

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SENSÖR TEMELLİ AYIRICILARLA MİNSUR S.A. SAN RAFAEL KASİTERİT CEVHERİNİN
ZENGİNLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mad. Müh. Aysa MOSLEMIYEKAN

**NİSAN 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SENSÖR TEMELLİ AYIRICILARLA MİNSUR S.A. SAN RAFAEL KASİTERİT
CEVHERİNİN ZENGİNLEŞTİRİLMESİ**

Maden Müh. Aysa MOSLEMIYEKAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
MADEN YÜKSEK MÜHENDİSİ
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 / 03 / 2021

Tezin Savunma Tarihi : 16 / 04 / 2021

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İbrahim ALP

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Bu tez, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez danışmanlığımı üstlenerek, çalışmanın yürütülmesi sırasında desteğini ve değerli görüşlerini benden esirgemeyen Sayın hocam Prof. Dr. İbrahim ALP'e teşekkürü bir borç bilirim. Yoğun çalışmalarım sırasında en büyük motivasyon desteğini sağlayan sevgili aileme minnetlerimi sunarım. Bölüm imkanlarından yararlanmamı sağlayan ve değerli görüşleri ile tez çalışmamı destekleyen RWTH Aachen Üniversitesi Cevher Zenginleştirme Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Hermann WOTRUBA'ya ayrıca teşekkür ederim. Yüksek lisans tezimin başlangıç aşamasında desteklerini aldığım Doç. Dr. Oktay CELEP'e teşekkür ederim.

Bilgisi ve engin tecrübesiyle gerek çalışmalarımda gerekse eğitim hayatım dışındaki problemlerimde her zaman yanımda olan Sayın Dr. Christopher ROBBEN'e, deneysel çalışmalarım esnasında ve Aachen Üniversitesine gelme süresi boyunca beni destekleyen Maden Mühendisi ve Bölüm Ekonomi Uzmanı Sayın Christoph STEPPUN'a, çalışma kapsamında değerli fikirleriyle, sabırlı ve hoş görülü davranışlarıyla çekinmeden kendisine ulaşmamı sağlayan Tomra Sorting Teknik Yöneticisi Sayın Dr. Moritz BECKMANN'a, XRT test çalışmalarımda bana yardımcı olan Tomra Sorting Uygulama Geliştirme Mühendisi Sayın Peter SIMONS'a, çalışmalarım boyunca her daim yanımda olan Sayın Dr. Mathilde ROBBEN'e gönülden minnettarım. Deneysel çalışmalarım için ekipman eğitimi veren Sayın Dr. Lars WEITKÄMPER'a, laboratuvar çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Arş. Gör. Samuel VIOLA'ya, tez çalışma süresi boyunca beni her zaman destekleyen değerli arkadaşım K.T.Ü. Maden Mühendisliği Bölümü Arş. Gör. Serkan KAYA'ya, çok teşekkür ederim. Çalışmam esnasında desteklerini benden esirgemeyen, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitü Sekreteri Sayın Ayşe BAYRAKTAR'a, Öğrenci İşleri Bilgisayar İşletmeni Sayın Mustafa ALVER'e teşekkürlerimi sunarım.

Aysa MOSLEMIYEKAN

Trabzon 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “SENSÖR TEMELLİ AYIRICILARLA MINSUR S.A. SAN RAFAEL KASİTERİT CEVHERİNİN ZENGİNLEŞTİRİLMESİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. İbrahim ALP’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 16/04/2021

Aysa MOSLEMIYEKAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Madencilikte, Dünden Bugüne Sensör Temelli Ayırıcılar	3
1.3. Madencilikte Kullanılan Sensörler ve Ayırma Prensipleri	6
1.3.1. Optik Sensörler.....	10
1.3.2. X-ışını Sensörleri.....	15
1.3.3. Elektromanyetik Sensörler (EM).....	17
1.3.4. Radyometrik Sensörler (RM)	17
1.3.5. Mikrodalga Sensörler (MW)	18
1.3.6. LIBS ve LIF Sensörler	18
1.4. Sensör Temelli Ayırıcıların Cevher Hazırlamadaki Kullanım Alanları	19
1.4.1. Ön Zenginleştirme	20
1.4.1.1. Tüvenan Cevher Değerlendirilmesi.....	20
1.4.1.2. Atık Sahası Değerlendirmesi	21
1.4.2. Cevher Türüne Göre Ayırma	22
1.4.3. Ara ve Nihai Ürün Kazanımı	23
1.5. Sensör Temelli Ayırıcıların Alt Süreçleri ve İşlevleri.....	24
1.5.1. Tanelerin Hazırlanması.....	26
1.5.2. Tanelerin Sunumu	27
1.5.3. Ağılama ve Veri Analizi	28
1.5.4. Mekanik Ayırma.....	34

1.5.5. Sensör Temelli Ayırıcıların Genel Tasarımı	36
1.6. Literatür Araştırması.....	37
1.7. Tezin Amacı	40
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	43
2.1. Malzeme.....	43
2.2. Yöntem.....	47
2.2.1. Modelleme	48
2.2.1.1. %HD Sıklık Dağılımı ve Tenör Sıklık Dağılımı	49
2.2.1.2. Karışım Kavramı ve Karışım Katsayılarının Seçimi.....	50
2.2.1.3. Proses Modellemesi.....	52
2.2.2. Numune Hazırlama.....	55
2.2.3. XRF Analizi	62
2.2.4. Mekanik Verimlilik	66
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	67
3.1. Modelleme İçin Kullanılan Kalibrasyon Grafiği	67
3.2. Kalibrasyon Grafiğinin Değerlendirilmesi	68
3.2.1. Dağılım Tablosu	70
3.3. %HD Sıklık Dağılımı ve Tenör Sıklık Dağılımı	73
3.4. Deney Levhaları	78
3.5. Tahmin Edilen Karışım Değerleri	80
3.6. Deney Sonucu Karışım Değerleri.....	81
3.7. Proses Modellemenin Doğrulanması ve Akım Şeması Seçimi.....	83
3.7.1. Kesme Tenörünün Doğrulanması.....	86
4. SONUÇLAR	88
5. ÖNERİLER.....	89
6. KAYNAKLAR.....	90
7. EKLER.....	95
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

SENSÖR TEMELLİ AYIRICILARLA MINSUR S.A. SAN RAFAEL KASİTERİT
CEVHERİNİN ZENGİNLEŞTİRİLMESİ

Aysa MOSLEMIYEKAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İbrahim ALP
2021, 94 Sayfa, 6 Sayfa Ek

Bu çalışmada, X-Işınları İletim (XRT) sensör temelli ayırıcılarla Minsur S.A. kasiterit atığının zenginleştirilmesi araştırılmıştır. Çalışmada, ayırıcı tesisinin performans tahmini için algılama etkinliğine dayalı bir proses modellemesi hazırlanmıştır. Modelleme sayesinde, ayırıcının ve ayırma tesisinin ön zenginleştirme sonuçlarını tahmin edebilmek mümkündür. Modelleme, ayırıcılardan alınan verilerle yapılmıştır. Deney çalışması, %0,6 Sn tenörüne sahip döküm sahasından alınan kasiterit cevherine uygulanmıştır. Dolayısıyla düşük tenörlü malzemenin değerlendirilmesi için iki farkı akım şeması önerilmiştir. Modelleme akım şemalarını takip edecek şekilde ilerlemiştir ve karışım katsayıları ile kalibre edilmiştir. Modellemenin doğruluğunu araştırmak için laboratuvar ölçekli deney çalışması yapılmıştır. Bu test çalışmasıyla gerçek karışım katsayıları bulunmuştur. Bulunan karışım değerleri X-ışını algılama verimliliğini göstermektedir. Deney sonucuna göre 1. akım şemasında %0,93 Sn tenörlü bir konsantre %99,10 verim ile elde etmek mümkündür. 2. akım şeması için %1,15 Sn tenörlü bir konsantre %98,98 verim ile elde edilmiştir. Deney çalışması Sn kazanma verimleri ve atık tenörü değerlerini doğrulamaktadır. Ancak, ayırıcı ön zenginleştirme tesisine ait üretim verileri ve karışım katsayılarına bağlı olarak, konsantre tenörü daha düşük ve konsantreye alma oranları daha yüksek bulunmuştur. Deney sonuçlarına göre sahaya uygun akım şeması seçilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sensör Temelli Ayırıcı, Kasiterit, Modelleme, Karışım Katsayısı, Bench-scale Test, Ayırıcı Performansı, Minsur S.A.

Master Thesis

SUMMARY

SENSOR-BASED SORTING APPLICATION FOR MINSUR S.A. SAN RAFAEL
CASSITERITE ORE CONCENTRATION

Aysa MOSLEMIYEKAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. İbrahim ALP
2021, 94 Pages, 6 Pages Appendix

In this study, the applicability of X-Ray Transmission (XRT) sensor based sorters for Minsur S.A. cassiterite waste dump enrichment is investigated. For this reason, a process modeling is created based on the detection efficiency for sorting process performance estimation. By means of this modeling, it is possible to estimate the sorter and sorting plant pre-concentration results. Modeling is created with the data recorded from the sorters. Experimental work is applied to the waste dump cassiterite ore with the grade of 0.6 Sn%. Hence two exemplary flowsheets are considered for evaluation of low-grade material. Modeling is developed by following the flowsheets and is calibrated with partition coefficients. A bench-scale test is conducted to investigate the accuracy of the modeling and hereby the actual partition coefficients are obtained. These partition coefficients indicate detection efficiency. According to the experimental results, with the first flowsheet it is possible to obtain a product grade of 0.93 Sn% with a recovery value of 99.10%. With second flowsheet, a product is obtained with a grade of 1.15 Sn% and recovery of %98.98. Experimental study approves the recovery and the waste grades. However, depending on production data and partition coefficients of the pre-concentration plant, the concentrate grades are lower and the masspull values are higher than the modeling. By considering the test results, the most fitted flowsheet for the plant is chosen.

Key Words: Sensor Based Sorter, Cassiterite, Modeling, Partition Coefficients, Bench-scale Test, Sorter Performance, Minsur S.A.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Madencilik endüstrisinde sensor temelli ayırıcıların sağladığı avantajlar (Tomra Sorting, 2020)	2
Şekil 1.2. 1915 yılında Sullivan madeninde elle ayıklama uygulaması (Wills, 2016)	3
Şekil 1.3. Yüzeye temas eden ışığın farklı davranışları (URL-7, 2020).....	7
Şekil 1.4. Enerji/ışık yansımalarını algılayan sensörlerin genel çalışma prensibi (Kamradt vd., 2012).....	10
Şekil 1.5. Farklı minerallerin NIR bölgesindeki farklı emilim özellikleri (Adams vd., 2018)	12
Şekil 1.6. VIS sensörlerin görüntüleme bileşenleri (Nienhaus vd., 2014).....	13
Şekil 1.7. Renk ayırıcı sensörle fosfattan, daha koyu renge sahip silisli şistin ayrılması (Tomra, 2020).....	14
Şekil 1.8. XRT ayırıcıların, ayırma işlemi için oluşturduğu görüntü (Tomra, 2020)	16
Şekil 1.9. Sensör temelli ayırıcılarla tüvenan cevherin ön zenginleştirilmesi (Knapp vd., 2014)	21
Şekil 1.10. Sensör temelli ayırıcılarla döküm sahası malzemesinin ön zenginleştirilmesi (Wotruba ve Harbeck, 2010).....	22
Şekil 1.11. Cevheri türüne göre ayırma işleminde sensör temelli ayırıcıların entegrasyonu (URL-8).....	23
Şekil 1.12. Sensör temelli ayırıcıların genel çalışma prensibi (Wotruba ve Harbeck, 2010)	24
Şekil 1.13. Ayırıcıların genel konfigürasyonu (Manouchehri, 2003).....	26
Şekil 1.14. Titreşimli oluk ile malzemenin ayırıcı bantına sunumu (Udoudo, 2010).....	27
Şekil 1.15. Algılama, sınıflandırma ve ayırma sistemlerinde kullanılan bazı malzeme özellikleri (Udoudo, 2010)	30
Şekil 1.16. Sensör temelli ayırıcılarda görüntü işleme prosedürü (Kattentidt vd., 2003)....	31
Şekil 1.17. Bant tipi ve şut tipi ayırıcılardaki ejector konfigürasyonu	35
Şekil 1.18. Bant tipi ayırıcıların genel gösterimi (URL-3, 2020).....	36
Şekil 1.19. Şut tipi ayırıcıların genel gösterimi (URL-5, 2020).....	37
Şekil 1.20. Minsur San Rafael cevher zenginleştirme tesisinin akım şeması (Robben vd., 2020)	42

Şekil 2.1. San Rafael madeninin bulunduğu yer (Mlynarczyk ve Williams-Jones, 2003) ..	44
Şekil 2.2. Bolivya Viloco madeninden alınan saf Kasiterit numunesi	46
Şekil 2.3. Modelleme metodolojisi	47
Şekil 2.4. Karışım fonksiyonun grafik üzerinde anlatımı (Sanders, 2007)	51
Şekil 2.5. Minsur S.A. ayırıcı sahasına ait üretim verileri	52
Şekil 2.6. Birinci örnek akım şeması	53
Şekil 2.7. İkinci örnek akım şeması	54
Şekil 2.8. Numune hazırlamada kullanılan XRT cihazının genel görünümü (Tomra, 2020)	55
Şekil 2.9. XRT ve DE-XRT ayırıcıların algılama prensibi (Nienhaus vd., 2014).....	56
Şekil 2.10. Deney levhalarının genel görünümü	58
Şekil 2.11. Hi-Scan 6040i X-ışını tarayıcı cihazı	59
Şekil 2.12. X-ışını tarama cihazında atom yoğunluğu ile ilişkili renk gradyanı	60
Şekil 2.13. Laboratuvar ölçekli çeneli kırıcı	61
Şekil 2.14. Halkalı değirmen görüntüsü.....	62
Şekil 2.15. XRF tarayıcı lensi üzerine yerleştirilen deney kapı	64
Şekil 2.16. XRF analizi için farklı kalay içeriklerine sahip toz numuneler ve deney kapları	65
Şekil 3.1. %HD değerleri ile Sn içeriği arasındaki ilişkiyi gösteren modelleme kalibrasyon grafiği	68
Şekil 3.2. %HD ve %Sn değerleri ile kalibrasyon grafiği.....	69
Şekil 3.3. HD ve numunedeki diğer metallerin korelasyon grafiği	72
Şekil 3.4. PtW ve WtP olayına neden olan tanelerin yokluğundaki görüntü	72
Şekil 3.5. Ayırıcı 1 için %HD aralıklarındaki Sn içerikli tanelerin dağılımı	74
Şekil 3.6. Ayırıcı 2 için %HD aralıklarındaki Sn içerikli tanelerin dağılımı	75
Şekil 3.7. Ayırıcı 3 için %HD aralıklarındaki Sn içerikli tanelerin dağılımı	76
Şekil 3.8. %0-%2 HD aralığındaki tenör sıklık dağılımı	78
Şekil 3.9. Farklı kalay içeriğine sahip deney levhalarının X ışını altındaki görüntüsü	79
Şekil 3.10. Karışım grafiği	87

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. 20. Yüzyılda sensör temelli ayırıcıların uygulandığı cevherlerin kronolojisi (Robben ve Wotruba, 2019)	5
Tablo 1.2. Farklı spektral aralıklardaki sensörler ve ayırma prensipleri (Wotruba, 2010)	6
Tablo 1.3. NIR aktif mineral grupları (Robben ve Wotruba, 2010)	11
Tablo 1.4. NIR bölgesinde emilim özelliği gösteren moleküler bağlar (Robben, 2010)	12
Tablo 1.5. Bilinen floresans özellikli mineral grupları ve floresans yüzdeleri (Wotruba, 2006)	15
Tablo 1.6. Madencilik sektöründeki sensör temelli ayırıcılar için kullanılan sensörler ve özellikleri	19
Tablo 1.7. Sensör türleri, ölçüm yöntemi ve algılama prensipleri (Robben vd., 2011)	33
Tablo 2.1. Minsur S.A. San Rafael yatağının mineralojik bileşenleri	43
Tablo 2.2. Numuneye ait X-ray analiz ve kimyasal analiz verileri (Tomra, 2020)	45
Tablo 2.3. Modellemede kullanılan obje listeleri	49
Tablo 2.4. Ayırıcı sahasına ait ön zenginleştirme değerleri	53
Tablo 2.5 Numune hazırlamada kullanılan XRT cihazı özellikleri (Tomra, 2020)	55
Tablo 2.6. Deney levhalarına ait bilgiler	57
Tablo 2.7. Deneyde kullan Hi-Scan 6040i X-ışını tarayıcı cihazın özellikleri	58
Tablo 2.8. Laboratuvar ölçekli çeneli kırıcı özellikleri	60
Tablo 2.9. Bant tipi XRT ayırıcıların mekanik verimlilik değerleri (Nölte, 2013)	66
Tablo 3.1. Kalibrasyon grafiği için kullanılan %HD ve %Sn değerleri	67
Tablo 3.2. Dağılım Tablo sonuçları	71
Tablo 3.3. Ayırıcı 1 için %HD aralıklarındaki Sn içerikli tanelerin dağılımı	73
Tablo 3.4. Ayırıcı 2 için %HD aralıklarındaki Sn içerikli taneler	74
Tablo 3.5. Ayırıcı 3 için %HD aralıklarındaki Sn içerikli taneler	75
Tablo 3.6. Tenör sıklık dağılımı verileri	77
Tablo 3.7. Birinci ayırıcı için karışım katsayı tahmini ve seçilen karışım katsayıları	80
Tablo 3.8. İkinci ayırıcı için karışım katsayı tahmini ve seçilen karışım katsayıları	80
Tablo 3.9. Üçüncü ayırıcı için karışım katsayı tahmini ve seçilen karışım katsayıları	81
Tablo 3.10. Algılama karışım değerleri	82

Tablo 3.11. Hesaplama sonucu elde edilen mekanik verimlilik değerleri	83
Tablo 3.12. Her bir ayırıcıya ait proses karışım katsayıları	84
Tablo 3.13. Modellemede ve deney sonucu elde edilen ön zenginleştirme değerleri	85



SEMBOLLER DİZİNİ

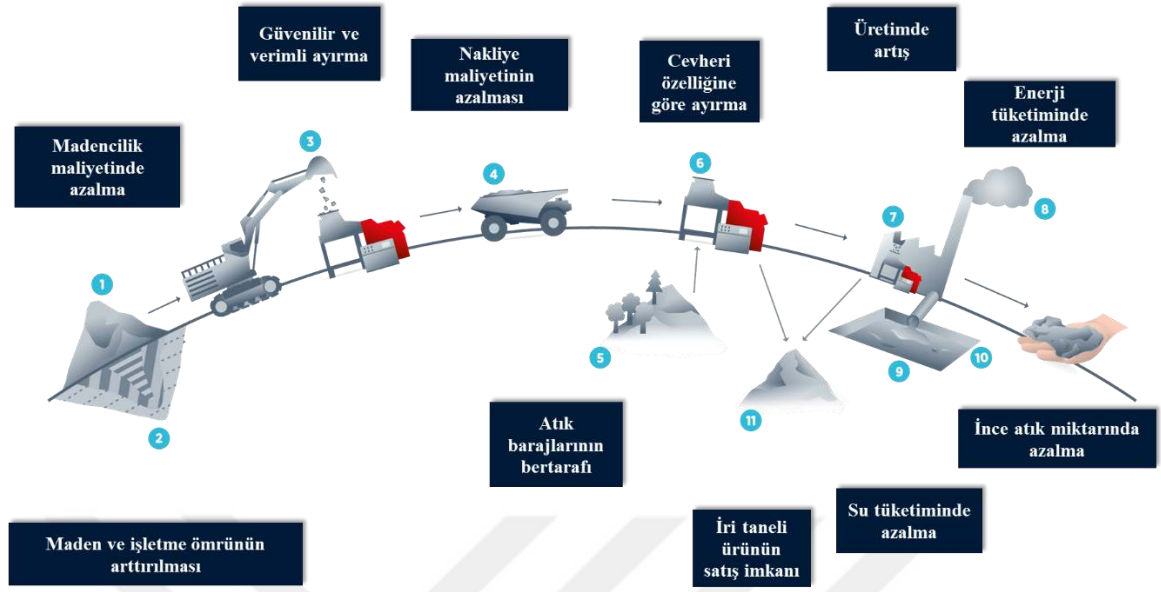
COL	Renk Ayırıcı
EDX	X-ışını dedektörü
EM	Elektromanyetik
IR	Kızılötesi
LIBS	Lazer Etkileşimli Kırılma Spektroskopisi
LIF	Lazer Etkileşimli Floresans
LIPS	Lazer Etkileşimli Plazma Spektroskopisi
LIS	Lazer Kıvılcım Spektroskopisi
MİB	Merkezi İşlem Birimi
MIR	Mid-infrared
MLA	Mineral Liberasyon Analizörü
MW	Mikrodalga
NIR	Yakın Kızılötesi
RM	Radyometrik
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SBS	Sensör Temelli Ayırma
UV	Morötesi
VIS	Görünür Işık
XRD	X-ışınları difraktometresi
XRF	X-ray Floresans
XRL	X-ray Lüminesans
XRT	X-ray İletimi
PtW	Atığa Karışan Ürün Miktarı
WtP	Ürüne Karışan Atık Miktarı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Elle ayıklama veya triyaj, bilinen en eski cevher zenginleştirme yöntemlerinden olup binlerce yıldır değerli mineralleri gang minerallerinden ayırmak için kullanılmaktadır. Bu yöntemin prensibi, ilave bir zenginleştirme işlemi gerektirmeden, değerli minerali görsel özelliklerine göre değerlendirip elle ayırmaktır. Günümüzde yüksek tenörlü cevherlerin miktarının azalmasıyla düşük tenörlü cevherlerin üretimi önem kazanmıştır. Bu cevherlerin zenginleştirme öncesinde serbestleşmeyi sağlamak amacıyla öğütme işlemi kullanılmaktadır. Yüksek tenörlü cevherlerin bitmesi elle ayıklama işlemine olan ilginin zamanla azalmasına neden olmuştur. Ancak, cevherlerden ahşap veya hurda demir parçalarını ayıklamak için ve işçi ücretlerinin düşük olduğu ülkelerde halen kullanılmaktadır (Wills, 2016).

Düşük tenörlü cevherlerin üretimine yönelik ihtiyacın artışı, sürdürülebilir hammadde işlemenin zorluklarını da arttırmıştır. Bu nedenle cevher zenginleştirme işlemlerinde, tüketilen enerji, su ve kimyasal maddelerin azaltılması ve işlem sonucu meydana çıkacak olan atık miktarının en aza indirilmesine yönelik sıkı tedbirler de artmıştır (Robben ve Wotruba, 2019). Sensör temelli ayırıcılar (SBS), yenilikçi bir teknoloji olarak cevher zenginleştirmenin çeşitli aşamalarında günümüz ihtiyaçlarını karşılayan ve gün geçtikçe uygulanmasına yönelik rağbetin arttığı görülen bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu teknoloji, zenginleştirme işlemlerinde kullanılan enerji, su ve reaktif tüketiminin azalmasına sebep olmanın yanı sıra, cevher kalitesinin artırılması ve meydana çıkacak olan atık miktarının azalmasında da önemli rol oynar. Dolayısıyla çevre üzerindeki zararlı etkiyi azaltırken, ilk yatırım maliyeti ve işletme maliyetlerinde azalmasına sebep olur. Sensör temelli ayırıcılar, ön zenginleştirme, zenginleştirme (nihai ürün kazanımı) ve cevheri türüne göre ayırma olarak, üç ana aşamada yaygın olarak kullanılırlar. Sensör temelli ayırıcı geniş uygulanabilirlik potansiyele sahip nispeten düşük maliyetli ve çok yönlü bir teknolojidir (Wills, 2016). Şekil 1.1’de Sensör temelli ayırıcıların, madencilğin farklı kademelerinde sağladıkları avantajlar gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Madencilik endüstrisinde sensor temelli ayırıcıların sağladığı avantajlar (Tomra Sorting, 2020)

Sensör temelli ayırma yöntemi, beslenen malzemedeki taneleri tek tek tespit edip ayırmasına yönelik tasarlanan bir teknolojidir. Teorik olarak %100 kazanım mümkün olsa da pratikte bu değeri tek seferde elde etmek mümkün değildir. Bu problemin sebebi cihazın mekanik ve algılama verimliliği ile ilgili kısıtlamalardır. Ayırıcıların mekanik verimliliğini etkileyen faktörler arasında vanaların gecikme süreleri, hava basıncı vb faktörler yer almaktadır. Mekanik verimlilik maksimum düzeyinde ise, meydana çıkacak olan yanlış ayıklamalar için algılama verimliliğinin incelenmesi gerekmektedir (Nölte, 2013). Algılama hatası cihazın ayırma performansını negatif yönde etkilemektedir.

Mekanik verimliliği üzerine daha önce çalışmalar yapılsa da, algılama verimliliği çoğunlukla göz ardı edilmiştir. Bu çalışmada X-ray iletim (XRT) teknolojisine sahip ayırıcılar için algılama verimliliğine dayalı bir proses modellemesi hazırlanmıştır. Modelleme, düşük tenörlü beslemeden yüksek konsantrasyon elde edilmesi ve ayırıcı tesisinin performans tahminini amaçlamıştır. Dolayısıyla ayırma performansını tahmin etmenin yanı sıra, hedef cevhere sensör temelli ayırıcıların uygun olup olmadığını anlamak mümkündür. Modellemenin doğruluğu laboratuvar ölçekli test çalışması ile araştırılmıştır. Modelleme ve test çalışmasında Minsur S.A. döküm sahasına ait %0,6 tenöre sahip kasiterit cevher numunesi ve numune ile ilgili veriler kullanılmıştır.

Tez kapsamında sensör temelli ayırıcıların genel tanıtımı yapıldıktan sonra madencilik ve cevher zenginleştirme sektöründe kullanılan sensörler ve kullanıldığı kademelerden bahsedilmiştir. Ayırıcıların genel olarak bileşenleri anlatıldıktan sonra modelleme (teorik kısım) çalışması hakkında bilgi verilmiştir. Bu bölümde, modellemeyi yapmak için Minsur S.A. San Rafael sahasındaki XRT ayırıcılardan alınan obje listeleri kullanılmıştır. Modelleme, önerilen akım şemalarını takip edecek şekilde geliştirilmiştir ve ayırma katsayıları ile kalibre edilmiştir. Son bölümde modellemeyi doğrulamak için laboratuvar ölçekli test yapılmıştır. Bu deney için kullanılan ana cihazlar X-ışını tarama (X-ray Luggage Scanner), X-ray floresans (XRF) ve XRT cihazlarıdır.

1.2. Madencilikte, Düünden Bugüne Sensör Temelli Ayırıcılar

Triyaj madenciliğin tarihinde en eski cevher zenginleştirme yöntemi olarak bilinmektedir. Bu ayıklama yöntemi, nispeten iri mineral parçaları üzerinde uygulanır. Ayıklama ister insan gücü ile ister otomatik cihazlarla olsun minerallerin bazı özelliklerinden faydalanarak gerçekleşmektedir. Özellikle elle ayıklamanın ekonomik olması bakımından, büyük parçalar halinde değerli ve değersiz minerallerin birbirinden ayrılabilmesi gerekmektedir (Uçurum, 2015). Şekil 1.2’de 1915 yılında Sullivan madenindeki elle ayıklama yönteminden bir görüntü verilmiştir (Wills, 2016).



