minerallerin zenginleştirilmesi süreçlerinde yaygın olarak kullanılırlar (Magumbe, 2002).

Sabit elekli jiglerin avantajları aşağıdaki gibidir:

Basit Yapı: Sabit elekli jigler, karmaşık mekanizmalara sahip olmayan, basit yapıya sahip ayırma ekipmanlarıdır. Bu basitlik, bakım ve işletme maliyetlerini düşürür.

Düşük Maliyet: Yüksek teknoloji gerektirmeyen bu sistemler, düşük kurulum ve işletme maliyetleri sunar.

Geniş Uygulama Alanı: Farklı türdeki minerallerin ve tane boyutlarının ayırılmasında etkilidir.

Sabit elekli jiglerin çalışma prensibi, suyun dikey pulsasyonunu kullanarak malzemeleri yoğunluklarına göre stratifiye etmeye dayanır. Malzeme, su dolu bir hazneye yerleştirilen sabit bir eleğin üzerine konur. Haznenin altından verilen pulsasyonlar, suyun yukarı ve aşağı hareketini sağlayarak malzemelerin yoğunluklarına göre sıralanmasına neden olur. Daha ağır yoğunluklu malzemeler elek altına düşerken, daha hafif malzemeler üstte kalır (Murthy vd., 2011).

Sabit elekli jigler, özellikle kömür, demir cevheri, kalay, altın gibi farklı minerallerin zenginleştirilmesinde kullanılır. Ayrıca, inşaat malzemeleri gibi daha büyük taneli malzemelerin sınıflandırılmasında da etkili olabilirler (Öztürk ve Temel, 2014).

Bu sistemler, madencilik endüstrisinde uzun yıllardır kullanılmakta olup, basitlikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle özellikle gelişmekte olan ülkelerde veya düşük bütçeli projelerde tercih edilir. Yeni teknolojilerin ve daha verimli ayırma ekipmanlarının geliştirilmesiyle birlikte, sabit elekli jiglerin kullanımı azalmış olabilir; ancak, belirli uygulamalarda hala değerli bir seçenek olarak kalmaktadırlar (Öztürk ve Temel, 2016).

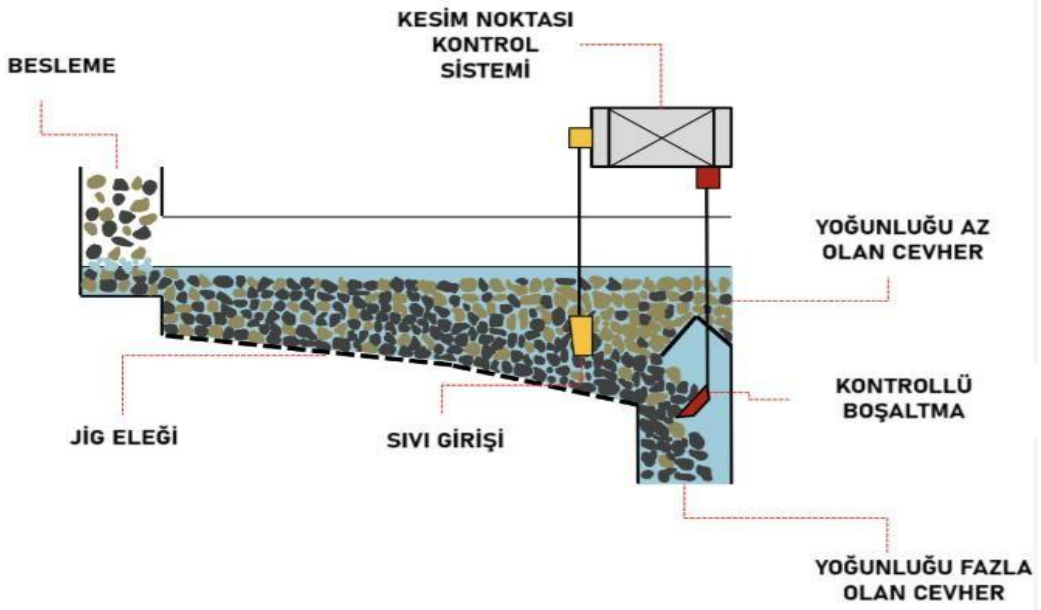
Bu teknoloji, mineral zenginleştirme süreçlerindeki verimliliği artırmak ve düşük maliyetli çözümler sunmak açısından önemli bir yer tutar. Sabit elekli jigler, madencilik sektöründeki basit ve etkili çözümlerden biri olarak, belirli durumlar ve malzemeler için hala tercih edilen bir yöntem olmaya devam etmektedir (Palanikumar, 2011).

2.9.3. Hidrolik (sulu) jigler

Hidrolik (sulu) jigler, madencilik sektöründe mineral ve diğer malzemeleri yoğunluk farkına göre ayırmak için kullanılan su bazlı ayırma ekipmanlarıdır. Bu sistemler, özellikle gravimetrik ayırma yöntemleri arasında yer alır ve su haraketi ile oluşan ortamda mineral ayırma işlemi gerçekleştirir. Hidrolik jigler, çeşitli madencilik uygulamalarında, özellikle ince taneli malzemelerin işlenmesinde tercih edilen etkili bir yöntemdir (Panda vd., 2014).



Şekil 2.3. Hidrolik jig



Şekil 2.4. Hidrolik jigin genel şeması (yan görünüm)

Sürekli çalışma durumunda, farklı bileşimdeki parçacıklar (örneğin, zenginleştirilmemiş cevherler), jig tankının bir ucundan beslenir ve hafifçe çıkış ucuna doğru eğimli olan elek üzerinde Şekil 2.4'teki gibi dağıtılır. Parçacıklar ekipmandan geçerken, genişleme ve sıkışma döngülerine ardışık olarak maruz kalır. Bu döngüler, tabakalaşma işlemini teşvik eder. Boşaltma ucuna ulaşıldığında, parçacık yatağı iki farklı bölgeye

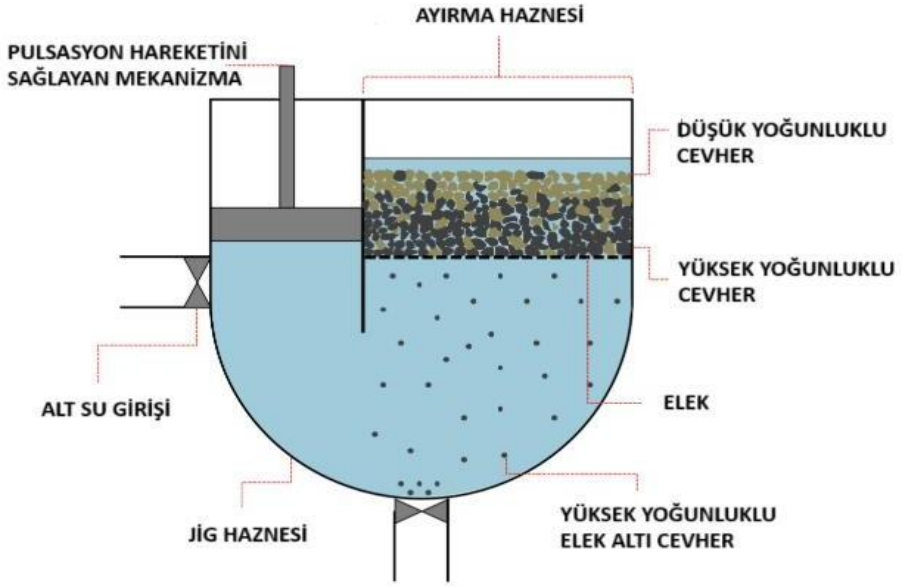
ayrılmalıdır: Bu tabakalar; yatağın üst kısmında yer alan düşük yoğunluklu cevher tabakası ve alt kısmında yer alan yüksek yoğunluklu parçacıkların oluşturduğu tabakadır. Hedeflenen içerik ve kazanılmak istenilen ürünün verimi, tabakalaşmış yatağın boşaltma ucunda ayrılması gereken yüksekliği (kesme noktası veya kesme yüksekliği) belirler. Hidrolik jiglerde, suyun büyük bir kısmı ürünlerle birlikte jigden atılır. Bu nedenle yerine konulacak su (hutch suyu) düzenli olarak jig haznesine pompalanır.

Endüstriyel jig türleri arasındaki farklılıklar; hazne geometrisi, pulsasyon mekanizması, yatak taşıma, boşaltma sistemi ve ayırma kontrol şeması gibi birçok faktörle ilişkilidir. Bu bağlamda, Sampaio ve Tavares (Tabelin vd., 2017) jig cihazlarını üç ana unsur temelinde geniş bir sınıflandırma önermiştir:

- Jig elek durumunun niteliği (sabit veya hareketli),
- Yoğun ürünün çıkarılma yöntemi ve
- Yatak pulsasyon mekanizması.

Çoğu endüstriyel hidrolik jigin genel yapısı, Şekil 2.5. görülebileceği üzere, iki bölmeye ayrılmış bir hazneden oluşur. Bu bölmelerden biri, besleme parçacıklarının bir destek eleği üzerinde bulunduğu ve suyun salınım hareketini gerçekleştirdiği ayırma haznesidir. Diğer bölme ise, jigdeki yatağın hareketini sağlamak için sıvı pulsasyonunu üreten mekanizmayı içerir.

Hidrolik jiglerin çalışma prensibi, bir su akışı içerisinde malzemelerin yoğunluklarına göre stratifikasyonunu (katmanlaşma) sağlamaktır. Bu ekipmanlar, genellikle bir yukarı ve aşağı hareket eden su kolonu yaratır. Bu hareket, malzemelerin yoğunluklarına göre ayrışmasını sağlar; daha yoğun malzemeler altta birikirken, daha az yoğun malzemeler üst kısımlara taşınır. Ayırma işlemi sırasında, malzemelerin boyutu ve şekli de ayırma verimliliğini etkileyebilir (Pearse, 2005).



Şekil 2.5. Hidrolik jigin genel şeması (ön görünüş)

Enerji Verimliliği: Hidrolik jigler, düşük enerji tüketimiyle yüksek ayırma verimliliği sağlar.

Çevre Dostu: Kimyasal kullanımına gerek duymaz, bu da çevresel etkiyi minimuma indirir.

Geniş Uygulama Alanı: Kömür, demir cevheri, değerli metaller ve endüstriyel mineraller gibi çeşitli malzemelerin işlenmesinde kullanılabilir.

Esneklik: Farklı tane boyutları ve yoğunluklardaki malzemelerin ayırılmasına olanak tanır.

Hidrolik jigler, özellikle kömür zenginleştirme, demir cevheri, manganez cevheri, altın ve diğer değerli metallerin yanı sıra, çeşitli endüstriyel minerallerin işlenmesinde kullanılır. Ayrıca, geri dönüşüm sektöründe de metal ve plastik gibi malzemelerin ayırılmasında etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkar (Yıldız, 2007).

Hidrolik jigler, farklı kapasite ve işleme ihtiyaçlarına göre çeşitli boyut ve tasarımlarda üretilir. Ekipmanın tasarımı, işlenecek malzemenin özelliklerine ve istenen ayırma verimliliğine göre özelleştirilebilir. Modern hidrolik jigler, gelişmiş kontrol sistemleri ile donatılarak, işleme sürecinin optimize edilmesini ve ayırma verimliliğinin maksimize edilmesini sağlar (Yıldırım, 2011).

Hidrolik jiglerin kullanımı, madencilik ve mineral işleme endüstrilerinde etkili ve verimli ayırma teknikleri arasında önemli bir yer tutar. Bu sistemler, yüksek ayırma verimliliği ve çevresel avantajları nedeniyle, sürdürülebilir madencilik uygulamaları için tercih edilen çözümler arasındadır (Uyğur, 2009).

2.9.4. Pistonlu jigler

Pistonlu jigler, mineral işleme endüstrisinde kullanılan, yoğunluk farkına dayalı ayırma işlemleri için tasarlanmış ekipmanlardır. Bu jig türü, özellikle gravimetrik ayırma teknikleri arasında yer alır ve yoğunluk farklarını kullanarak mineral ve gang (istenmeyen malzeme) arasındaki ayrımı gerçekleştirir. Pistonlu jigler, suyun pulsasyonunu sağlayan mekanik pistonlar kullanır. Bu pulsasyonlar, jig haznesi içerisindeki malzemenin stratifikasyonunu (katmanlara ayrılmasını) sağlayarak daha ağır minerallerin altta toplanmasına ve daha hafif gang materyalinin üste çıkmasına neden olur (Tripathy vd., 2016).

Pistonlu jiglerde, pistonun hareketi suyun jig haznesi içerisinde yukarı ve aşağı doğru pulsasyonlar oluşturur. Bu su hareketi, hazne içerisindeki malzemenin yoğunluğuna göre stratifikasyonunu sağlar. Ağır yoğunluklu mineraller alt katmanlara yerleşirken, hafif yoğunluklu malzemeler üst katmanlara taşınır. Sonuç olarak, malzemeler yoğunluklarına göre ayrılmış olur (Taylan, 2009).

Yüksek Ayırma Verimliliği: Pistonlu jigler, yoğunluk farklarını etkili bir şekilde kullanarak yüksek ayırma verimliliği sağlar.

Esnek Uygulama: Çeşitli mineral türleri ve tane boyutları için uygulanabilir, geniş bir uygulama alanı sunar.

Düşük İşletme Maliyeti: Mekanik yapısı nedeniyle, düşük işletme ve bakım maliyetleri ile operasyonel verimlilik sunar.

Pistonlu jigler, özellikle kömür zenginleştirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, demir cevheri, manganez, ve diğer ağır minerallerin işlenmesinde de etkilidir. Ayrıca, çeşitli metalik olmayan minerallerin ve inşaat malzemelerinin ayırma

işlemlerinde de kullanılır (Tanyıldızı ve Coşkun, 2013).

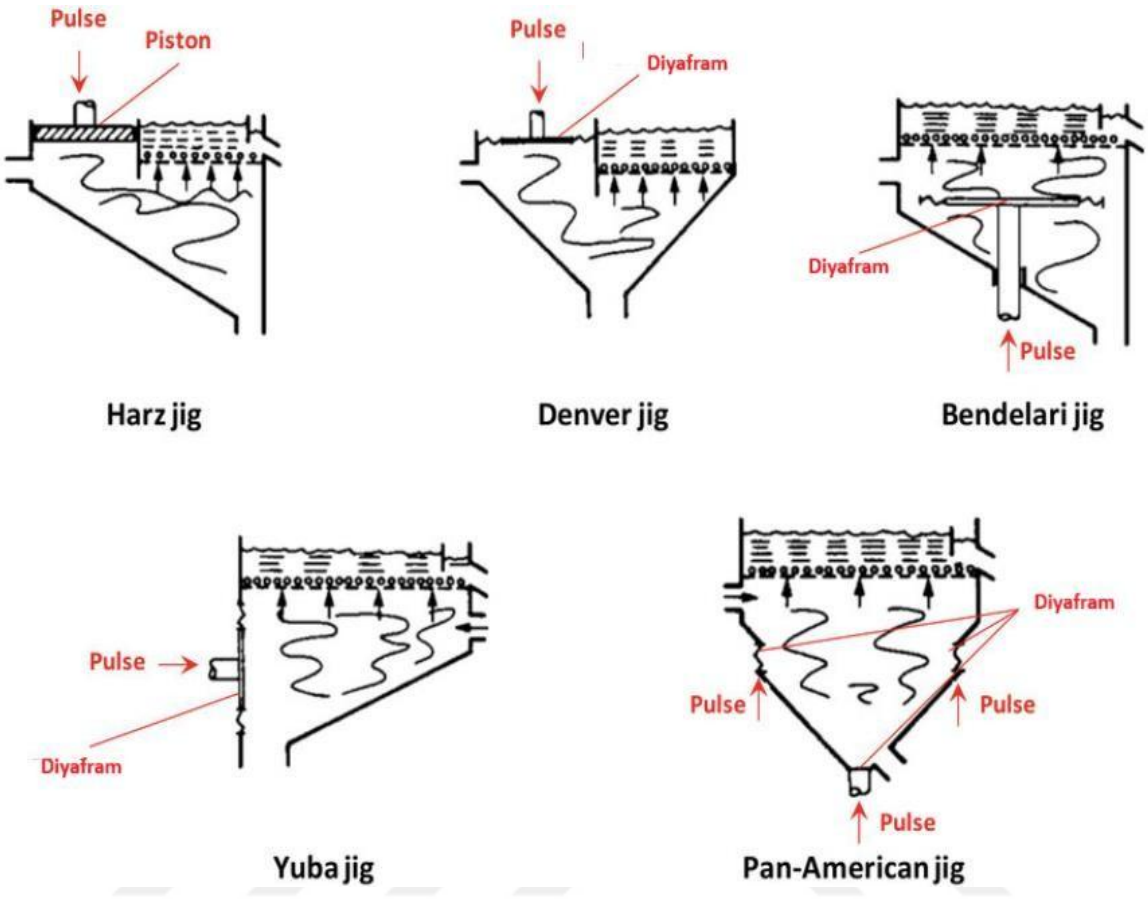
Pistonlu jigler, farklı işleme kapasitelerine ve malzeme özelliklerine uygun olarak çeşitli boyut ve tasarımlarda üretilir. Bu ekipmanların tasarımı, işlenen malzemenin özelliklerine, işleme kapasitesine ve istenen ayırma verimliliğine göre özelleştirilebilir. Modern pistonlu jigler, operasyonel verimliliği artırmak ve daha hassas ayırma işlemleri gerçekleştirmek için gelişmiş kontrol sistemleri ile donatılabilir (Taguchi vd., 2005).

Pistonlu jigler, madencilik ve mineral işleme endüstrilerindeki gravimetrik ayırma işlemlerinde önemli bir rol oynar. Bu sistemler, yüksek ayırma verimliliği ve düşük işletme maliyetleri nedeniyle, mineral zenginleştirme süreçlerinde tercih edilen çözümler arasında yer alır.

2.9.5. Diyaframlı jigler

Diyaframlı jigler, mineral işleme endüstrisinde yoğunluk farkına dayalı olarak malzemeleri ayırmak için kullanılan özel bir jig türüdür. Bu ekipmanlar, özellikle ince taneli malzemelerin zenginleştirilmesi için tasarlanmıştır ve gravimetrik ayırma yöntemlerinin bir alt grubunu oluşturur. Diyaframlı jiglerin temel bileşeni, su akışını ve dolayısıyla malzeme yatağının içindeki pulsasyonları kontrol eden esnek bir diyaframdır (Şanyılmaz, 2006).

Şekil 2.6.' da Sampaio ve Tavares (2005) tarafından sunulan şemalar, pistonlu ve diyaframlı jiglerin temel çalışma prensiplerini ve iç yapılarını anlamak için önemli bir görsel referans sunmaktadır. Pistonlu ve diyaframlı jigler, yoğunluk farkına dayalı zenginleştirme yöntemlerinde sıklıkla kullanılan ekipmanlardır. Bu jig türlerinde, malzemelerin su içindeki yoğunluklarına göre ayrılması prensibi uygulanır. Pistonlu jiglerde, bir pistonun yukarı ve aşağı hareketiyle suyun osilasyonu (dalgalanması) sağlanarak, malzeme yatağında stratifikasyon (tabakalaşma) meydana gelir. Diyafram tipi jiglerde ise bu hareket, bir kauçuk diyaframın esnek yapısı sayesinde gerçekleştirilir. Her iki sistemde de su hareketi, hafif ve ağır malzemelerin ayrışmasını kolaylaştırır. Pistonlu jigler, genellikle basit tasarımları ve kolay bakım avantajlarıyla bilinirken, diyaframlı jigler suyun daha hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Bu tür jigler, özellikle kömür temizleme işlemlerinde yaygın olarak kullanılır.

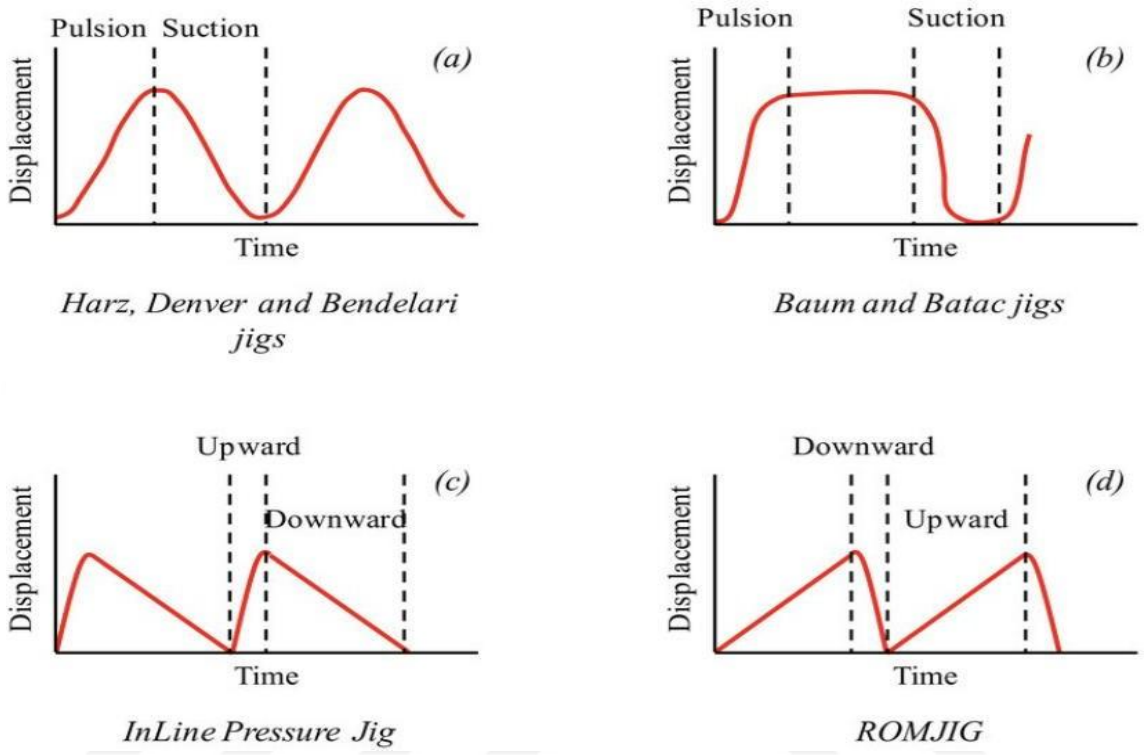


Şekil 2.6. Bazı pistonlu ve diyaframlı jiglerin şeması (Sampaio ve Tavares 2005)

Pulsasyon dalgası ya mekanik bir piston aracılığıyla ya da özel bir valf kullanılarak jigin haznesine aralıklı olarak beslenen su veya hava pulsasyonuyla üretilebilir. Bazı jig türlerinde ise, parçacıklarla su arasındaki göreli hareket, destek eleğinin dikey olarak yer değiştirmesiyle sağlanır. Bu yapı, jigin verimli bir şekilde çalışmasını ve farklı yoğunluklara sahip parçacıkların etkili bir şekilde ayrılmasını sağlar.