Şekil 1.2. 1915 yılında Sullivan madeninde elle ayıklama uygulaması (Wills, 2016)

İlk optik ayırıcının patenti Sweet (1928) tarafından, ilk radyometrik bazlı ayırıcının patenti Refining (1949) tarafından ve ilk indükleyici ayırıcının patenti Rose vd., (1950) tarafından alınmıştır (Robben, 2014).

İlk Sensör temelli ayırıcı cihazının çalışma prensibi, yansıtılan ışık miktarına göre malzemeleri tanımlayıp ayırmaya dayalıdır. Heterojen bir küttele parlak olan mineralleri daha mat ve soluk olan minerallerden ayırmak, iki farklı minerali birbirinden veya gangdan ayırmak için uygulanan bir yöntemdir. Buna, bakırı gümüşten, altını kuvarstan, kurşun ve çinkoyu gang minerallerden ayırmak örnek olarak verilebilir.

Sensör temelli ayırıcıların temeli 1920’li yıllara dayansa da, Tablo 1.1’de kronoloji çizelgesine bakıldığında teknolojinin tutulması ve elmas dışı cevherler için tam anlamıyla Ar-Ge çalışmalarının yapılması, ancak 1970’li yılların sonlarına doğru artmaktadır. İkinci dünya savaşından sonra madencilik sektöründe geleneksel elle ayıklama yöntemi yerine, sensör temelli ayırıcılar çok az sayıda olsa da kullanılmaya başlamıştır. “Kelly ve Hunter” M serisi cihazları 1950 ile 1980 yılları arasındaki en önde gelen ayırma makineleridir. Bu ayırıcılar altın ve kömür ayırmasında kullanılmıştır. M serisi ayırıcılarda radyometrik, fotometrik ve X ışını sensörleri kullanılmıştır (Arvidson, 2002; Salter ve Wyatt, 1991). 1960’lı yıllara kadar belirli mineraller üzerine sensör temelli ayırıcı uygulaması yapılmıyorken, 1970’li yıllardan itibaren metalik cevherler içinde araştırmalar ve ayırma uygulamaları yapılmaya başlanmıştır. Optik ayırma gibi insan eli değmeden yapılan ayırma yöntemleri, teknik olarak iyileştirilse de gerçekte gereğinden daha az ilgi görmektedir. 20. Yüzyılın sonlarından itibaren, algılama metodlarındaki gelişmeler ve bilgisayar tabanlı yazılımlardaki ilerlemeler, madencilik endüstrisinde bilincin artması, cevher tenörünün düşmesi, enerji tüketiminin artması gibi nedenler, sensör temelli ayırıcılara yönelimin artışına neden olmuştur (Robben ve Wotruba, 2019). Manouchehriye göre (2016) gelişmiş ayırıcıların üretilmesi ve cihazlardaki ayırma hassasiyetinin artması, günümüzde ve gelecekte bu teknolojiye yönelik artan talebin en önemli nedenlerindendir.

Tablo 1.1. 20. Yüzyılda sensör temelli ayırıcıların uygulandığı cevherlerin kronolojisi (Robben ve Wotruba, 2019)

Hammade	Sensör	Yıl	Bölge
Elmas	XRL	1928	Amerika
Kömür	XRT	1928	İngiltere
Uranyum	RM	1946	Kanada
Nikel	EM	1950	Kanada
Kömür	PM	1952	İngiltere
Uranyum	PM	1959	Kanada
Kömür	XRT	1966	İngiltere
Manganez	PGNAA	1966	-
Kömür	XRT	1975	İngiltere
Altın	PM	1974	Güney Afrika
Gümüş	PM	1974	-
Bakır	EM	1974	Amerika
Uranyum	PM ve RM	1975	Kanada
Maynezit, Wolframit, Altın	PM	1976	Avustralya
Altın	PM	1977	-
Uranyum	RM	1979	-
Volastonit	PM	1979	Finlandiya
Bakır-Çinko	RM	1984	Finlandiya
Florit	UV	1985	Amerika
Kimberlit	TIR	1989	Amerika
-	XRF	1996	Rusya

Günümüzde, sensör temelli ayırıcılar cevher zenginleştirme endüstrisinde halen olması gerektiği kadar ilgi görmemektedir. Dolayısıyla sensör temelli ayırma alanındaki gelişmeleri, geri dönüşüm endüstrisindeki araştırmalara ve çalışmalara borçluyuz. Bu nedenle geri dönüşüm endüstrisinde aktif olarak çalışan ayırıcı sayısı, cevher zenginleştirme endüstrisine nazaran daha fazladır ve günün ihtiyacına göre geliştirilerek daha da artmaktadır (Wotruba, 2006).

Amerika ve Avrupa ülkelerinde çevre duyarlılığının artması ve atık bertarafı için kullanılan alanların sınırlı olmasından dolayı, atık yönetimi ve geri dönüşüm uygulamaları oldukça önemli konu haline gelmiştir. Bu ülkelerdeki yönetim, atık sahalarındaki atık bertarafı maliyetini artırarak cam, plastik ve inşaat atıkları gibi malzemelerin, geri dönüşümüne teşvik etmiştir (Rayner, 2005; Barlow, 2001). Geri dönüşüm işlemlerinde, triyaj yöntemiyle ayrılması mümkün olmayan malzemeleri ayırabilmek için, sensör temelli ayırma sıkça kullanılan yöntemdir.

1.3. Madencilikte Kullanılan Sensörler ve Ayırma Prensipleri

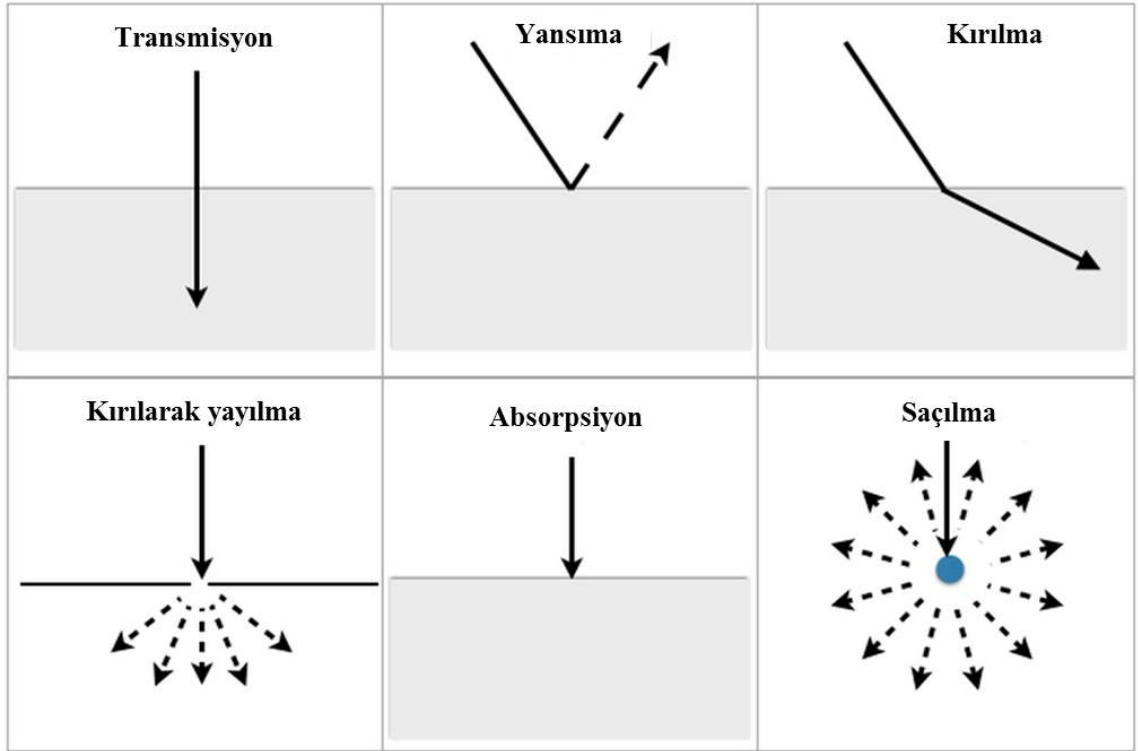
Sensör temelli ayırma tekniği ile ayrılacak olan malzeme, belirli bir spektral aralıktaki radyasyon ile uyarılır. Radyasyonun malzeme yüzeyine ulaştığındaki davranışı geri tepki olarak algılanır ve geri tepkinin türüne göre yansıma, floresans, iletim gibi uygun sensörler tarafından kaydedilir. Tablo 1.2’de Sensör temelli ayırma teknolojisinde, farklı spektral aralıklarda çalışan sensörler ve ayırma prensipleri gösterilmiştir (Wotruba, 2010).

Tablo 1.2. Farklı spektral aralıklardaki sensörler ve ayırma prensipleri (Wotruba, 2010)

	[m]	Sensör/Teknoloji	Ayırma Prensipleri	Uygulama alanı
γ Radiation	10^{-12}	RM (Radyometrik)	Doğal gama ışınımı	Radyoaktif cevherler
	10^{-11}			
X-ray	10^{-10}	XRT (X-ışını iletimi)	Atom yoğunluğu	Baz metaller, ağır metaller, değerli metal cevherleri, endüstriyel mineraller, kömür, elmas ve hurda metaller
	10^{-9}			
	10^{-8}	XRF (X-ışını floresansı)	X-ray ışınımı altında floresans etkisi	Elmas
UV	10^{-7}			
VIS	10^{-6}	COLOR (CCD color camera)	Yansıma, emilim, iletim	Baz metaller, değerli metal cevherleri, endüstriyel mineraller, elmas ve cam
NIR	10^{-5}	PM (fotometrik)	Monokromatik (tek renkli) yansıma, emilim	Değerli taşlar, elmas endüstriyel mineraller
IR	10^{-4}			
	10^{-3}	NIR (Yakın kızılötesi)	Yansıma, emilim	Baz metaller, endüstriyel mineraller
Microwaves	10^{-2}			
	10^{-1}	IR (Kızılötesi)	Isı iletimi, ısı dağılımı	Baz metaller, değerli metal cevherleri, metal sülfür cevherleri, endüstriyel mineraller, grafit ve kömür
Radio waves	10^1			
	10^2			
	10^3	EM (Elektromanyetik)	iletkenlik, geçirgenlik	Hurda metaller, metal sülfür cevherleri
AC	10^4			

Işın bir yüzeye ulaştığında, yüzeye geldiği açıya ve cismin özelliklerine bağlı olarak farklı yansıma davranışları göstermektedir. Bu özelliklere örnek olarak saydamlık, opaklık ve kristal yapısı verilebilir. Yüzeye gönderilen ışığın tamamı veya tamamına yakın miktarı emilmeden geri gönderiliyorsa bu durum yansıma olarak tanımlanır. Örneğin düz aynalar ve diğer pürüzsüz yüzeyler, net görüntüler oluşturmaları için ışığı yansıtırlar. Eğer ki ışığın çoğu cisimden geçerse bu durum iletim olarak adlandırılır. Bu durumda ışığın çok az bir

kısmı yansıma veya emilme özelliği gösterir. Opak malzemelerde ışık, iletim özelliği göstermez. Yarı saydam malzemelerde ışığın bir miktarı iletilir ancak dağılmasına neden olduğu için net bir görüntü oluşmaz. Cisim ışığı iletmiyor veya yansıtıyorsa ortaya çıkan durum soğurma olarak adlandırılır. Bu durumda, herhangi bir dalga boyundaki elektromanyetik radyasyonunu emen nesneler, ısınır ve emilen enerjiyi kızılötesi radyasyona dönüştürür. Işık, bir ortamdan diğerine geçerken hızındaki değişimden dolayı dalgalarda bükülme meydana gelmektedir. Bu durum kırılma olarak bilinir. Hız değişikliği ne kadar fazla ise kırılma miktarı da o kadar fazladır. Şekil 1.3'te yüzeye temas eden ışığın farklı davranışları gösterilmiştir (URL-7, 2020).



Şekil 1.3. Yüzeye temas eden ışığın farklı davranışları (URL-7, 2020)

Örnek olarak, prizmalar beyaz ışığı farklı bileşenlerine ayırabilirler. Yani gönderilen ışığın frekansına bağlı olarak, beyaz ışığı farklı açılarda bükerek, renklere ayırırlar. Işık bileşenlerindeki her rengin farklı frekansı vardır. Herhangi bir dalga türünün, yüzeye temas ettikten sonra yayılmasına kırınım adı verilir. Kırınım (kırılarak yayılma) ve saçılma terimleri genellikle birbirinin yerine kullanılır. Kırınım olayında, dalgaların yayılma

yönünde her hangi bir değişiklik olmamaktadır. Saçılma ise, dalgaların yayılma yönünde bariz değişiklik ile birlikte sapmasıdır (Berg ve Sorensen, 2018).

Tüm spektrumların oluşumuna, enerji seviyeleri arasındaki enerji geçişi (aktarımı) neden olmaktadır. Bir molekül, elektromanyetik radyasyonunu emer veya yayarsa, molekülün içsel enerjisinde değişiklik meydana gelir. Malzemeden iletilen spektrumun ölçümü, emilen enerji miktarını belirler. Radyasyon olayında ise moleküller fotonlarla çarpışır (Udoudo, 2010). Foton enerji (ΔE) miktarı dalga boyu (λ) ile ilişkili bir kavramdır ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$\Delta E \text{ (J)} = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

Burada;

h: Planck sabiti (6.626×10^{-34} J)

c: Bir vakum ortamında elektromanyetik radyasyonun hızı (ms^{-1})

λ : Elektromanyetik radyasyonun dalga boyu (m)

Bazı malzemeler elektromanyetik frekans şiddetini azaltabilir. Bu durum soğurma olarak bilinir. Fotonlar, iyon veya molekül tarafından emilerek molekülün uyarılmasına neden olurlar. Moleküldeki enerji seviyesi yükselir ve bu enerji artışı ısı veya floresans olarak açığa çıkar. Bu durumun ardından molekül tekrardan ilk duraylı haline geri döner. Yayılan veya açığa çıkan toplam enerji miktarı E_{over} olarak gösterilir ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$E_{\text{over}} = E_{\text{electr}} + E_{\text{vib}} + E_{\text{rot}} \quad (1.2)$$

Bu eşitlikte;

E_{electr} : Moleküllerin farklı dış orbitlerindeki elektronlarla ilişkili enerji (J)

E_{vib} : Atomlar arası titreşimden meydana çıkan enerji (J)

E_{rot} : Atomun gravite merkezine yakın, molekülün dönme hareketinden doğan enerji (J).

Beer yasasına göre, ışık soğurması, gönderilen ışığın geçtiği ortamdaki (numunedeki) emilim ile ilişkilidir (Odoudo, 2010). Bu durum malzemenin emilim özelliğini (A) ölçen sensörler için önemlidir ve aşağıdaki eşitlikle gösterilmektedir;

$$A(m) = -\log_{10} \frac{I_0}{I} \quad (1.3)$$

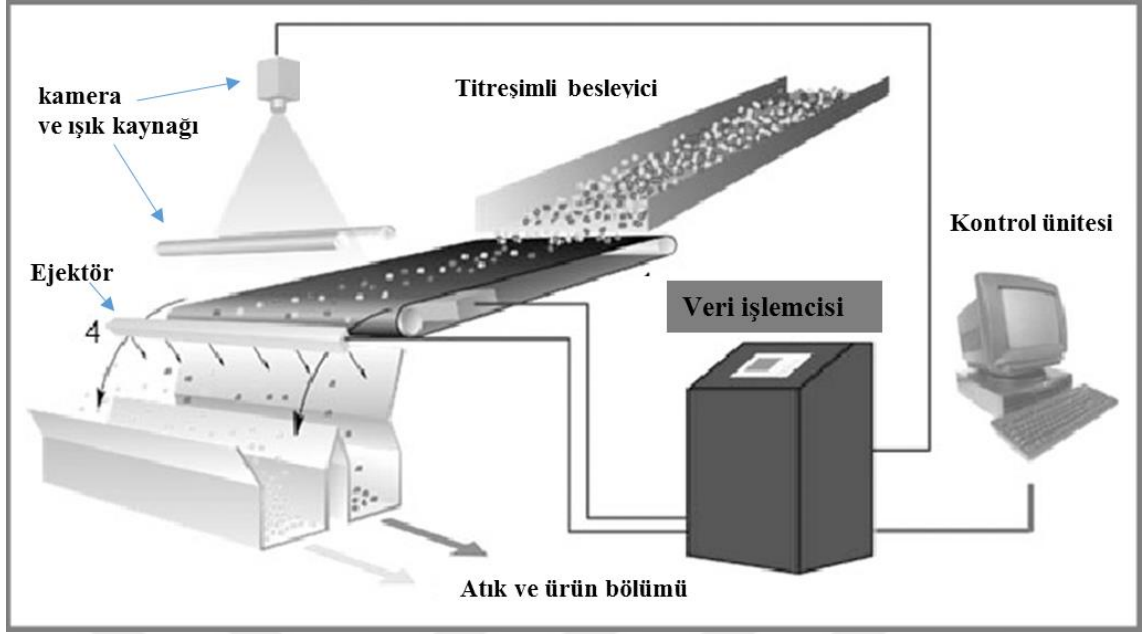
Burada;

I_0 : Verilen dalga boyunda, numuneye gönderilen ışığın şiddeti (m)

I : Verilen dalga boyunda numuneden geçen ışığın şiddeti (m) olarak gösterilmektedir.

Buradan yola çıkarak, spektroskopide malzemeyi tanımlama ve sınıflandırmak için kullanılan iki yaygın yöntemden bahsedilebilir. Bu yöntemler yansıma ve iletim olarak bilinir. Yansımada, malzeme üzerine gönderilen dalga enerjisini yansıtır. Örnek olarak beyaz ışık, elektromanyetik spektrumun tüm renklerini içermektedir. Bu ışık opak bir malzemeye gönderildiğinde, nesnenin rengini kameraya veya insan gözüne yansıtacaktır (Odoudo, 2010).

İletim durumunda, malzemeyi tanımlamak için çıkan dalganın şiddeti ölçülür. Sensör temelli ayırıcıların tasarımında spektroskopi, yapay zeka, optik ve matematik alanları kullanılmaktadır. Tasarım süreci laboratuvarından başlamaktadır. Ardından pilot tesis ve daha sonra endüstriyel ölçekli üretimle devam etmektedir. Bazı sensörler elektromanyetik radyasyonuna göre tasarlanırken, bazıları da iletkenlik veya manyetik duyarlılık ölçümüne yönelik tasarlanırlar. Ancak elektromanyetik spektruma dayalı sensörlerin tasarımı ve kullanımı daha yaygındır (Odoudo, 2010). Şekil 1.4'te enerji/ışık yansımasını algılayan sensörlerin genel çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Enerji/ışık yansımalarını algılayan sensörlerin genel çalışma prensibi (Kamradt vd., 2012)

Mikrodalga uyarıma ile termal kızılötesi kamera (TIR) birleşimi hariç, hemen hemen diğer tüm sensörler endüstriyel ölçekte dünya çapında kullanılmaktadırlar. Eğer bir algılama tekniği cevher veya atık tanelerini ayırt edebiliyorsa, o örnek için sensör temelli ayırma tekniğini uygulamak mümkündür (Robben, 2014).

1.3.1. Optik Sensörler

Optik ayırıcılar, sensör temelli ayırma teknolojisinin temelini oluştururlar. Bu ayırıcılara uyarlanan sensörler, optik sensörler olarak tanımlanır. Optik sensörler tek başına veya başka sensörlerle birlikte kullanılabilirler. En yaygın olarak kullanılan optik sensörler çizgisel okuma yapan kameralardır (line scan cameras). Uygulamaya bağlı olarak, eğer ki taneler arasındaki renk farkı yetersiz ise doku tanıma veya daha hassas algılama için çift taraflı kameralar da kullanılabilir. Bu sensörlerin ayırma prensibi, atık ve cevherin yüzey özelliklerinin tespit edilmesine dayalıdır. Tanelerin renk, parlaklık, saydamlık ve yansımalar gibi özellikleri arasında belirgin bir fark var ise o örnek için optik ayırıcı uygulanabilir (Wotruba, 2006). Bu nedenle doğru ve hassas algılama için malzeme yüzeyinin temiz olması önemlidir Madencilik sektöründe bilinen optik sensörler Color, VIS, NIR/IR ve UV sensörleridir.

Kızılötesi (IR) ışınların dalga boyu 700 nm ile 1,5 mm arasındadır. Bu spektrum kendi içinde 780-3000 nm dalga boyuna sahip yakın kızılötesi (NIR), 25000-1.000.000 nm dalga boyu olan uzak kızılötesi (FIR) ve 2500-25000 nm dalga boyuna sahip orta kızılötesi (MIR) olarak üç bölüme ayrılmaktadır (Robben, 2010). IR sensörlerin algılama prensibi, radyasyona maruz bırakılan tanelerin yüzey sıcaklıklarını ölçmeye dayalıdır. Bu sensörler, -272,15°C altındaki sıcaklık farklılıklarını bile tespit edebilir. Radyasyon için kullanılan mikrodalgalar, mineralleri seçici olarak ısıtmaktadır. İnce sülfür taneleri mikrodalgalarla hızlı bir şekilde ısınırlar ve böylece bulundukları cevherin tespiti kolaylaşır. Ayrıca bu taneler ısındıklarında tüm cevheri ısıtabilirler ve genel olarak cevherde bir sıcaklık artışına neden olurlar. Sülfür tanelerinden yayılan ısı, bağlı mineraller aracılığıyla tanenin yüzeyine ulaşır ve cevherin algılanabilmesine neden olurlar. Hızlı kızılötesi kameraların çözünürlüğü yaklaşık 2 mm'dir ve bu sensörlerle ince sülfür tanelerinin tespiti zordur. Madencilik sektöründe IR sensörlerle cevherlerin algılanabilirliği araştırma aşamasındadır (Wotruba, 2006).

Bu gruptaki bir diğer sensör, yakın kızılötesi (NIR) sensörüdür ve çalışma prensibi tanelerin NIR bölgesindeki (780-3000 nm) ışınımına ve yüzeyden yansıyan ışığın algılanma ve analizine dayalıdır. NIR aktif moleküllerdeki atomların uyarılmasıyla, molekülde titreşim meydana gelir ve yansıyan dalgaya göre örnek malzemenin mineralojik bileşimi belirlenebilir. Yansıyan dalga her tanenin mineralojik bileşimi için karakteristiktir (Knapp vd., 2014). Tablo 1.3'te NIR aktif mineral grupları verilmiştir.

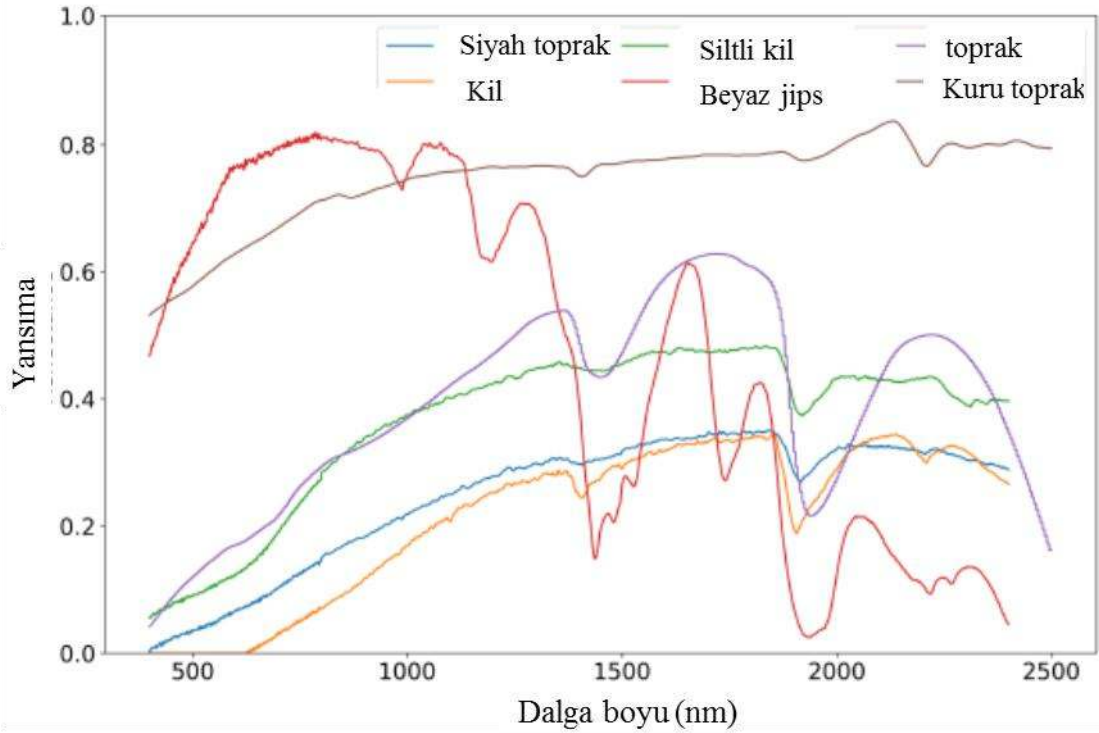
Tablo 1.3. NIR aktif mineral grupları (Robben ve Wotruba, 2010)

NIR aktif mineral grupları	Mineraller
Fillosilikatlar	Kil mineralleri, klorit, serpantin mineralleri
Hidroksile silikatlar	Epidot, Amfibol
Sülfatlar	Alunit, jarosit, alçı taşı (jips)
Karbonatlar	Kalsit, dolomit, ankorit, manyezit, rodokrozit
Amonyum içeren mineraller	Budingtonit, NH ₄ -illitler, alünit grubu mineraller

Bazı moleküler bağlar, NIR bölgesinde emilim özelliği gösterirler. Emilim özelliği sayesinde NIR ayırıcılarla cevheri ayırmak mümkün hale gelmektedir. NIR bölgesinde emilim gösteren moleküler bağlar Tablo 1.4’te verilmiştir.

Tablo 1.4. NIR bölgesinde emilim özelliği gösteren moleküler bağlar (Robben, 2010)

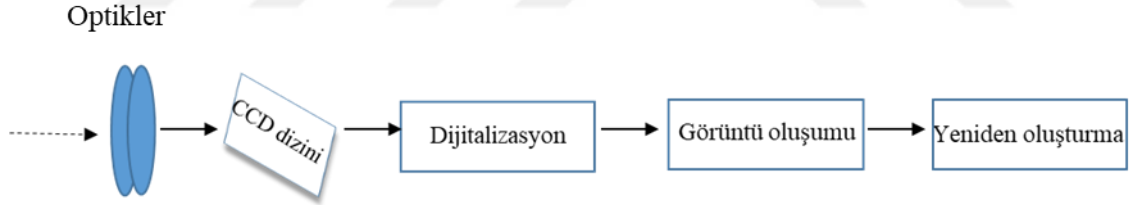
Moleküler bağlar	Birim	NIR emilim bandı
Hidroksil (OH)	nm	1400, (1550, 1750, 1850)
Su (H ₂ O)	nm	1400, 1900
Karbonat (CO ₃)	nm	2300-2350, 2550, (1780, 1990, 2155)
Amonyak (NH ₄)	nm	2020, 2320, 1560
FeOH	nm	2230-2295, (2330)
MgOH	nm	2300-2360, (2250)
AlOH	nm	2160-2220, (2200)



Şekil 1.5. Farklı minerallerin NIR bölgesindeki farklı emilim özellikleri (Adams vd., 2018)

Şekil 1.5'te kil, siyah renkli toprak, siltli kil, toprak, kuru toprak ve beyaz jipsin NIR bölgesindeki davranışları gösterilmiştir. Grafik üzerindeki her bir eğri bir minerale aittir. Eğrilere göre mineraller, farklı NIR dalga boylarında farklı emilim özelliği göstermektedir. Her mineralin emilim miktarı kendine özgüdür.

Görünür ışık (VIS) ve renk ayırıcı (Color) sensörler, elektromanyetik spektrumun görünür ışık aralığında (390-780 nm) çalışan sensörlerdir. VIS sensörlerin algılama ve görüntüleme yöntemi, insan gözü algısına benzer görüntüler oluşturur. Işığa duyarlı (Photosensitive) cihaz ışık yoğunluğunu ölçer, ışığı ölçülebilen voltaj sinyallerine dönüştürür ve farklı bir alanda görüntü yeniden oluştururlur. Optik sistemlerle kombinasyon halinde çalışan bu tür cihazlara katıhal kamera (Solid-state camera) veya dijital kameralar denilir. VIS aralığındaki ışınları ölçebilmek için belirli elektronik bileşenlerin bir arada çalışması gereklidir. Bu sensörlerin ana bileşenleri; optikler, dedektörler ve veri dijitalizasyonudur (Nienhaus vd., 2014). Şekil 1.6'da görünür ışık sensörlerin bileşenleri gösterilmiştir. Bu sensörler iletişim (Nienhaus vd., 2014) ve gıda sektöründe (Davies, 2000) kullanılmaktadır.



Şekil 1.6. VIS sensörlerin görüntüleme bileşenleri (Nienhaus vd., 2014)

Renk ayırıcı sensörler (Color sensors), VIS sensörleri gibi görünür ışık aralığında çalışırlar ve tane yüzeylerindeki renk, şeffaflık ve parlaklık farklılıklarının saptanmasına dayalı bir ayırma gerçekleştirirler. Bu ayırıcılarda, sensör tarafından toplanan verilerle görüntü oluşturulur. Bu görüntüler daha sonra görüntü analiz yazılımı ile analiz edilir. Sonuçlar, önceden kalibrasyon için belirlenen renk ve parlaklık sınıfları ile karşılaştırılır. Böylece farklı tanelerin karakterizasyonu yapılmış olur. Renk ayırıcılarının endüstriyel ölçekli uygulamalarına örnek kalsit, kuvars ve feldspat cevherleri verilebilir. Ancak bunların yanısıra altın, değerli taşlar ve kromit cevheri için de başarılı uygulamalar mevcuttur (Knapp vd., 2014). Renk ayırıcı sensörle örnek ayırma işlemi Şekil 1.7'de

verilmiştir. Bu işlemde fosfattan (beyaz renkli), daha koyu renge sahip silisli şist (çört) minerali ayrılmaktadır.



Şekil 1.7. Renk ayırıcı sensörle fosfattan, daha koyu renge sahip silisli şistin ayrılması (Tomra, 2020)

Bir diğer optik sensör, Morötesi (UV) sensörüdür. Bu sensörler yüksek hassasiyetli optik sensörler olarak adlandırılırlar. UV sensörlerin algıladığı dalga boyu 10-400 nm aralığındadır. Birçok mineral UV ışığına maruz kaldığında floresans özelliği gösterir. Floresans özelliğinin nedeni aktivatörlerdir. Nadir toprak elementleri, titanyum, vanadyum, krom ve çeşitli diğer element ve mineraller de aktivatör olarak görünebilirler. Floresansın gücü, uyarıcı UV ışık kaynağının gücüne ve mineralin kendisine bağlıdır. Optik ayırıcılarda kullanılan normal kameralar, UV uygulamaları için yeterli hassasiyete sahip olmadıklarından dolayı, yüksek hassasiyetli optik kameraların kullanılması gereklidir. (Wotruba, 2006). Tablo 1.5'te bilinen floresan özellikli mineral grupları ve floresan yüzdeleri gösterilmiştir.

Tablo 1.5. Bilinen floresans özellikli mineral grupları ve floresans yüzdeleri (Wotruba, 2006)

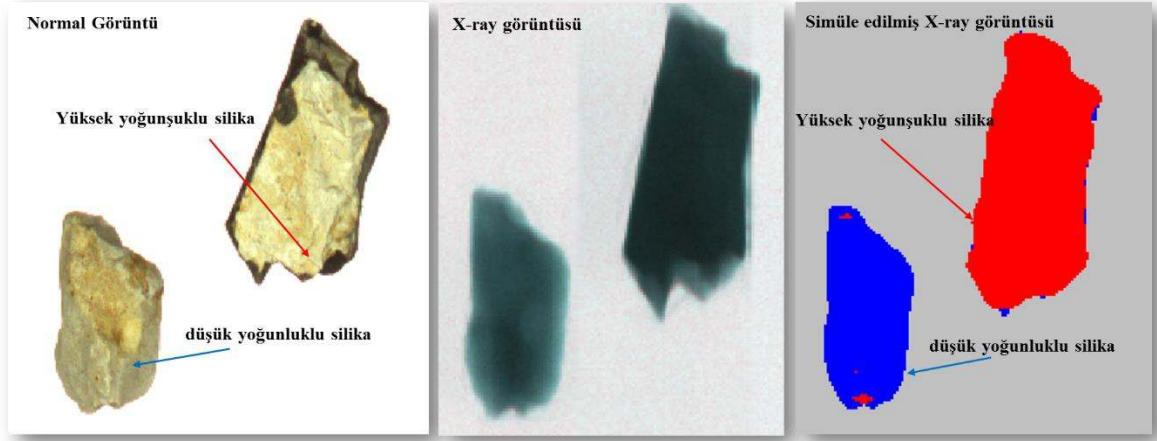
Mineral Grubu	Birim	Floresans
Elementler	%	< 1
Sülfürler	%	5
Sülfürlü tuzlar (Sulfosalts)	%	0
Oksitler/Hidroksitler	%	5
Halitler	%	15
Karbonatlar	%	30
Boratlar	%	30
Sülfatlar	%	10
Fosfatlar/Arsenatlar	%	10
Volframitler (Tungstatlar)	%	15
Silikatlar	%	20

1.3.2. X-ışını Sensörleri

X-ışınları 0,01-10 nm dalga boyuna sahiptirler. Bu ayırıcılarda malzeme X-ışınına maruz bırakılır ve sensör tarafından emisyon yoğunluğu ölçülerek cevher tanımlaması gerçekleşir. X-ışınları, örnek malzemenin atom çekirdeğinin etrafını saran elektron bulutundan kaynaklanmaktadır (Adams ve Gasparini, 1970).

X-ışınlarından yararlanan X-ışını floresansı (XRF), X-ışını lüminesansı (XRL), X-ışını iletimi (XRT) ve dual-energy XRT (DE-XRT) gibi çeşitli analitik yöntemler mevcuttur.

XRT'nin en bilinen uygulaması havaalanlarındaki bagaj tarama sistemidir. Beslenen malzeme 90-200 keV enerji aralığında X-ışınlarına maruz bırakılır. Sensör, malzemedan iletilen radyasyonu yaklaşık 1 mm uzamsal çözünürlükle algılar ve malzemenin atom yoğunluğu ve kalınlığına dayalı bir görüntü oluşturur. Uzamsal veya açısal çözünürlük bir mikroskop, kamera vb görüntü oluşturan araçların çözünürlük gücünü ifade etmektedir (URL-1, 2020). Atom yoğunluğu yüksek olan mineraller cevher olarak algılanır ve genellikle koyu renkle gösterilir. Yoğunluğu düşük olan mineraller atık fraksiyonuna gönderilir. Şekil 1.8'de XRT ayırıcıların, silika ayırma işlemi için oluşturduğu görüntü verilmiştir.



Şekil 1.8. XRT ayırıcıların, ayırma işlemi için oluşturduğu görüntü (Tomra, 2020)

Malzeme kalınlığından dolayı meydana çıkacak olan algılama problemlerini ortadan kaldırmak ve daha hassas bir ayırma işlemi gerçekleştirmek için DE-XRT olarak adlandırılan çift XRT sensör hattı kullanılmaktadır (Wotruba, 2010). Bu sensörler tanelerin ortalama atom numarasını ve yaklaşık hacimini belirleyerek ayırma yapmaktadırlar (Dalmijn ve De Jong, 2004; Mesina vd., 2007). XRT sensörü madencilik endüstrisinde birçok mineral için kullanılabilir. Buna örnek olarak endüstriyel mineraller, değerli taşlar, demir içeren ve demir içermeyen metaller, kömür ve metal cürufları verilebilir (Tomra, 2020).

XRF, elementel analiz için kullanılan bir tekniktir. Malzeme radyasyona maruz bırakıldıktan sonra üzerinden yansıyan floresans ölçülür. XRF cihazı, malzemenin elementel yapısı hakkında bilgi vermektedir (Nienhaus vd., 2014). Bu teknik laboratuvarlarda numunelerin kimyasal analizi için de kullanılmaktadır (Wotruba, 2010). XRF geri dönüşüm endüstrisinde benzer renkli plastikleri ayırmak için kullanılmaktadır (Dalmijn ve De Jong, 2004). Ancak, madencilik sektöründe XRF ayırıcı uygulaması araştırma aşamasındadır.

Elmas kazanımı için kullanılan en bilindik yöntem XRL veya X-ray lüminesans ayırıcıdır. Elmaslar X ışınlarına maruz kaldığında, 450 nm dalga boylarında lüminesans özelliği gösterirler. XRL sensörü, elmasın lüminesans özelliğinden yararlanarak cevheri gangdan ayırır. Cevher, besleyici vasıtasıyla tek tabaka olacak şekilde ayırıcıya beslenir. Daha sonra malzeme X-ışını radyasyonuna maruz bırakılır ve elmasın lüminesansına neden olur. Tespit edilen lüminesans özellikli cevherler hava veya mekanik güç ile ayrılır.

(Danoczi ve Koursaris, 2008). Bu sensör, endüstriyel ölçekte güney afrikada Karowe Elmas Madeni'nde kullanılmaktadır.

1.3.3. Elektromanyetik Sensörler (EM)

Elektromanyetik sensörler veya metal dedektörler, sensör temelli ayırma uygulamalarında iletken malzemelerin veya metallerin malzeme akımından ayrılması gerektiği durumlarda kullanılmaktadır (Knapp vd., 2014). Bu sensörlerin hassasiyeti tane boyutuna bağlı olarak 2 ila 200 kHz arasında değişmektedir. Sensör ve tane arasındaki mesafe arttıkça algılama şiddeti azalır. Bu sensörler malzemedeki iletken parçacıkların miktarı ve boyutunu tespit edebilir, ancak tenör hakkında bilgi vermez (Wotruba, 2006).

1.3.4. Radyometrik Sensörler (RM)

Radyometrik sensörlerle minerallerin ayrılması ilk defa 1940'lı yıllarda Kanada'da uranyumdan kalsiti ayırmak amacıyla uygulanmıştır. Bu sensörler cevherleri doğal radyoaktivite özelliğine göre ayırmaktadır. Yani her cevherin doğal radyoaktivite özelliği bir gösterge olarak kullanılabilir. Radyometrik sensörlerle algılama uygulamalarına örnek olarak uranyum cevheri ve yüksek uranyum içerikli altın cevherinin doğal radyoaktivite özelliklerine göre sınıflandırılması gösterilebilir. Her bir tanenin radyoaktivite özelliği, bir konveyör bantın altına monte edilmiş sintilatörler tarafından algılanır. Sintilatör, dedektörlerde sintilasyon maddesinin G-ışınımı gibi yüksek enerjili bir radyasyon ile uyarılması ve fotonların yayılmasına neden olmaktadır. G-ışınımı veya gama ışınımı, gama dalgalarıyla gerçekleşen radyasyon işlemidir. Gama ışınlarının dalga boyları 0,03-0,003 nm aralığındadır. Bu dalagalar elektromanyetik spektrumdaki en küçük dalga boyuna ve en yüksek enerjiye sahiptirler (URL-2, 2020). Yayılan fotonlar, foto çoğaltıcı tüpün ışığa duyarlı bir katoduna yönlendirilir ve daha sonra katottan elektron salınımına neden olur. Elektron miktarı yeterince arttıktan sonra, elektrik resistörüne yönlendirirler. Bu da parçacıkların algılanması ve karakterizasyonu için kullanılır (Knapp, 2014).

Bu teknolojinin uygulaması örnek olarak Kanada'da Eldorado Uranyum Madeni ve Amerika'da Schwartzwalder Madeni gösterilebilir.

1.3.5. Mikrodalga Sensörler (MW)

Mikrodalgalar (MW) 1–300 mm dalga boyu aralığına sahiptirler. Elektromanyetik dalga enerjisi, bir malzeme tarafından emildiğinde, kristal kafes içindeki moleküllerin hareketlerinden doğan sürtünme enerjisi, ısı olarak açığa çıkacaktır. Mikrodalga radyasyonunu emen materyaller dielektrik olarak tanımlanır. MW sensörler, malzemenin dielektrik özelliğinden ayırma için yararlanır (Kingman vd., 1999). Mikrodalga teknolojisi malzemenin nem tayini için (Cutmore vd., 2000) ve termal enerji yardımıyla cevher serbestleştirmede kullanılmaktadır (Kingman vd., 2004). Kömür ve demir cevherlerinin karakterizasyonu ve nem içeriğinin ölçümü için mikrodalga uygulamaları bulunmaktadır (Odoudo, 2010).

1.3.6. LIBS ve LIF Sensörler

Lazer Etkileşimli Kırılma Spektroskopisi (LIBS), Lazer Etkileşimli Plazma Spektroskopisi (LIPS) veya lazer kıvılcım spektroskopisi (LSS) olarak da bilinir ve son yirmi yılda hızlı bir şekilde gelişen analitik tekniktir. Bu metodun prensibi, numunenin bir miktarını buharlaştıran plazma bulutu üretmek için, düşük pulslu bir lazer ve odaklama lensi kullanmaktır (Cremers, 2013). Başka bir deyişle, LIBS algılama sistemi, darbeli lazerle plazma üreterek, yüzey üzerindeki tek bir noktanın temel bileşimini ölçmektedir (Wotrubu, 2006). Bu teknoloji bant konveyör üzerindeki besleme malzemesinin tenör kontrolü için kullanılmaktadır (Gaft, 2006).

LIBS sensörler, madencilikte numunedeki mineral bileşimini incelemek için de kullanılırlar. Laboratuvar ölçekli sensörle numunede bulunan Cu, Cr, Ca, Mg, Yn, Ti, Si, Fe ve Al içeriği ölçülebilir. Bu sensörler taşınabilir cihaz olarak geniş ve yaygın kullanım alanlarına sahiptirler. Ancak madencilikte endüstriyel ölçekli sensörler üzerine çalışmalar devam etmektedir (Nienhaus vd., 2014). Alüminyum alaşımlarını ayırmak için kullanılan pilot ölçekli LIBS ayırıcı mevcuttur (Mutz vd., 2003).

Lazer etkileşimli floresans (LIF), bir yüzey algılama tekniğidir. Ayrıca moleküler titreşim analiz yöntemi olarak da bilinmektedir. Malzemedeki moleküller yüksek darbeli lazer ışığıyla aktive edilirler ve titreşimli duruma gelmeleri için uyarılırlar. Bunun sonucu floresans adı verilen ve 102 ns lik bir ömre sahip olan ışın emisyonu meydana çıkar (Nienhaus, 2014). Bu yöntemin avantajı, standart UV lambası kullanarak floresans

olmadığı bilinen minerallere floresans özelliği kazandırmaktır (Wotruba, 2006). LIF çeşitli hammadde projelerinde denenmiştir ve endüstride çok nadir rastlanan bir tekniktir. Madencilikte yüksek floresans özelliği olan şeelit ayırımı için kullanımı örnek olarak verilebilir (Nienhaus vd., 2014). Tablo 1.6’da madencilik sektöründeki ayırıcılar için kullanılan sensörler ve özellikleri özet tablo halinde verilmiştir.

Tablo 1.6. Madencilik sektöründeki sensör temelli ayırıcılar için kullanılan sensörler ve özellikleri

Sensörler	Ölçülen özellikler	Algılama metodu
Optik sensörler - CCD kameralar	Yansıma, soğurma, parlaklık, görünür ışının iletimi	Aktif yüzey ölçümü
XRT sensörleri	X ışını iletimi	İletim ölçer
NIR sensörler	Yakın kızılötesi ışınlarının soğurması ve yansıması	Aktif yüzey ölçümü
XRF sensörler	X-ışını radyasyonu altında yansıyan x-ışını floresansı	Aktif yüzey ölçümü
EM sensörler	Elektiriksel iletkenlik ve duyarlılık	Endüktif ölçüm
RM sensörler	Doğal radyoaktivite özelliği	Pasif ölçüm

1.4. Sensör Temelli Ayırıcıların Cevher Hazırlamadaki Kullanım Alanları

Sensör temelli ayırıcılar, cevher hazırlamanın farklı aşamalarında çeşitli amaçlar için kullanılabilirler. Bu aşamalar ön zenginleştirme, cevheri türüne göre ayırma, ara ve nihai ürünün elde edilmesi olarak bilinmektedir.

Sensör temelli ayırıcılarla, tüvenan cevherden gangı uzaklaştırmak veya döküm sahası malzemesinden cevheri kazanma işlemi, ön zenginleştirme işlemi olarak bilinmektedir. Ön zenginleştirme aşaması için uygulanan sensör temelli ayırıcıların başlıca avantajları aşağıdaki gibidir (Wotruba ve Harbeck, 2010);

- i. Yükleme ve nakliyat maliyetlerini azaltmak
- ii. Maliyeti yüksek olan cevher zenginleştirme giderlerin azaltmak
- iii. Enerji, su ve reaktif giderleri gibi diğer işletme maliyetlerinin azalması
- iv. Çevresel etkiyi azaltmak
- v. Maden kaynaklarını verimli kullanarak işletme ömrünü arttırmak

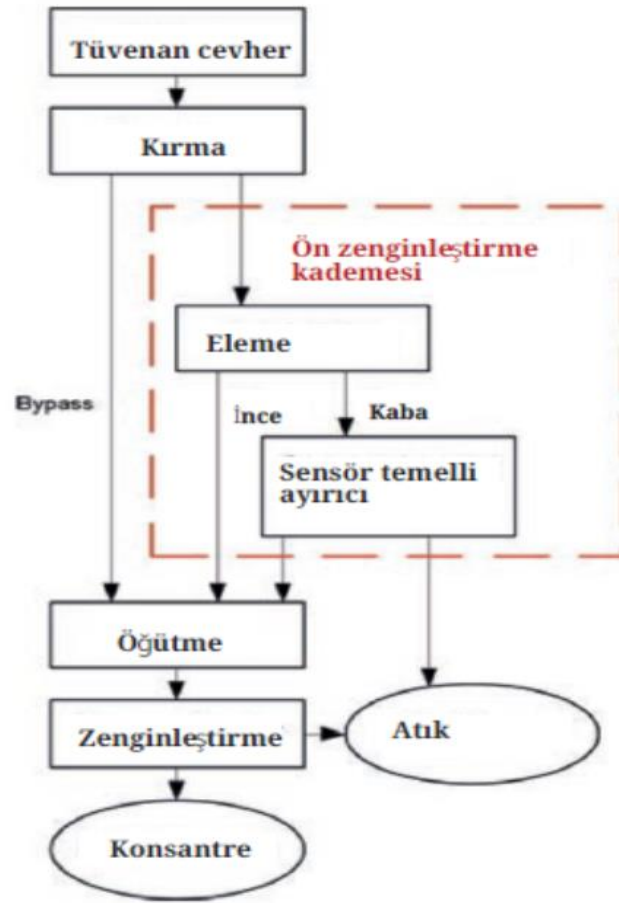
Sensör temelli ayırıcılar, cevheri türüne göre ayırmak içinde kullanılabilirler. Farklı cevher türlerini birbirinden ayırarak, özelliklerine göre zenginleştirme işlemlerine tabi tutulur. Bu işlem, toplam tesis verimininde artışına neden olur (Wotruba ve Neubert, 2014). Ara veya nihai konsantre alma kademesi için entegre edilen ayırıcıların amacı, 1mm ve daha iri boyutlardaki yüksek tenörlü cevherleri ayırarak konsantre elde etmektir. Bu işlem genellikle serbestleşmiş veya tenörü yüksek cevherler için uygulanmaktadır.

1.4.1. Ön Zenginleştirme

Her hangi bir zenginleştirme işlemi yapmaksızın, sensör temelli ayırıcılarla tüvenan cevherden gangı uzaklaştırmak veya atık malzemedan cevheri kazanma işlemine ön zenginleştirme adı verilir. Ön zenginleştirme kademesinden amaç, yüksek verim elde etmektir. Bu durumda tenör ikinci öneme sahiptir (Wotruba ve Harbeck 2010).

1.4.1.1. Tüvenan Cevher Değerlendirilmesi

Sensör temelli ayırıcılarla ön zenginleştirme işlemi, tüvenan cevherden iri boyutlu gang mineralleri uzaklaştırmak için uygulanır. Bunun için cevher önce birincil kırma kademesi ile uygun boyutta serbestleştirilmelidir. Ardından elenerek ince malzemedan arındırılmalıdır. Bu işlem, ayırıcının verimli ve ekonomik şekilde çalışabilmesi için yapılmaktadır. Eleküstü malzeme ayırıcıya beslenerek atık ve konsantre fraksiyonlarına ayrılır. Ayırıcıdan çıkan konsantre, ince tüvenan cevher ile karıştırılarak ileri öğütme/zenginleştirme işlemleri için tesise beslenir (Wotruba ve Harbeck, 2010). Sensör temelli ayırıcılarla tüvenan cevherin ön zenginleştirilmesi Şekil 1.9'da gösterilmiştir.



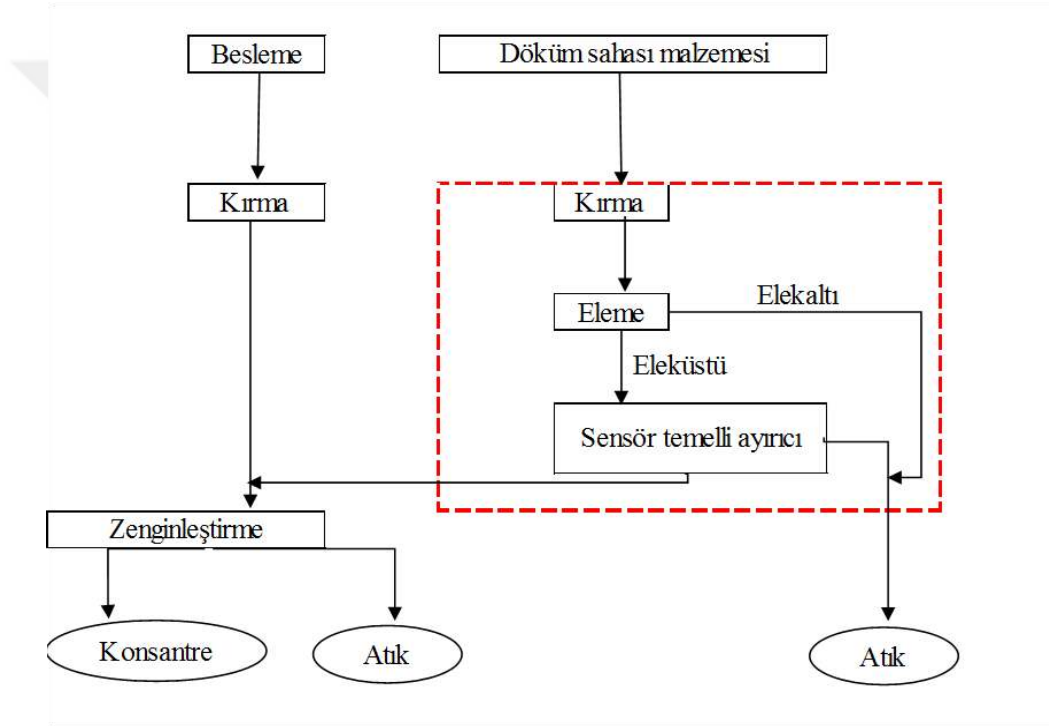
Şekil 1.9. Sensör temelli ayırıcılarla tüvenan cevherin ön zenginleştirilmesi (Knapp vd., 2014)

Çıkarılması ekonomik olmayan maden yataklarının (düşük tenörlü tüvenan cevher) sensör temelli ayırıcılarla değerlendirilmesi mümkündür. Gang malzemesinin miktarı fazla olduğu yataklarda kullanılan düşük maliyetli madencilik yöntemiyle beraber sensör temelli ayırma kademesi etkili bir kombinasyon şeklinde çalıştırılabilir. Bu yöntemle ekonomik sınır tenör düşürülerek, işletilmesi mümkün olmayan kaynaklar tekrardan işletilebilir hale getirilebilir ve cevher kaybı en aza indirgenmiş olur (Wotruba ve Harbeck 2010).

1.4.1.2. Atık Sahası Değerlendirmesi

Atıklardan geri kazanım, doğrudan ve dolaylı olarak iki şekilde mümkündür. Doğrudan ayırma uygulamalarına manyetik separatör örnek olarak verilebilir (Huang, 2010). Sensör temelli ayırma, dolaylı bir yöntem olarak ekonomik miktarda cevher içeren

eski atık sahalarının yeniden değerlendirilmesi için uygulanabilir. Cevher rezervlerinin azalmasıyla birlikte atık sahalarının değerlendirilmesi önem kazanmıştır. Atık sahaları, daha önce zenginleştirme işlemleriyle geri kazanılmamış, kayda değer miktarda yüksek tenörlü taneler içerebilirler. Atık sahalarında, maliyeti kurtarmak ve verimi artırmak için sensör temelli ayırıcılar zenginleştirme işlemleri ile birlikte kullanılabilir (Knapp vd., 2014). Endüstriyel ölçekte bu yöntem kalay cevheri için uygulanmıştır. Döküm sahası malzemesinin ön zenginleştirme kademesinde sensör temelli ayırıcıların entegrasyonu Şekil 1.10’da gösterilmiştir.