Jig işlemini karakterize eden yatak hareketi, bir akışkan akışı tarafından üretilen dikey darbelerden kaynaklanır. En basit darbe şekli, itme ve emme darbelerinin süresinin ve şiddetinin benzer olduğu, Şekil 2.7.'de gösterildiği gibi, sinüzoidal bir harmonik dikey harekettir. Bu sinüzoidal salınım dalga formu, Harz, Denver ve Bendelari jigleri gibi piston tipi ve bazı diyafram tipi jiglere özgüdür (Sampaio ve Tavares, 2005; Burt, 1999). Ancak, üreticilerin ve işletmecilerin vurguladığı tabakalaşma mekanizmasına bağlı olarak başka pulsasyon türü de (darbe türü) elde edilebilir. Türü ne olursa olsun, kullanılan pulsasyon

türü, farklı yoğunluktaki parçacıkların yatak içinde farklı pozisyonlara hareket etmesine ve ulaşmasına olanak tanımalıdır.



Şekil 2.7. Farklı jigglerin tipik pulsasyon diyagramları. (a) Sinüzoidal, (b) Trapezoidal, (c) Hızlı yukarı hareketli "testere dişi", ve (d) Hızlı aşağı hareketli "testere dişi"

Şekil 2.8.' de örneği görülen diyaframlı jiglerin çalışma prensibi, diyaframın mekanik hareketiyle su pulsasyonlarının oluşturulması üzerine kuruludur. Bu pulsasyonlar, jig haznesi içerisinde bulunan malzemelerin yoğunluklarına göre ayrılmasını sağlar. Ağır yoğunluklu malzemeler diyaframın altına çökerken, hafif malzemeler üste yükselir. Böylece, malzemeler yoğunluklarına göre stratifiye edilmiş olur ve ayırma işlemi gerçekleştirilir (Eskibalcı vd., 2002).

Diyaframlı jiglerin avantajları aşağıdaki gibidir:

Yüksek Ayırma Verimliliği: Diyaframlı jigler, özellikle ince taneli malzemeler için yüksek ayırma verimliliği sağlar.

Esneklik: Farklı tane boyutları ve yoğunluklardaki malzemelerin ayırılmasında etkili bir çözüm sunar.

Düşük Enerji Tüketimi: Mekanik hareketin sağladığı su pulsasyonları, düşük enerji tüketimi ile etkili bir ayırma işlemi sunar.



Şekil 2.8. Diyaframlı jig ve jig hazne içi

Diyaframlı jigler, kömür zenginleştirme, değerli metallerin (altın, gümüş) ve baz metallerin (kurşun, çinko) yanı sıra endüstriyel minerallerin (barit, fluorspar, vb.) ve elmas gibi değerli taşların ayırma işlemlerinde kullanılır. Ayrıca, geri dönüşüm sektöründe elektronik atıkların ve diğer karmaşık malzemelerin ayrılmasında da uygulanabilir (Kıyak, 2013).

Diyaframlı jigler, işleme kapasitesi, malzeme tipi ve işleme hedeflerine göre çeşitli boyut ve tasarımlarda üretilir. Bu ekipmanların tasarımı, malzemenin özelliklerine ve istenen ayırma verimliliğine göre özelleştirilebilir. Modern diyaframlı jigler, ayırma işlemini optimize etmek için gelişmiş kontrol sistemleri ile donatılabilir (Önal vd., 2005).

Diyaframlı jigler, madencilik ve mineral işleme sektörlerinde etkili ve verimli bir ayırma yöntemi olarak önemli bir yer tutar. Bu sistemler, özellikle ince taneli malzemelerin zenginleştirilmesinde tercih edilen çözümler arasında yer alır ve madencilik sektöründeki sürdürülebilirlik ve verimlilik çabalarına katkıda bulunur (Rath vd., 2017).

2.9.6. Basınçlı su ile çalışan jigler

Basınçlı su ile çalışan jigler, mineral işleme ve madencilik endüstrisinde, yoğunluk farkına dayalı olarak malzeme ayırma işlemlerinde kullanılan özel bir jig türüdür. Bu jigler, özellikle suyun basınçlı akışını kullanarak malzemeler arasındaki ayırımı gerçekleştirir. Bu teknoloji, gravimetrik ayırma yöntemlerinin bir alt grubu olarak kabul edilir ve geleneksel jigleme tekniklerine göre bazı avantajlar sunar (Bozkurt, 2017).

Basınçlı su ile çalışan jiglerin temel prensibi, basınç altındaki suyun, jig haznesi içindeki malzeme yatağını etkilemesi ve bu yolla malzemelerin yoğunluklarına göre stratifiye edilmesidir. Yüksek basınçlı su jetleri, malzemeleri karıştırır ve yoğunluk farklarına göre ayrışmalarını sağlar; daha ağır mineraller jig'in alt kısmında birikirken, daha hafif gang materyali üst kısımda toplanır (Özgen, 2012).

Basınçlı su ile çalışan jiglerin avantajları aşağıdaki gibidir:

Yüksek Ayırma Verimliliği: Basınçlı su jetleri, malzemeleri etkili bir şekilde stratifiye ederek yüksek ayırma verimliliği sağlar.

Düşük Enerji Tüketimi: Su jetlerinin kullanımı, diğer mekanik ayırma yöntemlerine göre daha düşük enerji tüketimi sunar.

Geniş Uygulama Yelpazesi: Çeşitli mineral türleri ve tane boyutları için uygulanabilir, esnek bir çözüm sunar.

Çevre Dostu: Kimyasal kullanımı gerektirmeyen bir yöntem olması, çevresel etkiyi minimuma indirir.

Basınçlı su ile çalışan jigler, demir cevheri, kömür, altın ve diğer değerli metallerin yanı sıra, endüstriyel mineraller ve inşaat malzemelerinin ayırma işlemlerinde kullanılabilir. Ayrıca, geri dönüşüm sektöründe de metal ve plastik gibi malzemelerin ayrılmasında uygulanabilir (Celep, 2005).

Bu jig türü, işleme kapasitesine, malzeme tipine ve işleme hedeflerine göre çeşitli boyut ve tasarımlarda üretilebilir. Modern basınçlı su ile çalışan jigler, işleme sürecini

optimize etmek için gelişmiş kontrol sistemleri ile donatılabilir ve ayırma işlemini daha verimli hale getirebilir (Celep vd., 2006).

Basınçlı su ile çalışan jigler, madencilik ve mineral işleme sektörlerinde yüksek verimlilik ve çevre dostu bir ayırma yöntemi olarak önemli bir yer tutar. Bu teknoloji, özellikle suyun dinamik gücünden yararlanarak, malzeme ayırma süreçlerinde yenilikçi çözümler sunar (Glastonbury vd., 2015).

2.9.7. Basınçlı hava ile çalışan jigler

Basınçlı hava ile çalışan jigler, madencilik ve mineral işleme sektörlerinde kullanılan, yoğunluk farkına dayalı malzeme ayırma işlemleri için tasarlanmış özel ayırma ekipmanlarıdır. Bu tür jigler, özellikle hava akışını kullanarak malzemeleri ayırmak için tasarlanmıştır ve gravimetrik ayırma yöntemlerinin bir alt grubu olarak kabul edilir. Ancak, bu spesifik ayırma yöntemiyle ilgili detaylı ve doğrudan teknik bilgi veya uygulamalara dair kaynaklar sınırlı olabilir. Genel olarak, basınçlı hava ile çalışan jiglerin temel prensipleri ve avantajları hakkında genel bilgiler vermek mümkündür (Köleli ve Aydeniz, 2016).

Basınçlı hava ile çalışan jiglerde temel prensip, hava akışının malzeme yatağını etkilemesi ve bu yolla yoğunluklarına göre malzemelerin ayrılmasını sağlamasıdır. Basınçlı hava, jig haznesi içerisinde malzemelerin stratifiye olmasını (katmanlaşmasını) sağlayarak, daha yoğun malzemelerin altta toplanmasına ve daha hafif malzemelerin üstte kalmasına neden olur (Çiçek ve Cöcen, 2002).

Basınçlı hava ile çalışan jiglerin avantajları aşağıdaki gibidir:

Enerji Verimliliği: Basınçlı hava kullanımı, enerji verimliliği açısından avantajlı olabilir.

Çevre Dostu: Suyun kullanılmadığı bu yöntem, su kaynaklarının korunmasına yardımcı olur ve kuru işleme imkânı sunar.

Geniş Uygulama Alanı: Hava jigleri, kömürden metallerin ve endüstriyel minerallerin ayrılmasına kadar geniş bir malzeme yelpazesinde kullanılabilir.

Basınçlı hava ile çalışan jigler, özellikle kömür zenginleştirme işlemlerinde kullanılır. Ayrıca, demir cevheri, manganez gibi metallerin ve çeşitli endüstriyel minerallerin ayırma işlemlerinde de etkili olabilirler. Geri dönüşüm sektöründe, çeşitli atıkların sınıflandırılması ve ayrılması işlemlerinde de kullanılma potansiyeline sahiptirler (Ozun vd., 2019).

Basınçlı hava ile çalışan jigler, işleme kapasitesi, malzeme türü ve işleme hedeflerine bağlı olarak çeşitli boyut ve tasarımlarda üretilir. Bu ekipmanların tasarımı, malzemenin özelliklerine ve istenen ayırma verimliliğine göre özelleştirilebilir. Modern basınçlı hava jigleri, ayırma işlemini optimize etmek ve daha etkili hava kontrolü sağlamak için gelişmiş kontrol sistemleri ile donatılabilir (Özün ve Ergen, 2019).

Bu teknoloji, madencilik ve mineral işleme sektörlerinde yenilikçi ve etkili bir ayırma yöntemi olarak önemli bir yer tutabilir. Ancak, basınçlı hava ile çalışan jiglerin kullanımı ve optimizasyonu, spesifik uygulama koşullarına ve malzeme özelliklerine dikkat edilerek yapılmalıdır (Somasundaran ve Wang, 2006).

2.9.8. Pnömatik (havalı) jigler

Pnömatik (havalı) jigler, madencilik ve mineral işleme sektörlerinde kullanılan, hava akışını kullanarak malzemeleri yoğunluklarına göre ayıran ekipmanlardır. Bu ayırma yöntemi, özellikle gravimetrik ayırma tekniklerinin bir alt grubu olarak kabul edilir ve su yerine basınçlı hava kullanır. Pnömatik jiglerin avantajları arasında su kullanımının olmaması, bu sayede kuru işleme imkanı sunması ve çevresel etkilerin azaltılması yer alır (Çakmak, 2006).

Pnömatik jiglerin çalışma prensibi, basınçlı hava akışını malzeme yatağı üzerinde kullanarak malzemelerin yoğunluklarına göre stratifikasyonunu sağlamaktır. Hava, malzeme yatağını karıştırarak daha yoğun malzemelerin altta toplanmasını ve daha hafif malzemelerin üste çıkmasını sağlar. Bu işlem, malzemelerin yoğunluklarına göre ayrılmasını mümkün kılar (Liu vd., 2017).

Pnömatik jiglerin avantajları aşağıdaki gibidir:

Su Kullanılmaması: Su kaynaklarının korunmasına yardımcı olur ve suyun kısıtlı olduğu bölgelerde madencilik işlemlerine olanak tanır.

Enerji Verimliliği: Basınçlı hava kullanımı, genellikle düşük enerji tüketimi ile yüksek ayırma verimliliği sağlar.

Esnek Uygulama: Kömür, demir cevheri, altın ve diğer değerli metallerin yanı sıra, çeşitli endüstriyel minerallerin ayırma işlemlerinde kullanılabilir.

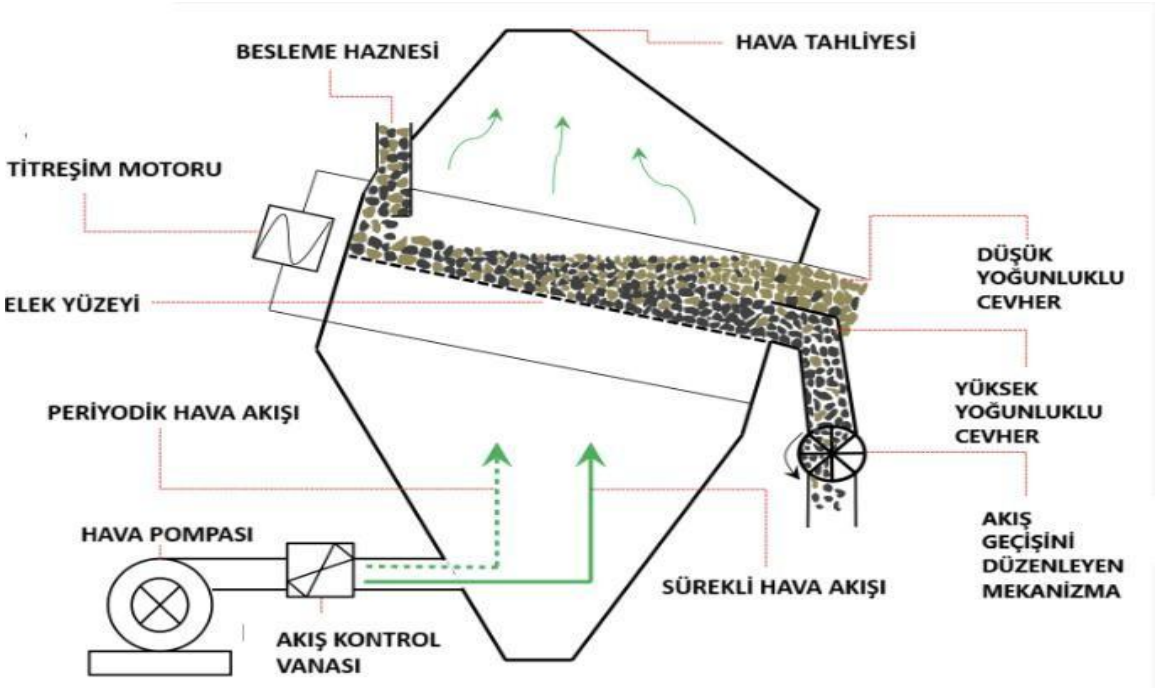
Pnömatik jigler genellikle kömür zenginleştirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, demir cevheri ve diğer metallerin ayırma işlemlerinde de etkilidir. Bunun yanı sıra, inşaat malzemeleri, geri dönüşüm malzemeleri ve endüstriyel mineraller gibi geniş bir malzeme yelpazesinin işlenmesinde uygulanabilir (Kleynhans vd., 2012).

Pnömatik jigler, işleme kapasitesi ve malzeme türüne göre çeşitli boyut ve tasarımlarda üretilir. Bu ekipmanlar, malzemenin özelliklerine ve ayırma işleminin gerekliliklerine göre özelleştirilebilir. Modern pnömatik jigler, işleme sürecini daha da optimize etmek ve ayırma verimliliğini artırmak için gelişmiş kontrol sistemleri ile donatılabilir (Aratoğlu, 2017).

Pnömatik jigler, madencilik ve mineral işleme sektörlerinde kuru işleme ihtiyaçları için yenilikçi ve çevre dostu bir ayırma yöntemi olarak önemli bir yer tutar. Bu teknoloji, özellikle suyun sınırlı olduğu veya su kullanımının istenmediği durumlarda, malzeme ayırma süreçlerinde etkili çözümler sunar (Raimov, 2023).

Pnömatik jigler, Şekil 2.9.' da görülebileceği üzere; bir ucunda besleme yapılan ve bu beslemenin iki farklı yukarıya doğru hava akışına maruz bırakıldığı, eğimli titreşimli bir elekten oluşur. Jig haznesi içerisine sürekli hava akışı verilir ve bu sayede hava dağılımı homojen hale gelmektedir. Diğer bir hava akışı ise üst üste binmiş pulsasyonlu bir hava akışıdır ve bu akış, yatağın elekten geçerken yoğunluk tabakalaşmasını teşvik eder. İki bağımsız hava akışının birleşik etkisi, strok frekansı ve genliğinin hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanır (Snoby vd., 2009). Yatak seviyesi ve kesme yüksekliğini kontrol etmek için jigin çıkış ucuna yoğunluk sensörleri yerleştirilmiştir (Kumar, D. 2018). Cevherin

jigten boşaltılması için genellikle boşaltma vanaları kullanılır. Ekipman kapalıdır ve oluşan tozları işleyen bir toz toplama sistemi vardır.



Şekil 2.9. Pnömatik jig (ön kesit)

2.9.8.1. ***Basınçlı hava ile çalışan jigler ve pnömatik jiglerin karşılaştırılması***

Basınçlı hava ile çalışan jigler ve pnömatik (havalı) jigler, farklı çalışma prensiplerine sahip olmakla birlikte, her biri belirli uygulama alanlarında avantajlar sunar. Basınçlı hava ile çalışan jigler, yüksek basınçlı hava akışını kullanarak malzeme yatağını yukarı doğru hareket ettirir ve bu hareket, malzeme parçacıklarının yoğunluk farklarına göre tabakalaşmasını sağlar. Bu jiglerde hava akışı sabit bir frekans ve basınçta sağlanır, böylece sürekli ve tutarlı bir ayrışma süreci elde edilir. Ayrıca, basınçlı hava ile çalışan jigler kuru koşullarda işlem yapar, su kullanımı gerektirmez ve çevresel düzenlemelere uyum sağlar. Bu özellik, su kaynaklarının kısıtlı olduğu veya çevresel düzenlemelerin sıkı olduğu bölgelerde büyük avantaj sağlar. Ancak, yüksek basınçlı hava üretimi için güçlü bir kompresör sistemi gerektirdiğinden, işletme maliyetleri artabilir ve ince taneli malzemelerde verimlilik düşebilir.

Öte yandan, pnömatik jigler, düşük basınçlı hava darbelerinin kısa süreli uygulanması ile çalışır. Bu darbeler, malzeme yatağında yoğunluk temelli tabakalaşmayı hızlandırır. Pnömatik jigler, hava darbelerinin sinüzoidal, trapezoidal veya diğer özel profillerde uygulanmasını sağlayarak farklı mineral türlerine uyum gösterir. Hem ıslak hem de kuru ortamlarda kullanılabilen pnömatik jigler, daha geniş bir uygulama alanı sunar ve mineral işleme tesislerinde sıklıkla tercih edilir. Ayrıca, hava darbelerinin frekansı ve genliğinin ayarlanabilir olması, farklı mineral türlerinin etkin ayrışmasını mümkün kılar. Ancak, pnömatik jiglerin su kullanımına ihtiyaç duyabilmesi ve daha karmaşık bir kontrol sistemine sahip olmaları, bazı durumlarda işletme maliyetlerini artırabilir.

Basınçlı hava ile çalışan jiglerin kullanım alanları, özellikle kuru ortamlar ve su kullanımının sınırlı olduğu uygulamalarla sınırlıdır. Kömür, demir cevheri ve endüstriyel mineraller gibi kuru işlem gerektiren malzemelerin ayrıştırılmasında etkili olup, çamur ve su atıklarının istenmediği bölgelerde çevre dostu bir çözüm sunar. Pnömatik jigler ise, hem ince hem de kaba malzemelerin ayrıştırılmasında kullanılabilir ve esnek uygulama özellikleri sayesinde hem ıslak hem de kuru işlemlere uygunluk gösterir.

Her iki jig tipi de belirli avantajlar ve dezavantajlar sunar. Basınçlı hava ile çalışan jigler su kullanımını gerektirmediği için çevre dostu bir seçenek olmakla birlikte, kompresör gereksinimi ve ince taneli malzemelerdeki verimlilik sorunları gibi zorluklarla karşılaşabilir. Pnömatik jigler ise daha geniş bir uygulama alanına sahip olup, ayarlanabilir hava darbeleri sayesinde farklı mineral türlerine uyum sağlar, ancak su kullanımını ve daha karmaşık kontrol sistemlerini gerektirir. Bu nedenle, her iki tip jig de belirli koşullara ve ihtiyaçlara göre seçilmelidir.

2.9.9. Ağır–sıvı jigleri

Ağır-sıvı jigleri, mineral işleme alanında kullanılan özel bir ayırma ekipmanı türüdür. Bu sistemler, yoğunluk farkına dayanarak malzemeleri ayırmak için tasarlanmıştır. Ağır-sıvı jigleri, özellikle yüksek yoğunluklu sıvılar kullanarak çalışır ve bu sıvılar içerisinde malzemelerin yoğunluklarına göre stratifikasyonunu (katmanlaşmasını) sağlar. Ancak, bu spesifik terimle ilgili doğrudan ve detaylı bilgileri sağlayacak kaynaklar sınırlı olabilir.

Genel olarak, ağır-sıvı ayırma işlemleri ve ilgili teknolojiler hakkında bazı temel bilgiler sunmak mümkündür (Yıldız, 2014).

Ağır-sıvı jiglerinin avantajları aşağıdaki gibidir:

Yüksek Ayırma Hassasiyeti: Yüksek yoğunluklu sıvılar kullanarak, çok ince tane boyutlarındaki malzemeler arasında bile ayırma yapılabilir.

Esnek Uygulama: Çeşitli mineral türleri için uygulanabilir ve yüksek saflıkta ürünler elde etmek için kullanılabilir.

Çevre Dostu: Kullanılan sıvılar yeniden kullanılabilir ve işlem suyu gerektirmez, bu da çevresel etkiyi azaltır.

Ağır-sıvı ayırma teknikleri, özellikle değerli metallerin, endüstriyel minerallerin ve kömürün zenginleştirilmesinde kullanılır. Ayrıca, geri dönüşüm sektöründe de farklı malzemelerin ayırılmasında etkili bir yöntem olarak kullanılabilir (Canyılmaz ve Kutay, 2003).

Ağır-sıvı ayırma sistemleri, işlenecek malzemenin özelliklerine ve istenen ayırma verimliliğine göre özelleştirilebilir. Modern sistemler, işleme sürecini optimize etmek ve ayırma verimliliğini artırmak için gelişmiş kontrol sistemleri ile donatılabilir (Kasman, 2009).

Ağır-sıvı jigleri ve ilgili teknolojiler, mineral işleme sektöründe önemli bir yer tutar ve özellikle yoğunluk ayırma işlemlerinde yüksek verimlilik ve hassasiyet sunar. Bu sistemler, çeşitli endüstrilerde malzeme ayırma süreçlerinde yenilikçi ve etkili çözümler sunmaya devam etmektedir (Palanikumar, 2011).

2.10. Jiglerde Zenginleştirmeyi Etkileyen Faktörler

Jiglerde zenginleştirme işlemi, mineral ve maden işleme endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir ayırma teknolojisidir. Bu işlem sırasında, çeşitli faktörler zenginleştirme verimliliğini etkileyebilir. Bu faktörlerin anlaşılması ve kontrol altına alınması, işlemin başarısı için kritik öneme sahiptir (Panda vd., 2014).

Tane boyutu dağılımı, jig işleminin verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Genellikle, malzemenin homojen bir tane boyutu dağılımına sahip olması tercih edilir. Çok ince veya çok kalın taneli malzemeler, stratifikasyon sürecini olumsuz etkileyebilir (Taylan, 2009).

Jig içine beslenen malzemenin miktarı ve hızı, ayırma işleminin etkinliğini doğrudan etkiler. Fazla yüklenme, yetersiz stratifikasyona yol açarken, çok düşük besleme hızları da işlemin ekonomik olmaktan çıkmasına sebep olabilir (Yıldırım, 2011).

Ayırılacak malzemeler arasındaki yoğunluk farkı, jigleme işleminin temelini oluşturur. Yoğunluk farkı ne kadar yüksekse, stratifikasyon o kadar etkili olur ve zenginleştirme verimliliği artar (Ağaçayak, 2004).

Jiglerde su veya hava pulsasyonunun frekansı ve şiddeti, stratifikasyon sürecini ve dolayısıyla zenginleştirme verimliliğini etkiler. Pulsasyon parametrelerinin, işlenen malzemenin özelliklerine göre optimize edilmesi gereklidir (Yıldırım, 2011).

Jig haznesinin boyutu, diyaframın veya diğer hareketli kısımların tasarımı gibi faktörler de zenginleştirme işleminin etkinliğini etkileyebilir. İyi tasarlanmış bir jig, malzemenin daha etkili stratifikasyonunu ve dolayısıyla daha yüksek zenginleştirme verimliliğini sağlar (Panda vd., 2014).

Bu faktörlerin her biri, jigleme işlemi sırasında dikkate alınmalı ve optimize edilmelidir. Optimal koşulların sağlanması, zenginleştirme sürecinin verimliliğini maksimize etmek için kritik öneme sahiptir. Madencilik ve mineral işleme uygulamalarında, bu faktörlerin detaylı bir şekilde incelenmesi ve sürekli olarak izlenmesi, işlemin başarısı için önemlidir (Taylan, 2009).

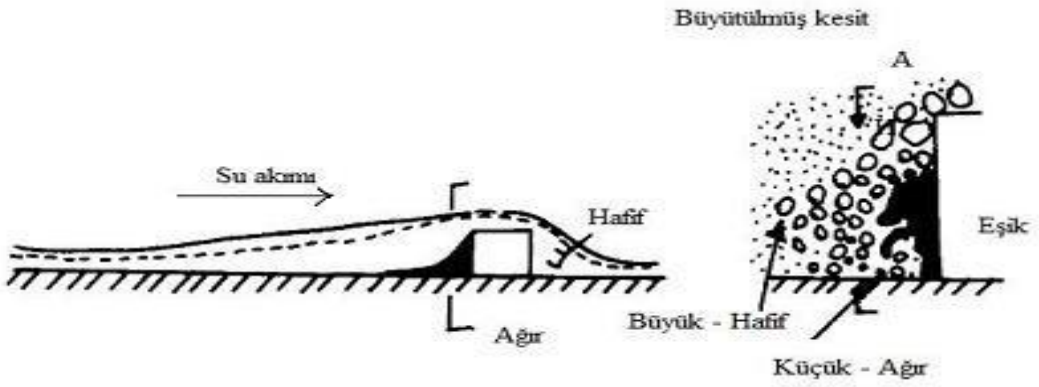
2.11. Sallantılı Masalarla Zenginleştirme

Tabaka halinde akışkan ortamda ayırma yapan ve ayırıcı yüzeyi hareketli olan bir cihazdır. Sallantılı masalar, krom cevherlerinin gravite yöntemi ile zenginleştirilmesinde

günümüzde en çok kullanılan aygıtlardır. Sallantılı masa esas olarak üzerinde tabaka halinde akışkan akışı olan dikdörtgen, paralel kenar, dikdörtgene yakın yamuk veya V şeklinde bir yüzeydir. Uygun bir mekanizma ile masanın uzun ekseni doğrultusunda ve geriye doğru olan hareketi daha hızlı olmak üzere ileri – geri hareket ettirilir (Gence, 1985).

Sallantılı masa yüzeyindeki ayırmanın etkinliğini arttırmak için masa yüzeyi eşiklerle kaplanır. Eşiklerin yükseklikleri mekanizma kenarından konsantre kenarına doğru azalarak konsantre kenarında sıfır olmaktadır (Aydın, 2001).

Endüstride kullanılan sallantılı masalar; iri cevher ve ince cevher (şlam) masası olmak üzere iki gruba ayrılırlar. İri cevher masaları yüksek ve sık eşikli, şlam masaları ise alçak ve seyrek eşikli bazende eşiksizdir. Eşikler akış koşullarını değiştirir ve eşikler arasında engelli çöküş klasifikasyonu olur (Şekil 2.10). Bunun sonucunda hem etkili bir ayırma yapılabilir hem de masa kapasitesi artar (Önal, 1985).



Şekil 2.10. Akan Su Tabakasında Katı Hareketi Üzerindeki Eşik Etkisi (Bayat, 2009)

Masa yüzey alanlarını efektif kullanabilmek için katlı masalar geliştirilmiştir. Şekil 2.11 ’de üç katlı bir sallantılı masa görülmektedir.

Dedeman Madencilik A.Ş. Adana Aladağ Krom İşletmesi, Eskişehir Krom İşletmeleri- Kayseri Pulpınar Krom İşletmesi’ nde sallantılı masa kullanılmaktadır.



Şekil 2.11. Üç Katlı Sallantılı Masa

2.11.1. Sallantılı masalarda zenginleştirmeyi etkileyen faktörler

- **Besleme Malı:** Masalarda hem boyut hem de yoğunluğa göre bir ayırım söz konusu olduğundan besleme malının önceden bir tane sınıflandırmasına tabii tutmak sallantılı masanın kapasitesini ve verimini artıracaktır. En büyük tane iriliği kömür için yaklaşık 18 mm ve cevher için 1.7 mm olan malzeme sallantılı masalarda işleme tabi tutulabilir. Alt boyut ise yüksek özgür ağırlığa sahip cevherlerin bazı uygulamalarında 0.025 mm ye kadar inmektedir.

- **Özgül Ağırlık:** Sallantılı masalar pulp halinde aralarında yeterli özgül ağırlık farkı bulunan mineralleri birbirinden ayırabilir. Zenginleştirme kriteri 1.25 in üzerinde olan herhangi iki mineral birbirinden başarılı bir şekilde ayrılabilir. Ancak mineraller arsında şekil farkı mevcutsa, zenginleştirme kriteri 1.0 civarında olsa bile ayırma yapılabilir.

- **Eşik Konumu:** Masalar genelde iki tiptir; (a) derinlik ve yoğun eşik yapı sistemi ile tanımlanan ve iri tanelerin zenginleştirildiği kum masaları, (b) çok ince taneli ve az yoğunluklu malzemenin eşikler üzerinde kayarak uzaklaştırılmasının amaçlandığı çok az derinliğe sahip şlam masaları. Eşikler arası mesafe en büyük tanenin boyutunun en az 3 katı olmalıdır.

- **Kapasite:** Sallantılı masanın kapasitesi beslenecek malzemenin tane boyutu ve özgül ağırlığı ile işlemin (kaba zenginleştirme veya temizleme) cinsine bağlıdır. 1.7-1.2 mm boyutlarındaki cevherin zenginleştirilmesinde normal boyutlardaki bir masanın kapasitesi 2 t/saat dir. şlam masalarında ise 0.1 ton/saate kadar kapasite inmektedir.

- **Hız ve Genlik:** Ortalama hareket iri malzeme için hızı dakikada 230-285 gidip-gelme ince malzeme için ise 285-325 arasındadır. Ortalama hareket genliği 19 mm olup 25 mm ye kadar çıkabilir. İri taneli malzeme için uzun genlik- düşük hız, ince malzeme için ise kısa genlik- yüksek hız kullanılır. Kaba ayırmada uzun genlik düşük hız, temizlemede ise kısa genlik- yüksek hız kullanılır.

- **Masa Eğimi:** Sallantılı masaların eğimi, cevher boyutuna, ayrılacak minerallerin özgül ağırlığına, ayırma cinsine ve yıkama su miktarına göre değişir. İnce cevherler için 1/48 - 1/24, iri cevherler için 3/48 - 1/12, ve kaba zenginleştirmede 1/6 ya kadar eğim kullanılır.

- **Su Sarfiyatı:** Sallantılı masalarda su sarfiyatı beslenen malzemenin tane iriliğine ve işlemin cinsine (kaba veya temizleme) göre değişir. Kaba zenginleştirmede 1.4 ton su/ton cevher, temizlemede ise 1.2 ton su/ton cevher kullanılır. Şlam masalarında ise 10 ton su/ton cevhere kadar su harcaması çıkmaktadır. Masalarda ilave verilen su miktarı yaklaşık tüm su sarfiyatının %25'i kadardır.

- **Güç Sarfiyatı:** Tek katlı masalarda güç sarfı 0.7-2.2 kws/ton arasında değişmekte, iki veya üç katlı masalarda ise 2.3 kws/ton olarak seçilir.

- **Bakım:** İşlemin durmasına yol açan en büyük neden masa eşiklerinin ve kaplamanın değiştirilmesidir. Günümüzde kullanılan modern masaların yüzeyi kauçuk veya maun ile kaplandığından ömürleri en az 10 yıl olmaktadır (Bayat, 2009).

2.12. Multi gravite ayırıcısı (MGS) ile zenginleştirme

Multi Gravite Ayırıcısı (MGS), özellikle ince taneli ve düşük yoğunluk farkına sahip mineral karışımlarının zenginleştirilmesi için kullanılan gelişmiş bir gravimetrik ayırma

teknolojisidir. Geleneksel gravimetrik yöntemlerin aksine, MGS yoğunluk farklarını daha etkin bir şekilde kullanarak, daha yüksek saflıkta ve verimde mineral konsantreleri üretme imkanı sunar (Ay ve Turhan, 2010).

MGS'nin çalışma prensibi, dönen bir tambur içerisinde yer çekimi ve merkezkaç kuvvetlerinin kombinasyonunu kullanmaktır. Bu sistemde, besleme malzemesi dönen tambura püskürtülür ve yoğunluklarına göre ayrıştırılır. Dönen tamburun iç yüzeyine yerleştirilen bir dizi riffle (küçük engel), malzemelerin stratifikasyonunu sağlar. Bu süreçte, daha ağır mineraller riffle'ların dibinde toplanırken, daha hafif materyaller üst kısımlara taşınır ve böylece farklı yoğunluklardaki malzemeler efektif bir şekilde ayrıştırılır (Canyılmaz ve Kutay, 2003).

Yüksek Ayırma Verimliliği: MGS, özellikle ince taneli malzemelerde yüksek ayırma verimliliği sağlar ve geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek saflıkta ürünler elde edilmesine olanak tanır (Kasman, 2009).

Esnek Uygulama: Çeşitli mineral türleri için kullanılabilir ve ayırma işlemi sırasında ayarların kolaylıkla değiştirilebilmesi, farklı işleme ihtiyaçlarına uyum sağlar.

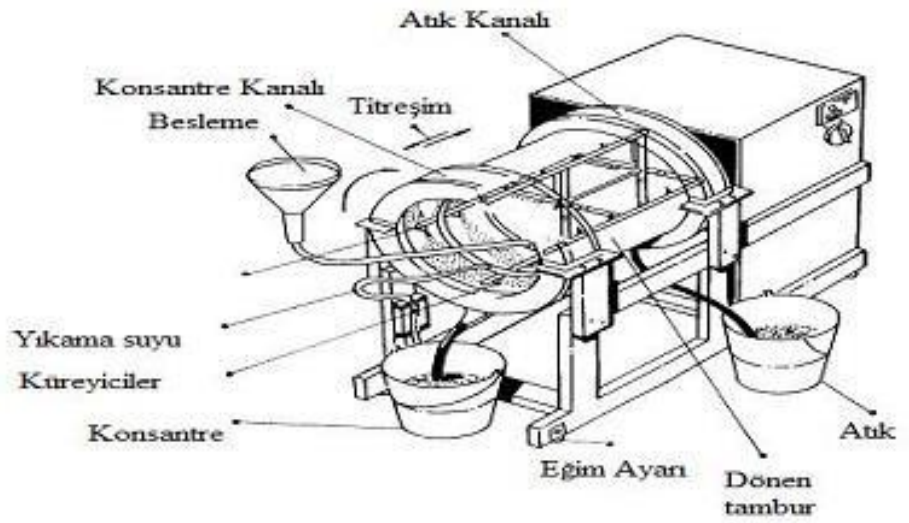
Düşük Su Tüketimi: MGS, su kullanımını minimize eder, bu da su kaynaklarının kısıtlı olduğu bölgelerde veya çevresel etkiyi azaltmak isteyen işletmeler için idealdir.

MGS, altın, krom, kalay, tungsten, barit, cevher atıklarının yeniden işlenmesi ve ince kömür fraksiyonlarının zenginleştirilmesi gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca, çevresel iyileştirme projelerinde ve endüstriyel minerallerin işlenmesinde de etkili bir çözüm sunar (Ozun vd., 2019).

MGS'nin tasarımı, işlenen malzemenin özelliklerine ve işleme hedeflerine göre özelleştirilebilir. Modern MGS sistemleri, işleme sürecini optimize etmek ve ayırma verimliliğini artırmak için gelişmiş kontrol sistemleri ile donatılmıştır (Taylan, 2009).

MGS teknolojisi, mineral işleme sektöründe yüksek verimlilik ve çevresel sürdürülebilirlik sağlayan yenilikçi bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Bu sistemler,

özellikle zorlu malzemelerin işlenmesinde ve değerli minerallerin geri kazanımında önemli avantajlar sunar (Çiçek ve Cocen, 2002).



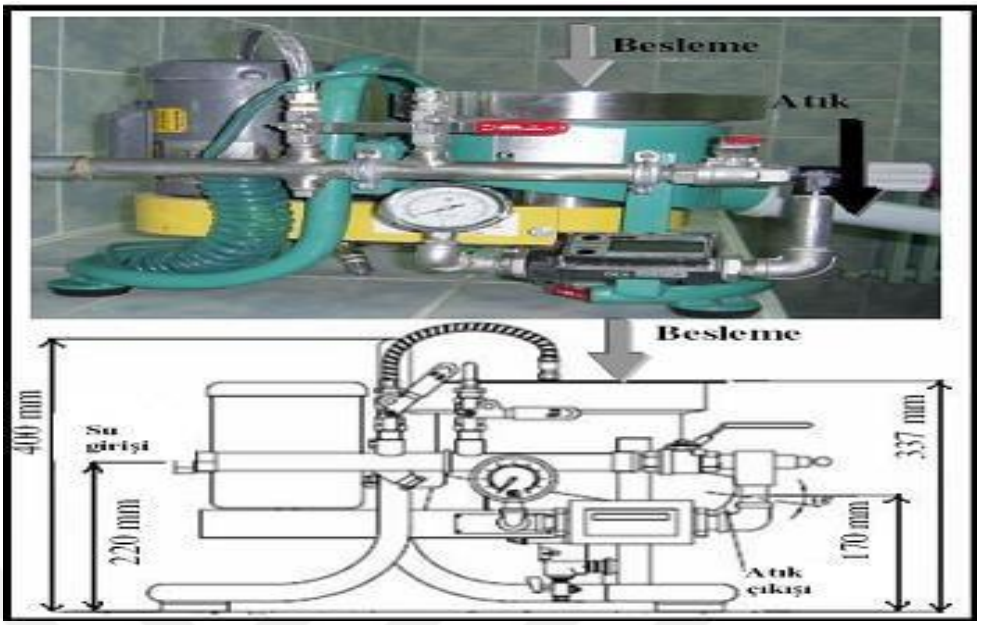
Şekil 2.12. MGS Ünitesi Şematik Gösterimi (Chan vd., 1994)

C900 tipi Mozley firmasının ürettiği Multi Gravity Seperator cihazınınn çalışma parametreleri şu şekildedir:

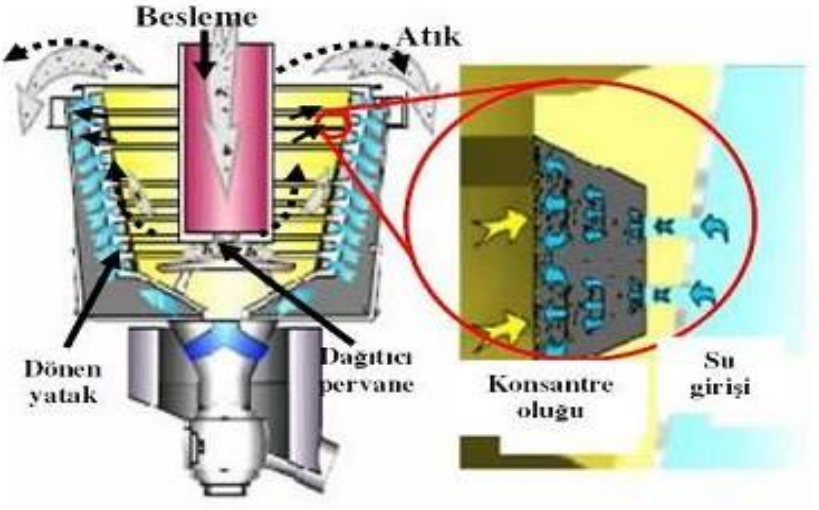
- Tambur dönme hızı: 100 – 300 dev/dk
- Tambur salınım frekansı: 4/4.8/5.7 dev/sn
- Tambur salınım genliği: 10/15/20 mm
- Tambur eğim açısı: 0-9º
- Yıkama suyu miktarı: 0 – 10 L/dak
- Besleme kapasitesi: maksimum 200 kg/s (kuru)

2.13. Knelson Konsantratörü ile Zenginleştirme

Knelson konsantratörü, yerçekimi kuvvetlerini kullanarak değerli metallerin, özellikle altının, zenginleştirilmesi için tasarlanmış bir ayırma ekipmanıdır. Bu sistem, yüksek yoğunluklu malzemeleri, özellikle altın gibi değerli mineralleri, diğer daha hafif materyallerden ayırmak için merkezkaç kuvvetlerinden faydalanır. Knelson konsantratörü, özellikle ince taneli altın parçacıklarının geri kazanımında etkili olduğu için altın madenciliği sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknoloji, yüksek saflıkta ve verimde mineral konsantreleri elde etme imkânı sunar (Kıyak, 2013).



Şekil 2.13. Knelson Ayırıcısı ve Şematik Görünüşü (Laboratuar Tipi) (Alp vd., 2004 a.b; Celep vd., 2004).