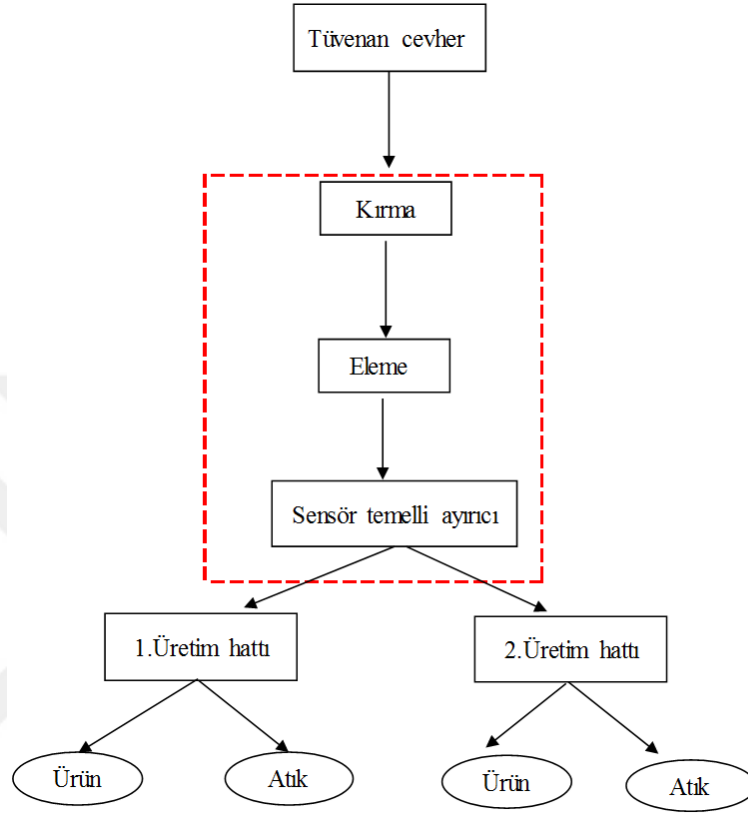


Şekil 1.10. Sensör temelli ayırıcılarla döküm sahası malzemesinin ön zenginleştirilmesi (Wotruba ve Harbeck, 2010)

1.4.2. Cevher Türüne Göre Ayırma

Sensör temelli ayırıcıları kullanarak, tüvenan cevherdeki iri taneleri özelliklerine göre ayırmak mümkündür. Bu özelliklere örnek olarak tenör, mineralojik yapı ve sertlik verilebilir. Böylece ayrılan farklı cevher türleri, özelliklerine dayalı ayrı ayrı değerlendirilebilir. Bu yöntem işletmedeki üretilen cevher miktarını ve dolayısıyla işletme gelirini artırmaktadır. Bir işletmede birden fazla tesis hattı kurulacaksa, üretilen cevher; (cevherler) ilk yatırım ve işletme maliyetlerini zaman içerisinde karşılamalıdır. Şekil

1.11’de sensör temelli ayırıcılarla cevheri türüne göre ayırmanın şematik görüntüsü gösterilmiştir.



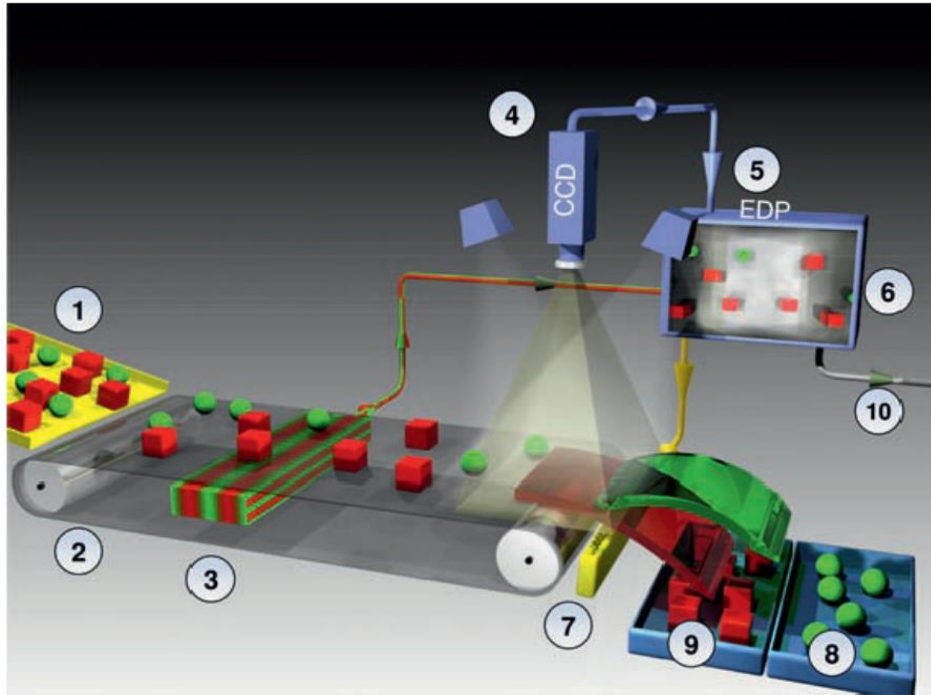
Şekil 1.11. Cevheri türüne göre ayırma işleminde sensör temelli ayırıcıların entegrasyonu (URL-8)

1.4.3. Ara ve Nihai Ürün Kazanımı

Sensör temelli ayırıcılarla 1 mm'nin üzerindeki boyutlarda, tamamen serbestleşmiş malzemeden nihai ürün elde edilebilir. Bu aşama temizleme kademesi olarak bilinir ve nihai ürünün elde edilmesi için uygulanmaktadır. Bu uygulama için, elmaslar veya diğer değerli taşların nihai konsantrasyonu, tüvenan kaya tuzundan direkt olarak yüksek kaliteli tuz kazanımı ve endüstriyel minerallerdeki yüksek parlaklıkta cevherin ayrılması örnek olarak verilebilir (Wotruba ve Harbeck, 2010). XRT, XRF ve optik renk ayırıcı sensörler elmas, kalsit ve talk minerallerinin, tenörü yüksek ürün elde etmek için kullanılmaktadır (Wotruba ve Neubert, 2014).

1.5. Sensör Temelli Ayırıcıların Alt Süreçleri ve İşlevleri

1990'lı yıllardan itibaren, bilgisayar tabanlı hızlı dijital işleme tekniklerin ve yüksek çözünürlüğe sahip çizgisel tarama yapan kameraların gelişmesi, yenilikçi ve daha verimli optik ayırıcıların üretilmesini sağlamıştır. Başlangıçta geri dönüşüm endüstrisi için tasarlanan bu ayırıcılar, 1 - 250 mm boyut aralığındaki taneleri ayırabilme kabiliyetine sahiptir. Ayırıcıların farklı tane boyutlarına uygulanabilmesi ve cevherlerin sensör tarafından algılanabilirliği bu teknolojiyi cevher zenginleştirme içinde kullanılabilir hale getirmiştir. 1990'lardan günümüze neredeyse tüm elektromanyetik spektrumunu kapsayan yeni sensörler geliştirilmiştir. Modern sensör temelli ayırıcılar ile saniyede 40.000 taneyi algılama ve saatlik 200 ton ürünü ayırmak mümkündür (Wotruba ve Harbeck, 2010). Şekil 1.12'de sensör temelli ayırıcıların genel çalışma prensibi gösterilmiştir.

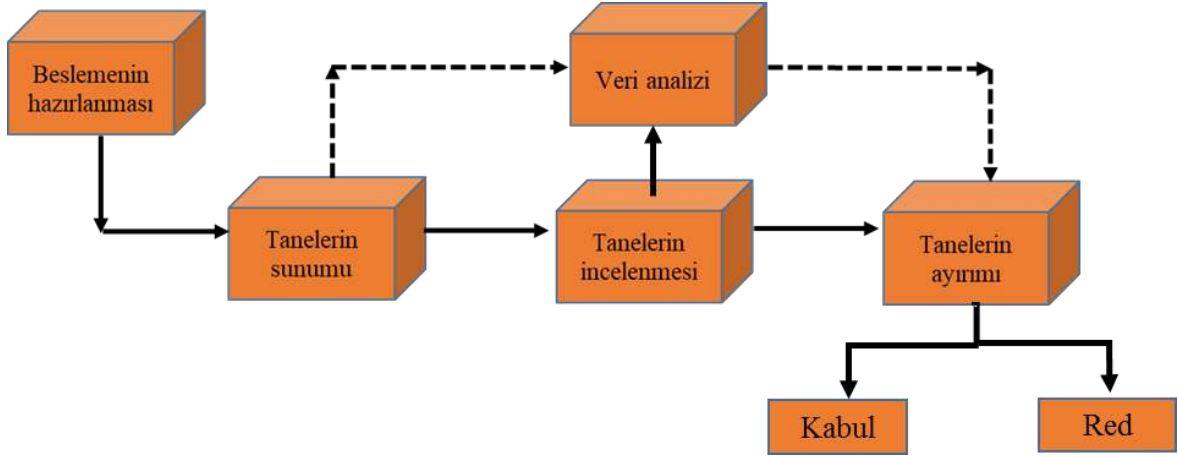


Şekil 1.12. Sensör temelli ayırıcıların genel çalışma prensibi (Wotruba ve Harbeck, 2010)

- i. Ayırma işlemi öncesi, malzemenin sensör tarafından doğru algılanabilmesi için yapılan temel işlem beslemenin hazırlanmasıdır. Bu işlem malzemenin uygun boyutta kırılması, elenmesi ve gerekli durumlarda yıkanmasından ibarettir. (1)
- ii. Bu adımda cevherin izolasyonu ve sensöre sunumu yapılır. Sensör temelli ayırma sistemi, tanelerin tek tek taranıp ayrılmasına dayalı bir teknoloji olduğu için, her bir tane ayrı ayrı ve diğer tanelerden yeterli mesafede ayrılarak sensöre sunulmalıdır. Bant tipi ayırıcılarda, malzeme 2 ile 6 m/s aralığında hıza sahip bir bant üzerinde sensöre sunulurken şut tipi ayırıcılarda, beslenen malzeme bir oluktan aşağı doğru serbest halde düşerek sunulmaktadır. (2)
- iii. Taneleri tanıma işlemi bir elektromanyetik radyasyon kaynağı, bir sensör veya birden fazla sensör kombinasyonu ile, elektromanyetik ışınların yansıması veya iletimini algılayarak gerçekleşir. (3) ve (4)
- iv. Algılama sonucu elde edilen veriler merkezi işlem birimine (MİB) gönderilir. Burada taneler tek tek elektronik veri yardımı ile analiz edilir. (5) ve (6)
- v. Sonuçlara dayalı her bir tane için kabul/ret kararı verilir. İşlem sonucu mekanik ayırma sistemi aktifleşir. (7)
- vi. Çoğu sistemde, mekanik ayırma işlemi bir dizi yüksek hızlı havalı vanalar tarafından gerçekleşirken, bazı durumlarda mekanik kanatlar veya su jetleri uygulanabilir. Ancak madencilikte tercih edilen yöntem hava vanalarıdır. Ayırma işleminin en son aşamasında, taneler kabul 'edilmiş' (8) veya 'reddedilmiş' (9) olarak ilgili alana gönderilir.
- vii. Ayırıcı cihazı uzaktan kontrol sistemine de bağlanabilir (10) (Wotruba ve Harbeck, 2010).

Sensör temelli ayırıcılarda ayırma işlemi Şekil 1.13'te gösterildiği gibi, birbiriyle bağlantılı dört temel kademedен oluşmaktalar (Salter, 1991). Bu kademeler:

- Tanelerin (beslemenin) hazırlanması
- Tanelerin sunumu
- Algılama ve veri analizi
- Tanelerin ayırımı



Şekil 1.13. Ayırıcıların genel konfigürasyonu (Manouchehri, 2003)

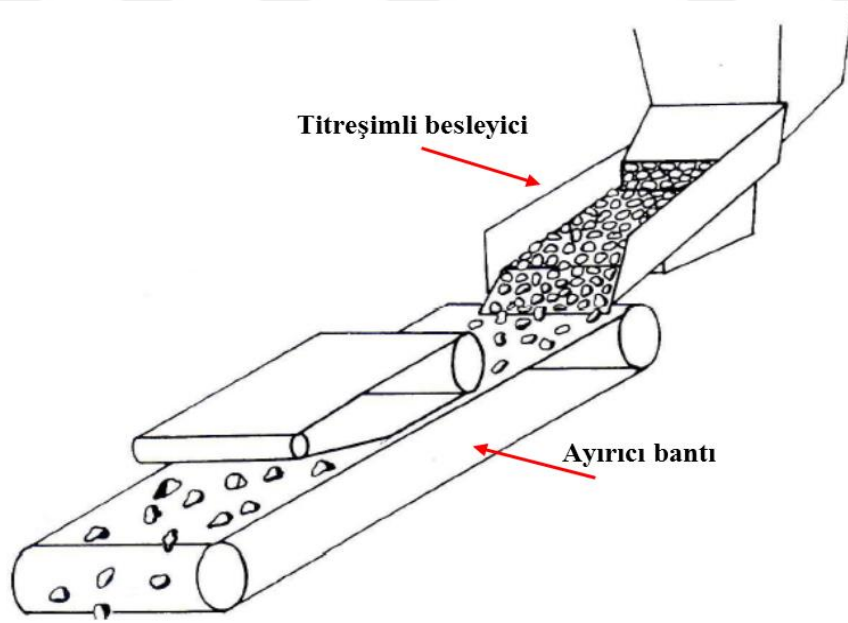
1.5.1. Tanelerin Hazırlanması

Ayırma işlemine başlamadan önce yapılan en önemli işlemlerden birisi beslemeyi hazırlamaktır. Buradaki amaç, tanelerin birbirine temas etmeden ve aralarındaki yeterli mesafeyi koruyarak, tek tabaka halinde sensöre sunulup seçici bir şekilde kabul veya reddedilmelerine izin vermektir.

Bu koşulları sağlamak için, ilk önce malzeme kırma işlemi ile uygun tane boyutuna getirilir ve elemeye farklı tane boyutlarına ayrılır. Malzemenin yüzeyi temiz olması gerektiği durumlarda yıkama, aşındırma veya kurutma işlemleri uygulanabilir. Optimum tane boyut aralığını tayin etmek için, çeşitli faktörler göz önünde bulundurulur. Bu faktörlerden birisi sensörün çözünürlüğüdür. Cevher ayırmada optimum çözünürlük için tane boyutu 1 ile 300 mm aralığında olmalıdır. Ayrıca minimum ve maksimum tane boyut oranı 1:3'ü geçmemelidir. Sensör temelli ayırma işlemi taneleri tek tek algılama ve ayırmaya dayalı olduğu için tane boyutu ürün miktarında da önemli rol oynamaktadır. Dolayısıyla iri taneli beslemenin ürün çıktısı ince taneye nazaran daha fazladır (Knapp vd., 2014).

1.5.2. Tanelerin Sunumu

Algılama işlemine başlamadan önce, taneler izole edilmelidir. Bu işlem tanelerin tek tek algılanabilmesi ve mekanik güçle ayrılması için gereklidir. Şöyleki, taneler ayırıcıya beslenmeden önce, besleme oluğundan geçer. Besleme oluğu, titreşimli bir besleyicidir ve tanelerin kontrollü hızlanması ve sabitlenmesi sağlar. Titreşimli besleme, tanelerin ayırma alanında veya bant üzerinde yayılmasına ve birbirinden ayrı ayrı durmasına neden olur (Knapp vd., 2014). Böylece, tanelerin zıplama, üst üste oturma, bulunduğu yörüngeden sapma gibi ayırma verimini negatif etkileyecek davranışlar engellenmiş olur. Bant tipi ayırıcılarda, en ideal tane davranışı besleme oluğundan çıkan tane ile bant hızının aynı olması durumunda gözlenmektedir (Udoudo, 2010). Şut tipi ayırıcılarda, taneler banta beslenmek yerine serbest olarak düşerler ve düşüş esnasındaki yörüngeleri üzerine algılama ve ayırmaya tabi tutulurlar. Hassas ve güvenilir bir algılama ve ayırma işlemini gerçekleştirmek için tanelerin birbirinden optimum mesafede olması ve üst üste binmemeleri gerekmektedir (Knapp vd., 2014). Şekil 1.14’te titreşimli oluk ile malzemenin ayırıcı bandına sunumu gösterilmiştir.



Şekil 1.14. Titreşimli oluk ile malzemenin ayırıcı bantına sunumu (Udoudo, 2010)

1.5.3. Ağılama ve Veri Analizi

Cevher zenginleştirme alanında kullanılabilecek çeşitli algılama sistemleri mevcuttur. Sensör temelli ayırma yönteminin yanı sıra, cevher minerolojisi hakkında bilgi veren X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop gibi çeşitli algılama yöntemleri mevcuttur.

X-ışınlarıyla ilgili çalışmalar ilerledikçe, elektromanyetik ışının özellikleri kullanılarak birçok analiz yöntemi geliştirilmiştir. Bunlardan biri de, karakterizasyon çalışmalarında kullanılan X-ışınları difraktometresi (XRD)'dir. XRD cihazı X-ışınları prensibiyle çalışmaktadır. Spektroskopik yöntemlerden olan XRD'nin temel çalışma prensibi X-ışınlarının kırınımıdır. Yapay X-ışını üreten tüpe sahip cihaz elektromanyetik dalga ile aynı dalga boyuna sahip olacak şekilde saçılım gösterir. Numunenin yüzeyi X-ışınının doğru bir açıyla kırılması ve saçılması için pürüzsüz olmalıdır. Hazırlanan numuneye X-ışını gönderilir ve Numuneye isabet eden X-ışınları, farklı açı (α , β , γ) ve şiddetlerde yansır. Böylelikle X-ışınları, analiz edilen maddenin içeriğinde gözlenen mineralojik ve elementel bileşimi tespit eder (Öz ve Özer, 2019)

SEM mineral analiz sisteminde, minerallerin dijital görüntülemesi, alanı bir elektron ışınıyla tarayarak ve geri saçılmış elektron dedektör (BSE) çıktısının dijitalizasyonunu gerçekleştiren, CCD kameralar kullanarak yapılabilir. Alternatif olarak, SEM görüntülerindeki minerallerin renk farklılıklarına dayalı algılama yapan bir X-ışını detektörü de (EDX) kullanılabilir. Bunun sonucunda, mineral tanelerinin tanınmasının yanı sıra miktarları, tane boyut dağılımı ve serbestleşme derecesi de belirlenebilir.

Piyasada CSIRO ve JKMRC tarafından geliştirilmiş, QEMSCAN ve mineral liberasyon analizörü (MLA) olarak iki çeşit SEM tabanlı ürün bulunmaktadır. QEMSCAN sistemi sadece BSE görüntüleri kullanır ve alet, ölçüm için EDX analizi üzerine ilerler. Parçacık haritalama adı verilen işlemde tane kesitlerinin dijital görünümü oluşturulur. Burada piksellerin oluşumu binlerce X ışını ölçümüyle gerçekleşmektedir. Ancak, her piksel ve mineral için analiz yapmak oldukça pahalı ve zaman alıcıdır.

MLA sistemi, tanedeki mineral kompozisyonunu tanımlamak için, her gri bölge için daha az sayıda X-ışını analizini gerçekleştirir. BSE gri skala değeri başlıca faz ayırımı için kullanılmaktadır. Bu değer katı maddelerde ortalama atom yoğunluğuna göre değişmektedir. Ancak, çok yakın ortalama atom numarasına sahip fazları, ayırt edebilmek için X-ışını verileri kullanılmalıdır. Bu sınırlamaya rağmen, pentlandit ve kalkopirit gibi

benzer gri seviyeli mineralleri içeren cevherler için uygulanmaktadır. Bu durumda, tanelerin mineral haritalarını oluşturmak için noktalı haritalama tekniği kullanılır. Çok sayıda X-ışını analizi gerektiren bu yaklaşım son derece zaman alıcı ve maliyetlidir. Elektron geri saçılım katsayılarındaki varyasyonları önlemek için, karbon kaplama kalınlığı iyi kontrol edilmelidir (Köse vd., 2012).

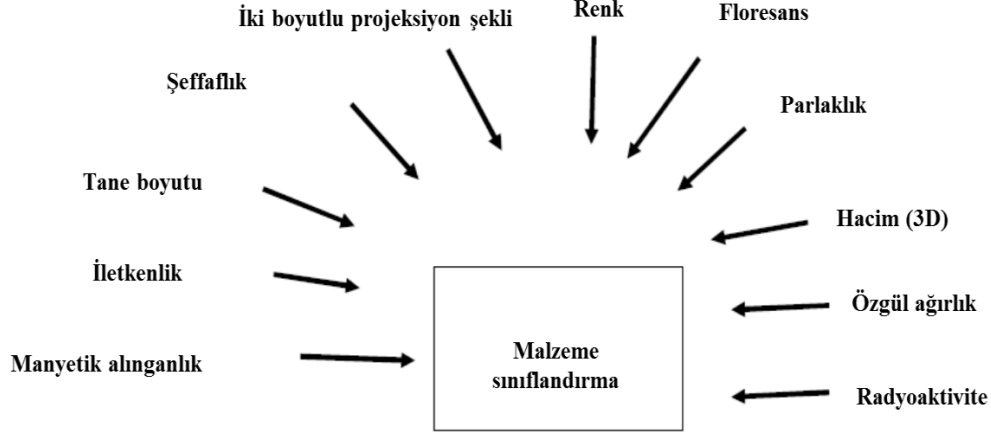
SEM tabanlı sistemlerin bazı dezavantajları şunlardır: İlk yatırım ve işletme maliyetleri çok yüksektir, ayrıca tozsuz ve sıcaklık kontrollü bir ortamda çalıştırılmalıdır. Bu tür kısıtlamalar, veri hassasiyeti, basitliği ve maliyet gereksinimleri ile uyumlu, daha sağlam, daha ucuz ve bakımı yapılabilir bir sistemin geliştirilmesini teşvik etmektedir (Lane vd., 2008).

Optik mikroskop veya optik analiz mikroskobu küçük nesneleri büyötmek için merceklerden oluşan bir sistem ile görünür ışığı kullanan bir mikroskop türüdür (URL-9, 2021). SEM analizi gibi, optik analiz yönteminde kimyasal veriler olmadan daha etkileşimli bir modda benzer nicel bilgiler elde edilebilir (Benedictus vd., 2008).

Cevher mikroskobu cevher parçalarının parlatılmış kesitlerinde mineral tanelerinin incelenmesi için yansıyan renkler, çatlak, kristal yapısı ve benzeri bilgileri kullanmaktadır. Bu nedenle SEM temelli tekniklere göre poroziteyi belirlemede ve cevheri oluşturan temel mineralleri belirlemesinde daha etkilidirler. Optik mikroskop uygulamaları bazı mineral çiftlerinin hızlı ayrımı açısından faydalı olsa da, bu uygulamalar BSE görüntüleme (kalkopirit / pentlandit; hematit / pirit) ve EDX haritalama (hematit / manyetit / götit; markazit / pirit) ile uyumlu değildir (Köse vd., 2012).

Sensör temelli ayırıcıların algılama sistemleri, bir ışık kaynağı ve bir dedektörden (sensör) oluşmaktadır. Işık kaynağı floresans ve ışık yayan diyotlardan (LED) oluşabilmektedir. Dedektör ise iletkenliği ölçen sensörler, monokromatik, renk veya infrared kameralardan oluşmaktadır (Udoudo, 2010). Uygulanan ölçüm metoduna bağlı olarak, sensörler farklı pozisyonlarda monte edilebilirler. İletim agılama tekniklerinde, ışık kaynağı ve sensör malzeme akışının alt ve üst kısmında, birbirine karşıdan bakacak şekilde yerleştirilir. Yansımayı ölçen tekniklerde ise ışık kaynağı ve sensör aynı tarafta yan yana konumlandırılır (Knapp vd., 2014). Şut tipi ayırıcılarda sensör, serbest düşen tanelerin akış yönüne dik olacak şekilde yerleştirilmelidir (Udoudo, 2010). Ayırma işlemlerinde, algılama sistemi malzemenin özelliğine göre seçilmektedir. Şekil 1.15'te tanelerin algılanması için kullanılabilecek özellikler verilmiştir. Eğer sensörlerin biri, bir cevher

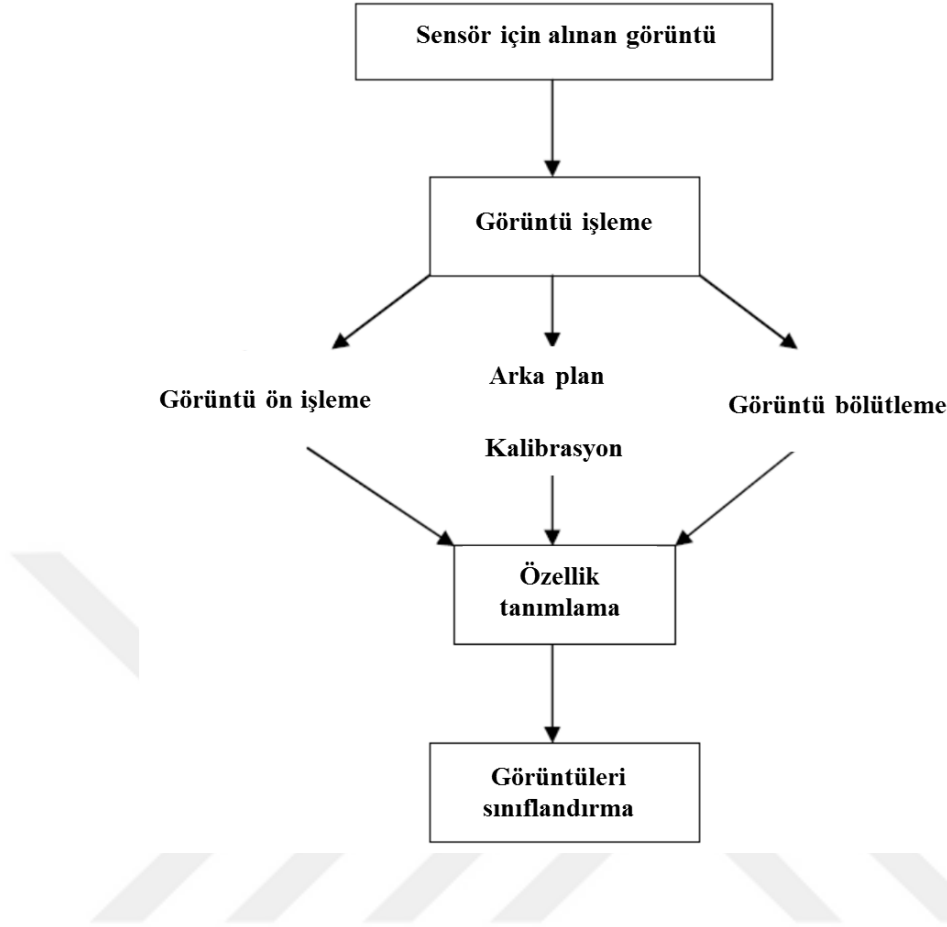
veya atığı algılayabiliyorsa sensör temelli ayırma tekniği o cevher veya atık için uygulanabilir.



Şekil 1.15. Algılama, sınıflandırma ve ayırma sistemlerinde kullanılan bazı malzeme özellikleri (Udoudo, 2010)

Gelişmiş veri analizi yazılım ve donanımları, sensör temelli ayırma teknolojisini daha kullanılır hale getirmiştir. Sensörlerden elde edilen veriler eş zamanlı olarak değerlendirilmelidir. Kalibre edilmiş ayırma algoritmasına dayalı, istenilen ve istenmeyen taneler için ‘evet’ ve ‘hayır’ kararı verilir ve taneler hava kuvvetiyle ayrılır. Sensör temelli ayırıcılarda, farklı ayırma işlemleri için farklı ayırma algoritmaları oluşturulabilir (Kleine, 2010).