Şekil 2.14. Knelson Ayırıcısının Düşey Kesiti (Ling, 1998)

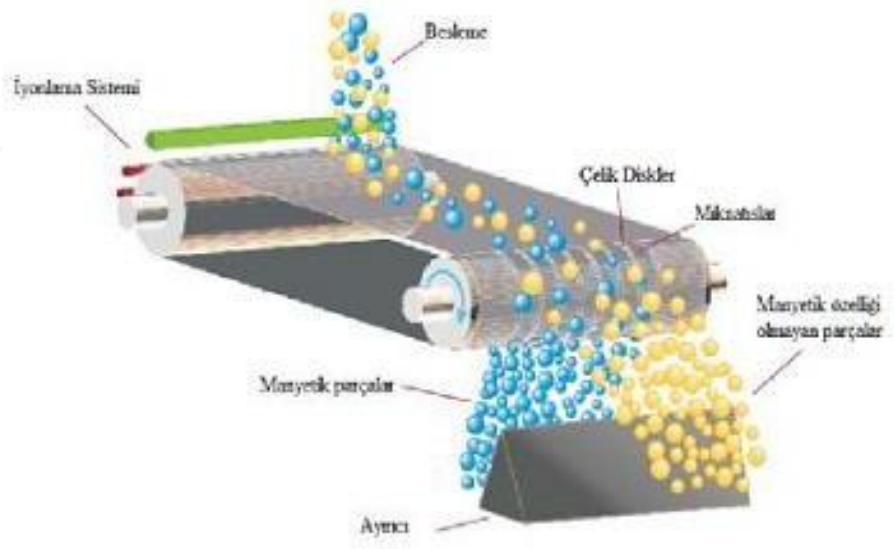
2.14. Manyetik Ayırma ile Zenginleştirme

Manyetik ayırma ile zenginleştirme, mineral işleme sektöründe demir gibi manyetik özellik gösteren mineralleri, manyetik olmayan malzemelerden ayırmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu süreç, malzemenin bir manyetik alandan geçirilmesiyle gerçekleştirilir; manyetik mineraller alana çekilirken, manyetik olmayanlar etkilenmez ve böylece ayrışma sağlanır. Yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcılar (HMS), düşük alan şiddetli

minerallerin ayrılması için kullanılabilir, bu sayede çeşitli endüstrilerde geniş bir uygulama yelpazesi bulunur (Yıldırım, 2011).



Şekil 2.15. Sanayi Tipi Manyetik Ayırıcı (Outokumpu Technology)



Şekil 2.16. Manyetik Ayırıcı Çalışma Prensibi (Outokumpu Technology) (Gence,1985).

2.14.1. Kromitin manyetik duyarlılığı

Kromit, düşük manyetik duyarlılığa sahip bir mineraldir. Bu özellik, kromitin manyetik ayırma işlemlerinde diğer minerallerden ayrılmasını zorlaştırabilir. Ancak, kromitin manyetik ayırma yöntemleriyle zenginleştirilmesi mümkündür, özellikle yüksek

yoğunluklu manyetik ayırıcılar kullanılarak. Manyetik ayırma işlemleri, kromitin saflığını artırma ve değerli metal geri kazanımı için önemli bir yöntemdir. Bu süreç, özellikle kromit cevherinin işlenmesinde ve arıtılmasında kullanılır (Köleli ve Aydeniz, 2016).

2.14.2. Gang minerallerinin özellikleri

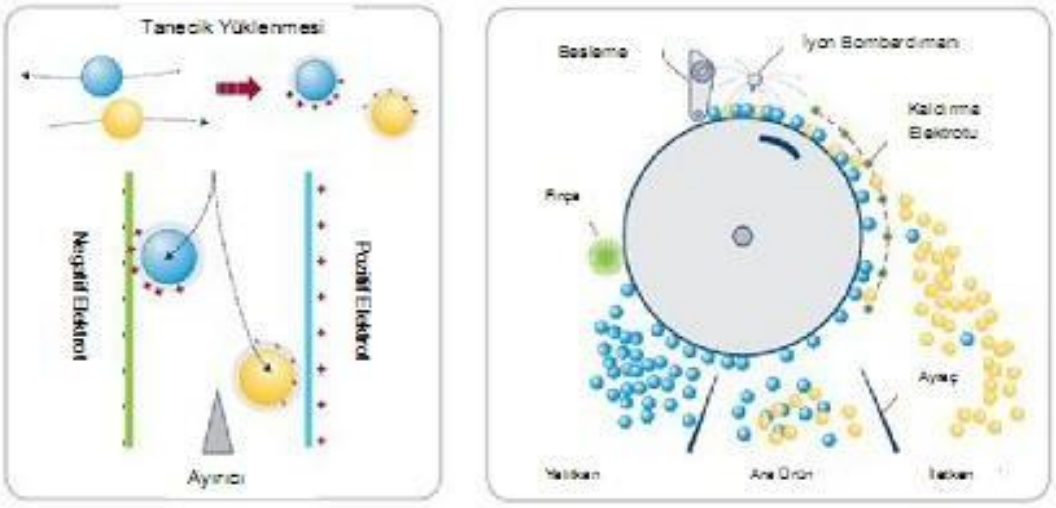
Gang mineralleri, madencilik ve mineral işleme sırasında ekonomik değeri olmayan veya hedef mineralle birlikte çıkarılan ancak işlem amaçlı olmayan minerallerdir. Bu mineraller, genellikle hedef mineralin ayırma ve zenginleştirme işlemleri sırasında atık olarak kabul edilir. Gang minerallerinin özellikleri, bulundukları cevher yatağına ve çevreleyen kayaçlara göre değişiklik gösterir. Bunlar arasında kuvars, kalsit, mika, feldspat ve kil mineralleri gibi çeşitli türler bulunabilir. Gang mineralleri, hedef mineralin işlenmesi ve saflığının artırılması süreçlerinde önemli rol oynar (Özün ve Ergen, 2019).

2.14.3. Cevherde manyetit bulunması

Cevherde manyetit bulunması, madencilik ve mineral işleme açısından önem taşır çünkü manyetit, güçlü manyetik özelliklere sahip bir demir oksit mineralidir. Bu, manyetit içeren cevherlerin, manyetik ayırma yöntemleri kullanılarak kolayca işlenebileceği anlamına gelir. Manyetit, hem doğrudan demir üretimi için kullanılabilir hem de çeşitli sanayi uygulamalarında değerli bir kaynak olarak değerlendirilir. Manyetit içeren cevherlerin işlenmesi, yüksek verimlilikte demir konsantresi üretimine olanak tanır (Raimov, 2023).

2.15. Elektrostatik Ayırma İle Zenginleştirme

Elektrostatik ayırma, mineral işleme sektöründe, minerallerin elektriksel özelliklerinden faydalanarak yapılan bir zenginleştirme yöntemidir. Bu yöntem, özellikle iletken (örneğin metalik mineraller) ve yalıtkan (örneğin kum ve kayaçlar) malzemelerin ayrılması için kullanılır. Elektrostatik ayırma, kuru koşullarda gerçekleşir ve özellikle suyun kullanılamadığı veya istenmediği durumlar için uygun bir alternatif sunar. Yüksek saflıktaürün elde etme potansiyeline sahiptir, bu yüzden çeşitli mineral zenginleştirme ve geri dönüşüm işlemlerinde tercih edilir (Yıldız, 2014).



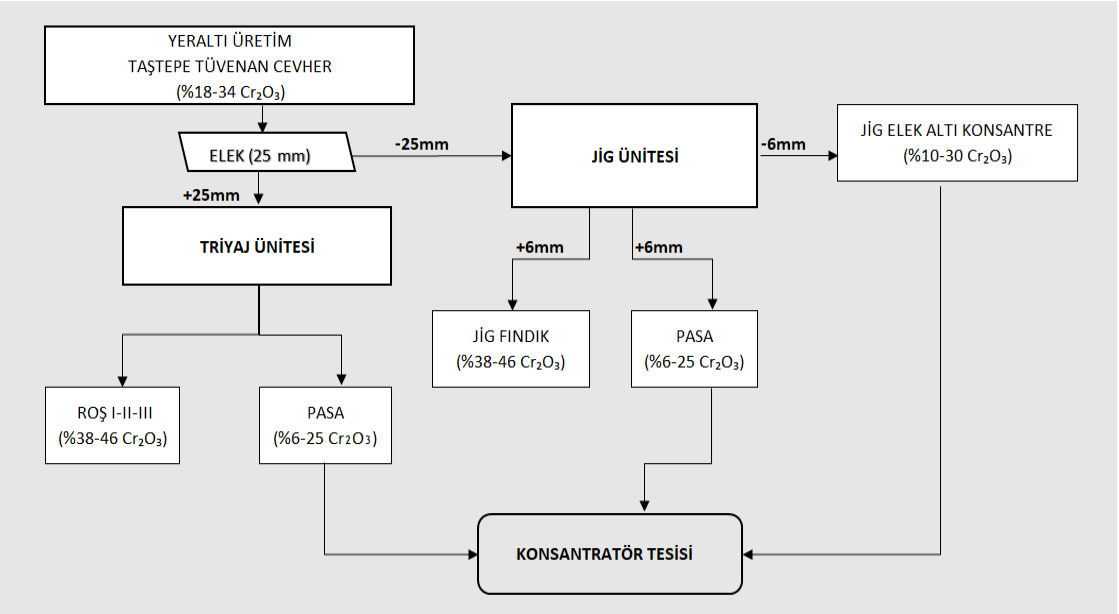
Şekil 2.17. Elektrostatik Ayırma Prensibi (Outokumpu Technology) (Gence, 1985)

2.16. Flotasyon İle Zenginleştirme

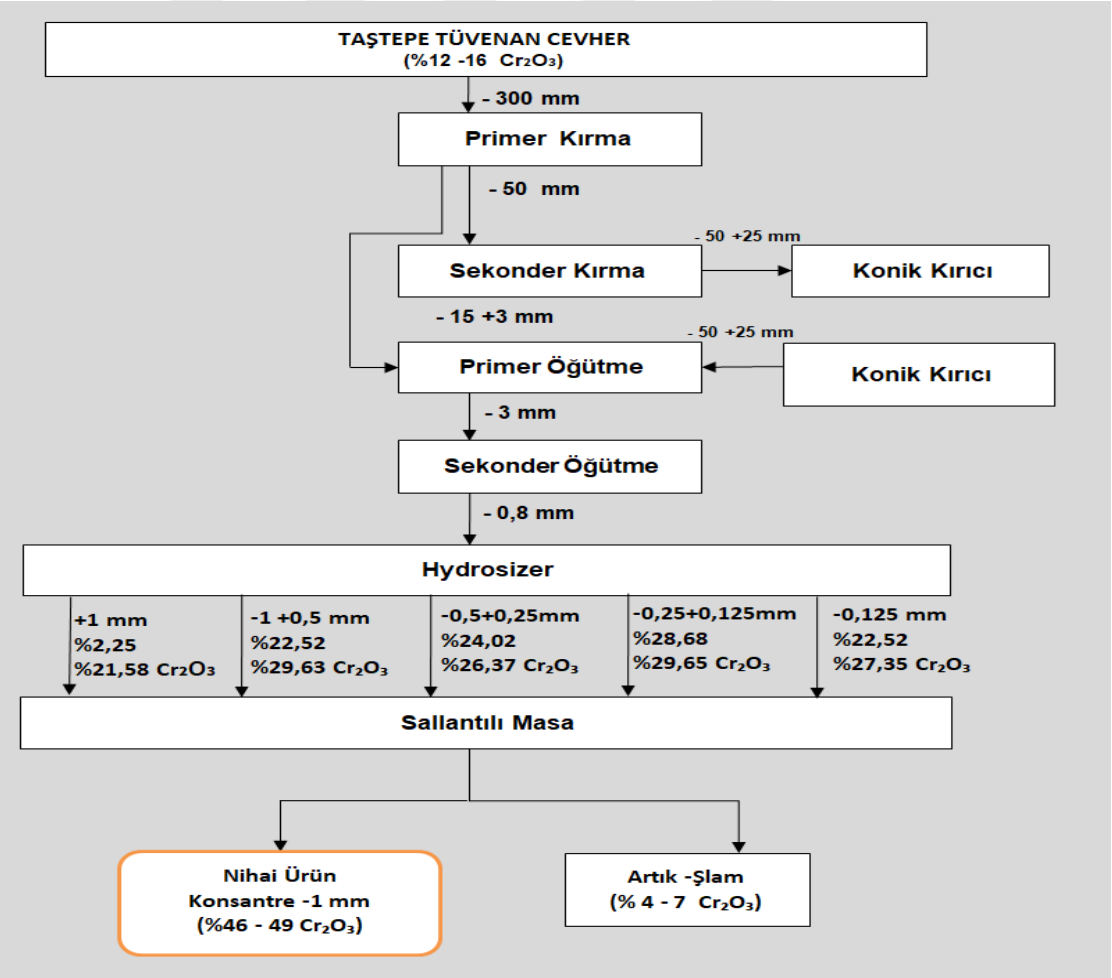
Flotasyon, mineral parçacıklarının yüzey özelliklerinden faydalanarak, su içinde asılı kalacak şekilde seçici bir biçimde kimyasallarla işlenmesine dayanır. Bu yöntem, yüzeyine yapışan hava kabarcıkları aracılığıyla değerli mineralleri su yüzeyine taşırken, değersiz mineralleri (gang) suda bırakır. Flotasyon süreci, özellikle bakır, çinko, kurşun, nikel ve altın gibi metalik minerallerin yanı sıra, kömür gibi enerji hammaddelerinin zenginleştirilmesinde de yaygın olarak kullanılır. Verimliliği artırmak için pH ayarlamaları, köpük oluşturucular ve diğer kimyasal modifikatörler kullanılır (Tanyıldızı ve Coşkun, 2013).

2.17. Proses Akım Şeması

Modsim programında benzetim yapılan ve tesis verilerinin elde edildiği, Dedeman Madencilik Eskişehir Krom İşletmeleri proses akım şemaları Şekil 3.1. ve Şekil 3.2’ de verilmiştir.



Şekil 3.1. Proses Akım Şeması (Triyaj ve Jig Tesisi)



Şekil 3.2. Proses Akım Şeması (KonsantratörTesisi)

2.18. MODSIM ve Benzetim

MODSIM, cevher hazırlama tesislerinin benzetimi için yaygın olarak kullanılan bir yazılımdır. Bu yazılım, çeşitli cevher hazırlama süreçlerini modellemek ve simüle etmek için kullanılır. MODSIM'de yapılabilecek bazı benzetim çalışmaları:

- **Öğütme devreleri benzetimi**: MODSIM, farklı öğütme devreleri için benzetimler yapabilir. Öğütme devrelerinin performansını değerlendirebilir, öğütme devrelerinin optimize edilmesi için farklı parametrelerin etkisini inceleyebilir ve enerji tüketimini optimize edebilir.

- **Flotasyon benzetimi**: Flotasyon sürecinin modellenmesi ve simülasyonu, farklı flotasyon devreleri için tasarım ve optimizasyon çalışmaları yapılmasına olanak tanır. Bu, konsantre kalitesini artırmak, cevher kaybını azaltmak ve reaktif kullanımını optimize etmek için kullanılabilir.

- **Yoğunluk farkı ile zenginleştirme için benzetim**: MODSIM, yerçekimi ayırma işlemlerinin modellenmesi için de kullanılabilir. Farklı yerçekimi ayırma ekipmanlarının performansını değerlendirebilir ve yerçekimi ayırma işlemlerinin optimize edilmesine yardımcı olabilir.

- **Konsantre temizleme benzetimi**: Elde edilen konsantrenin temizlenmesi ve saflaştırılması için farklı temizleme devreleri simüle edilebilir. Bu, ürün kalitesini artırmak ve kirlilik seviyelerini azaltmak için önemlidir.

- **Proses Kontrol Sistemleri Benzetimi**: MODSIM, mineral işleme tesislerinin proses kontrol sistemlerinin modellenmesi ve simülasyonu için kullanılabilir. Bu, otomasyon sistemlerinin tasarımı, performansı ve optimize edilmesi için bir araç sağlar.

- **Enerji Verimliliği ve Çevresel Etkilerin Değerlendirilmesi**: MODSIM, enerji tüketimi ve çevresel etkilerin değerlendirilmesi için kullanılabilir. Farklı işleme senaryolarının enerji tüketimi üzerindeki etkilerini değerlendirebilir ve çevresel etkileri azaltmak için alternatif proseslerin incelenmesine yardımcı olabilir.

Bu benzetim çalışmaları, mineral işleme tesislerinin performansını artırmak, maliyetleri düşürmek ve çevresel etkileri azaltmak için önemlidir. MODSIM gibi yazılımlar, mineral işleme endüstrisinde sürekli iyileştirmelerin yapılmasına olanak tanır ve tesislerin daha sürdürülebilir hale gelmesine yardımcı olabilir.

Yoğunluk farkına dayalı ayırma, cevher hazırlama endüstrisinde kullanılan yaygın bir yöntemdir ve bu sürecin modellenmesi ve benzetimi, tesislerin performansını artırmak için önemlidir. MODSIM gibi yazılımlar, farklı yoğunluk farkına göre ayırma yapan ekipmanların performansını değerlendirme ve sürecin optimize edilmesine yardımcı olma konusunda kullanılabilir. İşte yoğunluk farkına göre ayırmada benzetim çalışmaları ile ilgili bazı anahtar noktalar:

- **Ekipman Seçimi**: MODSIM, yoğunluk farkına göre ayırma yapan ekipmanların (örneğin, jigler, spiraller, masa ve santrifüjler gibi) performansını değerlendirebilir. Bu, tesislerin doğru ekipmanı seçmesine ve sürecin verimliliğini artırmasına yardımcı olur.

- **Parametre Optimizasyonu**: Benzetim, yoğunluk farkına göre ayırma sürecinin farklı parametrelerinin (örneğin, besleme hızı, eğim açısı, su akış hızı) etkisini değerlendirebilir. Bu parametrelerin optimize edilmesi, ayrılabilirlik ve ürün kalitesini artırabilir.

- **Ürün Kalitesi ve Verimlilik Değerlendirmesi**: MODSIM, yoğunluk farkına göre znginleştirme işleminin ürün kalitesini ve verimliliğini değerlendirebilir. Bu, konsantre kalitesinin artırılması ve cevher kaybının azaltılması için önemlidir.

- **Süreç Benzetimi ve Görselleştirme**: Yazılım, yoğunluk farkına göre zenginleştirme sürecinin tam benzetimin gerçekleştirebilir ve sonuçları görselleştirebilir. Bu, operatörlerin süreci daha iyi anlamasına ve iyileştirmeler yapmasına yardımcı olabilir.

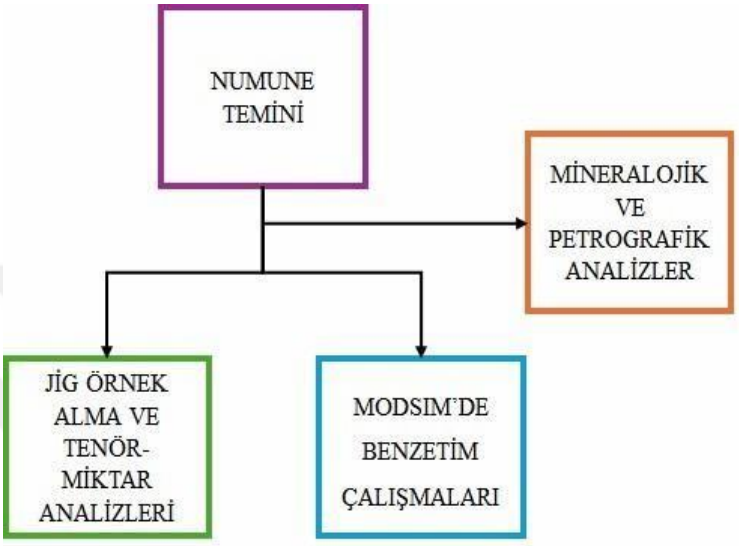
- **Alternatif Süreçlerin Değerlendirilmesi**: MODSIM, yoğunluk farkına göre zenginleştirme sürecinin alternatif versiyonlarını modelleyebilir ve karşılaştırabilir. Bu, tesislerin farklı işleme yöntemlerini değerlendirmesine ve en uygun olanını seçmesine

yardımcı olabilir.

Sonuç olarak, MODSIM gibi yazılımlar, yoğunluk farkına göre zenginleştirme işlemlerinin modellemesi ve benzetim için güçlü araçlar sağlar. Bu benzetimler, tesislerin performansını artırmak, ürün kalitesini iyileştirmek ve işletme maliyetlerini düşürmek için önemli bir rol oynar.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada uygulanan süreçlerin şematik gösterimi Şekil 3.3.'de verilmiştir. Şemada gösterilen tüm adımlara bu bölüm içerisinde ayrıntılı olarak yer verilecektir.



Şekil 3.3. Deneysel süreçlerin şematik gösterimi

3.1. Materyal

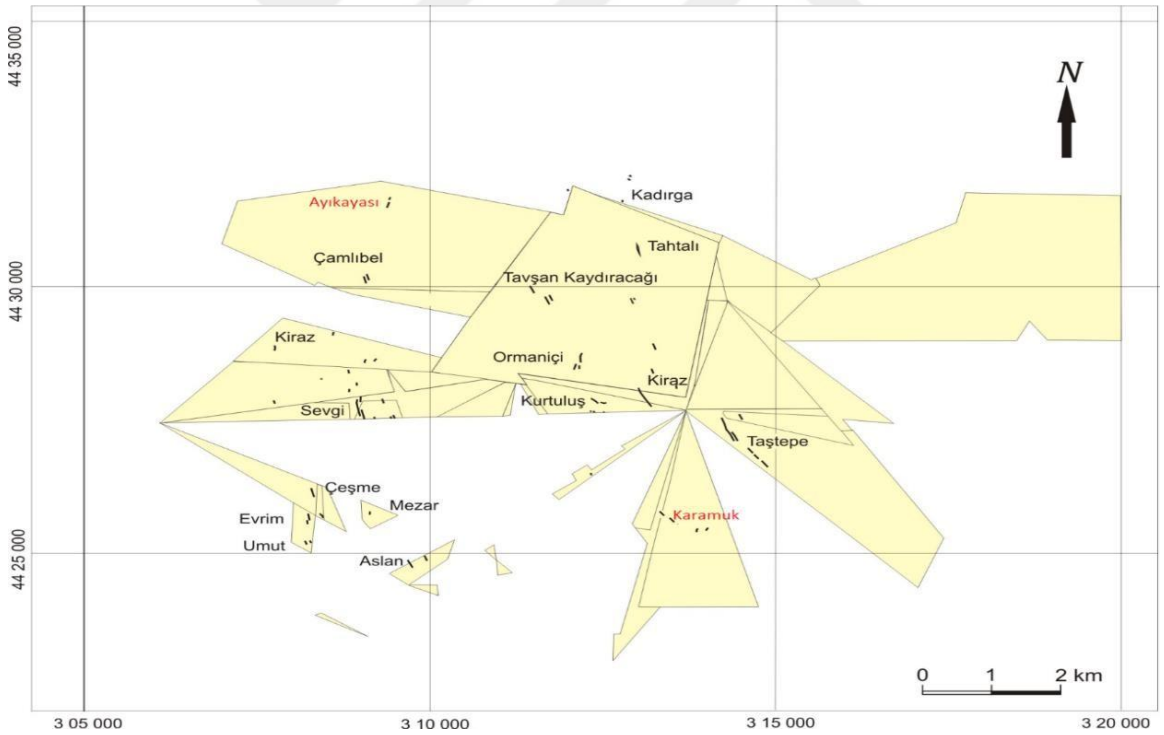
Çalışmada kullanılan cevher Eskişehir İli Tepebaşı İlçesinde bulunan Krom Zenginleştirme Tesisinden temin edilmiştir. Cevherin mineralojik yapısının incelenmesi ve araştırılması amacıyla numune, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Cevher Hazırlama Laboratuvarı'na getirilmiştir. İlgili cevher, uygun koşullarda muhafaza edilerek mineralojik-petrografik analizler yapılmıştır.

3.1.1. Mineralojik-petrografik analizler

Çalışma kapsamına kullanılan cevherin bulunduğu ruhsat sahalarının içindeki kalan alanlarda, ultramafik ve mafik kayaçlar bulunmaktadır. Buna göre sahaların doğusunda tektonit, batı bölgelerinde ise onların üzerinde kümülat kayaçlar yer almaktadır.

Tektonitler: Genelde ofiyolit dizilerinin en alt birimini oluşturan tektonitler, gerilme (stres) altında yeniden kristallanmiş olmaları nedeniyle, yapıcı mineralleri belli bir yönelim kazanmış kayaçların genel adıdır. İnceleme alanında bunlar, plastik deformasyon yapı ve dokuları ile yeniden kristallenmeler sunan, başlıca harzburjitler ile onlara bağlı, onların içindeki dunit ve genellikle dunit kılıflı podiform kromit kütleleri ile temsil edilmektedir. Dunit ve kromititlerin oransal miktarları, harzburjitlerin yanında önemsizdir.

Çalışma alanında yaygın kayaçları arasında yer alan harzburjit ve ona bağlı dunitler, Taş Tepe, Avşıkartal Tepe ve Kirazlı Tepe dolayında, yaklaşık 6 km^2 'lik bir alanda yüzeylenirler. Haritada (şekil 3.4.) harzburjit diye gösterilen birim, başlıca harzburjitlerden oluşmakla birlikte, gerçekte az oranda içyapıya uyumlu katman ya da mercekler halinde dunit de içerir. Ayrıca gerek harzburjit, gerekse bu dunitlere bağlı krom cevherleşmeleri de görülür.



Şekil 3.4. Ocakları ve mostraları gösterir harita

Harzburjitlerden alınmış örneklerin ince kesitlerinde, yaygın serpantin mineralleri yanısıra, ilksel mineraller olarak olivin, ortopiroksen ve kromit izlenir. Olivinler, serpantinleşmeden ortopiroksenlere göre daha fazla etkilenmiştir. Olivin kristallerine ancak elek dokusunun /mesh texture) çekirdeklerinde küçük taneler halinde rastlanmaktadır. Bütün

örneklerde olmamakla birlikte, serpantinleşmemiş olivin kristallerinde, dalgalı sönme ve deformasyon lamelleri görülmektedir.

Arazide tektonik nitelikleri belirgin değildir. Bununla birlikte harzburjitlerin içinde bulunmalarıyla, kümülat dunitlerden kolayca ayrılabilmektedir. İnce kesitlerinde ise, bu ayrımı daha da kolay ve kesin olarak yapmak olanaklıdır. İleri derecede serpantinleşmiş olsalar bile, elek dokusu çekirdeklerinde korunmuş olivinlerde, plastik deformasyon izi olarak deformasyon lamelleri görülür. Yine kromitlerin genellikle özbiçimsiz ve uzamış kristaller halinde bulunması da ayırıcı bir özellik olarak göze çarpar.

Taştepe'nin güneydoğusunda 1300 metre uzanan bir zon içinde 4 cevherleşme bulunmaktadır. Bu cevherleşmeler büyük ihtimal birbirinin devamı niteliğinde düşünülmektedir. İmalat ve üretimlerde analiz sonuçlarına göre cevherin tenörü %24-44 Cr_2O_3 arasında değişmektedir. Cevherleşmelerin kalınlığı 1 ile 6 metre arasında değişmekte ve genelde bantlı-nodüler-masif türü içermektedir (Şekil3.5.). Doğrultu K10-15B, eğim ise 55-65 derece KD yönünde değişmektedir.



Şekil 3.5. Taştepe Ocak Kromit Cevheri Örnekleri

Çizelge 3.1. Taştepe Ocaktan üretilen kromitlerin ve yan kayaçların yoğunluk değerleri

Litoloji	**Tane Yoğunluğu (g/cm^3)**	**Su Emme Kütlece (%)**	**Porozite Hacimce (%)**
Bantlı cevher	2.81	2.35	6.59
Masif cevher	3.73	0.30	1.11
Dunit	2.45	1.45	3.56
Harzburjit	2.57	0.68	1.74

Cevher zenginleştirme tesisi, ocaklarından gelen tüvenan cevherden en yüksek verimi alabilmek için, iki bölümden oluşturulmuştur. Bu bölümler;

Yüksek Tenörlü Cevherler için:

- Elle seçme (triyaj)
- Jig

Düşük Tenörlü Cevherler için:

- 24 adet ana ürün sallantılı masa
- 6 adet ara ürün sallantılı masa

Sahalardan tesise gelen yüksek tenörlü cevherler elle seçme bandına beslemenden önce +/- 25 cm olarak sınıflandırılır.

Yüksek tenörlü yıkanmış parça cevherler (>% 34-36) işçiler tarafından seçilerek ayrı gözlere alınır. Bununla birlikte cevher içermeyen parçalar da seçilerek bant sonunda düşük tenör içeren parça cevherler kısmına alınarak tesise beslenmek üzere ayrılır. Sonuç olarak triyaj sonrası 3 ayrı sınıf halinde cevher sınıflandırılmış olur.

-2,5 cm tüvenan cevherler ufalandıktan sonra (-25mm) jige beslenerek, jig konsantre (> %36-38) ve jig artık (> %16-18) tenörlü olarak zenginleştirilir. Jig artığı tekrar ufalanarak (-2mm) sallantılı masa tesisine beslenerek nihai zenginleştirmeye tabi tutulur. Ocaktan üretilen cevherin genel kimyasal analizi çizelge 3.2.'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Ocaktan üretilen cevherin genel kimyasal analizi

Elementler	Cr_2O_3	FeO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	Cr/Fe
1. Numune	34.10	12.85	10.82	18.80	22.21	0.65	2.33
2. Numune	29.92	13.26	11.52	19,63	23.35	0.72	1.98
3. Numune	33.84	13.62	12.11	19.10	20.23	0.67	2.18
Ortalama	**32.62**	**13.24**	**11.48**	**12.63**	**21.93**	**0.68**	**2.16**

3.2. Jig İle Zenginleştirme ve Tesis Analizi

3.2.1 Bendelari jigi

Bendelari Jigi, madencilik ve mineral işleme endüstrisinde, özellikle cevher zenginleştirme süreçlerinde kullanılan, diyafram tipi bir jigtir. Bu tip jigler, özellikle yoğunluk farklarına dayalı ayrım işlemleri için etkilidir. Bendelari jigi, yoğunluk farklarına dayalı ayrım yapılırken, özellikle ince parçacıkların verimli bir şekilde ayrılmasını sağlar.

Bendelari jiginin temel özellikleri ve çalışma prensibi aşağıdaki gibidir:

- Diyafram Tipi Yapı: Bendelari jigi, diyafram tipinde bir titreşimli ayırıcıdır. Diyafram, genellikle bir piston aracılığıyla yukarı ve aşağı hareket eder, bu da yataktaki malzemelere dikey pulsasyonlar uygular. Bu pulsasyonlar, malzemelerin yoğunluk farklarına göre ayrılmasını sağlar.
- Yoğunluk Temelli Ayırma: Bendelari jigi, farklı yoğunluklara sahip malzemeleri ayırmak için kullanılır. Daha yoğun malzemeler yatakta daha hızlı hareket ederken, daha hafif malzemeler üst kısımda kalır.
- Eğimli Titreşimli Yatak: Jig, eğimli bir yatak üzerinde çalışır ve malzeme, bu yatakta pulsasyonlar ve eğim etkisiyle hareket eder. Bu, yoğunluk farklarına dayalı verimli bir ayırma süreci sağlar.

Bendelari Jigi'nin Avantajları:

Yüksek Verimlilik: Bendelari jigi, özellikle ince ve karmaşık cevherler üzerinde yüksek verimlilikle çalışabilir. Parçacıklar arasındaki yoğunluk farkları belirginse, bu jig, ayrımı çok hassas bir şekilde yapabilir.

Düşük Su Tüketimi: Geleneksel ıslak jigleme yöntemlerine kıyasla, Bendelari jigi daha az su kullanır. Bu, su tüketiminin önemli olduğu yerlerde önemli bir avantaj sağlar.

Daha Az Atık: Kuru jigleme teknolojisiyle, daha fazla değerli malzeme elde edilir ve atık miktarı azaltılır. Bu, çevresel etkileri en aza indirir ve ekonomik olarak daha verimli bir işlem sağlar.

Esnek İşlem Koşulları: Bendelari jigi, farklı malzeme türleri ve yoğunluklar arasında etkili bir şekilde çalışabilen esnek bir sistem sunar. Bu, farklı cevherlerin işlenmesi sırasında daha iyi kontrol sağlar.

Kolay Bakım: Bendelari jigleri, genellikle daha az bakım gerektiren sistemlerdir. Çalışma parçalarının çoğu sağlam ve dayanıklıdır, bu da uzun süreli kullanımda güvenilirlik sağlar.

Bendelari Jigi'nin Kullanım Alanları:

- Kömür İşleme: Özellikle kömür zenginleştirme süreçlerinde kullanılır, çünkü kömür ile diğer minerallerin yoğunluk farkları belirgindir.
- Metal Cevherleri: Altın, gümüş gibi değerli metallerin işlenmesinde de kullanılır. Yoğunluk farkları sayesinde değerli metal cevherlerinin ayrılması sağlanabilir.
- Endüstriyel Atıklar: Bendelari jigi, endüstriyel atıkların işlenmesi ve geri dönüşüm süreçlerinde de kullanılabilir.

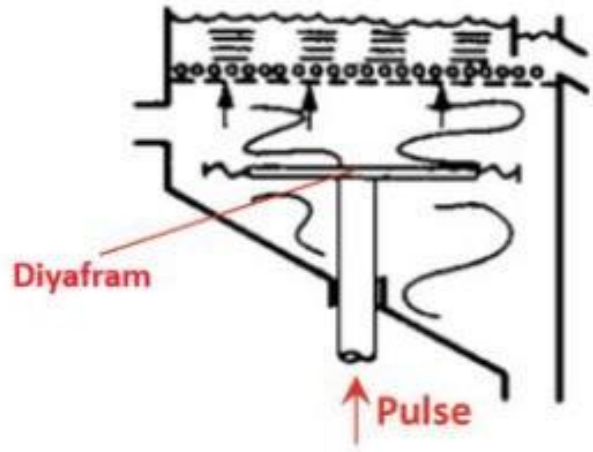
Bendelari jigi, diyafram tipi bir jig olarak, özellikle yoğunluk farklarına dayalı ayrım işlemlerinde etkin bir araçtır. İnce parçacıkların ayrılmasında yüksek verimlilik, düşük su tüketimi ve çevre dostu olması gibi avantajlar sunar. Bu özellikleri, onu kömür ve metal cevheri işleme, endüstriyel atıkların geri dönüşümü gibi pek çok alanda kullanışlı hale getirir.

3.2.2. Tesis analizi

Çalışmanın bu aşamasında zenginleştirme tesisinde bulunan jig ekipmanı (Şekil 3.8 - 3.9) üzerinde farklı ayırma yoğunluklarında elde edilen konsantre üzerinde tenör ve miktar analizleri yapılmıştır.



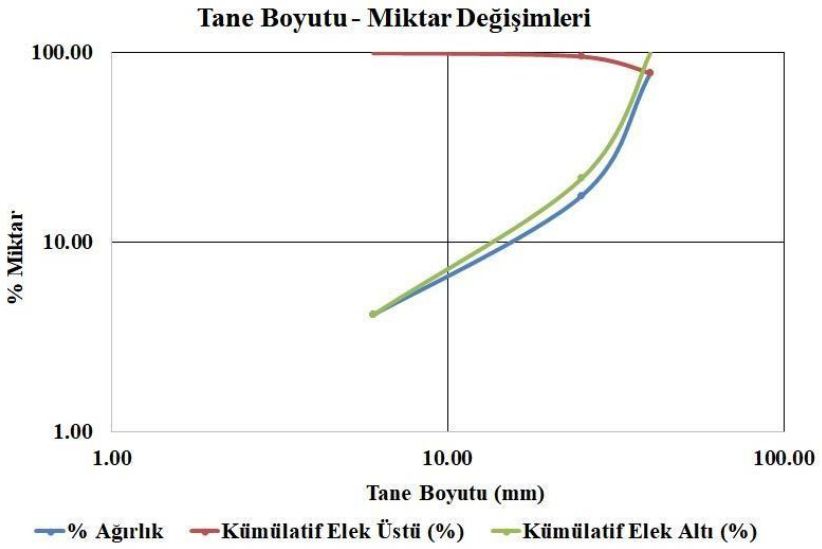
Şekil 3.6. Dedeman Madencilik Eskişehir Jig Tesisi-a



Şekil 3.7. Dedeman Madencilik Eskişehir Jig Tesisi-b

Tesiste kullanılan jig, diyaframlı jıg grubunda yer almaktadır. Her bir ayırma alanı 3x1.69 m^2 (her bir hazne 1.3 m x 1.3) olup 3 ayırma gözüne sahiptir. Triyajdan çıkan -25+6 mm tane boyutunda cevher beslenmektedir. Saatlik olarak yaklaşık 30-35 ton cevher beslenmektedir. Cihaz üzerinde bulunan basınç göstergeleri ve tabaka kalınlığına bağlı olarak ayırma yoğunluğu ayarlanmaktadır. Bununla birlikte %60 pulp/katı oranında besleme yapılmaktadır (Çizelge 3.1).

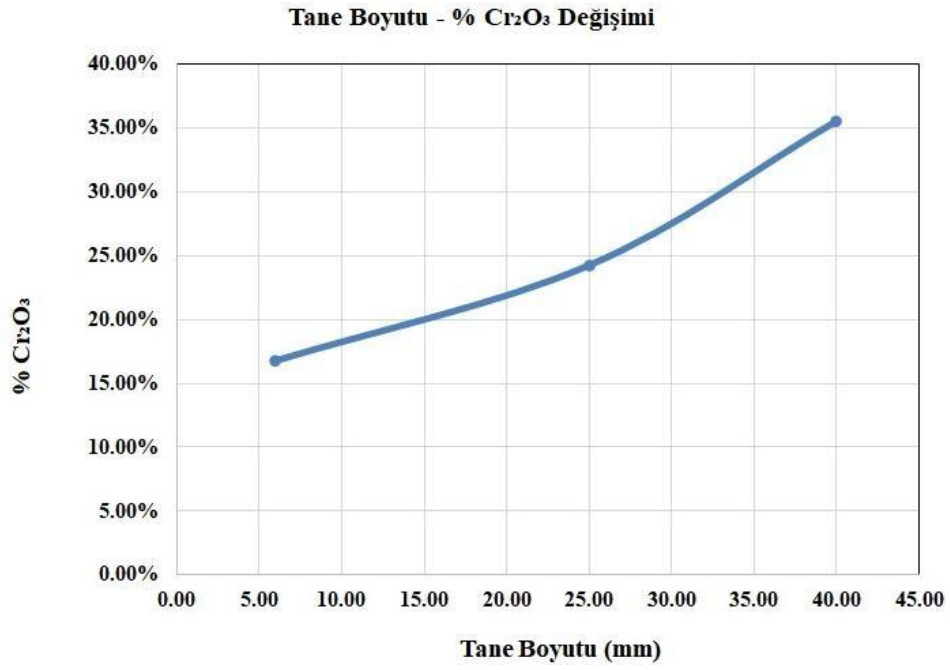
Bu çalışmalar öncesinde JİG ünitesine beslenen cevher üzerinde elek analizi yapılmıştır. Elde edilen elek analiz sonucu aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.8. JİG'e beslenen cevherin tane boyutu ile miktarların değişimleri

Çizelge 3.3. JİG'e beslenen cevherin elek analizi ve tenör değerleri

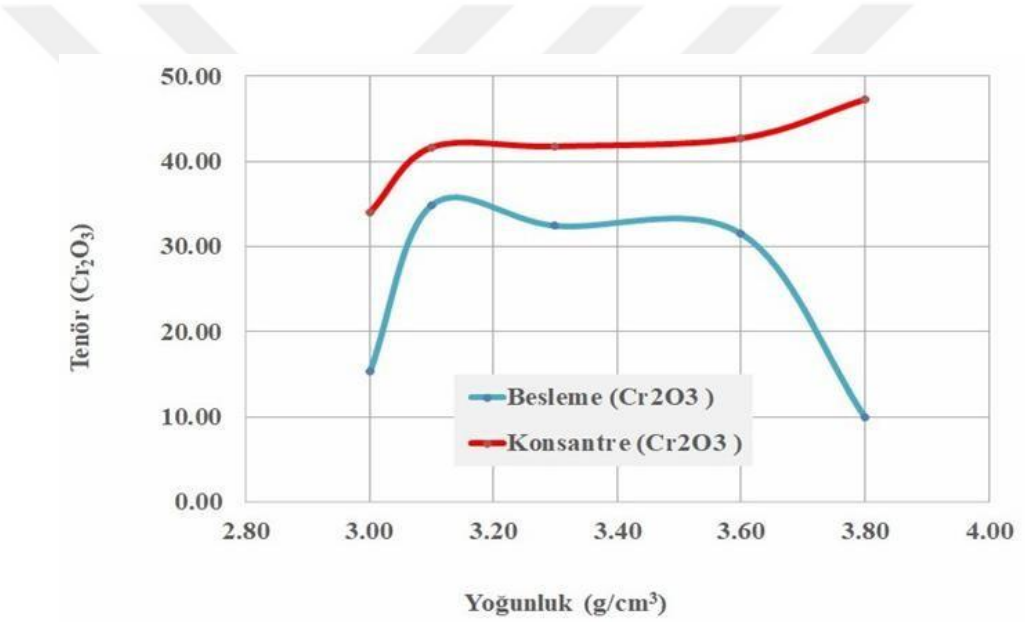
Tane Boyutu (mm)	Kümülatif Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Altı (%)	Cr_2O_3 içeriği (%)
- 40 +25 mm	78.19	100.00	35.48%
- 25 + 6 mm	95.85	21.82	24.23%
- 6 mm	100.00	4.16	16.79%



Şekil 3.9. JİG'e beslenen cevherin tane boyutu ile tenör değişimleri

Yapılan analizler sonucunda tane boyutu azaldıkça % Cr_2O_3 tenörünün düştüğü gözlenmiştir. Kromit içerisinde yer alan olivin cevheri ince tane boyutlarında serbestleşmekte olduğu tespit edilmiştir. Ufalanma karakteristiği bakımından kromitin ufalanmasının olivine göre daha zor olduğu anlaşılmaktadır.

Tesiste bulunan Bendalary jig ünitesinden farklı çalışma yoğunluklarında elde edilen konsantrelerinden örnek alma kurallarına göre numuneler alınılarak tenör ve miktarsal değişimler tespit edilmiştir. Jig için gerçekleştirilen operasyonel şartlar Çizelge 3.4'te her bir ayırma yoğunluğu için sırasıyla verilmiştir.