Veri işleme, görüntü işleme prosedürlerinin uygulanmasını kapsamaktadır. Şekil 1.16’da sensör temelli ayırıcıların görüntü işleme prosedürü gösterilmiştir. Algılayıcının kamera olduğu durumda, gürültüyü gidermek için alınan görüntünün, ön işleme yapılması gereklidir. Nesnenin ışık yoğunluğu ölçülerek, pixel cinsinden veriler toplanmaktadır. Görüntü bölütleme kısmında, elde edilen görüntüler birbirinden ve aynı zamanda arka plandan ayrılırlar. Daha sonra görüntü özelliği/özellikleri tespit edilir. Ardından kalibrasyon için kullanılan görüntüye göre, elde edilen görüntüler sınıflandırılır. Daha sonra bu veriler malzemenin ayrılması için kullanılır (Kattentidt vd., 2003).



Şekil 1.16. Sensör temelli ayırıcılarda görüntü işleme prosedürü (Kattentidt vd., 2003)

Sensör temelli ayırıcılarda algılama ünitesi bir veya birden fazla ışık kaynağı ve dedektörden oluşabilmektedir. Algılama ve tanımlama hızı, sensör çözünürlüğü, hassasiyeti, yüzey-hacim tespiti tanımlama sistemlerinin performansını etkileyen faktörlerdir (Gülcan, 2013). Bu faktörler aşağıda açıklanmıştır;

Hassasiyet: Sensörün spektral bant genişliği ve şiddetine bağlı hassasiyeti, ölçülmesi istenilen özellikler ve ışık kaynağının tasarımı ile ilişki olarak değerlendirilmesi gereken bir parametredir. Işınımına uzun süre maruz kalma, hassasiyeti artırmakta ancak tanımlama hızını düşürmektedir.

Çözünürlük: Problemsiz veri aktarımının sağlanması için, sensörün x-ekseni uzantısındaki çözünürlüğü, teknik açıdan en üst değerinde olmalıdır. Eğer sensör ve ayırma sistemi donanımsal ve yazılımsal olarak doğrudan ilişkilendirilmişse, sensör sistemi ortalama tane boyutuna göre ayarlanmalıdır. Bu şekilde sensör çözünürlüğü, kabul edilen taneleri tespit edebilir ve red olarak tanımlanan taneleri, ayırabilecek şekilde ayarlanmış

olur. Bu sistemlerin besleme tane boyutundaki farklılıklardan etkilenmemeleri için, tane boyutu aralığı dar tutulmalıdır (Wotruba, 2006).

Yüzey-hacim tespiti: Yüzey bazlı sensörler, yüzey özelliklerindeki farklılıklara dayalı, taneleri tespit edip ayırırlar. XRT ve elektromanyetik sensörler, yüzey bazlı sensörlerin aksine, ışının tane içinde ilerlemesine ve taneden geçmesine dayalı, algılama yaparlar. Bu durumda örnek olarak bir XRT sensörü yoğun ve kalın bir taneyi algılamaya yönelik ayarlansa bile, görüntü kalitesi yüksek olmalıdır.

Tanımlama hızı: Besleme bantı/açıklığı üzerinde yatay çizgisel bir uzunluğun taranması ve toplanan verileri yazılıma gönderilmesi için geçen toplam süreyi tarif etmek için kullanılır. Y-ekseni üzerindeki çözünürlük (mm), tanelerin aktarım hızının sensörün okuma hızına bölünmesiyle elde edilir. Örnek olarak, eğer bant hızı 1 m/s ise ve sensör saniyede 3000 çizgi okuyabiliyorsa, y eksenindeki çözünürlük 1 mm olarak bulunmaktadır (Wotruba, 2006). Tablo 1.7’de farklı sensör türleri, ölçüm yöntemi ve algılama prensipleri sunulmuştur.

Tablo 1.7. Sensör türleri, ölçüm yöntemi ve algılama prensipleri (Robben vd., 2011)

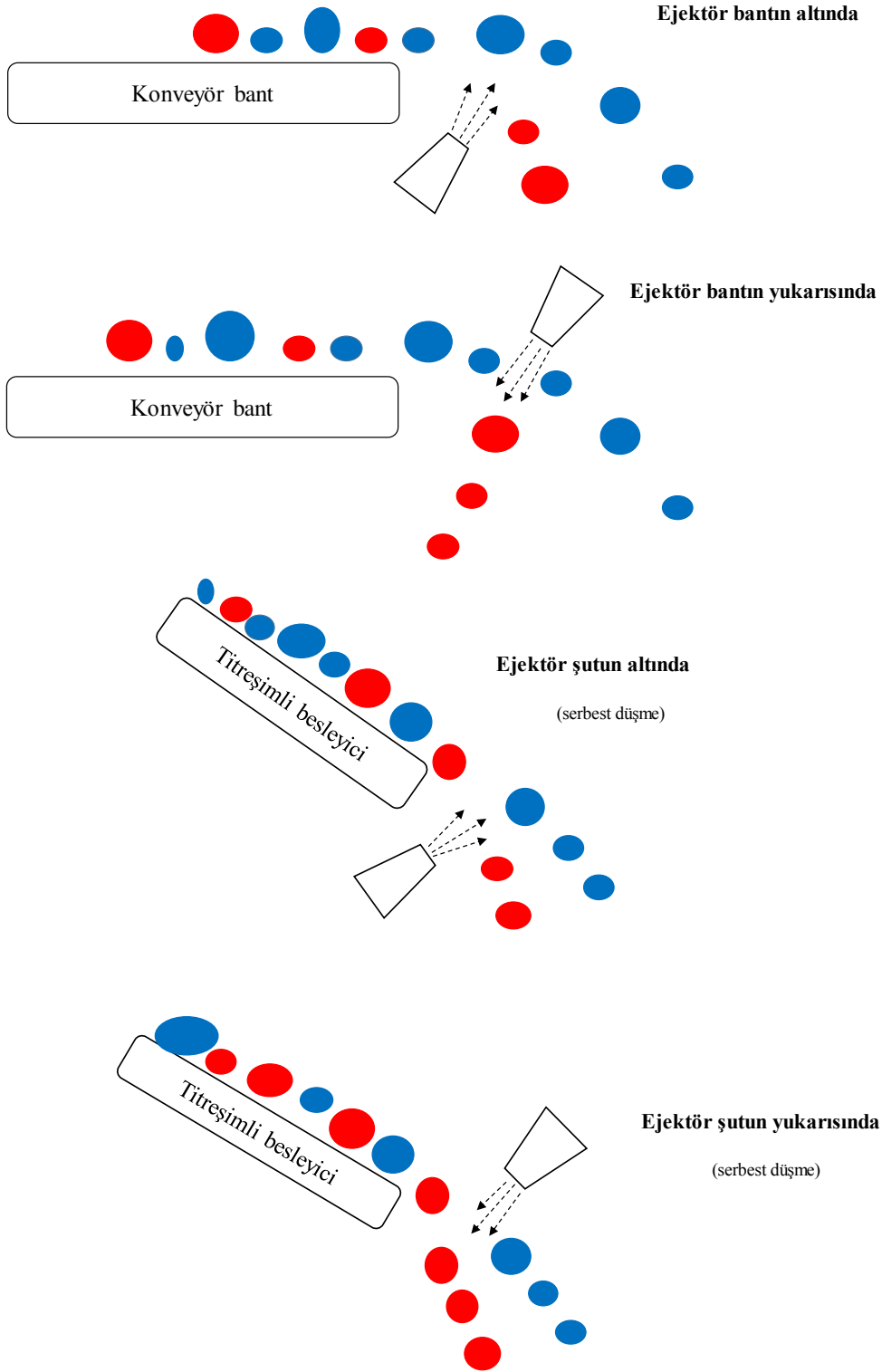
Sensör türü	Algılama/Analiz yöntemi	Metot
Optik sensörler	CCD sensörlerle görüntün alınması	Yüzey bazlı
Sismik	Sismograflarla elastik dalgaların uyarımı ve kaydı	Transmitif
Jeoradar	Anten aracılığıyla elektromanyetik dalgaların, iletim ve yansıma sinyallerinin tespiti	Transmitif
Radyometrik	Doğal radyoaktivite ölçümü	Yüzey bazlı ve transmitif
Jeoelektrik	Elektrotlarla elektrik akımının ölçümü ve oluşan potansiyelin tespiti	Transmitif
LIF	Lazer ile uyarım ve foton emisyon ölçümü	Yüzey bazlı
LIBS	Lazer atımı ile plazma oluşturulması ve analizi	Yüzey bazlı
Aktif-kızılötesi	IR ışını ile uyarma ve emisyon ölçümü	Yüzey bazlı ve transmitif
Pasif kızılötesi	Görünür olmayan ısı radyasyonunun ölçümü	Yüzey bazlı
X-ışını spektroskopi	X ışını ile uyarıldıktan sonra, ikincil X ışını emisyonunun ölçümü	Yüzey bazlı
Ses analizi	Ses dalgalarının nesne içindeki ilerlemesinin ölçümü	Yüzey bazlı

1.5.4. Mekanik Ayırma

Algılama işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştikten sonra, elde edilen veriler cihaz tarafından analiz edilir ve seçilen taneler mekanik ayırma ile ayrılır (Knapp vd., 2014).

Sensör temelli ayırıcılardaki ayırıcı sistemleri basınçlı hava, su jetleri, mekanik ayırıcılar ve vakumlu vanalardan ibarettir. Madencilikte en çok kullanılan ve tercih edilen yöntem basınçlı hava ile ayırma yöntemidir. Bu yöntemin tercih edilme nedeni diğer metodlara nazaran enerji verimliliği yüksek, daha hızlı ve yüksek hassasiyetle çalışmasıdır (Kleine, 2010). Havalı ayırmanın dezavantajı, kullanılan basınçlı havanın kurutulmuş olması zorunluluğudur. Ayrıca, ayırma işlemine tabi tutulacak olan malzeme suda çözünme özelliğine sahip ise su jetleriyle ayırma yöntemi tercih edilmemelidir (Odoudo, 2010).

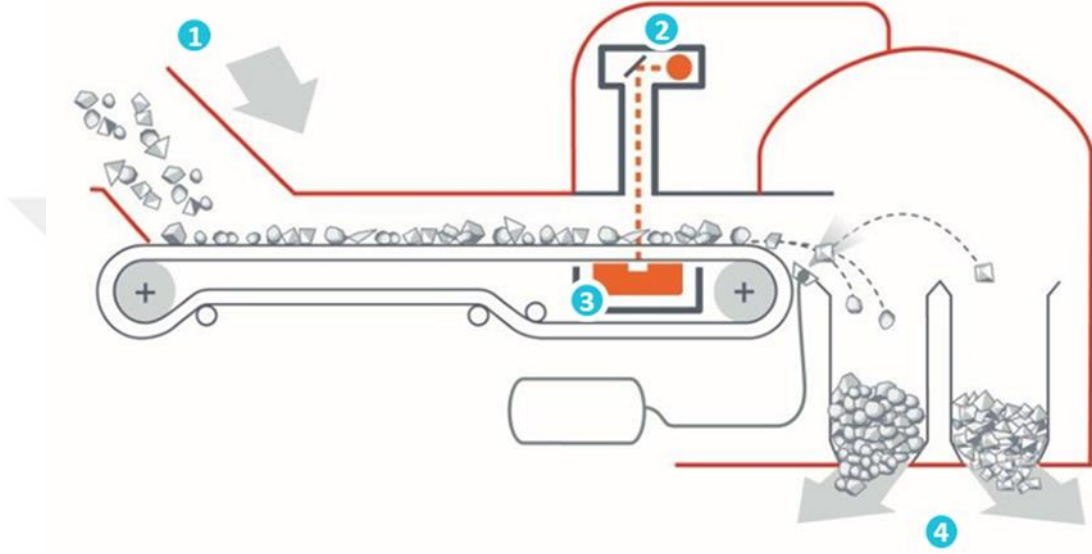
Nozulların boyutu, birbirine göre mesafesi ve basınç miktarı, maksimum tane boyutu ile doğrudan bağlantılıdır. Örnek olarak 5-20 mm boyutundaki taneler 3,5–5,5 bar hava basıncıyla ayrılırlar (Knapp vd., 2014). Madencilikte kullanılan ayırıcılarda, mekanik ayırma sistemi aynıdır ve tüm işlemin performansını değerlendirmekte önemli rol oynamaktadır. Çünkü yanlış zamanda aktifleşen vana, cihazın mekanik verimini etkiler ve genel ayırma işlemin verimini düşürebilir. Algılama, veri analizi ve tanelerin ayırma işlemi için geçen süre yalnızca birkaç milisaniyeden ibarettir. Şekil 1.17’de bant ve şut tipi ayırıcılarda, ejektör konfigürasyonu gösterilmiştir. Her iki tip ayırıcıda ejektör akışın üstü veya altında yer alabilir. Şut tipi ayırıcılarda ejektör genellikle akışın alt kısmında yer almaktadır. Ejektörün konfigürasyonunu; malzemenin özelliği, gerekli üfleme gücü ve vanaların kirlenme ihtimali belirlemektedir (Wotruba ve Harbeck, 2010).



Şekil 1.17. Bant tipi ve şut tipi ayırıcılardaki ejector konfigürasyonu

1.5.5. Sensör Temelli Ayırıcıların Genel Tasarımı

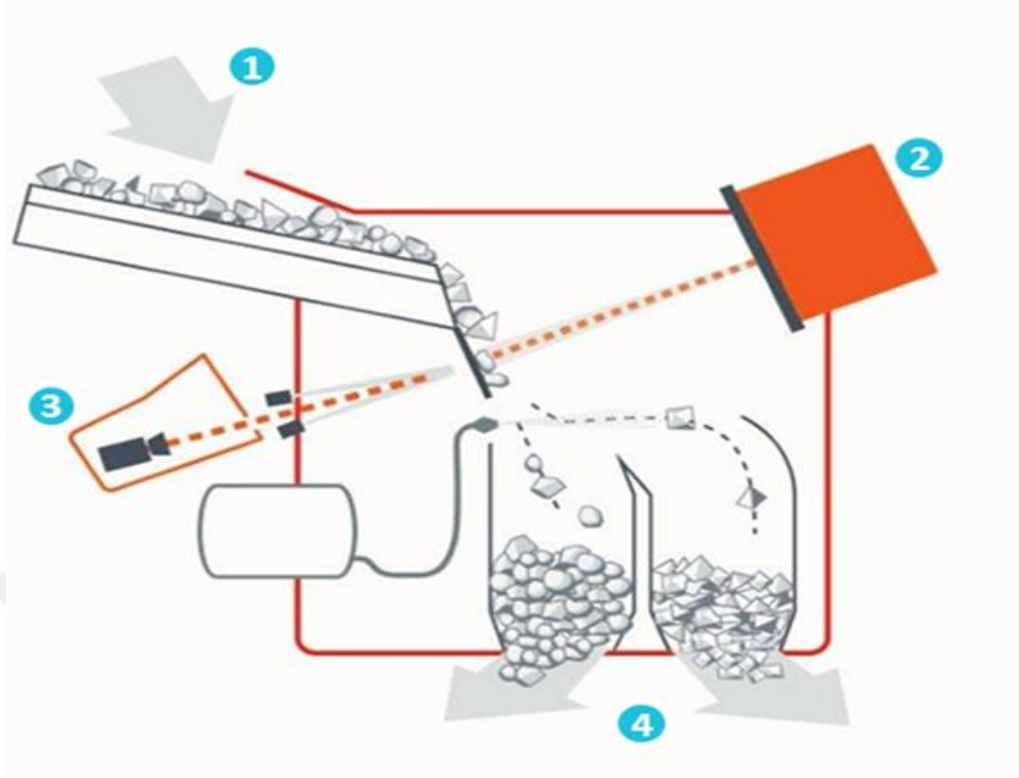
Endüstriyel ölçekli sensör temelli ayırıcılar için, bant tipi ve şut tipi olarak iki farklı tasarım mevcuttur. Şekil 1.18’de bant tipi ve Şekil 1.19’da şut tipi ayırıcıların genel olarak görünümü gösterilmiştir.



Şekil 1.18. Bant tipi ayırıcıların genel gösterimi (URL-3, 2020)

Her iki ayırıcı tipinde, (1) malzeme bir oluktan banta beslenir, (2) taneler bir ışık kaynağı tarafından uyarılır ve (3) tanenin yanıtı sensör tarafından algılanır. (4) Sensörden gönderilen bilgiler eş zamanlı olarak işlenir, ardından kabul veya red komutu vanalara gönderilir. Aktifleşen vanalar, taneleri hava gücü ile ayırır. Bant tipi ayırıcı tasarımının başlıca avantajları aşağıdaki gibidir (URL-4, 2020):

- Taneler sensör tarafından algılanmadan önce, bant üzerinde daha sabit ve duraylı hale gelirler, bu da daha hassas algılamaya olanak sağlar,
- Düzenli olmayan beslemeler içinde kullanılabilir,
- Küçük tanelerin yüzey nemi göz ardı edilebilir.



Şekil 1.19. Şut tipi ayırıcıların genel gösterimi (URL-5, 2020)

Şut tipi ayırıcıların temel prensibi bant tipi ayırıcılarla aynıdır. Ancak, cevher bir banta beslenmek yerine, algılama alanına serbest halde düşer. Şut tipi ayırıcıların başlıca avantajların aşağıdaki gibidir (URL-6, 2020):

- Basit tasarıma sahiptirler,
- Bant tipine nazaran daha az yer kaplarlar,
- 250 mm büyüklükteki taneleri bile ayırabilirler,
- Çift taraflı algılama seçenekleride mevcuttur.

1.6. Literatür Araştırması

Sensör temelli ayırıcılar, genellikle ön zenginleştirme aşamasında kullanılmaktadır. Bu teknoloji madencilikte, geri dönüşüm endüstrisinde olduğu kadar yaygın olmasa da, gün geçtikçe dikkat çekmeye başlamıştır. Bu bölüm, sensör temelli ayırıcıların madencilikteki uygulamalarını ve araştırma sonuçlarını içermektedir.

İtalya’da Maffei Sarda Feldispat Madeni’nde tüvenan cevherden gangı ayırmak için renk ayırıcısı devreye alınmıştır. Buradaki amaç, gang olarak nitelendirilen grimsi kırmızı tonlu malzemeyi, beyaz ve yeşil renkli malzemedan ayırmaktır. Son derece değişken cevher bileşimine rağmen, renk ayırıcılarla çok kısa sürede beklenen verim ve geri kazanım değerlerine ulaşılmıştır (Anselmi ve Harbeck, 2000). Yüksek kaliteli seramik üretimi için, kullanılan hammaddelerin kaliteli ve saf olması gerekmektedir. Kaliteli hammadde üretimi için renk ayırma yöntemi her zaman tercih edilen bir yöntemdir (Dehler, 2003).

Başka bir çalışmada DE-XRT ayırıcı ile demir, manganez ve çinko cevherlerinin, X ışınına göre ayrılabilirliği araştırılmıştır. Araştırmada maksimum verimi elde etmek dikkate alınmıştır. Sonuçlar ayırma performansının olumlu olduğunu göstermektedir (Young vd., 2017). DE-XRT ayırıcı ile kömürden piritik sülfürü temizlemenin yanı sıra, kömürü türbanitten ayırmak da mümkündür (Ketelhodt ve Bergmann, 2010). Almanya’da Kupferschiefer Madeni’nde metalik atıktan cevher geri kazanılmaktadır. Bu çalışmada NIR ayırıcı ile kireçtaşı atık olarak ayrılmaktadır. Bu işlem tenörü iki kattan daha fazla miktarda yükseltmektedir. RWTH Aachen Üniversitesi, cevher zenginleştirme birimi Kuperschiefer cevheri dahil bir çok cevheri XRF ile analiz etmiştir. Bu çalışmanın amacı XRF ile cevherleri ayırmaya çalışmaktır. Ayırıcı henüz endüstriyel ölçekli çalışma için hazır değildir. Ancak gelecek için büyük potansiyel sunmaktadır (Kamradt vd., 2012).

XRT ayırıcının en bilindik ve başarılı uygulamasına örnek Avusturya’da Mittersill Tungsten Madeni verilebilir. Buradaki hedef düşük tenörlü tüvenan cevherden iri taneli cevheri (tungsten) ayırmaktır. Ayrılan cevher yıllık 0,5 milyon tona karşılık gelmektedir. Bu madende sekonder kırıcıdan sonra, paralel olarak konumlandırılan XRT ayırma işlemi iki farklı tane boyutuna uygulanmaktadır. Bu işlem öğütme tesisine beslenen malzemenin tenörünü %25 oranında artırmaktadır. Ayırıcılardan çıkan atık, agrega olarak satılmaktadır (Robben ve Mosser, 2014).

Karowe Elmas Madeni’nde uygulanan XRT ayırıcı işleminin başarısı dünya çapında bilinmektedir. Bu madende XRT yöntemiyle dünyanın, boyut olarak üçüncü ve mücevher kalitesi olarak ikinci elması kazanılmıştır. Bu elmasa Lesedi La Rona adı verilmiştir (Robben ve Wotruba, 2019). Dünyada en büyük XRT ayırıcı tesisi Suudi Arabistan’daki Umm Wu’al Fosfat Madeni’nde kurulmuştur. Bu tesisin saatlik kapasitesi 1800 tondur ve yıllık 13,5 milyon ton hammadde işlemektedir. XRT ayırıcılar, silisyum içeriğini düşürmek için çakmaktaşını fosfattan ayırmaktadır. Bu uygulamayla ton başına düşen reaktif, su ve

enerji tüketiminde azalmanın yanı sıra, zenginleştirme işleminin performansını da artırmaktadır (Robben ve Takala, 2018).

DE-XRT ve EM sensörlerinin kombinasyonu, demir dışı metalleri ayırmak için uygulanan yeni bir yöntemdir. Delft Üniversitesi'nde yapılan bir araştırmada bakır, alüminyum, mangan, pirinç, çinko ve paslanmaz çelik malzemelerin karışımı ile bir ayırma deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayırma işlemi DE-XRT ve EM sensörlerinin kombinasyonu ile yapılmıştır. Çalışma sonucuna göre paslanmaz çelik diğer metallerden bağımsız olarak ayrılabilir. Ancak, bakır ve pirinç, alüminyum ve magnezyum ayırma işleminde birbirlerini etkilemektedir (Mesina vd., 2006).

Avustralya Wolfram Camp Madeni'nde, tungsten cevherinin XRT ayırıcı ile ön zenginleştirilmesi yapılmıştır. İşlem sonucu, uygulamanın başarılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca su, enerji ve ileri işlemlerde kullanılan reaktif miktarında azalmaya neden olduğu düşünülmektedir (Robben vd., 2013). Kloof Altın Madeni'nin döküm sahasına pilot ölçekli XRT ayırıcı kurulmuştur. Bu işlemin amacı atıktan altını geri kazanmaktır. Uygulama sonucuna göre atıktaki bulunan altın cevheri düşük tenörlü olmasına rağmen, etkili bir şekilde ve %70 verimle ayrılmıştır (Ketelhodt, 2009).

Minsur S.A. kalay madeninde dört adet XRT ayırıcı çalışmaktadır. Bu ayırıcılar atık malzemeden cevheri ayırmaktadır. Uygulama sonucu kalay tenörü %2,8'e ve geri kazanım değeri %90'a ulaşmıştır (Robben vd., 2020). Mikrodalga ve kızılötesi termal görüntüleme (MW-IRT) işlemi, porfiri bakır cevherlerinin ayrılmasını kolaylaştırmak için potansiyel bir teknik olarak önerilmektedir. Laboratuvar ölçekli bir çalışmada 16 porfiri bakır örneği MW ve ardından IRT işlemine tabi tutulmuştur. Tanelerin mineralojik yapısı ve dokusal heterojenliği yüzeydeki ortalama sıcaklığı etkilese de ayırma performansı olumsuz etkilenmemektedir (Batchelor vd., 2016).

Sensör temelli ayırıcıların yaygın olarak kullanılmasının önündeki en büyük engel bilgi eksikliğidir. Yani, işletmeciler çoğunlukla son teknolojilerden habersizler. En önemlisi de, ayırıcıların işletme ekonomisini nasıl etkilediğinden haberdar olmamalarıdır. Amerika'da bir bakır madeninde kullanılan sensör temelli ayırıcının işletme ekonomisini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Araştırma sonucuna göre, yarı otojen değirmenden önce uygulanan sensör temelli ayırıcının yıllık getirdiği kar miktarı 4,5 milyon doları geçmektedir. Bu işlemle yatırım maliyeti 20 ay içerisinde geri kazanılmıştır (Lessard vd., 2016).

Başka bir çalışmada NIR ayırıcının performans tahmini araştırılmıştır. Bu çalışmada endüstriyel ölçekli NIR ayırıcı ile ayrılan bor cevherinin kabul ve red fraksiyonları alınmıştır. Daha sonra elenerek üç farklı tane boyutu oluşturulmuştur. Her bir tanenin optik filtreli ve filtresiz görüntüsü, bor içeriği analizi için kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar, farklı tane boyutlarına ait bölme katsayılarının tahmini için kullanılmıştır. NIR ayırıcı için ekart probabilité değeri 0,105 ve RV_{50} (kesme değeri) 0,730 olarak bulunmuştur. Genel olarak elde edilen sonuçlara bakıldığında, bu yöntemin cevher ayırma işlemleri için güvenilir bir yaklaşım olduğu görülmektedir (Gülcan, 2020).

1.7. Tezin Amacı

Bu çalışmada, XRT ayırıcılar için algılama verimliliğine dayalı bir proses modellemesi hazırlanmıştır. Bu modellemeyle ayırıcıların performans tahminini yapabilmek mümkündür. Modelleme çalışması, doğrulandığı takdirde diğer metalik cevherler içinde bir temel oluşturabilecektir.

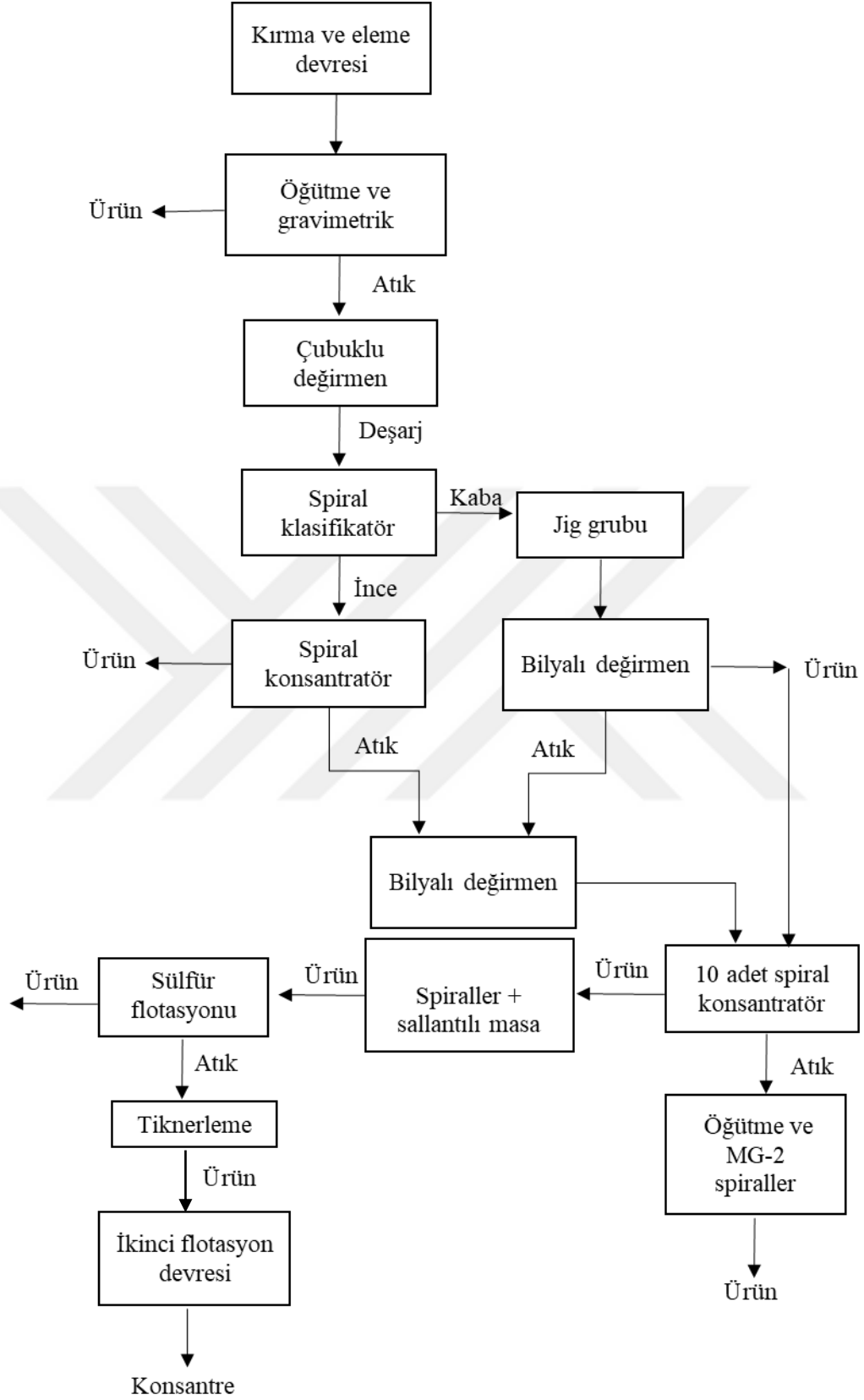
Çalışma, Minsur S.A. San Rafael döküm sahasına ait kasiterit atığı üzerine uygulanmıştır. Dolayısıyla optimum değerleri elde etmek için modelleme önerilen iki farklı akım şemasını takip edecek şekilde ilerlemiştir. Buradaki hedef, XRT sensör temelli ayırıcılarla Minsur S.A. Kasiterit cevherinin zenginleştirilmesi için, teorik (modelleme) ve deneysel çalışmalarla etkin ve verimli bir yöntem uygulamaktır. Bunun için, düşük tenörlü döküm sahası malzemesinde değersiz mineralleri uzaklaştırarak, hem maliyeti yüksek olan cevher zenginleştirme işlemlerine girmesini engellemek, hem de metal kaybını mümkün olduğunca en aza indirmek amaçlanmıştır.

2000’li yıllarda Minsur S.A. San Rafael dünyanın %20 kalay ihtiyacını karşılıyordu. Ancak, zamanla rafine kalayın piyasadaki değeri kaybindan dolayı ve yüksek tenörlü cevherin bitmesiyle işletme üretim maliyetlerini karşılamak için üretim miktarını azalttı. İşletme XRT işlemleri ile atık sahasında bulunan cevheri ayırarak varlık değerini korumaya çalışmaktadır. Bu işlemle %0,6 Sn içerikli malzeme XRT ye beslenerek %1,8 Sn tenörlü ürün elde edilmektedir. Bu ürün direkt olarak cevher zenginleştirme tesisine beslenmektedir. XRT uygulamasıyla hedeflenen sonuçlar aşağıdaki gibidir,

- i. Atık değerlendirmesi, madencilik işlemlerine nazaran daha düşük maliyetlidir. Dolayısıyla düşük maliyetli işlemlerle katma değeri sağlamak,
- ii. Nihai konsantre miktarını ve tenörünü arttırmak,

- iii. Atık sahalarını rezerve dönüştürerek kesme değerini düşürmek,
- iv. Çevresel etkiyi azaltmak.

Minsur San Rafael zenginleştirme tesisi gravite ile ayırma ve flotasyon yöntemi olarak iki ana işlemden oluşmaktadır. Gravite ile zenginleştirme aşamasında iki adet primer jig ve dört adet sekonder jig kullanılmaktadır. Jigden alınan atıklar elekten geçtikten sonra çubuklu değirmene ve değirmen çıkışı spiral klasifikatöre beslenmektedir. Bu aşamada elde edilen ince fraksiyon spiral konsantratöre ve kaba fraksiyon farklı bir dizi jige beslenmektedir. Jigden alınan atık fraksiyonu bilyalı değirmene beslenmektedir. Spiral konsantratör bölümü, boyutu 2mm olan elekler ve ayırma d50 değeri 700 µm olan hidrosiklonlar içermektedir. Konsantratörden alınan atık, sekonder değirmene beslenmektedir. Buradan alınan ürün boyutu 500µm den daha küçüktür. Bu ürün farklı 10 adet spirale beslenmektedir. Bu spirallerden alınan ürün tekrar 14 adet spiral ve sallantılı masalarla saflaştırılır. Jigler, spiraller ve sallantılı masalardan alınan ürünler, 430 µm elekten geçirilir ve eleküstü nihai ürün olarak ayrılırken, elekaltı flotasyon tesisine beslenmektedir. Sülfürlü mineralleri uzaklaştırmak için uygulanan yöntem ters flotasyondur. Proses için kullanılan kimyasallar, kolektör olarak ksantatlar, sülfürik asit ve köpürtücüdür. Bu aşamadan alınan deşarj süpürme flotasyon işlemine tabi tutulur ve çıkan atık tekrardan kaba flotasyona beslenir. Alınan konsantre bant filtrelelere gönderilir (Robben vd., 2020). Minsur San Rafael zenginleştirme tesisine ait akım şeması genel görünümü Şekil 1.20’de gösterilmiştir.



Şekil 1.20. Minsur San Rafael cevher zenginleştirme tesisinin akım şeması (Robben vd., 2020)

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Malzeme

Kasiterit veya kalay taşı, SnO_2 kimyasal formülüne sahip inorganik bileşiktir. Kasiterit, kalay kaynağı olarak tanınan ve ticari önemi olan tek mineraldir. Ancak, stannit, silindirit, teallit gibi kompleks sülfidlerden de çok az miktarda kalay elde edilmesi mümkündür (Anderson, 2017). Kasiterit, $6.8\text{--}7.1 \text{ gr/cm}^3$ özgül ağırlığına sahip olduğundan genellikle gravimetrik zenginleştirme yöntemlerinden faydalanılarak zenginleştirilir. Özgül ağırlığının yüksek olmasının yanı sıra, atom numarasıyla ($Z=50$) ilişkili olarak yüksek atom yoğunluğunda sahiptir. Bu nedenle iletilen X ışınlarını yüksek miktarda emmekte ve XRT ayırıcı ile ayrılabilme potansiyelini taşımaktadır (Robben vd., 2020). Bu çalışma kapsamında kullanılan kalay numunesi, Minsur S.A. San Rafael atık sahasına aittir. Numunede ortalama kalay içeriği %0,6 Sn'dir. Tablo 2.1'de Minsur S.A. San Rafael yatağının farklı zonların mineralojik bileşim tablosu verilmiştir.

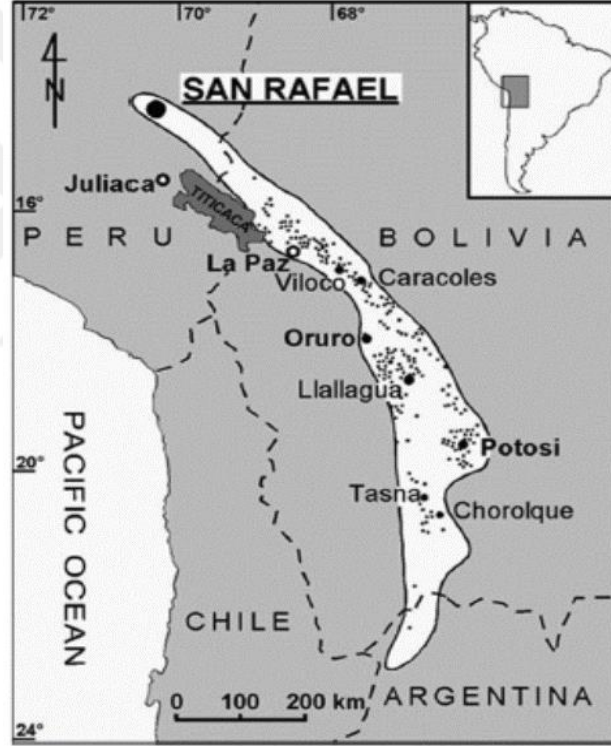
Tablo 2.1. Minsur S.A. San Rafael yatağının mineralojik bileşenleri

	Saf granit	Orta kloritik	Çok kloritik	Saf granit	Serisit ve turmalin	Çok turmalinli	Saf tonalit	Serisitli ve kloritik	Çok kloritli	Serisit ve turmalin	Turmalin ve silis
Numune (% wt)	R432C	R432B	R432A	I 8	J-26B	J26-A	D4-68E	D4-68D	D4-68C	D4-68B	D4-94
Kuvars	23,94	40,70	54,98	23,22	52,43	55,98	29,42	41,51	43,19	53,35	79,11
Apatit	0,26	0,67	1,35	0,53	0,69	0,41	0,62	0,82	0,64	0,63	0,38
Rutil	0,01	0,29	0,28	0,03	0,37	0,24	0,00	0,54	0,48	0,39	0,41
Klorit	0,00	24,91	43,40	0,00	0,00	0,00	0,00	17,23	32,52	1,52	0,00
Serisit	0,00	21,87	0,00	0,00	31,67	0,00	15,47	39,90	23,18	38,45	0,00
Albit	17,57	11,55	0,00	18,02	0,00	0,00	19,88	0,00	0,00	0,00	0,00
Anortit	3,21	0,00	0,00	8,62	0,00	0,00	5,87	0,00	0,00	0,00	0,00
Biyotit	10,29	0,00	0,00	12,44	0,00	0,00	19,51	0,00	0,00	0,00	0,00
Kordiyerit	9,61	0,00	0,00	5,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K-spar	3,10	0,00	0,00	31,65	0,00	0,00	9,24	0,00	0,00	0,00	0,00
Turmalin	0,00	0,00	0,00	0,00	14,84	43,37	0,00	0,00	0,00	5,66	20,09

San Rafael ilk başta bakır yerlatı madeni olarak işletilmeye başlamıştır. Düşük tenörlü kalay içeren cevher yeraltı ilerlemelerinde meydana çıkmıştır ve atık olarak döküm sahasına gönderilmiştir. Yerlatı işletmesi için kullanılan yöntem ara katlı göçertmedir. Yerlatı işletmesi şu anda tamamen bitmiştir ve firma atık sahalarını değerlendirerek kalay

üretimine başlamıştır. Minsur S.A. dünyanın %12 kalay ihtiyacını üreten en büyük kalay işletmesidir. Bu işletme Peru Cumhuriyeti'nin Puno bölgesinde yer almaktadır.

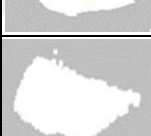
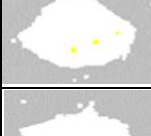
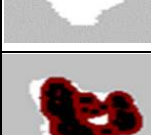
San Rafael Madeni, Peru Orta And Dağları'nın doğusunda bulunan ve alışılmadık derecede yüksek Sn-Cu tenörlü damar tipi yataklarından kalay üretmektedir. Cevher damarları çok sıkı seviyede bulunmaktadır. Damarlar 1200 m yi aşan bir dikey uzantıya sahiptir. Birincil dikey metal bölgelerin üzeri bakır ile örtülmüştür. Cevherleşme tipi, kasiterit-kuvars-klorit damarları şeklindedir (Robben vd., 2020). Şekil 2.1'de And Dağları bölgesindeki kalay damarında, San Rafael madeninin bulunduğu yer nokta işaretiyle gösterilmiştir.



Şekil 2.1. San Rafael madeninin bulunduğu yer (Mlynarczyk ve Williams-Jones, 2003)

Deneyde kullanılacak olan numuneye ait X-ray analizi ve kimyasal analiz verileri Tablo 2.2’de verilmiştir. Bu analiz, XRT işleminden önce örnek tanelerin sensöre yanıtını göstermektedir. Tablodaki ağırlık teste tabi tutulan her bir tanenin ağırlık değerini göstermektedir

Tablo 2.2. Numuneye ait X-ray analiz ve kimyasal analiz verileri (Tomra, 2020)

Örnek	X-ray görüntü	Ağırlık gr	Sn %	Fe %	Cu %	Zn %	Pb %	kassiterit içeriği
		173,17	1,80	0,24	<0,001	<0,003	<0,005	Var
		116,44	0,00	0,03	<0,001	<0,003	<0,005	Yok
		172,47	0,00	2,88	<0,001	<0,007	<0,005	Yok
		145,82	0,00	4,07	0,011	0,078	0,049	Yok
		79,67	0,00	0,50	<0,001	0,01	0,008	Yok
		74,77	1,86	0,14	0,009	0,051	<0,005	Var
		141,58	0,00	5,63	0,008	0,013	<0,005	yok
		67,61	0,00	0,64	0,005	0,006	0,006	Yok
		46,83	30,31	2,81	0,008	0,004	<0,005	Var
		19,29	0,00	12,37	0,002	0,013	<0,005	Yok

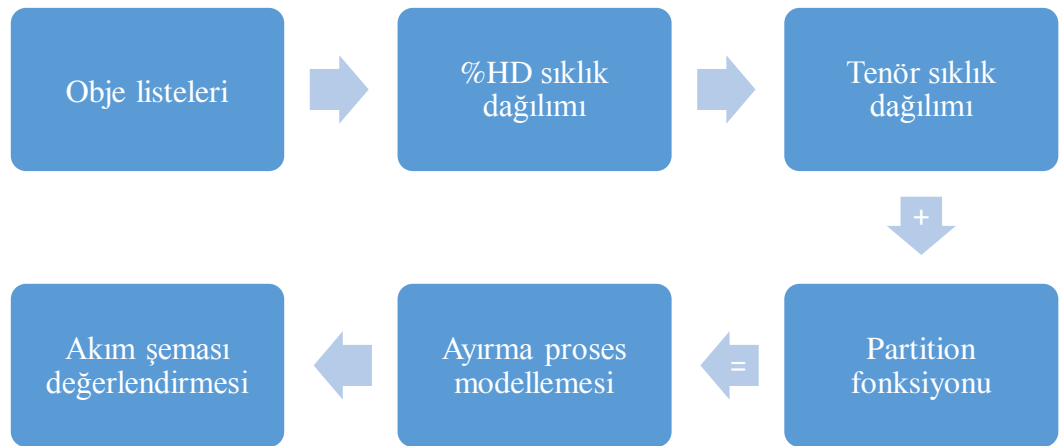
Kalay çoğunlukla koruyucu kaplama olarak veya kurşun çinko gibi diğer metallerle alaşım şeklinde kullanılmaktadır. Çelik levhaların kaplamasında, lehimler, cam endüstrisinde ve kimya sanayinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Şekil 2.2’de Bolivya Viloco madeninden alınan saf Kasiterit numunesi gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Bolivya Viloco madeninden alınan saf Kasiterit numunesi

2.2. Yöntem

Teorik çalışmanın ana girdisi obje listeleridir. Bu listeler tanelerin spesifik özellikleri hakkında bilgi veren bilgisayar tabanlı listelerdir. Bu çalışmada Minsur S.A. atık döküm sahası (waste dump) malzemesinden alınan obje listeleri kullanılmıştır. Obje listelerinden alınan veriler %HD (high density) değerlerdir. %HD, X-ışınlarının en fazla emildiği bölgeleri ifade etmek için kullanılan terimdir. Dolayısıyla %HD olarak algılanan taneler kalay içeren tanelerdir. Obje listeleri geniş listeler olduğundan içerdiği veriler özetlenmeli ve ilişkilendirilmelidir. Bu özetlemeyi yapabilmek için kullanılan yöntem Pivot Tablosu'dur. Pivot tablosu daha geniş tabloların verilerini özetleyen ve anlamlı gruplandırma yapan istatistiksel tablodur. Gruplandırma için %HD değerleri ve %Sn miktarı dikkate alınmıştır. Sn miktarı kalibrasyon formülünden yararlanarak hesaplanmıştır. Gruplandırmanın ardından, farklı tane boyutlarında %HD sıklık dağılımını gösterebilmek için kalibrasyon tabloları ve grafikleri oluşturulmuştur. %HD ve %Sn miktarı arasında ilişki kurarak, her bir %HD aralığındaki %Sn değerleri bulunmuştur. Elde edilen verilerle tenör sıklık dağılımı grafiği ve tablosu oluşturulmuştur. Tenör sıklık dağılımı tablosu proses modellemesi için kullanılmıştır. Modelleme, karışım katsayıları ve üretim verileri ile kalibre edilmiştir. Modelleme ayırma sahası için önerilen iki farklı akım şemasını takip edecek şekilde ilerlemiştir. Şekil 2.3'te modelleme metodolojisi gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Modelleme metodolojisi

Yapılan modellemenin doğruluğunu araştırmak için laboratuvar ölçekli deney yapılmıştır. Laboratuvar ölçekli deney, çok değişkenli kalibrasyon testleridir. Sensörleri kıyaslamak veya her bir tanenin mineralojik yapısıyla ilgili bilgiler elde etmek için kullanılan, statik bir deney yöntemidir. Bu deney için ilk işlem olarak temsili numune hazırlanmıştır. Numune hazırlamada ilk olarak, taneler %HD içeriklerine göre üç farklı gruba ayrılmıştır. Daha sonra örnek bölücülerle, her gruba ait bir temsili numune serisi oluşturulmuştur. Tanelerin mühtemel hareketlerine karşı ve hassas ölçüm yapabilmek için, her bir numune serisi bir levha üzerine yapıştırılarak sabitlenmiştir. Levhalar önce XRT cihazıyla daha sonrada X-ray tarayıcı cihazıyla taranmıştır. X-ray tarayıcı cihazı iki boyutlu tarama yapan ve cevher içeriği hakkında bilgi veren laboratuvar ölçekli X ışını cihazıdır. Bu aşamadan sonra taneler, XRF uygulaması için hazırlanmıştır. Bunun için numunedeki tüm taneler tek tek kırılıp, öğütülmüştür. Öğütme işleminin ardından taneler XRF cihazına tabi tutularak, her bir tanenin içeriği ile ilgili bilgiler elde edilmiştir. Bu değerler cihazın algılama verimliliğini ölçmek ve %Sn içeriğiyle %HD değerleri arasındaki ilişkiyi gösterebilmek için kullanılmıştır.

2.2.1. Modelleme

Ayrırma işleminde yüzde yüz verimi elde etmek mümkün değildir. Bunu sağlamak için mekanik ve algılama hatalarını mümkün olduğunca en aza indirmek gerekmektedir. Başka bir deyişle hatasız bir ayırma yapabilmek için mekanik ve algılama verimi % 100 olmalıdır. Eğer mekanik verimlilik maksimum değerinde ise, ayırma sonucu meydana çıkan yanlış ayırma yüksek ihtimalle algılama hatasından kaynaklanmıştır. Ayırma işlemlerinde, algılama verimi tüm ayırma işleminin verimini etkilediği için önemli bir faktördür. Bu çalışmada algılama verimliliğine dayalı bir proses modellemesi oluşturulmuştur. Bu modelleme ile Minsur S.A. San Rafael ayırıcı tesisinin performans tahmini mümkündür. Modelleme, önerilen iki adet farklı akım şemasını takip edecek şekilde ilerlemiştir. Modelleme sonucu elde edilen değerler, firmanın belirttiği ön zenginleştirme değerlerine yakın olması amaçlanmıştır. Bunun için, ayırıcı tesisine ait üretim verileri üzerinden karışım katsayıları tahmin edilmiştir. Modelleme, karışım katsayıları ve üretim verileriyle kalibre edilmiştir. Karışım katsayıları cevher ve atığın birbirine karışma ihtimalini yüzde olarak ifade eden değerlerdir. Karışım değeri, üretim verileri dikkate alarak tahmin edilmiştir. Bu değerler; üretim verilerindeki cevher ve atığın

tenörü, kazanımı ve konsantre alma oranı değerlerine yakın değerler elde edeceğimiz şekilde tahmin edilmiştir. Üretim verileri ve ön zenginleştirme değerleri Minsur S.A. ayırıcı sahasından alınmıştır.

Modellemenin ana girdisi obje listeleridir. Bu listeler her bir tanenin karakteristik özellikleri hakkında bilgi veren geniş bilgisayar tabanlı tablolardır. Obje listelerinin içerdiği bilgiler, %HD, homojenlik, genişlik, yükseklik vb bilgilerdir. Modelleme için kullanılan listeler, doğrudan sahada bulunan üç adet XRT ayırıcı üzerinden kaydedilmiştir ve toplamda 9999 adet obje içermektedir. Listede yer alan bir obje bir taneyi temsil etmektedir. Tablo 2.3’de modellemede kullanılan obje listeleri ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Tablo 2.3. Modellemede kullanılan obje listeleri

Parametre	Besleme
Besleme	Döküm sahası malzemesi
Obje sayısı	9999 obje
Ayırıcı tane boyutu	Ayırıcı 1: +32 mm
	Ayırıcı 2: 22-32 mm
	Ayırıcı 3: 14-22 mm

2.2.1.1. %HD Sıklık Dağılımı ve Tenör Sıklık Dağılımı

Modelleme için ilk adım olarak kalibrasyon grafiği oluşturulmuştur. Kalibrasyon grafiği, %HD değerleri ve %Sn değerleri arasındaki ilişkiyi göstermek için hazırlanmıştır. Deney için kullanılan numune XRT ayırıcıya beslenmiş ve %0-100 HD aralığında farklı HD içeriklerine göre ayırma işlemi yapılmıştır. Bu işlemin ardından her aralığa ait %Sn değerleri kimyasal analiz ile elde edilmiştir. Ayırma çalışması Tomra Sorting ve kimyasal analiz işlemi Minsur S.A San Rafael tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu değerleri kullanarak kalibrasyon grafiği hazırlanmıştır. Grafikte korelasyon formülü $y = 0.8969x^3 - 0.547x^2 + 0.2181x$ ve R^2 değeri 0.9996 olarak bulunmuştur. Bu değer veriler arasındaki ilişkinin kuvvetli olduğunu göstermektedir. Aradaki ilişki kuvvetli olduğu için bir sonraki adıma geçilmiştir.

Bu aşamada, korelasyon formülü ile %HD değerleri tek tek Sn miktarı değerlerine dönüştürülmüştür. Ardından beslemedeki farklı tane boyutlarında, %HD sıklık dağılımını gösterebilmek için kalibrasyon tabloları oluşturulmuştur. Bu tablolar pivot yöntemiyle

oluşturulmuş özet tablolarıdır. Bu tablolar daha kapsamlı ve geniş tabloların verilerini özetleyen istatistiksel tablolarıdır. Bu özetlemede verileri gruplandırmak için, toplam, ortalama ve diğer istatistikler kullanılmıştır. Kalibrasyon tablolarında, %0-100 HD aralığında grup aralığı %10 seçilerek sıklık dağılımına bakılmıştır. Bu gruplandırma ile her aralıkta bulunan tane sayısını görmek mümkündür.

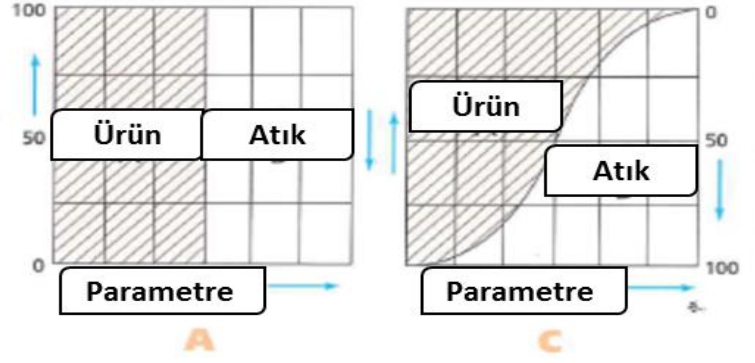
%HD sıklık dağılımından sonra tenör sıklık dağılımına bakılmıştır. %Sn tenör değerleri, Sn miktarı değerlerini kullanarak türetilmiştir. Tenör sıklık dağılımı, her bir %HD aralığında, kalay miktarını ve yüzde olarak içeriğini göstermektedir. Böylece %HD değişimi ile tenör miktarındaki değişimi görmek mümkündür.

Bu çalışmada, %HD ve %Sn için iki adet kesme değeri belirlenmiştir. X ışınlarına dayalı belirlenen ayırıcı kesme değeri %0,5 olarak seçilmiştir. Bu değer ayırıcı üreten firma tarafından test yaparak ve Minsur S.A. işletmesinin ekonomik modelini göz önünde bulundurarak seçilmiştir. Cevher kesme değeri ise %0,1 Sn dir. Yanlış yerleştirme kesme tenörüne yakın değerlerde daha fazladır. Dolayısıyla tenör sıklık dağılımını göstermek için, kesme değerine yakın değerler dikkate alınmıştır. Modelleme için %0 - 2 HD aralığı dikkate alınmıştır. Bu aralık, tekrardan gruplandırılmış ve değişikliklerin daha net görülmesi için grup aralıkları %0,1 olarak seçilmiştir.

2.2.1.2. Karışım Kavramı ve Karışım Katsayılarının Seçimi

Karışım veya partition, ayırma işleminde atık ve ürünün yüzde olarak birbirine karışma olasılığını gösterir. Karışım prensibi Şekil 2.4’da gösterilmiştir.

İdeal şartlarda, eğer cevher özelliği taşıyan tüm taneler doğrudan ürün bölümüne gönderilirse ve atık olarak nitelendirilen tüm taneler doğrudan atık fraksiyonuna gönderilirse partition grafiği Şekil 2.4.A’da gösterildiği gibi meydana çıkacaktır. Buradaki parametre cevherin yoğunluğudur. Daha öncede bahsedildiği gibi hiç bir ayırıcı yüzde yüz ayırma verimine sahip değildir. Bu nedenle bazı cevher taneleri yanlışlıkla atık fraksiyonuna gönderilirken, bazı atık taneleride cevher fraksiyonuna gönderilebilir. Bu durum neticesinde ortaya çıkan yanlış yerleştirme eğrisi Şekil 2.4.B’de gösterildiği şekilde ortaya çıkacaktır. Bu olay “karışım” olarak adlandırılır ve kesme tenörüne yakın tenör değerlerine sahip taneler, birbirine karışma olasılıkları en yüksek tanelerdir (Sanders, 2007).