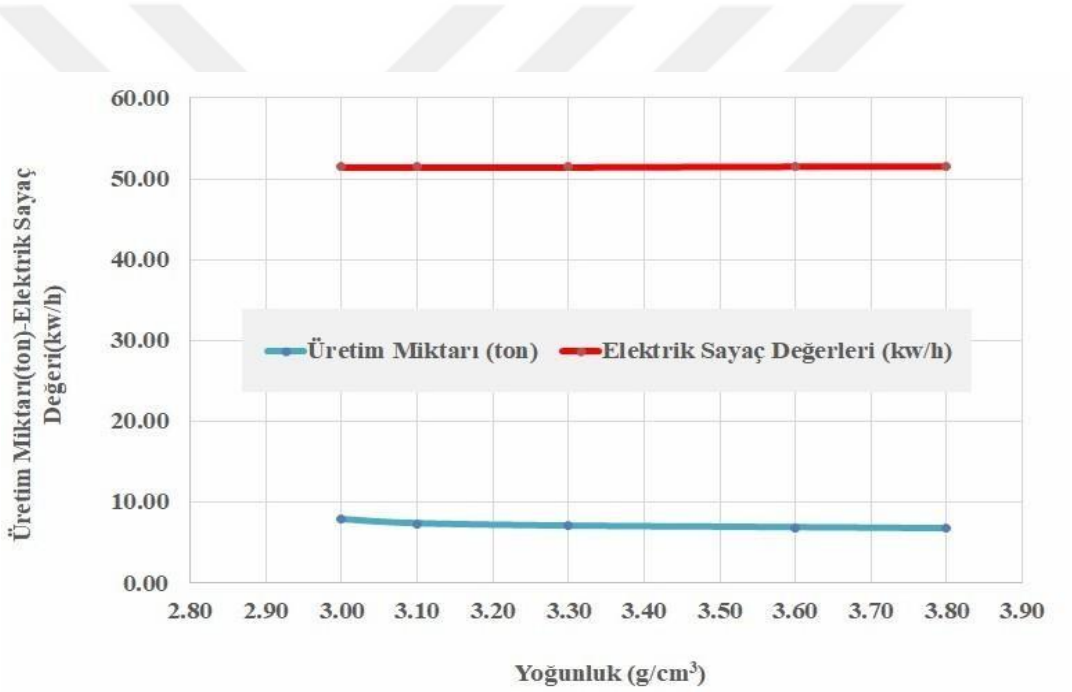


Şekil 3.10. Jig için farklı ayırma yoğunluklarında beslenen ve elde edilen konsantre için tenörsel değişim

Tesis de yapılan çalışmalarda jig zenginleştirme ünitesinde beslenen cevher için tenörsel değişkenlikler bulunmaktadır. Bunun ana sebebi ocak içerisinde farklı aynalardan cevher üretiminden kaynaklanmaktadır. Ancak zenginleştirme sonucu krom değerlerinde ayırma yoğunluğuna bağlı paralel bir değişim gözlenmektedir. Bu durum bu cevher yapısı için beklenen bir durumdur.

Çizelge 3.4. Farklı yoğunluklarda ayırım yapan jig için işletme koşulları

Jig Ayırma Yoğunluğu (gr/cm^3)	**3.00**	**3.10**	**3.30**	**3.60**	**3.80**
Beslenen Miktarı (ton)	136	137.5	136.2	136	137
Üretim Miktarı (kg/10 sn.)	7.800	7.300	7.000	6.810	6.670
Elektrik Sayaç Değerleri (kwh)	51498.64	51505.57	51521.24	51571.24	51591.24
Pulp (K/S-%)	% 62	% 61	% 63	% 62	% 61
Jig ürünleri	% Cr_2O_3				
Beslenen (% Cr_2O_3)	15.39	34.90	32.45	31.54	10.04
Konsantre (% Cr_2O_3)	34.00	41.65	41.75	42.70	47.25
Atık (% Cr_2O_3)	3.35	9.19	9.49	8.78	2.69



Şekil 3.11. Jig için farklı ayırma yoğunluklarında beslenen ve elde edilen konsantre için üretim miktarı ve elektrik sayaç değeri değişim

Jig ünitesinden elde edilen farklı yoğunluklardaki konsantre üretim miktarlarının yüksek yoğunluklarda düşük olduğu tespit edilmiştir. Cevher mineralojisi ve serbestleşme derecesine bağlı bu durumun ortaya çıkması ilişkilendirilebilir. Eğer yeterli serbestleşme derecesi olmasaydı miktarsal değişim olmayabilirdi. Bununla birlikte tenörsel değişimden de aynı olayı tespit edilebilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Herhangi bir cevher/mineral hazırlama tesisinin kütle balans dengesi, bir simülatör olan MODSIM kullanılarak derinlemesine araştırılabilir. Bu kütle balans dengesi denklemi, tüm katı ve sıvı akışını ve ayrıca malzemenin derecesindeki, bileşimindeki ve tane boyutu dağılımındaki değişiklikleri hesaba katar. Dahası, MODSIM, öğütme, kırma ve sınıflandırma işlemleri için yaygın ve geleneksel modellerin kullanılmasına izin verir. Simülatöre tanıtılan her bir işlem için model hesaplamaları, programın tamamen modüler yapısı sayesinde mümkün hale gelir.

Sonuç olarak, modeller herhangi bir amaca uyacak şekilde uyarlanabilir ve tesis optimizasyonu ve geliştirme simülasyonları çalıştırılabilir. Bu, cevher/mineral hazırlama işlemenin herhangi bir aşamasından araştırma bulgularının dahil edilmesini ve ilerletilmesini sağlayan MODSIM'in benzersiz bir özelliğidir. Tez için yapılan araştırmada MODSIM 3.6 kullanılmıştır.

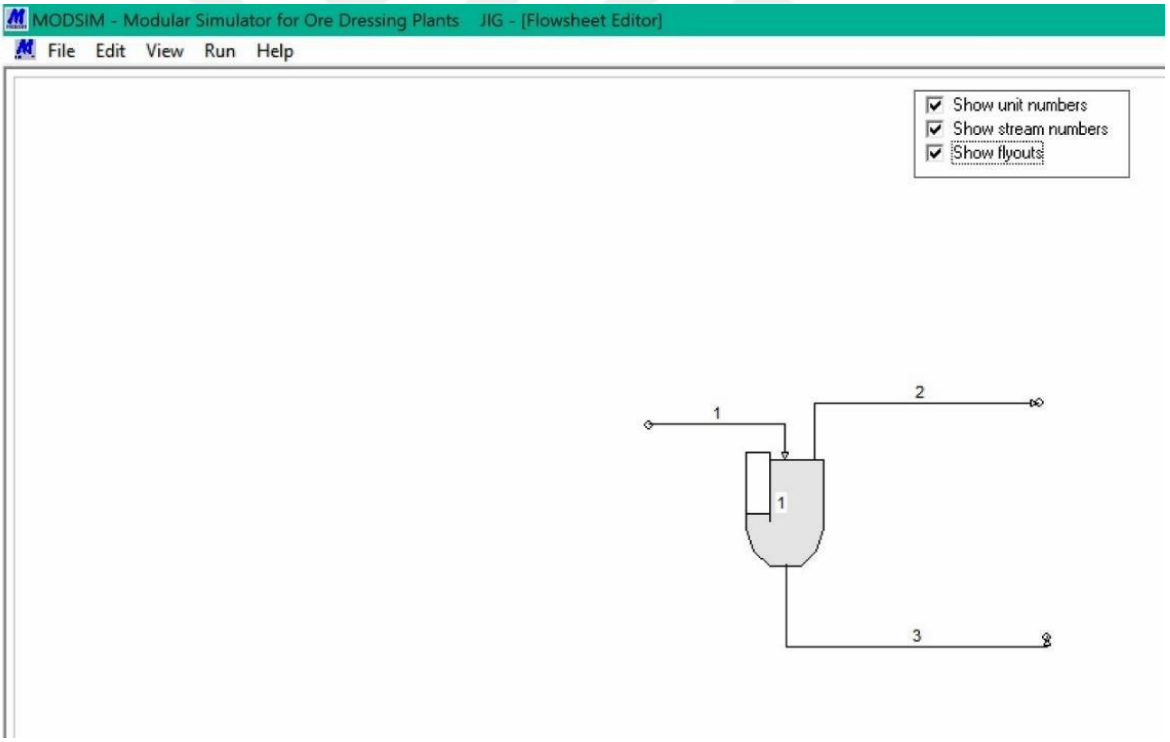
4.1. MODSIM'de Benzetim Çalışmaları

Tesis ölçeğinde yapılan çalışmalardaki koşullar referans alınarak ayırma yoğunlukları aynı kalarak MODSIM'de 3.00-3.10-3.30-3.60-3.80 gr/cm^3 ayırma yoğunlukları kullanılmış ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. MODSIM'de benzetim çalışmalarının aşamaları Şekil 4.1-4.7'de sırasıyla verilmiştir. Elde edilen MODSIM sonuçları ile gerçek zamanlı elde edilen veriler tablolarda verilmiştir. Verilerin karşılaştırılması ise son yıllarda yaygın bir şekilde kullanılan RMSE (Kök Ortalama Kare Hatası) ve VAF (Varyansın Açıklanma Oranı) göstergelerine göre yapılmıştır.

MODSIM benzetim programının başlangıcında yapılacak işlem ile ilgili öncelikle olarak akım şeması oluşturulmaktadır. Ardından sisteme kaydedilerek tanımlama yapılmaktadır (Şekil 4.1-4.2)

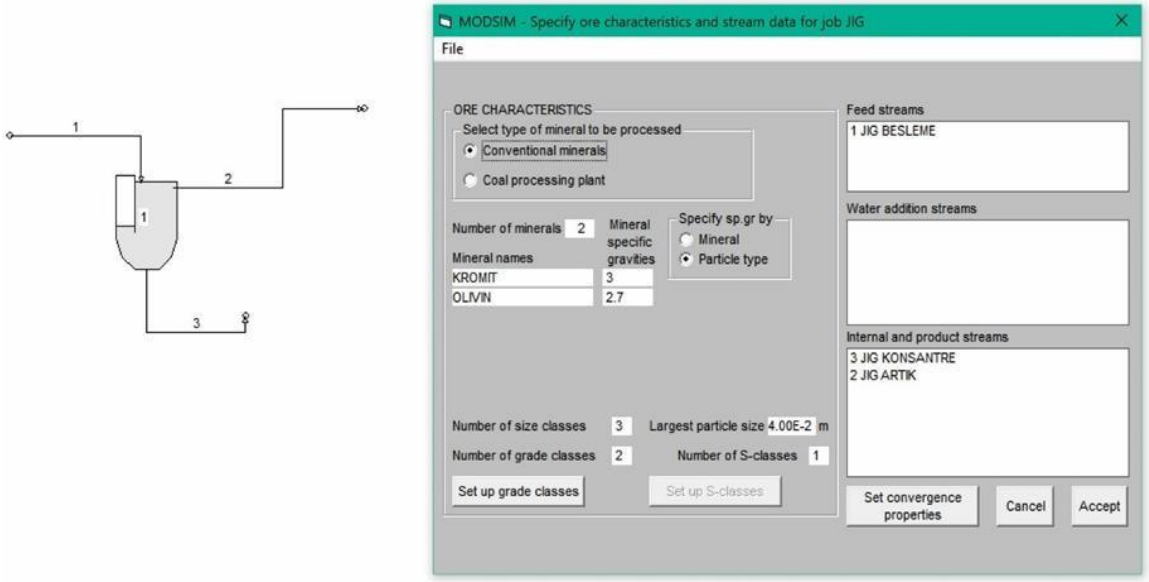


Şekil 4.1. MODSIM ana giriş platformu



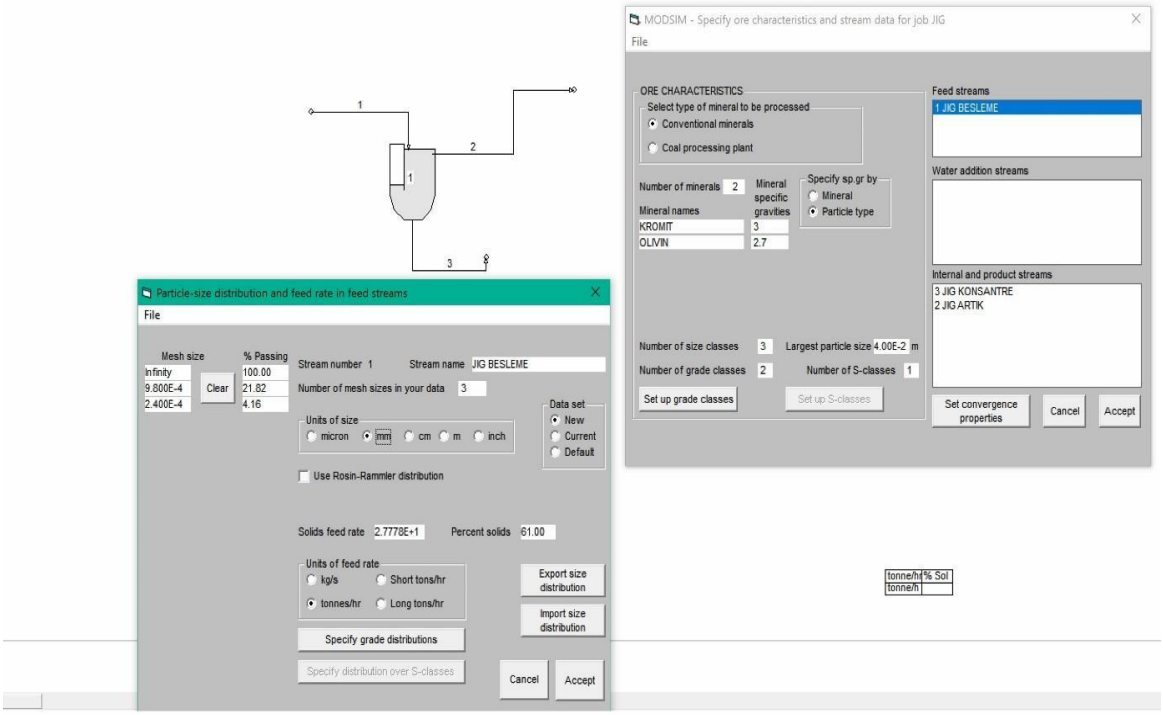
Şekil 4.2. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim platformu

Akım şeması tanımlanmasından sonra akış kolları ile ilgili bilgilerin detaylıca girişi yapılmaktadır. Şekil 4.3.'te görüldüğü üzere yoğunluk, tane boyut analizi gibi veriler tanımlanmaktadır.

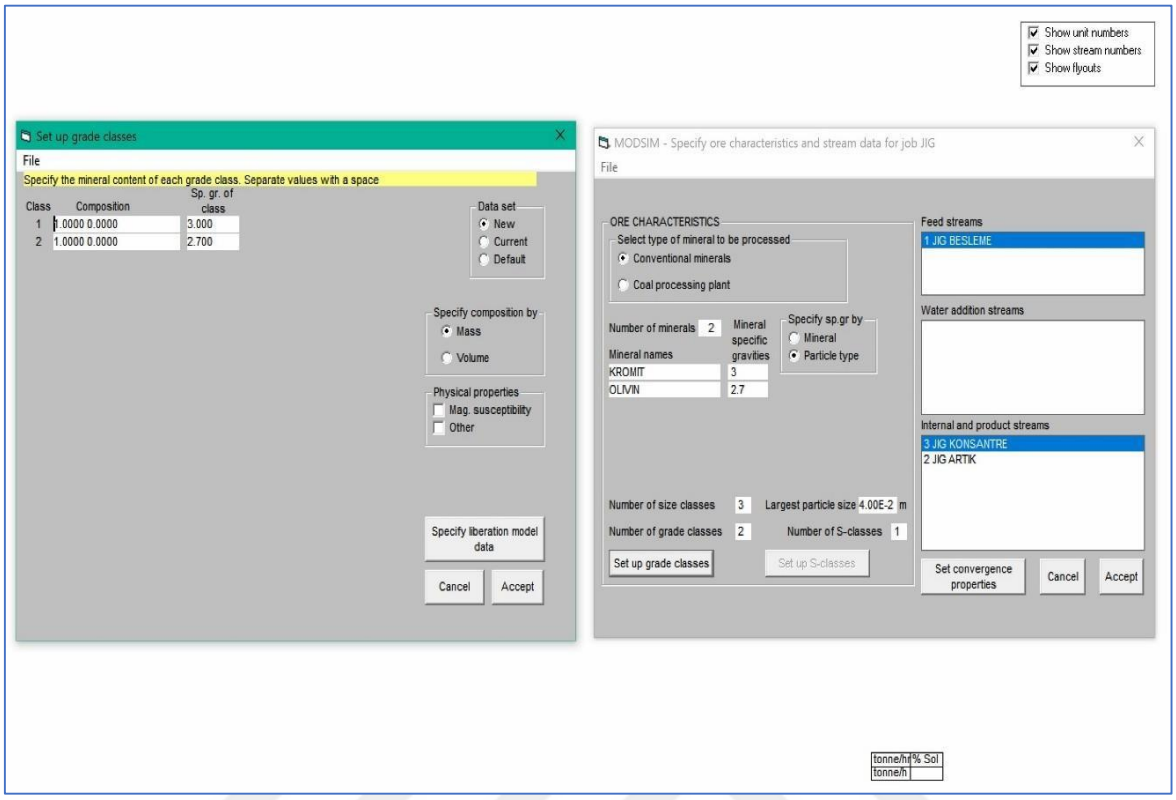


Şekil 4.3. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetimde bilgi girişleri platformu

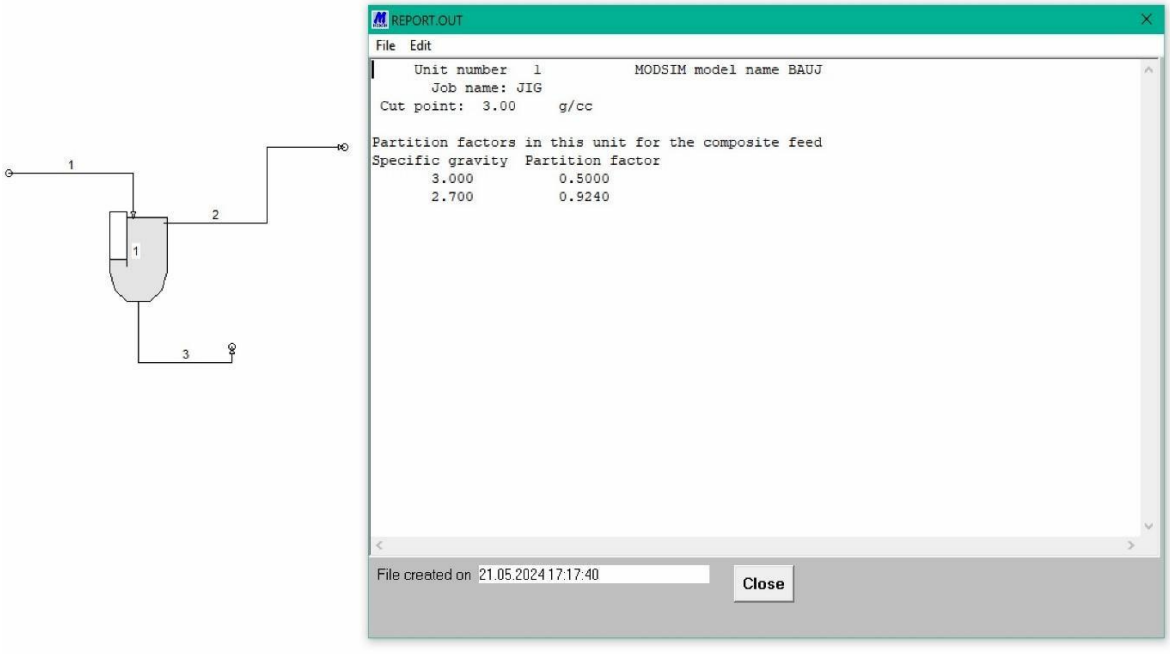
Benzetim çalışmaları için sisteme gerekli bilgilerin girişi yapıldıktan sonra benzetim işlemi yapılmaktadır. Sonuçlar için farklı seçeneklerle elde edilmesi mümkün olabilmektedir.