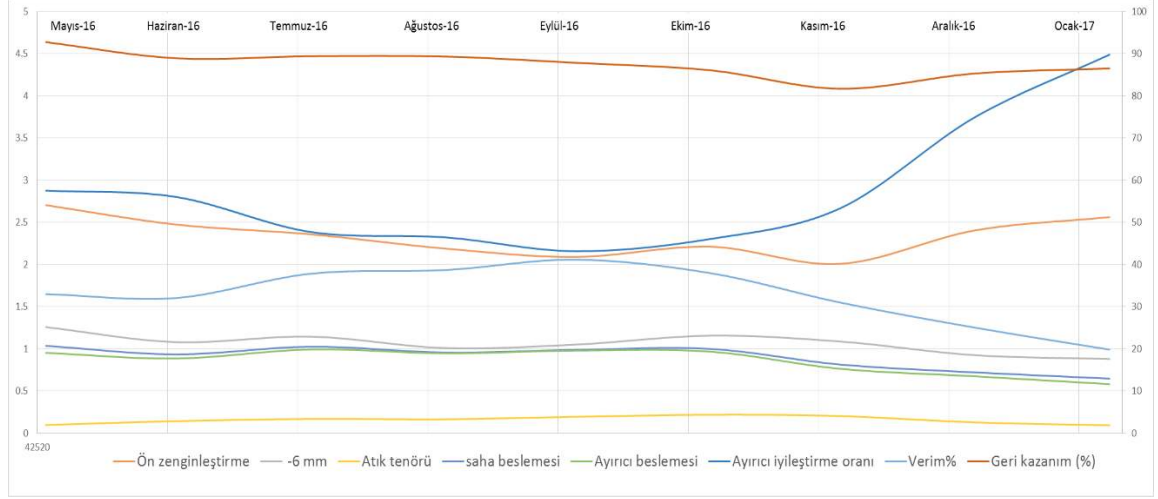
Şekil 2.4. Karışım fonksiyonunun grafik üzerinde anlatımı (Sanders, 2007)

Çalışmada, atığın ürüne karışma (WtP) ve ürünün atığa karışma (PtW) ihtimalini göstermek için her ayırıcı için iki adet karışım katsayısı belirlenmiştir. Karışım değerlerinin seçimi için ayırıcı sahasına ait üretim verileri göz önünde bulundurulmuştur. Üretim verileri Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Burada ortalama verim, konsantre oranı, ürün ve atık tenör değerleri sırasıyla %87,14, %22,11, %2,05 ve %0,08 dir. Ayrıca, karışım katsayılarının seçiminde mekanik verimliliğin etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. Mekanik verimlilik hesabı için iki faktör dikkate alınmıştır. Bu faktörler konsantreye alma oranına bağlı olarak mekanik verim (M_Y) ve kapasiteye bağlı olarak mekanik verimliliği (M_C).

$$M_Y = 1.1388 \times Y^4 - 2.2687 \times Y^3 + 1.0578 \times Y^2 + 0.0734 \times Y \quad (2.1)$$

$$M_C = 1 - (-1.3435 \times C^4 + 5.2266 \times C^3 - 7.5268 \times C^2 + 4.5933 \times C) \quad (2.2)$$

Burada Y: Konsantreye alma oranı; C: Ayırıcı kapasitesi olarak kullanılmaktadır. Denklem sonucu elde edilen mekanik verimlilik değeri %6 dir. Yani, her ayırıcı için toplam partition miktarı, mekanik verimlilik değerinden daha az olmalıdır



Şekil 2.5. Minsur S.A. ayırıcı sahasına ait üretim verileri

Şekil 2.5'te verilen grafik, ayırıcı tesisinin Mayıs ve Ocak ayları arasında, aylık ortalama ön zenginleştirme değerlerini göstermektedir. Belirlenen aylar arasında, ayırıcı tesisi besleme tenörü %0.6-1 arasında değişiklik göstermektedir. Grafikte aylık en düşük ve en yüksek üretim verileri değerleri; ürün tenörü %2-2.71 ve atık tenörü ise %0.09-0.22 arasındadır. Verim değeri %81.7-89.4 tür ve konsantre oranı %19.8-38.7 aralığında değişiklik göstermektedir. Modelleme için karışım değerleri, bu değerleri dikkate alarak tahmin edilmiştir. Farklı karışım değerleri seçilerek ve sonuç olarak elde edilen değerler kaydedilmiştir. Bu işlem modelleme kalibrasyonu olarak adlandırılmaktadır. Farklı karışım katsayılarından elde edilen sonuçlara bakılarak, üretim verilerine en yakın değerleri veren katsayılar doğru olarak kabul edilmiştir.

2.2.1.3. Proses Modellemesi

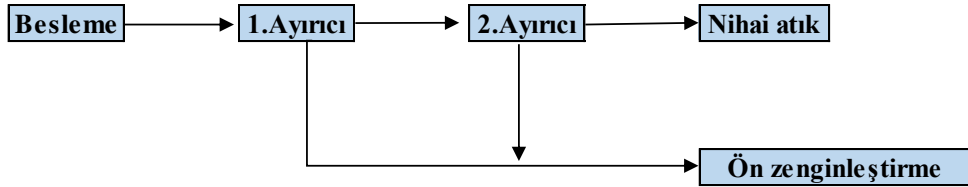
Proses modellemesi, tenör sıklık dağılım verilerinden yararlanılarak oluşturulmuştur ve akım şemalarını takip edecek şekilde ilerlemiştir. Minsur S.A. tarafından önerilerin ön zenginleştirme değerleri ayırıcı sahasına ait olduğu için proses modellemesi ayırıcı prosesi için hazırlanmıştır. Önerilen ön zenginleştirme değerleri Tablo 2.4'te verilmiştir. İlk olarak 1. ayırıcı (Ek Tablo 1), 2. ayırıcı (Ek Tablo 2) ve 3. ayırıcı (Ek Tablo 3) için proses tabloları oluşturulmuştur. Daha sonra her üç ayırıcıdan elde edilen toplam ön zenginleştirme değerleri, proses ön zenginleştirme değerleri olarak kabul edilmiştir. Proses

tabloları partition katsayılarıyla, önerilen ön zenginleştirme değerlerine yakın olacak şekilde kalibre edilmiştir.

Tablo 2.4. Ayırıcı sahasına ait ön zenginleştirme değerleri

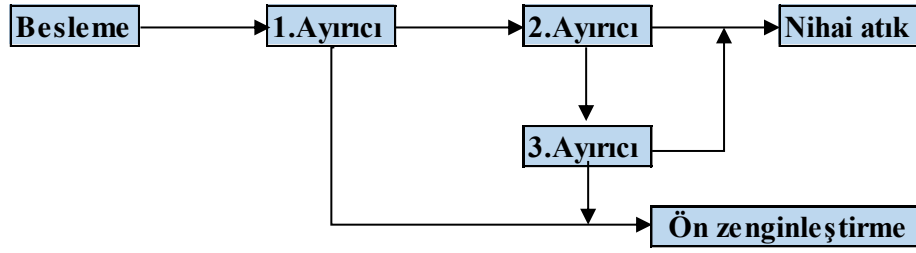
Parametre	Birim	Değerler
Besleme miktarı	tph	239
Besleme Sn tenörü	%	0,60
Ürün Sn tenörü	%	1,80
Atık Sn tenörü	%	0,07
Verim	%	89
Konsantre oranı	%	25

Modellemede kullanılan akım şemaları sırasıyla Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de gösterilmiştir. İlk akım şemasında, 1. ayırıcıdan alınan ürün doğrudan ön zenginleştirmeye gönderilirken, atık olarak ayrılan malzeme 2. ayırıcıya beslenmektedir. Bu ayırıcı bir nevi süpürme görevini görmektedir ve 1. ayırıcının atığında kalan ürünleri tekrardan kazanmaktadır.



Şekil 2.6. Birinci örnek akım şeması

İkinci akım şemasında, 1. ayırıcıdan çıkan atık, 2. ayırıcıya beslenmektedir ve buradan alınan atık, nihai atık sahasına gönderilmektedir. 2. ayırıcıdan elde edilen ürün tekrar 3. ayırıcıya beslenmekte ve elden edilen nihai ürün, 1. ayırıcının ürünü ile birleştirilerek nihai cevher zenginleştirme sahasına gönderilmektedir. 3.ayırıcıdan çıkan atık diğer ayırıcıların atığı ile birleştirilerek atık sahasına gönderilmektedir.



Şekil 2.7. İkinci örnek akım şeması

Her iki akım şemasında, birinci ayırmada amaç; yüksek tenörlü cevher kazanımından ziyade fazla miktarda ürünün kazanılmasıdır. 2. ayırıcı ilk ayırıcının atığında kalan cevherlerin geri kazanımı için devreye alınmıştır. 3. ayırıcı bir önceki ayırıcının ürününden, daha fazla atığın uzaklaştırılması için tasarlanmıştır. Modellemede verim ve konsantre oranı değerleri için kullandığımız formüller aşağıdaki gibidir.

$$\%R = \frac{C \times c}{F \times f} \times 100 \quad (2.1)$$

$$\text{Kazanma oranı} = \frac{C}{F} \times 100 \quad (2.2)$$

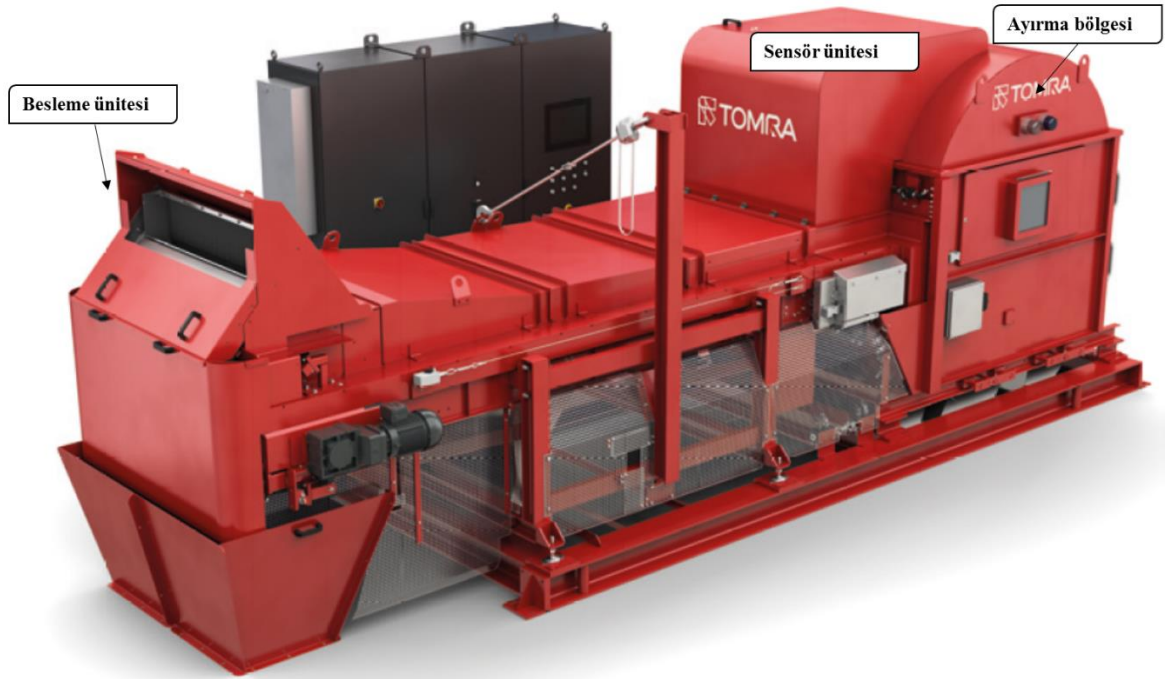
Burada C: konsantre miktarı; c: konsantre tenörü; F: Besleme miktarı; f; besleme tenörü olarak kullanılmıştır.

2.2.2. Numune Hazırlama

Numune hazırlamanın amacı farklı kalay içeriğine sahip taneleri XRF analizi için uygun hale getirmektir. Bu aşamadaki ilk adım, farklı kalay içeriğine sahip tanelerden, üç adet numune serisi hazırlamaktır. Bunun için XRT ayırıcı kullanılmıştır. Numune hazırlamada kullanılan Tomra Sorting XRT cihazının teknik özellikleri Tablo 2.5'te ve genel görünümü Şekil 2.8'de gösterilmiştir.

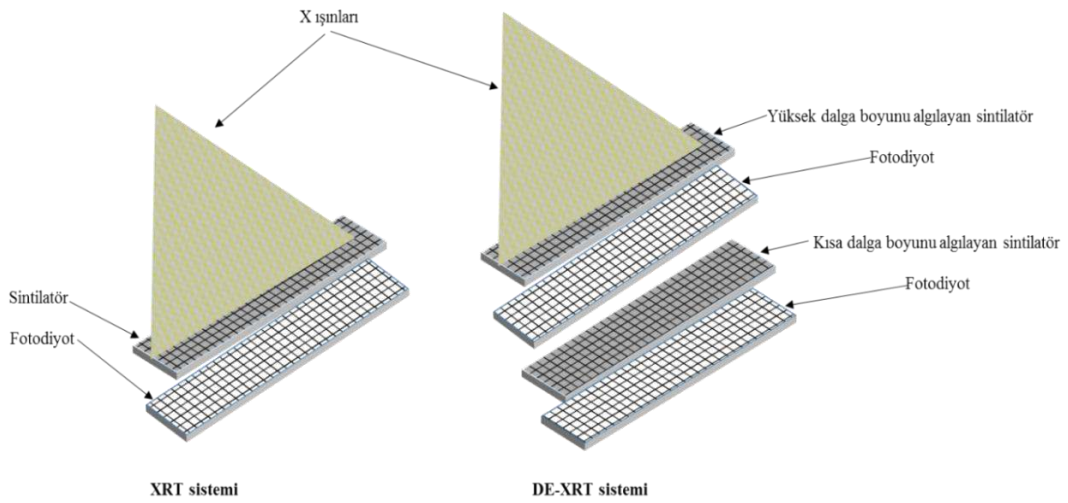
Tablo 2.5. Numune hazırlamada kullanılan XRT cihazı özellikleri (Tomra, 2020)

Parametre	Birim	Özellikler
Ayırıcı tipi	mm	COM Tertiary XRT 1200
Sensör tipi	--	X-ışını sensörü
Besleme kapasitesi	Ton/saat	150
Tane boyut aralığı	mm	4-60
Elektrik gücü	KVA	15



Şekil 2.8. Numune hazırlamada kullanılan XRT cihazının genel görünümü (Tomra, 2020)

XRT ayırıcının çalışmasında ilk adım olarak, beslemeyi incelemek için bir ayırıcı testi yapılmış ve görüntüler kaydedilmiştir. Sonuçlar optimizasyon için kullanılarak kabul/red fraksiyonları belirlenmiştir. Cihazın çalışma prensibi, X-ışınlarının tane içinden geçerek zayıflamasının düzlemsel projeksiyonuna dayanmaktadır. Malzeme, besleme ünitesinden titreşimli besleyiciyle beslenmekte ve sensör ünitesine sunulana kadar hareketli bant üzerinde stabilize edilmektedir. Daha sonra X-ışınları malzemeye doğru gönderilmekte ve malzemedan geçen ışın, çizgisel tarama yapan dedektör tarafından algılanmaktadır. X-ışını sensöründen alınan sinyaller atom yoğunluğuna ve malzemenin kalınlığına bağlıdır. Sinyaller, tanelerin iç bileşimi hakkında bilgi vermektedir. Kaydedilen görüntüler, Tomra görüntü işleme yazılımını ile farklı yoğunluğa sahip bölgeleri ayırmak için kullanılmaktadır. XRT ayırıcının kapasitesi beslemenin tane boyutu ve hacmine göre değişiklik göstermektedir. XRT algılama birimi: X-ışını dedektörleri ve bir tabaka halinde bulunan sintilatörlerden oluşmaktadır. Sintilatörler X ışınları gibi iyonlaştırıcı radyasyonla aktive edilirler. Işının sintilatöre isabet etmesiyle görünür ışık emisyonu meydana çıkar. Bu emisyon, fotodiyot veya fotoçoğaltıcı gibi optik alıcılarla algılanabilir. X ışını şiddeti arttıkça üretilen ışık miktarı da artmaktadır. DE-XRT ayırıcılarda, sintilatör ve fotodiyot sayısı iki katına çıkmaktadır. İlk sensör dizini yüksek dalga boyuna sahip ışınları algılarken, ikinci kat sensör dizini kısa dalga boyuna sahip ışınları algılar (Nienhaus vd., 2014). Şekil 2.9’da XRT ayırıcıların algılama sisteminin modifiye görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.9. XRT ve DE-XRT ayırıcıların algılama prensibi (Nienhaus vd., 2014)

XRT ayırıcıya %0.1-2 HD aralığında 100 kg kasiterit numunesi beslenmiştir. Beslenen malzeme 8-32 mm tane boyutuna sahiptir. XRT kabul/ret komutuyla <%0.1, %0.1-2 ve >%2 olarak üç farklı cevher grubu oluşturulmuştur. Laboratuvar ölçekli deney için, her numune grubunda en az 100 adet tane bulunmalıdır. Bu nedenle her üç %HD grubu ayrı ayrı olarak, ızgara-kanallı örnek bölücülerle (riffle) bölünmüştür. İşlem her aralıkta en az 100 adet tane kalana kadar devam etmiştir. Ayırma ve örnek bölme işlemleri Tomra Sorting GmbH laboratuvarlarında yapılmıştır. Örnek bölücüyle ayrılan temsili numuneler, birbiriyle temas halinde olmamaları için deney levhaları şeklinde hazırlanmıştır. Deney levhası düz bir yüzey üzerine birbirinden mesafeli olarak yapıştırılmış tane takımına verilen isimdir. Böylece her içerikten 100 adet olmak üzere toplamda 300 adet tane deneye tabi tutulmuştur. Her levhaya ve levhalardaki her bir taneye bir numara verilmiştir. Bu işlem XRT taramada her bir taneye ait görüntüyü kolaylıkla bulmayı sağlamaktadır. Deney levhalarıyla ilgili veriler Tablo 2.6'da ve örnek deney levhası Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

Tablo 2.6. Deney levhalarına ait bilgiler

Levha numarası	Kalay içeriği	Tane boyutu	Temsili örnek sayısı
	%	mm	adet
1	<0.1	8-32	100
2	0.1-2	8-32	100
3	>2	8-32	100



Şekil 2.10. Deney levhalarının genel görünümü

Levhalar, önce XRT cihazıyla taranmıştır ve her bir taneye ait %HD değerleri kaydedilmiştir. Daha sonra X-ışını tarayıcısıyla tanelerin iki boyutlu görüntüsü alınmıştır. Bu cihaz iki boyutlu tarama yapan ve X-ışınlarına maruz kalan tanelerin iç yapısı hakkında bilgi veren laboratuvar ölçekli cihazdır. Deneyde kullan Hi-Scan 6040i X-ışını tarayıcı cihazın özellikleri Tablo 2.7’de ve genel görünümü Şekil 2.11’de verilmiştir.

Tablo 2.7. Deneyde kullan Hi-Scan 6040i X-ışını tarayıcı cihazın özellikleri

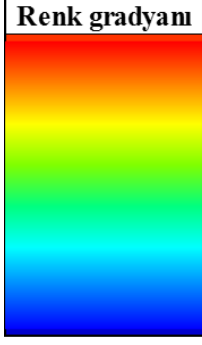
Özellik	Parametre	Değer
Bant genişliği	mm	620
Bant hızı	m/s	0,20
Dedektör türü	ışını	X
Çözünürlük	mm	0,10
Penetrasyon	mm	30
Voltaj	kV	160



Şekil 2.11. Hi-Scan 6040i X-ışını tarayıcı cihazı

Beslenen malzemenin atom yoğunluğuna bağlı olarak, X ışını emme derecesi, her bölgede farklılık göstermektedir. Kurşun kaplı cihaz kabininin içinde X-ışını kaynağı ve iki kat plakalı algılayıcı karşı karşıya duracak şekilde monte edilmiştir. X-ışını beslenen malzemeye doğru gönderilir. Radyasyondan sonra toplam X ışını zayıflamasına çizgisel integral adı verilir. Dedektör bu zayıflamayı ölçerek malzemeyi tanımlamaktadır. Plakalı dedektör, gelen enerjinin şiddeti ve pozisyonunu algılamaktadır. İlk kat algılayıcı düşük enerjili X-ışınlarını algılayarak yüksek enerjili ışınlar, bir filtreden geçerek ikinci kat algılayıcı tarafından algılanırlar. İki algılayıcı tabakasının çıktıları karşılaştırılır ve böylece nihai bir görüntü oluşturulur. Bu görüntü tanenin pozisyonu ve yoğunluğu hakkında bilgi vermektedir.

Bu cihazın ekran görüntüsü atom yoğunluğuyla alakalıdır. Atom yoğunluğu yüksek olan bölgeler daha koyu olarak görüntülenirken, atom yoğunluğu düşük olan bölgeler daha açık tonlarda görüntülenmektedir. Şekil 2.12’de X-ışını tarama cihazına ait atom yoğunluğuna dayalı renk gradyanı gösterilmiştir.

Renk gradyanı	Atom numarası	Bileşenler
	<10	Hafif elementler: hidrojen, karbon, nitrojn, oksijen
	10-15'	Orta ağırlıklı elementler: saf alüminyum, sodyum, klor, yemek tuzu
	15-56	Ağır elementler; Metaller: titanyum, krom, demir, nikel, bakır, çinko, kalay, gümüş vb.

Şekil 2.12. X-ışını tarama cihazında atom yoğunluğu ile ilişkili renk gradyanı

X-ışını altında atom yoğunluğu 10'dan düşük olan elementler, kırmızı tonlarda, 10-15 aralığında atom yoğunluğuna sahip orta ağırlıklı elementler sarı veya yeşil tonlarda ve metaller gibi 15 den daha ağır atom yoğunluğuna sahip elementler çeşitli mavi tonlarında görüntülenmektedir. Deney levhaları tek tek X-ray tarayıcıyla tarandıktan sonra, görüntüleri kaydedilmiştir. Numunelerdeki görüntülenerek renkleri, renk gradyanı ile karşılaştırılarak atom yoğunluğu yüksek olan bölgeler tespit edilmiştir.

Bu aşamadan sonra taneler deney levhalarından çıkarılarak tek tek kırma işlemine tabi tutulmuştur. Kırma devresi için kullanılan kırıcı laboratuvar ölçekli çeneli kırıcıdır. Kırıcı özellikleri Tablo 2.8'de gösterilmiştir. Kırma işleminin amacı taneleri öğütücüye beslemek için hazırlamaktır. Bu işlemle taneler 8-32 mm den -4 mm boyutuna indirilmiştir. Çeneli kırıcının çıkış ağız genişliği 4mm ve dakikada devir sayısı 650 rpm olarak ayarlanmıştır. İşlem sonrası örnekler, ayrı ayrı paketlenmiş ve levha üzerindeki numarasıyla kodlanarak saklanmıştır. Şekil 2.13'te deney için kullanılan çeneli kırıcı gösterilmiştir.

Tablo 2.8. Laboratuvar ölçekli çeneli kırıcı özellikleri

Özellik	Parametre	Değer
Kırıcı markası		Retsch
Kırıcı tipi		Çeneli kırıcı
Çıkış ağız genişliği	mm	4 (ayarlanabilir)
Tane boyutu	mm	Max. 40
Devir sayısı	rpm	550-950
Güç	W	1150



Şekil 2.13. Laboratuvar ölçekli çeneli kırıcı

XRF analizine tabi tutulacak olan örnekler öğütme işlemiyle toz haline getirilmelidir. Öğütme işlemi için halkalı değirmen kullanılmıştır. Kırıcıdan çıkan taneler tek tek halkalı değirmene beslenerek öğütülmüştür. Bu çalışmada önce bir kaç numune farklı öğütme süreleri ile öğütülmüştür. Sonuçlara göre optimum öğütme süresi 1 dakika olarak seçilmiştir. İşlem sonrası örnekler ayrı ayrı paketlerde saklanarak XRF işlemi için hazırlanmıştır. Deneyde kullanılan öğütme cihazı SIEBTECHNIK markalı, devir sayısı 1000 rpm, halkalı değirmendir. Kullanılan halkalı değirmen görüntüsü Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



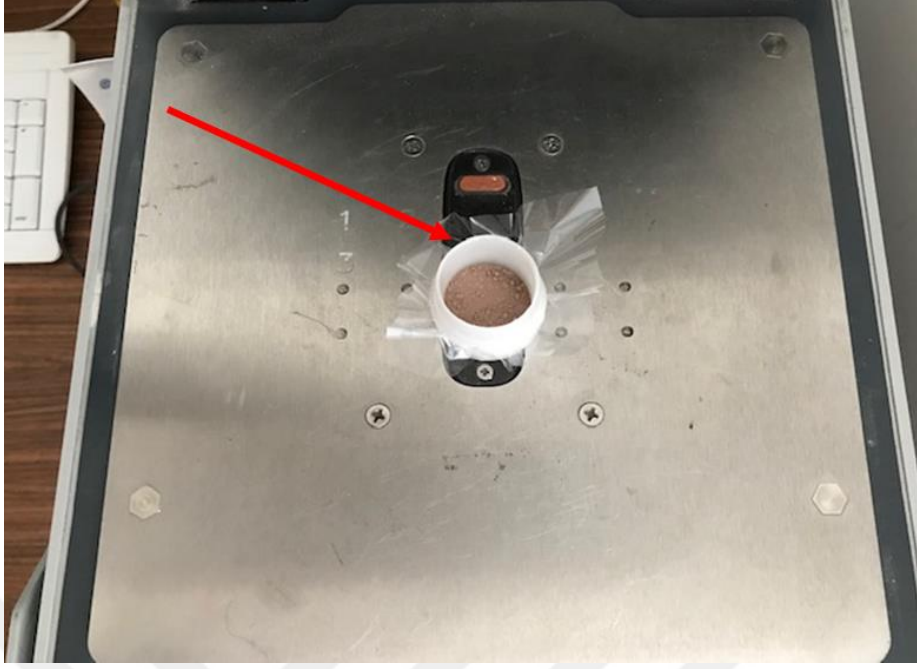
Şekil 2.14. Halkalı değirmen görüntüsü

2.2.3. XRF Analizi

XRF analizi cevher içerisindeki temel bileşenleri belirlemek için kullanılan analiz tekniğidir. Bu tekniğin avantajı hızlı analiz yapmasının yanı sıra malzemeye zarar vermemesidir. XRF cihazı bir X ışını kaynağı ve bir dedektörden oluşmaktadır. Analize tabi tutulan numune X ışınları ile uyarılır. Uyarma sonucu, numuneyi teşkil eden atomlardaki düşük seviyeli elektron yörüngesinden dışarı çıkar. Atom dengesini korumak için, üst enerji seviyesinde bulunan elektron, alt seviyedeki boşluğa iner. Bu seviye değişimi sonucu ikincil X ışını veya floresans ışınları meydana çıkmaktadır. Dedektör ikincil X ışınlarını algılayarak element hakkında bilgi vermektedir. Her bir elementin kendine özgü floresans ışınları dalgaboyu vardır. Işımanın dalga boyunun saptanmasıyla elementin cinsi (nitel), saptanan bu ışının yoğunluğunun ölçülmesiyle element konsantrasyonu (nicel) belirlenmektedir. Bu işlem, numunenin katı, sıvı ve ya toz halinde bulunması farketmeksizin, içerdiği elementlerin miktarını ppm veya yüzde olarak göstermektedir. Karakteristik X-ışınları, dalgaboyları ya da enerjilerinin farklılıkları tarafında analiz edilebilirler. Dolayısıyla 3 çeşit XRF tekniği vardır. Dalgaboyu saçılımlı spektrometre (WDS), enerji saçılımlı spektrometre (EDS) ve ayırmaz XRF tekniği. WDS ve EDS cihazları arasındaki temel fark, X-ışını dedektör sistemleridir. WDS cihazı örnekten gelen

X-ışınını tayin edebilmek için tek kristal kırınımı kullanırken, EDS bir foton dedektörü kullanır. Bu dedektör genellikle bir Si(Li) diyotudur ve X-ışını fotonlarını enerjilerine göre ayırır. Ayırmazsız teknikte floresans ışını peş peşe duran bir çift filtreden geçirilir ve ikiz sayıcılara gönderilir. İki sinyalin arasındaki fark, elementin konsantrasyonu ile orantılıdır (Al-kubati, 2016). XRF analizinin doğruluğu çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu faktörler; cihazın doğru kalibrasyonu, numune hazırlama ve cihaz hassasiyetidir. Cihazın yüksek duyarlılık ve yüksek sayım oranı, doğruluk oranını artırmanın yanı sıra, ölçüm süresini de arttırmaktadır. Kantitatif analiz için numune hazırlama önem arz etmektedir. Hazırlanan numune homojen olmalı ve tüm malzemeyi temsil etmelidir.