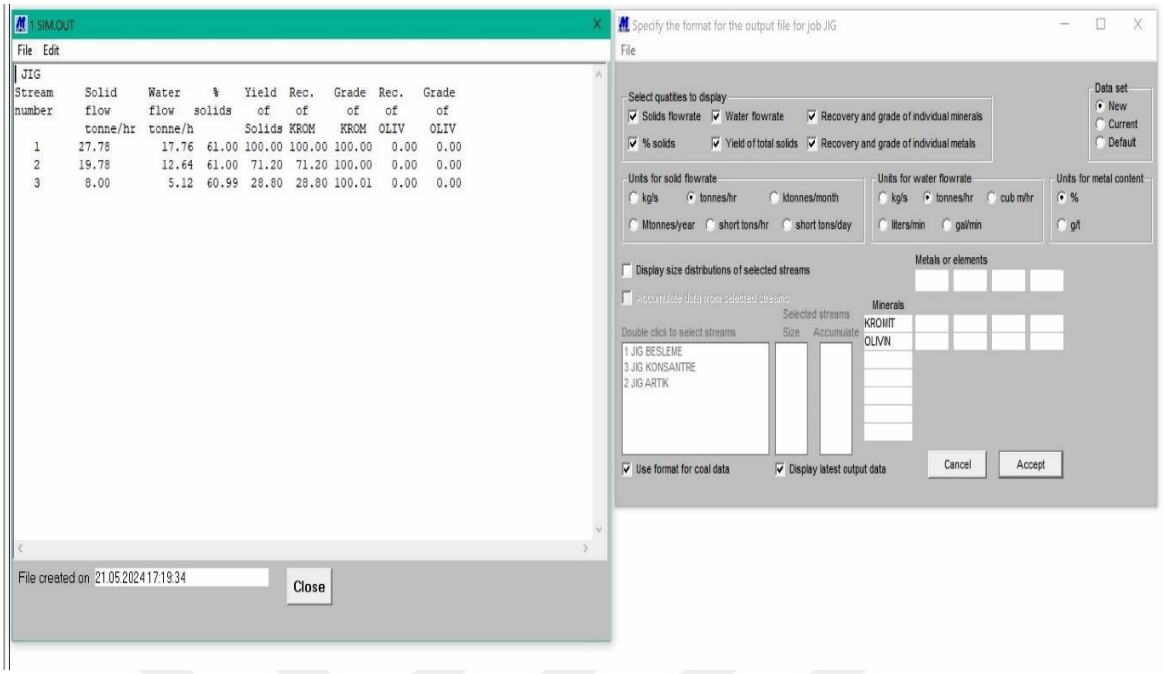
Şekil 4.4. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetimde gerekli bilgilerin modül girişleri-a



Şekil 4.5. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetimde gerekli bilgilerin modül girişleri-b



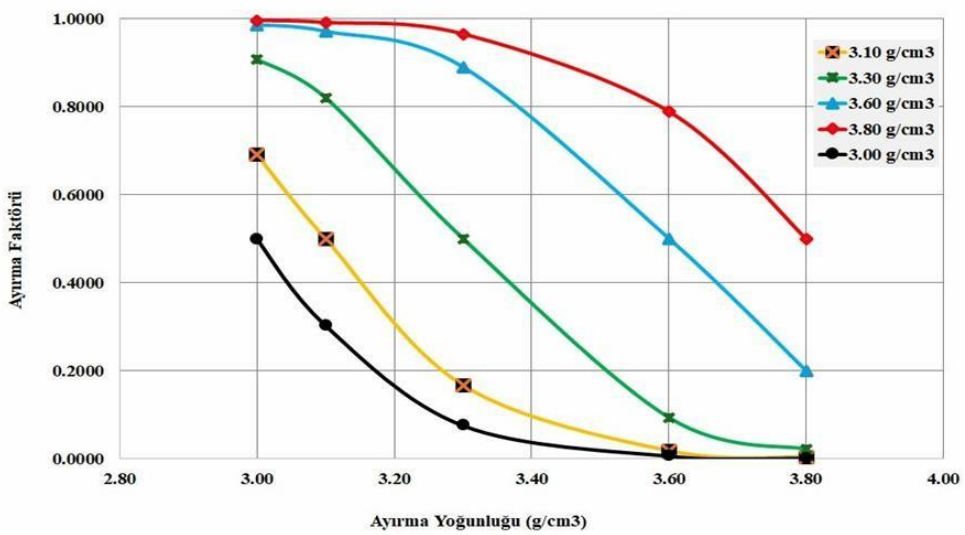
Şekil 4.6. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim sonucunda elde edilen veriler-a



Şekil 4.7. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim sonucunda elde edilen veriler-b

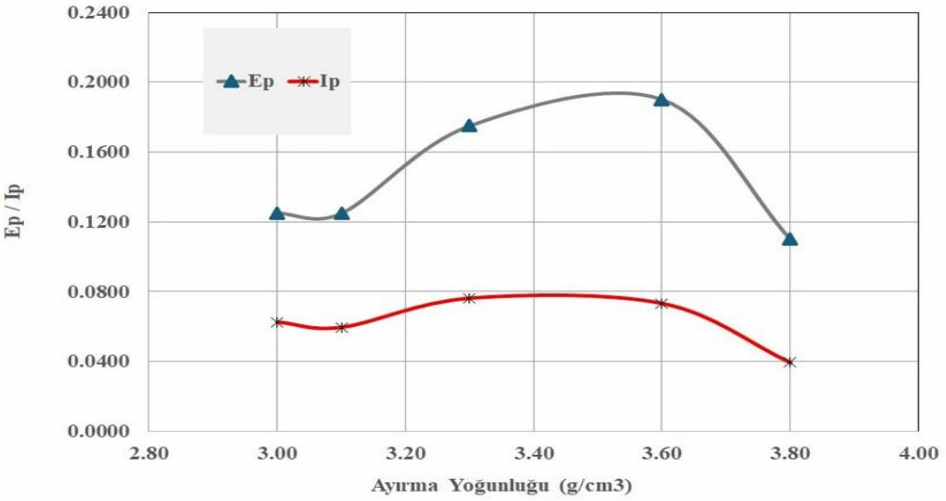
Yapılan benzetim çalışmaları sonuçlarında elde edilen veriler şekil 4.7. – 4.13. arasında sırasıyla verilmiştir.

Benzetim yoluyla elde edilen partisyon katsayıları ile ayırma performansı ve ayırma etkinliği hesaplanarak benzetim başarısı ile ilgili sonuç elde edilebilir. Çalışma kapsamında benzetim sonuçlarından elde edilen partisyon katsayılarından elde edilen performans eğrilerine göre ayırma performans değeri Ep ve ayırma etkinliği Ip değerlerinin yoğunluğa bağlı değişimleri Şekil 4.9'da verilmiştir.

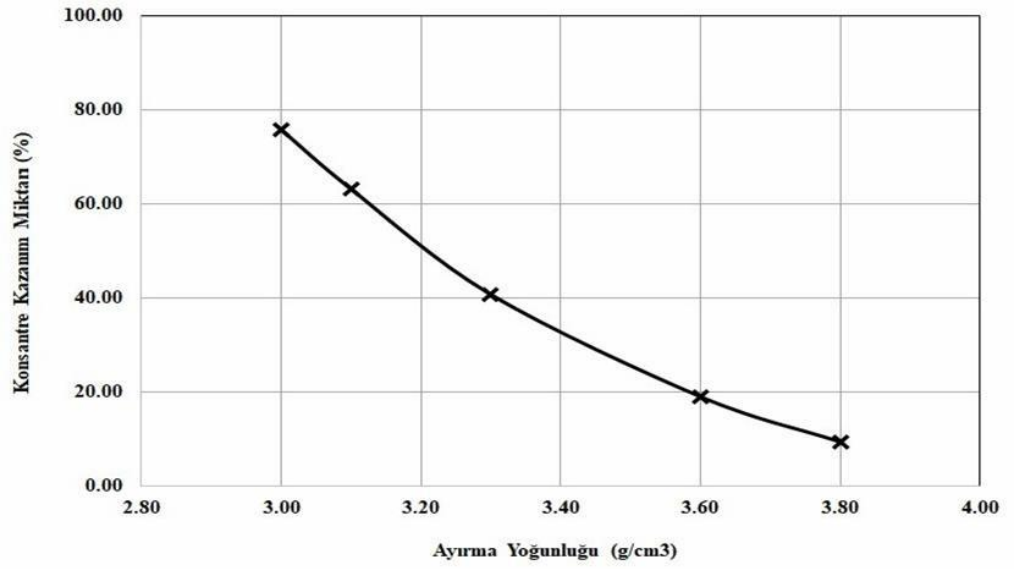


Şekil 4.8. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim sonucunda ayırma yoğunluğuna bağlı elde edilen partisyon katsayısı değişimi

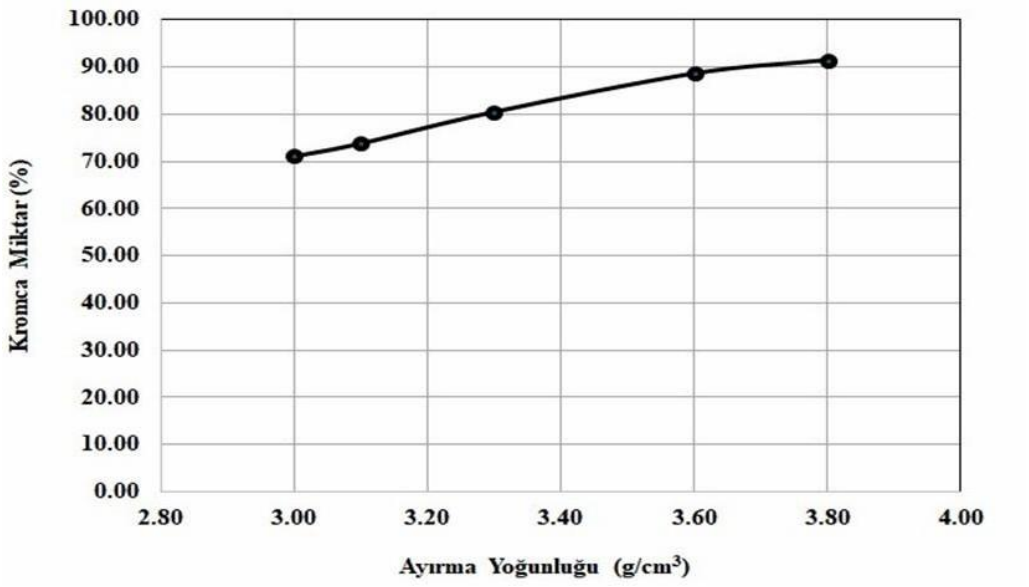
Elde edilen verilere göre ayırma performansının en iyi olduğu yoğunlukların 3.00 ve 3.80 g/cm^3 değerler tespit edilmiştir. Diğer yoğunluklarda ise performansın düştüğü belirlenmiştir. Benzetimde en yüksek ve en düşük ayırma yoğunluklarında performans yüksekliğinin en büyük sebebi kazanılan cevherin krom ya da gang olduğu ile ilgilidir. En yüksek yoğunlukta ayırma seçiciliğin yüksek olması en büyük sebebidir. Düşük yoğunlukta ise yan kayaç ile kromit arasında yoğunluk farkının az olmasından kaynaklı ayırma keskinliğinin fazla olmasından dolayıdır. Benzetim çalışmaları sonucunda farklı ayırma yoğunlukları için elde edilen konsantre miktarları Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.9. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim sonucunda elde edilen ayırma etkinliği ve performansının yoğunluğa bağlı değişimi

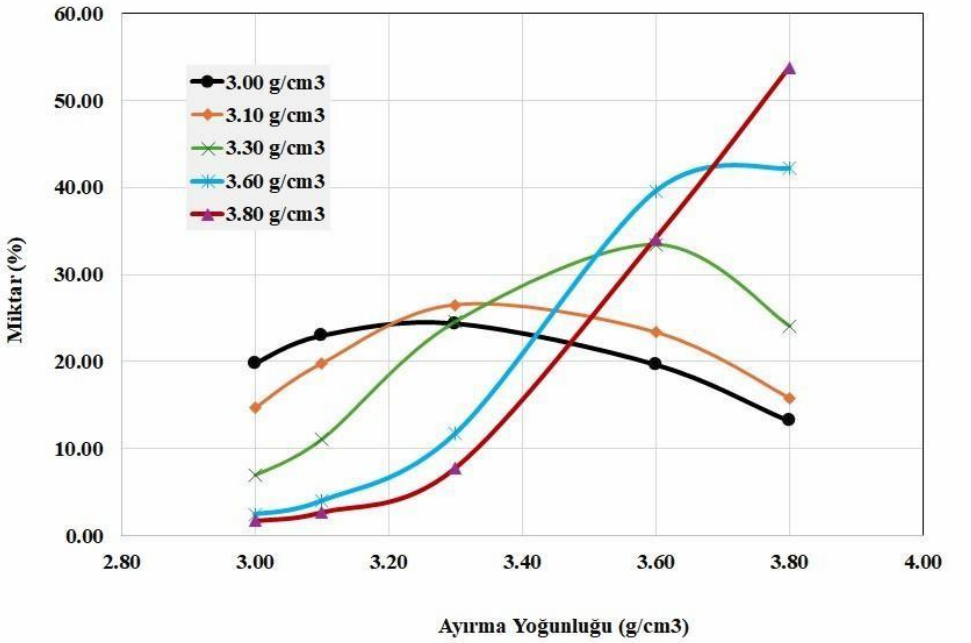


Şekil 4.10. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim sonucunda farklı yoğunluklarda elde edilen konsantre kazanma miktarı değişimi



Şekil 4.11. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim sonucunda farklı yoğunluklarda elde edilen krom tenörü kazanma verimi ilişkisi

Şekil 4.8 - 4.11'de görüldüğü üzere elde edilen benzetim sonuçlardan görüleceği üzere yoğunluk arttıkça konsantre miktarında da azalma görülmektedir. Nitelik açısından yüksek krom tenörlü malzeme kazanımı aslında artmaktadır. Beslenen malzeme içerisindeki krom tenörü artışı sağlanırken miktarsal (tonaj olarak) düşüş gerçekleşmektedir. Öte yandan MODSIM benzetim programı da gerçek te çalışan bir jig gibi tepki gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.12. MODSIM'de jig için oluşturulan benzetim sonucunda farklı yoğunlukların her birinde elde edilen fraksiyonel (krom dağılımları) değişim ilişkisi

Şekil 4.12'de görüldüğü üzere MODSIM'de bir metalik cevher için her bir ayırma yoğunluğunda elde edilen kütlenin içerisinde krom değişimi tespit edilebilmektedir. Bir yüzdürme-batırma testinde elde edilen miktarın içerisinde hangi yoğunlukta ne kadar değerli cevherin bulunduğunun tespiti zor ve zaman alıcı iken MODSIM'de bunu yapabilmek kolay olabilmektedir. Elde edilen sonuçlardan düşük yoğunluklarda elde edilen konsantrenin içerisinde yüksek tenörlü cevherin varlığının ağırlıkça az olduğu tespit edilmiştir. Çünkü içerisinde gang minerallerinin varlığından kaynaklanan miktarsal orana bağlı düşüş bulunmaktadır.

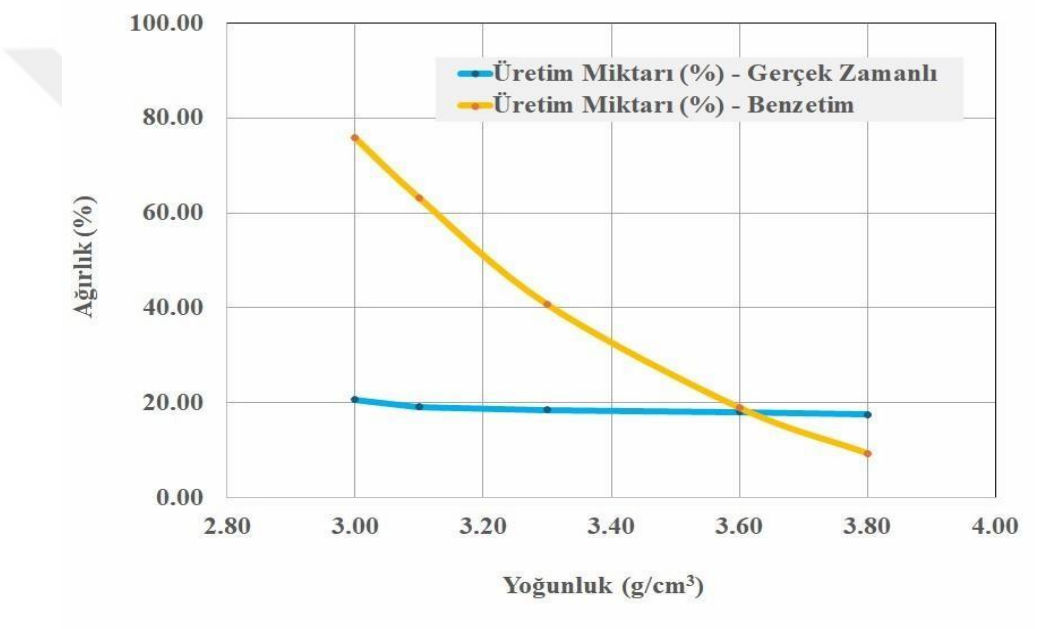
4.2. Benzetim ve Tesis Verilerinin Karşılaştırılması

Karşılaştırmalar yapmak amacıyla bir dizi performans analizi yürütülmüştür Performans çalışmalarının ilk aşamasında Root Mean Square Error (RMSE) ve Variance Account For (VAF) endeksleri hesaplandı. Mükemmel bir tahmin yeteneği %100 VAF ve 0 RMSE'ye sahip olması beklenmektedir. VAF ve RMSE endekslerinin hesaplanmasında kullanılan formüller aşağıda verilmiştir.

$$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(t - t^*)}{\text{var}(t)} \right] \qquad (4.1.)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (t - t^*)^2} \qquad (4.2.)$$

MODSIM ile yapılan simülasyon sonuçları her bir ayırma yoğunluklarında elde edilen verilere göre gerçek değerlerle karşılaştırmalı olarak Şekil 4.13 ’de verilmiştir.



Şekil 4.13. MODSIM ve Tesiste farklı yoğunluklarda elde edilen konsantre kazanma miktarı değişimi

Şekil 4.13’de görüldüğü üzere benzetim sonucunda elde edilen veriler ile jig tesisinden elde edilen verilerin uyumlu olmadığı tespit edilmiştir. Burada uyumlu olan tek noktanın yoğunluk arttıkça miktarca azalmanın tespit edilmesidir. Benzetim çalışmalarında teorik hesaplamada yoğunluk değerinin etken olduğu bilinmelidir. Ancak gerçek zamanlı jig zenginleştirme ünitesinde cevherin yapısı ve diğer çalışma koşullarının uygulamalarda çok fazla etkin olmadığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı yoğunluklarda krom zenginleştirme için gerçek ve simülasyon zamanında elde edilen sonuçların istatiksel analizi

Değişkenler	**Sonuçlar**
r=	0.95
r^2=	0.895
RMSE=	33.28
VAF=	-50129.03

Yapılan istatistiksel hesaplamalarda r ve r^2'nin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Verilerde yoğunluk arttıkça konsantre kazanma miktarlarının gerçek zamanlı ve benzetim çalışmalarında azaldığı görülmektedir. Bundan dolayı r ve r^2 yüksek çıkmaktadır. Bununla birlikte mükemmel bir kestirim kapasitesi için, VAF %100 ve RMSE 0 olmalıdır. Ancak elde edilen değerlerden verilerin birbirleriyle uyumu düşük çıkmaktadır. Tesis çalışma koşullarından elde edilen verilerin jig çalışma parametrelerine çok bağımlı olmadığı, buna karşın benzetim çalışmalarında ise hesaplamalarda değişkenlerin çok etkili olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Günümüzde temel analitik teknikler önemli bir öneme sahiptir. Bir sistemdeki veya analizindeki herhangi bir değişiklik, sistemdeki birçok neden ve etkiden kaynaklanır. Sonuç olarak, etkileri veya nedenleri değerlendirmek için kullanılan metodolojiler ve yaklaşımlar esastır. Bu noktada, benzetim sistemlerinin uygulanması hayati önem taşır. Teknoloji ilerledikçe, hızlı analiz, kontrol, karar verme, tahmin ve diğer işlevlere sahip sistemler birçok sektörde daha yaygın hale gelmektedir.

Cevher hazırlama süreçlerinde benzetim tekniklerinin kullanılması, endüstriyel operasyonların verimliliğini ve etkinliğini artırmak için önemli bir araç haline gelmiştir. Benzetim yazılımları, proseslerin detaylı analizini yaparak, çeşitli parametrelerin etkilerini ve alternatif süreç senaryolarını değerlendirme imkânı sunar. Bu tekniklerin kullanılması, işletmelerin süreç optimizasyonu, maliyet azaltma, enerji verimliliği, ürün kalitesi ve çevresel etkilerin yönetimi gibi kritik alanlarda önemli kazanımlar elde etmesini sağlar.

Şekil 3.9'da Jig'e beslenen cevherin tane boyutu ile tenör ilişkisi incelendiğinde iri tane boyutlarında %Cr_2O_3 değerinin yüksek olduğu görülmektedir. İri tane boyutlarında kromitin daha yoğun bulunduğu, ince tane boyutlarında ise gang minerallerinin görüldüğü tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak kromitin ufalanmasının daha zor olduğu söylenebilir.

Şekil 3.10'da jig tesisine beslenen tüvenan cevherin tenörünün düzensiz olduğu buna karşın elde edilen konsantre tenörünün ayırma yoğunluğuna bağlı olarak jig çalışma ayarlarının cevhere göre düzgün optimize edildiğinden dolayı her bir ayırma yoğunluğuna göre başarılı ayırma yaptığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.8'de jig için farklı ayırma yoğunluklarında elde edilen partisyon katsayısı eğrilerinden yüksek yoğunlukta yapılan ayırmalarda konsantre/artık oranına bakıldığında konsantre içerisine artığın karışmadığı tespit edilmiştir. Düşük yoğunluklara ait partisyon katsayısı eğrisinde ise değerlerin düşük hesaplandığı görülmektedir. Düşük ayırma yoğunluklarında yapılan zenginleştirme işlemlerinde cevher-gang karışması meydana geldiği görülmüştür.

Şekil 4.10'da MODSIM'de benzetim sonucunda jigden elde edilen konsantre kazanım miktarlarının yoğunluk yükseldikçe azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum benzetim programının da tam serbestleşme olduğu varsayıldığı için tenör olarak yüksek miktarca az bir konsantre eldesi olarak hesaplanmaktadır.

Şekil 4.11'de benzer bir eğilim görülmektedir. Yüksek ayırma yoğunluklarında MODSIM'de tam serbestleşme varsayıldığından konsantre de kromit tenörü yüksek olarak hesaplandığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.12'de MODSIM'de her bir ayırma yoğunluğunda özellikle yüksek ayırma yoğunluklarında kromit dağılımı çok yüksek bulunmuştur. Bu durum benzetim programından kaynaklı bir durumdur.

Yapılan çalışma kapsamında jig tesisinden elde edilen konsantre tenörünün en yüksek ayırma yoğunluğu olan 3.80 g/cm^3'de %45 Cr_2O_3 olduğu tespit edilmiştir. MODSIM'de yapılan benzetim sonucunda en yüksek krom kazanma miktarı, tenörü ve kazanma verimleri incelendiğinde yine en yüksek ayırma yoğunluğu olan 3.80 g/cm^3'tür. Konsantredeki krom kazanma oranlarının miktarsal olarak şekil 4.11'de %90, şekil 4.12'de % 55 olarak hesaplanmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen veriler, bir jig zenginleştirme tesisinde parametre değişikliklerinin elde edilen konsantre miktarını ve tenörünü değiştirmediğini göstermiştir. Bununla birlikte, benzetim çalışmalarında elde edilen sonuçlar, parametre değişikliklerinin etkisinin mevcut olduğunu ortaya koymuştur.

Benzetim çalışmalarında elde edilen sonuçlarda şekil 4.9-4.12 de görüleceği üzere çok fazla veriye ulaşılabileceği anlaşılmıştır. Konsantre miktarı haricinde, konsantre içerisindeki farklı yoğunlukların miktarsal dağılımları da tespit edilebilmektedir. Metalik cevherlerin yüzdürme-batırma testlerinin zor uygulanmasından dolayı bu verilere ulaşılamaması bir sorun teşkil ederken, benzetim programları sayesinde birçok veriye rahatlıkla ulaşılabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında jig zenginleştirme ünitesinden elde edilen veriler ile benzetim programı sonuçları karşılaştırılmıştır. Aralarındaki veriler detaylı olarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan istatistiksel hesaplamalarda r ve r^2'nin 0.95 ve 0.895 olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın mükemmel bir kestirim kapasitesi değerlendirilmesi için kullanılan VAF ve RMSE değerlerinin 33.28 ve -50129.03 olduğu hesaplanmıştır. Gerçek zamanlı elde edilen verilerle benzetim çalışmalarından elde edilen verilerin uyumlu olmadığı anlaşılmıştır. Tesis çalışma koşullarından elde edilen verilerin jig çalışma parametrelerine çok bağımlı olmadığı, buna karşın benzetim çalışmalarında ise hesaplamalarda değişkenlerin çok etkili olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Sonuç olarak, cevher hazırlama süreçlerinde benzetim ve simülasyonun kullanılması, endüstriyel operasyonların performansını ve sürdürülebilirliğini artırmak için büyük faydalar sağlar. Bu tekniklerin sürekli olarak geliştirilmesi ve işletmeler tarafından benimsenmesi, madencilik endüstrisinde daha verimli, maliyet etkin ve çevresel olarak sorumlu süreçlerin oluşturulmasına katkıda bulunur.

Dünyanın giderek artan krom talebi doğrudan satış imkânı olmayan düşük tenörlü krom kaynaklarımızı zenginleştirme ve cevher hazırlama işlerinin değerlendirilmesi ile karşılanabilir ve diğer ülkelerle rekabet edilebilir. Ancak Türkiye'nin henüz düşük tenörlü krom potansiyeli uygun teknikle, düşük maliyetle ve verimli işletme imkânlarına sahip değildir. Türkiye'nin krom pazarındaki pozisyonunu koruması ve bu alanda daha da ilerleyebilmesi açısından altyapı çalışmaları planlanırken potansiyelin bilinmesi ve mevcut tesislerin işlerliği dikkatle incelenmelidir. Özellikle 2000 yılından sonra birçok yeni krom zenginleştirme tesisi kurulmuş olmakla birlikte düşük tenörlü kromitleri zenginleştirme konusunda çabalar yetersiz kalmıştır. Ayrıca mevcut tesislerde verim ve kapasite kullanımı da düşüktür. Çoğu tesislerde atığa giden cevher kaçağı % 6'dan fazladır. Geçmiş yıllarda kaçak oranının %19 seviyesine kadar çıktığı bilinmektedir. Oysaki günümüzde % 6'dan fazla Cr_2O_3 içeren eski konsantre atıkları önemli bir kaynaktır. Bu atıklardaki ince kromitin kazanılması cazip bir fırsat olarak görülmekte, ancak bu fırsatın değerlendirilmesi ise üst düzeyde teknolojik donanıma sahip işletmelere bağlıdır. Fakat Türkiye'de zenginleştirme tesislerinde genel olarak krom madenciliğimizde mekanizasyon hala çok düşük seviyelerde olup emek yoğun bir faaliyet olarak devam etmektedir. Bu da Türkiye'nin rekabet gücünü kıran bir diğer olumsuz etmen olarak karşımıza çıkmaktadır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Ağaçayak,T., (2004). *Topraktepe (Yeşildağ Beyşehir-Konya) kromitlerinin zenginleştirme yöntemlerinin araştırılması.* [Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. Konya.

Aratoğlu M. (2017) *Bilfer Eskiköy Krom Konsantre Tesisi Atıklarının Flotasyon ile Zenginleştirilmesi*. [Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Anabilim Dalı]. 90s, Ankara.

Aslan, N. (1996). *Değişik hammaddelerin multi gravite separatörü ile zenginleştirme parametrelerinin araştırılması*. [Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Sivas.

Ay, M. & Turhan A. (2010). *Investigation Of The Effect Of Cutting Parameters On The Geometric Tolerances And Surface Roughness In Turning Operation*. Electronic Journal of Machine Technologies, (7) 55-67.

Aydın, M.E. (2001). *Etibank Guleman Kef konsantratör tesisi kromit artıklarının değerlendirilmesi*. [Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Diyarbakır.

Bayat, O. (2009). *Cevher Hazırlama Zenginleştirme Laboratuarı Ders Notları* (Yayınlanmamış Rapor). Çukurova Üniversitesi. 1 – 2.-- Şubat 2009, Metalik Cevherleri Zenginleştirme Yöntemleri Ders Notları (Yayınlanmamış Rapor), Çukurova Üniversitesi, 12 – 13.

Bozkurt, B. (2017). *Kromun Zenginleştirme Tesis Atıklarından Geri Kazanımında Knelson Gravite Konsantratörünün Etkisi.* [Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi]. Afyon.

Burt, R. (1999). *The role of gravity concentration in modern processing plants*. Minerals Engineering. 12, 1291–1300.

Canyılmaz, E. & Kutay, F. (2003). *Taguchi metodunda varyans analizine alternatif bir yaklaşım*. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18 (3), 51-63.

Celep, O. (2005). *Mastra ve Kaletaş (Gümüşhane) cevherlerinden altın kazanımı.* [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi]. Trabzon.

Celep, O., Alp, İ., Deveci, H., Vıcıl, M. & Yılmaz, T. (2006). *Knelson santrifüj gravite ayırıcısıyla Mastra (Gümüşhane) cevherinden altın kazanımı.* Yerbilimleri Dergisi. 19 (2), 175-182.

Chen, X. (2021). *The Role of Chromite in the Global Economy: An Overview*. Resources Policy, 69, 101842.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Çakmak İ. (2006). *Elazığ–Guleman Yöresi Kromit Cevheri Yataklarının Analizi ve Analiz Sonuçlarına Göre Kullanım Alanlarının Araştırılması.* Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları 4:2, 20-24.

Çelik, C. (1993). *Kalite geliştirmede tasarım eniyileme problemine taguchi yöntemlerinin uygulanmasında sistematik bir yaklaşım*. [Doktora tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Eskişehir.

Çınarlıdere, G. (2012). *Kromit minerali zenginleştirilmesi*. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak. 30.

Çiçek T. & Cöcen İ. (2002). *Mozley yerçekimi ayırıcısının (MGS) Türk kromit konsantre tesislerinin ince kromit atıklarına uygulanabilirliği.* Mineral Mühendisliği, 15 (91–93). Doi: 10.1016/S0892-6875(01)00195-9.

Çilingir, Y. (1996). *Metalik cevherler ve zenginleştirme yöntemleri* (2.Baskı). Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları. 198. İzmir.

Çilingir, Y. (1990). *Metalik Cevherler ve Zenginleştirme Yöntemleri*. C.l İzmir.

Deniz V. (1992). *Burdur–Yeşilova Yöresi Kromitlerinin Zenginleştirilmesi*. Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.

Develi, Y. (2014). *Hatay Yöresi Tekcrom Maden A.Ş Krom işletmesi triyaj artıklarının zenginleştirilebilirliğinin araştırılması*. [Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Adana. 100.

Devlet Planlama Teşkilatı (Dpt). (2001). *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu, Metal Madenler Alt Komisyonu, Krom Çalışma Grubu Raporu*. Sekizinci 5 Yıllık Kalkınma Planı. Ankara. DPT: 2626 - ÖİK: 637, 1 – 8, 11 – 14.

Er, B. (2011). *Multi gravite cihazlarının krom cevheri zenginleştirmesindeki etkilerinin araştırılması*. [Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. İzmir.

Ergin, Z., Cöcen, İ. & Semerkant, O. (1998). *Cevher zenginleştirme laboratuvar ders notları* (3. baskı). D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi. İzmir.

Eskibalcı, F., Çinku, K., Kurşun, İ. & Özkan, Ş.Ü. (2002). *Kavak Yöresi Kromit Atıklarının MGS cihazı Kullanılarak Zenginleştirilmesi.* İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi. 15(2), 55-62.

Feil, N.F., Sampaio, C.H. & Wotruba, H. (2012). *Influence of jig frequency on the separation of coal from the Bonito seam*. - Santa Catarina, Brazil. Fuel Processing Technology. 96, 22–26.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Garcia, M. & Patel, N. (2020). *Quality Analysis of Chromite Ores from Different Regions.* Minerals Engineering, 143, 106423.

Glastonbury RI, Beukes J., Van Zyl P., Sadikit L., Jordaan A., Campbell Q., Stewart H. & Dawson N. (2015). *Comparison of physical properties of oxidative sintered pellets produced with UG2 or metallurgical-grade South African chromite: A case study.* J.S. Afr. Inst. Min. Metall. 115, 699–706. Doi: 10.17159/2411-9717/2015/V115N8A6.

Green, A. & Thompson, R. (2023). *Environmental Impacts of Chromite Mining: Challenges and Solutions*. Journal of Environmental Management. 281, 111912.

Hacıoğlu, S. (2010). *Kayseri Pınarbaşı kromitlerinin kuru zenginleştirilmesi.* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. İstanbul. 83.

Hamzaçebi, C. & Kutay, F. (2003). *Taguchi metodu - bir uygulama.* Gazi Üniversitesi, Teknoloji Dergisi, Sayı:3-4, 7-17.

Hughes, S. (2022). *Economic Factors in Chromium Mining: Cost and Pricing Dynamics.* The Extractive Industries and Society. 9(3), 775-789.

Işık, F. 2000. *Taguchi Metodu ve Bir Uygulama*. [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü]. İstanbul. 75.

Johnson, L. & Wang, X. (2022). *Geopolitics of Chromite: An Analysis of International Trade Policies*. Global Trade and Economics Journal, 29(1), 87-102.

Kasman, Ş. (2009). *Lazer Mikro İşleme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkisinin Deney Tasarım Yöntemiyle Belirlenmesi*. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, (IATS'09), Karabük, Türkiye.

Kıdıman, F.B. (2009). *Düşük tenörlü krom cevherlerinin zenginleştirilmesinin araştırılması*. [Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Adana. 90.

Kıyak, T. (2013). *Orhaneli krom zenginleştirme tesis atıklarının Knelson konsantratörü kullanılarak zenginleştirilmesi.* [Yüksek Lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Kütahya.

Kleynhans, E.L.J., Beukes, J.P., Van Zyl, P.G., Kestens, P.H.I. & Langa, J.M. (2012). *Peletlenmiş Kromit Ön İndirgeme Sürecinde Kil Bağlayıcıların Benzersiz Zorlukları.* Minerals Engineering, 34 55-62. Doi: 10.1016/j.mineng.2012.03.021.

Köleli, N. & Aydeniz D. (2016). *Kromit", Kitapta: Çevresel Malzemeler ve Atıklar*. Doi: 10.1016/B978-0-12-803837-6.00011-1.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Kumar, C.G., Tripathy, S. & Rao, D.S. (2009). *Characterisation and pre-concentration of chromite values from plant tailings using floatex density seperator*. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 8, No:5, 367-378.

Kumar, D. Kumar, D. (2018). *Dry Cleaning Process*. Sustainable Management of Coal Preparation. 115–130.

Kumar, R. & Özdemir, S. (2023). *Comparative Analysis of Chromite Mining in Kazakhstan, India, and Turkey*. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 14(1), 45-60.

Kurşun, H. (1993). *Karanlıkdere düşük tenörlü kromit cevherinin optimum zenginleştirme koşullarının araştırılması çalışmaları*. [Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi]. Sivas.

Kurşun, İ. (2003). *Karadeniz bölgesi sahil kumlarının titanyum açısından değerlendirilmesi*., [Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. İstanbul. 169.

Lee, K. & Gupta, D. (2021). *Future Prospects of Chromite: A Focus on Demand and Sustainability*. Journal of Cleaner Production, 285, 124816.

Lima, R.M.F., Brandao, P.R.G. & Peres, A.E.C. (2005). *The infrared spectra of amine collectors used in the flotation of iron ores*. Minerals Engineering., 18, 267-273.

Liu, C., Hystad, G., Golden, J.J., Hummer, D.R., Downs, R.T., Morrison, S.M., Ralph, J.P. & Hazen, R.M. (2017). *Krom mineral ekolojisi.* American Mineralogist, 102:3, 612-619. Doi: 10.2138/am-2017-5900.

Magumbe, L. (2002). *Process Desing for Gold Recovery from The Chester Deposit*. [Yüksek Lisans Tezi, Laurentian Üniversitesi].

Meyer, H. & Reddy, K. (2023). *Global Chromite Production: Trends and Prospects.* Minerals Journal, 20(4), 567-583.

Mohanta, S., Sahoo, B., Sampaio, C.H. & Petter, C.O. (2019). *Practical difficulties associated with the Indian coal washeries: A case study.* International Journal of Coal Preparation and Utilization. 39(5), 246–258.

Murthy, Y.R., Tripathy, S.K. & Kumar, C.R. (2011). *Chrome ore beneficiation challenges & opportunities – A reiew*. Minerals Engineering, 24, 375-380.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Ozun, S., Hassas, B.V. & Miller, J.D. (2019). *Collectorless flotation of oxidized pyrite.* Colloids and Surfaces: A-Physicochemical and Engineering Aspects. 561, 349-356. Doi: 10.1016/j.colsurfa.2018.10.064.

Önal, G., Gürkan, V. & Acarkan, N., (2005). *Krom Zenginleştirme Tesisleri Artıklarının Yüksek Alan Şiddetli Yaş Manyetik Ayırma ile Değerlendirilmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Özgen, S. (2012). *Clean Chromite Production from Fine Chromite Tailings by Combination of Multi Gravity Separator and Hydrocyclone*. Separation Science and Technology, 47 (2012) 1948-1956.

Özgen, S. (2020). *Kromit tesis atıklarının Knelson ve Falcon konsantratör ile zenginleştirilmesi*. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 11(3), 1233-1239.

Öztürk, F.D. & Temel, H.A. (2016). *Beneficiation of Konya-Beyşehir chromite for producing concentrates suitable for industry*. JOM. Vol. 68, No. 9, 2449-2454.

Öztürk, F.D.& Temel, H.A. (2014). *Enrichment of Bingöl (Yedisu), Diyarbakır (Hani and Ergani) and Elazığ (Alacakaya) Chromite*. Mühendislik Dergisi, C:5, Sa:2, 81-88.

Özün S. & Ergen G. (2019). *Galen Flotasyonu İçin Optimum Parametrelerin Belirlenmesi: Ksantatların Zincir Uzunluğunun ve Zincir Yapısının Flotasyon Geri Kazanımına Etkisi*. ACS Omega 4:1, 1516–1524. Doi: 10.1021/acsomega.8b02841.

Özün, S. & Girgin, S. (2023). *Kromit Flotasyonunda Toplayıcı Karışımlarının Etkisi*. Alfa Mühendislik ve Uygulamalı Bilimler Dergisi, 1(1), 62-72.

Palanikumar, K. (2011). *Experimental investigation and optimisation in drilling of GERP composites*. Measurement, 44, 21382148.

Panda, L., Banerjee, P.K., Biswall, S.K., Venugopal, R. & Mandre, N.R. (2014). *Modelling and optimization of process parameters for beneficiation of ultrafine chromite particles by selective flocculation*. Seperation and Purification Technology, 132, 666-673.

Pearse, M.J. (2005). *An overview of the use of chemical reagents in mineral processing.* Minerals Engineering. 18 (2): 139-149.

Raimov R. (2023). *Kromit ve Olivinin Flotasyon Özelliklerinin Belirlenmesi.* [Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı]. 56s. Isparta.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Rath, R. K., Dey, B., Mohanta, M. K., Prusty, L. K., & Singh, R. (2017). *Recovery of chromite values from tailings of COB plant using enhanced gravity concentrator*. International Conference on Mineral Processing Technology, Indian Institute of Mineral Engineers, Chennai, 644-649.

Sampaio, C.H. & Tavares, L.M.M. (2005). *Beneficiamento Gravimétrico: Uma Introdução aos Processos de Concentração Mineral e Reciclagem de Materiais por Densidade*. Editora da UFRGS: Porto Alegre, Brazil.

Shahzad, M.; Tariq, S.M.; Iqbal, M.; Arshad, S.M.; Saqib, S. An assessment of cleaning amenability of salt range coal through physical cleaning methods. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research, A Physical Sciences*, 2015, 58, 74–78.

Singh, A. & Öztürk, Y. (2021). *Annual Chromite Production Review: A Global Perspective.* International Journal of Metal Extraction, 16(3), 315-330.

Smith, J. & Wang, L. (2022). *Global Chromium Reserves and Their Economic Impact.* Journal of Mineral Economics, 35(2), 123-139.

Snoby, R., Thompson, K., Mishra, S. & Snoby, B. (2009). *Dry jigging coal: Case history performance.* Proceedings of the SME Annual Meeting, Denver, CO, USA, 22–25. pp. 09–052.

Somasundaran P. & Wang D. (2006). *Sürfaktanların çözelti dengeleri.* Çözelti Kimyası, Mineraller ve Reaktifler. Elsevier, 5-43. Amsterdam, Nederland.

Sullivan, P. & Kumar, N. (2023). *Environmental Management in Chromite Mining: Challenges and Solutions*. Environmental Science and Policy, 34, 112-127.

Şanyılmaz, M. (2006). *Deney tasarımı ve kalite geliştirme faaliyetlerinde Taguchi yöntemi ile bir uygulama*. [Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. Kütahya. 106.

Tabelin, C.B., Sasaki, R., Igarashi, T., Park, I., Tamoto, S., Arima, T., Ito, M. & Hiroyoshi, N. (2017). *Simultaneous leaching of arsenite, arsenate, selenite and selenate, and their migration in tunnel-excavated sedimentary rocks: II. Kinetic and reactive transport modeling.* Chemosphere. 188, 444–454.

Taguchi, G., Chowdury, S. & Wu, Y. (2005). *Taguchi's quality engineering handbook*. ASI consulting group, LLC, Livonia, Michigan, ISBN 0-471-41334-8.

Tanyıldızı, H. & Çoşkun, A. (2013). *Varyans (ANOVA) analizi yöntemi ile silis dumanı katkılı hafif betonun mekanik özelliklerine deney parametrelerinin etkilerinin belirlenmesi*. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 29 (3): 227-233.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Taylan, D. (2009). *Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması.* [Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi]. Isparta.

Tripathy, S.K., Murthy, Y.R., Singh, V. & Suresh, N. (2016a). *Processing of Ferruginous Chromite Ore by Dry High-Intensity Magnetic Separation.* Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Rewiev, 37(3): 196-210.

Tripathy, A., Panda, L., Sahoo, A.K., Biswal, S.K., Dwari, R.K. & Sahu, A.K. (2016-b). *Statistical optimization study of jigging process on beneficiation of fine size high ash Indian non-coking coal.* Advanced Powder Technology. 27(4), 1219–1224.

Turgut, B. (1995). *Düşük Tenörlü Karaburhan Kromitlerinin Zenginleştirilebilirliğinin Araştırılması*. Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir..

Turner, B. & Zhao, F. (2022). *Advancements in Chromite Mining: Technology and Efficiency*. Journal of Mining Technology, 11(2), 234-250.

Uyğur, B. (2009). *Açık Ocaklarda Patlatma Kaynaklı Sarsıntıların Taguchi yöntemi kullanılarak parametre optimizasyonu ile azaltılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). Kütahya. 221.

Yıldırım, S. (2011). *Ürün Tasarımı Geliştirilmesi: Taguchi Tasarımı*. [Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi]. Ankara.

Yıldız N. (2014). *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme*. Ertem Basım Yayın Dağıtım Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., Ankara. 293-380.

Yıldız, N. (2007). *Cevher hazırlama*. Ertem Basım Yayın Dağıtım Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., Ankara. Sayfa:492.