Deneyde kullanılan XRF cihazı, 50 kV'lık ana filtre gücüne sahip NITON XL3t cihazıdır. Cihaz standart fabrika ayarlıdır ve farklı cevher tipleri için farklı uygulama seçenekleri vardır. Bu cihazda ölçüm sırasında matris etkisini önlemek için numune tane boyutu $<100\mu\text{m}$ olmalıdır. Kırma ve öğütme işleminden sonra toz halinde saklanan 300 adet örnek, ayrı ayrı XRF cihazıyla analiz edilmiştir. Bunun için öğütülmüş her bir numuneden karelej yöntemiyle örnek alınmıştır. Alınan örnekler, analizine özel plastik kaplara (cup) doldurulmuştur. Her bir numuneye ait kap, XRF tarayıcı lensi üzerine yerleştirildikten sonra (Şekil 2.15) analiz süresi 120 sn olmak üzere 1 kez tekrarlanmıştır. Analiz tekrar sayısı çıkan sonuçlarla bağlantılıdır. Şöyleki, 10 adet numune, her biri için tekrar sayısı üç defa olmak üzere analiz edilmiştir. Her tekrarda çıkan sonuçlar birbirine oldukça yakın olduğu için tekrar sayısı bir olarak belirlenmiştir. Tüm analiz bittikten sonra elde edilen veriler bilgisayar üzerine kaydedilmiştir. Şekil 2.16'da XRF analizi için kullanılan toz halinde taneler ve analiz için kullanılan deney kapları gösterilmiştir.



Şekil 2.15. XRF tarayıcı lensi üzerine yerleştirilen deney kapı



Şekil 2.16. XRF analizi için farklı kalay içeriklerine sahip toz numuneler ve deney kapları

2.2.4. Mekanik Verimlilik

Toplam proses partition değerlerini elde etmek için hem algılama hemde mekanik partition değerlerine ihtiyaç vardır. Mekanik verimlilik değerleri, ayırıcıların mekanik verimliliği üzerine yapılan tez çalışmasından alınmıştır. Değerler Tablo 2.9’da verilmiştir

Tablo 2.9. Bant tipi XRT ayırıcıların mekanik verimlilik değerleri (Nölte, 2013)

Parametre	Birim	Değer		
Ayırıcı numarası		1	2	3
Atığa giden ürün (PtW)	%	2	1	1
Saflık	%	83,50	89,80	93,50

Saflık, kazanılan miktar ile alakalı bir kavramdır ve mekanik etkiler altında kazanılan miktarı yüzde olarak göstermektedir. Çalışmadaki dikkati artırmak için saflık değerleri tekrardan ölçülmüştür. Aşağıda verilen eşitlikte, kilogram bazında saflık, cevher yoğunluğu, çevre kaya yoğunluğu ve tane başına saflık ifadeleri sırasıyla P, ρ_c , ρ_h ve X olarak gösterilmiştir.

$$P = \frac{X \rho_c}{X \rho_c + (1-X) \rho_h} \quad (2.3)$$

$$P (X \rho_c + (1 - X) \rho_h) = X \rho_c \quad (2.4)$$

$$P X \rho_c + P \rho_h - P X \rho_h = X \rho_c \quad (2.5)$$

$$X (P \rho_c - \rho_c) - P X \rho_h = - P \rho_h \quad (2.6)$$

$$X (P \rho_c - \rho_c - P \rho_h) = - P \rho_h \quad (2.7)$$

$$X = \frac{- P \rho_h}{(P \rho_h - \rho_c - P \rho_h)} \quad (2.8)$$

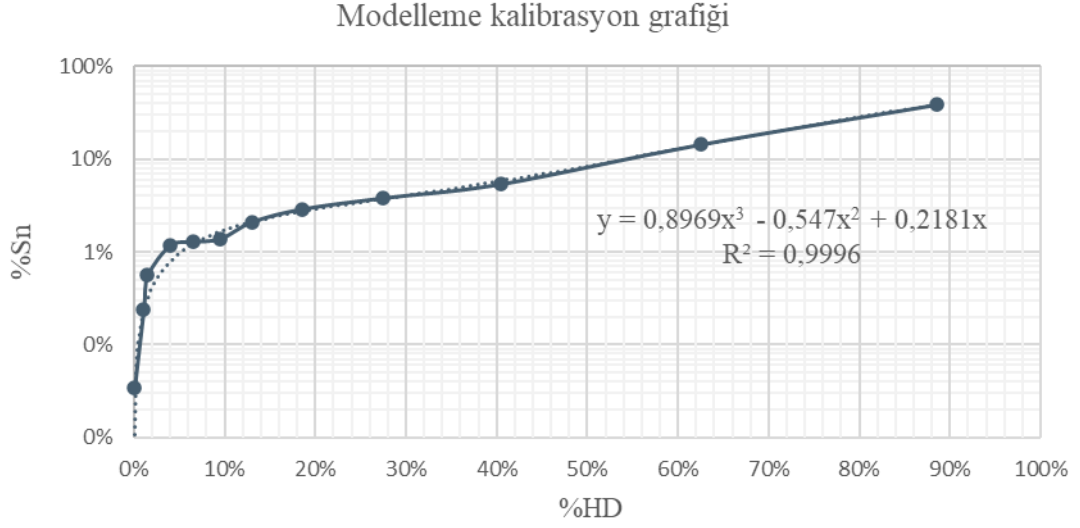
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Modelleme İçin Kullanılan Kalibrasyon Grafiği

XRT cihazıyla belirlenen aralıklarda HD değerleri ve kimyasal analiz ile her aralığa ait %Sn değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Bu değerlerle oluşturulan kalibrasyon grafiği Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Kalibrasyon grafiği için kullanılan %HD ve %Sn değerleri

HD	Ortlama HD	Fe	Sn
%	%	%	%
<0.1	0,05	4,22	0,03
0.1-2	1,05	5,32	0,24
2-3	1,50	6,59	0,56
3-5	4,00	7,22	1,18
5-8	6,50	7,64	1,29
8-11	9,50	6,46	1,39
11-15	13,00	8,82	2,11
15-22	18,50	9,59	2,90
22-33	27,50	0,00	3,83
33-48	40,50	6,91	5,41
48-77	63,00	7,92	14,40
77-100	89,00	4,43	38,58



Şekil 3.1. %HD değerleri ile Sn içeriği arasındaki ilişkiyi gösteren modelleme kalibrasyon grafiği

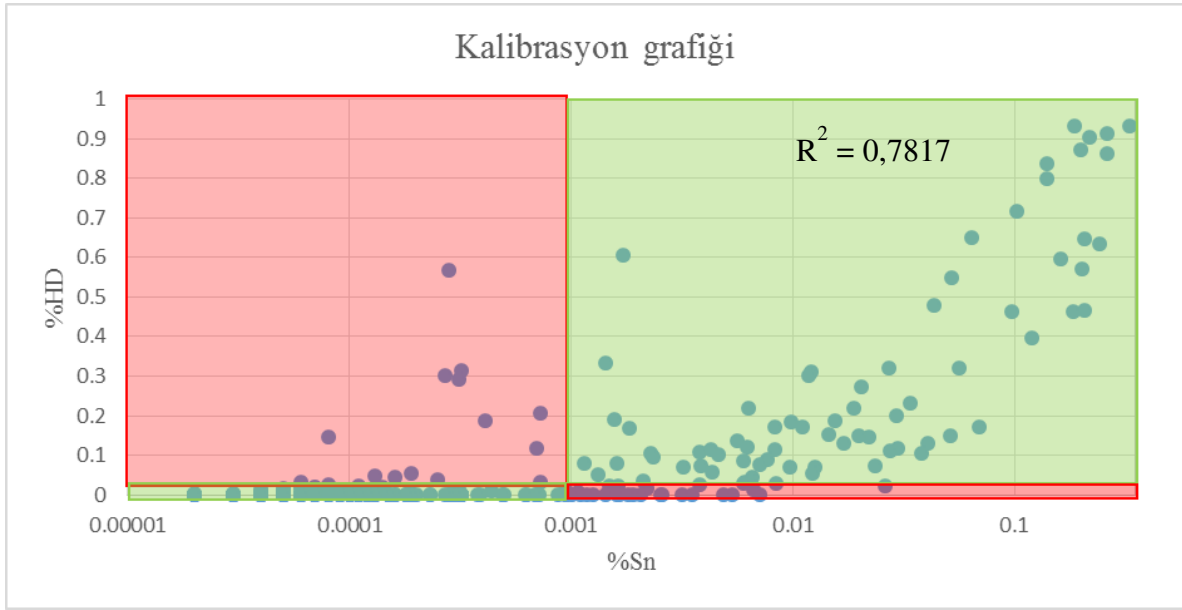
Grafik, veriler arasında pozitif bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu durum R^2 değerinin bire yakın olduğundan anlaşılmaktadır. R^2 , $0 \leq R^2 \leq 1$ aralığında bulunan istatistiksel bir ölçüdür ve deneysel verilerin denklemle ifade edilebilen bir eğriye ne kadar uyduğunu göstermek için kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada R^2 değeri 0.996 olarak ve korelasyon formülü $y = 0.8969x^3 - 0.547x^2 + 0.2181x$

olarak bulunmuştur. Basit bir deyişle, formüle göre %HD değeri bağımlı değişkendir ve %Sn içeriğine göre değişiklik göstermektedir. Grafikten elde edilen formül, modellemede %HD değerlerinden Sn içerikli tanelerin miktarını bulabilmek için kullanılmıştır. Şekil 2.4'te %Sn içeriği ve %HD değerleri ile oluşturulan kalibrasyon grafiği gösterilmiştir.

3.2. Kalibrasyon Grafiğinin Değerlendirilmesi

Deney sonucu, XRF analizinden elde edilen %Sn değerleri ile, aynı numunelerin obje listelerindeki %HD değerlerini kullanarak kalibrasyon grafiği oluşturulmuştur. Dağılımı görebilmek için, her bir taneye ait kimyasal içeriği ve sensör indeksi değerlerini bulmak, büyük öneme sahiptir (Gülcan, 2020). Değişikliklerin daha net görülmesi için grafik logaritmik ölçüde çizilmiştir. Kalibrasyon grafiği Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Kalibrasyon grafiği %HD değerleri ile aynı objelerin %Sn değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Grafiğe bakıldığında malzemenin çoğunluğu düşük %HD değerlerinde yer aldığı görülmektedir. Grafikteki R^2 değeri 0,7817 bulunmuştur. R^2 değeri değişkenler arasındaki korelasyon gücünü göstermektedir. Aralarında güçlü ilişki olan değişkenler bire yakın R^2 değerine sahiptir.



Şekil 3.2. %HD ve %Sn değerleri ile kalibrasyon grafiği

Deney sonucu elde edilen kalibrasyon grafiği, modellemede kullanılan kalibrasyon grafiğine nazaran daha düşük korelasyon gücü göstermektedir. Besleme atık malzemesi olduğundan dolayı R^2 değeri kabul edilebilir. Ancak mevcut R^2 değerinin daha düşük bulunma nedeni, aşağıda bahsedilen dört durumdan kaynaklanıyor olabileceği düşünülmektedir.

- i. Deney sonucu oluşturulan kalibrasyon grafiği tanelerin tek tek ölçümü ile oluşturulmuştur. Modellemede kullanılan kalibrasyon grafiği için %HD ve %Sn değerleri ortalama değerlerdir. Dolayısıyla tane olarak ölçülen %HD değerleri daha güvenilirdir.
- ii. XRF cihazının ölçüm dikkatinin düşük olduğu düşünülmektedir.

- iii. Deney için tane sayısı az olabilir. Yani XRF işlemine tabi tutulacak tane miktarını arttırarak grafik üzerinde daha fazla nokta elde edilebilir. Bu durum korelasyon sonucunun güvenilirliğini artırmaktadır.
- iv. Kalibrasyon grafiğinde, 0,53 gibi düşük R^2 değerleri bile halen kabul edilebilirdir, ancak algılama verimliliğinin düşük olduğunu göstermektedir. Bu durum atığın ürüne ve ürünün atığa karışma olasılığını artırmaktadır (Robben ve Wotruba, 2019).

3.2.1. Dağılım Tablosu

Kalibrasyon Grafiği, algılama verimliliğinin grafiksel göstergesidir ve Dağılım Tablosu kalibrasyon grafiğinin rakamsal olarak açıklamasıdır (Robben ve Wotruba, 2019). Sensör temelli ayırıcıların uygulanabilirliği gösteren ilk faktör algılama verimliliğidir. Algılama verimliliğiyle kesme tenörüne bağlı olarak ürün ve atığın birbirine karışma olasılığını açıklamak mümkündür (Robben, 2019). Bunu açıklamak için Dağılım Tablosu kullanılmaktadır. Böylece ürün ve atığın ne kadarının doğru ürünlere yerleştirildiğini ve ne kadarının yanlış ürünlere gönderildiği açıklanabilir. Bu tablo yalnız 0 ve 1 kodlama yöntemi ile hazırlanmıştır. Şöyle ki %HD kesme değerinden daha büyük tenör değerine sahip olan taneler 1 olarak kodlanırken, kesme değerinden daha düşük tenör değerine sahip taneler 0 olarak kodlandırılır. Yani:

$(>\%HD\ 1,0) = \text{Ürün olarak algılanan ürünler}$

$(<\%HD\ 1,0) = \text{Atık olarak algılanan atıklar}$

Bu çalışmada, cevherin kesme tenörü %0,1 dir ve ayırıcı kesme tenörü %0,5 dir. Ayırıcı, %HD değerinden daha yüksek değerlere sahip taneleri ürün olarak algılarken, kesme değerlerinden daha düşük değerlere sahip taneleri atık olarak algılamaktadır. Kesme değerlerine yakın değerlerde yanlış yerleştirilme ihtimali yüksektir. Dağılım tablosu sonuçları Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Dağılım Tablo sonuçları

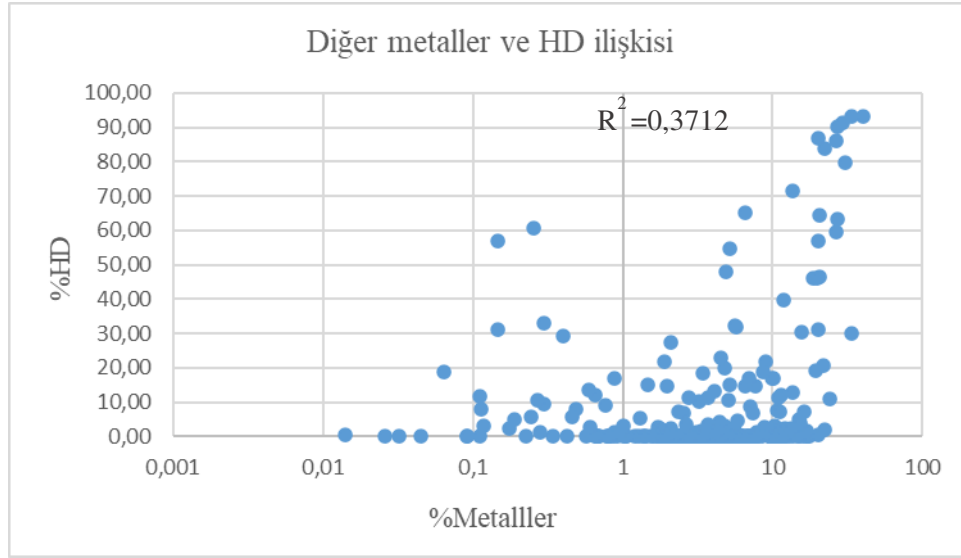
Parametre	Tane miktarı	
	Adet	%
Konsantreye gönderilen ürün sayısı	81	27
Atığa gönderilen ürün sayısı (PtW)	17	6
Atığa gönderilen atık sayısı	163	54
Konsantreye gönderilen atık sayısı (WtP)	39	13
Toplam tane sayısı	300	100

Tabloya göre toplam 300 adet tanenin 81 adeti kalay içerikli tane olarak algılanarak doğrudan ürün bölümüne gönderilmiştir, bu da toplam beslemenin %27 sine karşılık gelmektedir. Geriye kalan tanelerin %54 ü atığa gönderilmiştir. Toplamda ürünün %6 sı atığa ve atığın %13 ü ürün bölümüne yanlış yerleştirilmiştir.

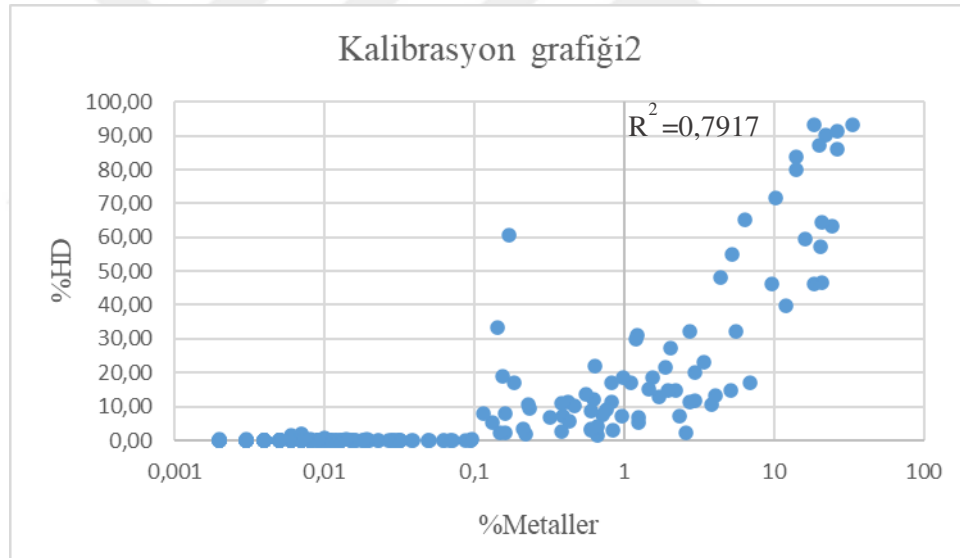
PtW ve WtP fraksiyonlarının oluşum nedenleri aşağıdaki gibidir.

- Tanedeki %HD ve %Sn değerlerinin her hangi birinin düşük olduğundan dolayı ürün atığa ve atık ürüne karışmıştır.
- Tanedeki %HD değeri kesme değerinden daha yüksektir, ancak %Sn değeri, Sn kesme tenöründen daha düşüktür. Bu durum, atığın ürüne karışmasına sebep olmuştur.
- Tanedeki %Sn değeri, Sn kesme tenöründen daha yüksektir. Ancak, %HD değeri kesme değerinden daha düşüktür. Bu durum da ürünün atığa karışmasına neden olmuştur.

Yukarıda belirtilen ürünün atığa ve atığın ürüne karışma olayı, diğer metallerin varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun için numunede bulunan çinko (Zn), demir (Fe), kurşun (Pb) ve bakırın (Cu) tenörleriyle, taneler ve HD ilişkisine bakılmıştır. Sonuçlar grafiksel olarak Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Ayrıca PtW ve WtP olayına neden olan tanelerin yokluğunda, veriler arasındaki ilişkiye bakılmıştır. Bunun için karışma neden olan taneler tek tek tespit edilerek grafikten çıkarılmıştır. Sonuç olarak elde edilen grafik Şekil 3.4'te verilmiştir. Her iki şekilde görüntünün daha net anlaşılması için grafikler logaritmik ölçüde çizilmiştir.



Şekil 3.3. HD ve numunedeki diğer metallerin korelasyon grafiği



Şekil 3.4. PtW ve WtP olayına neden olan tanelerin yokluğundaki görüntü

Grafiğe göre HD ve diğer metaller arasında çok zayıf bir ilişki vardır. Ayrıca, karışıma neden olan tanelerin yokluğu değerler arasındaki ilişki çok olumlu etkilememektedir. Dolayısıyla, yüksek tenörlü cevherin atık olarak ayrılması ve düşük tenörlü cevherin ürün olarak ayrılması aşağıdaki nedenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

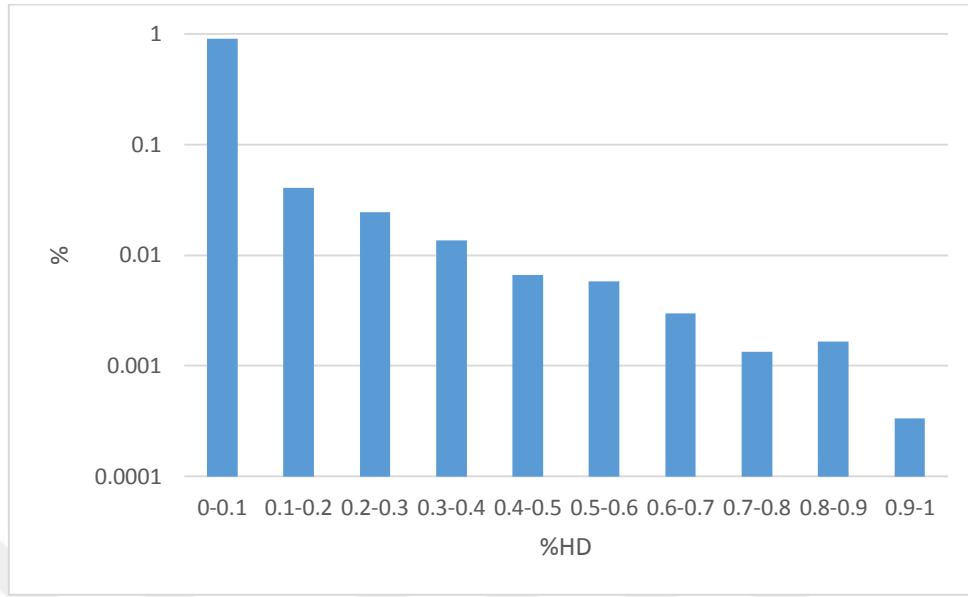
- i. Sinyal ve gürültü oranından dolayı, tanenin algılanmasını engellemiştir.
- ii. Numunedeki tane boyutu çok küçüktür ve HD olarak algılanamamıştır.
- iii. XRF cihazının algılama performansı %100 değildir.

3.3. %HD Sıklık Dağılımı ve Tenör Sıklık Dağılımı

Tablo 3.3'te 1. Ayırıcının, Tablo 3.4'te 2. ayırıcının ve Tablo 3.5'de 3.ayırıcının %HD sıklık dağılımı verileri verilmiştir. Bu tablolara dayalı çizilen grafikler sırasıyla Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Tabloda gösterilen rakamlar her bir ayırıcıya beslenen malzeme miktarını tane olarak göstermektedir. Ancak grafiğin daha net anlaşılabilmesi için tane miktarı yüzde olarak ifade edilmiştir. Örnek olarak %0 - 10 HD aralığında 5415 adet tane bulunmaktadır ve bu değer %90,25 olarak ifade edilmiştir. %HD değeri arttıkça algılanan malzeme miktarı azalmaktadır. %HD değerinin artışı tanelerin yüksek tenöre sahip olduklarının göstermektedir. Grafiklere bakıldığında her ayırıcı için beslenen tanelerin büyük bir kısmının düşük %HD (0%-10%) aralıklarında yer aldığı görülmektedir. Buradan, kalay içerikli tanelerin büyük çoğunluğunun, düşük tenörlü olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 3.3. Ayırıcı 1 için %HD aralıklarındaki Sn içerikli tanelerin dağılımı

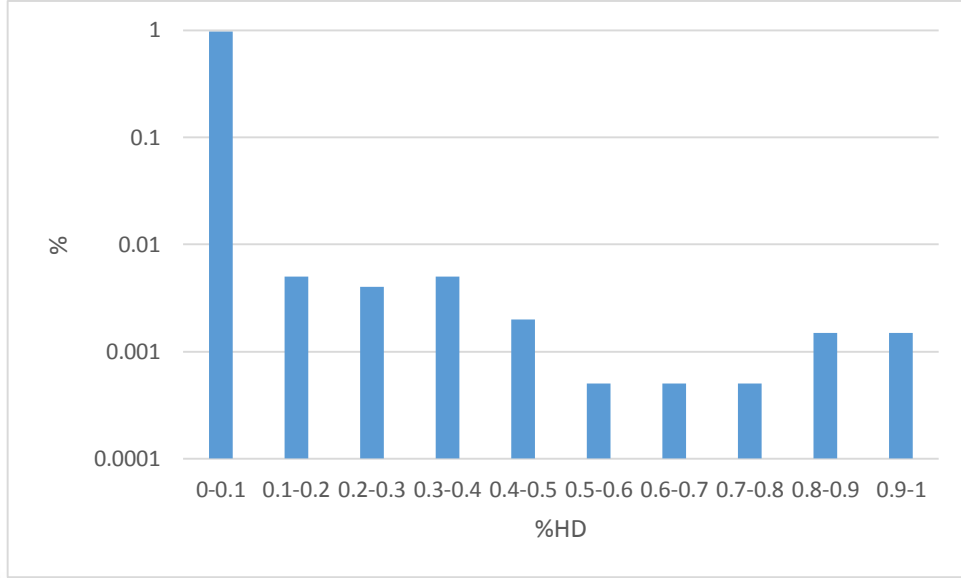
1.Ayırıcı		
HD	Tane sayısı	Tane sayısı
%	Adet	%
0-10	5415	90,25
10-20	243	4,05
20-30	147	2,45
30-40	82	1,37
40-50	40	0,67
50-60	35	0,58
60-70	18	0,30
70-80	8	0,13
80-90	10	0,17
90-100	2	0,03
Genel toplam	6000	100,00



Şekil 3.5. Ayırıcı 1 için %HD aralıklarındaki Sn içerikli tanelerin dağılımı

Tablo 3.4. Ayırıcı 2 için %HD aralıklarındaki Sn içerikli taneler

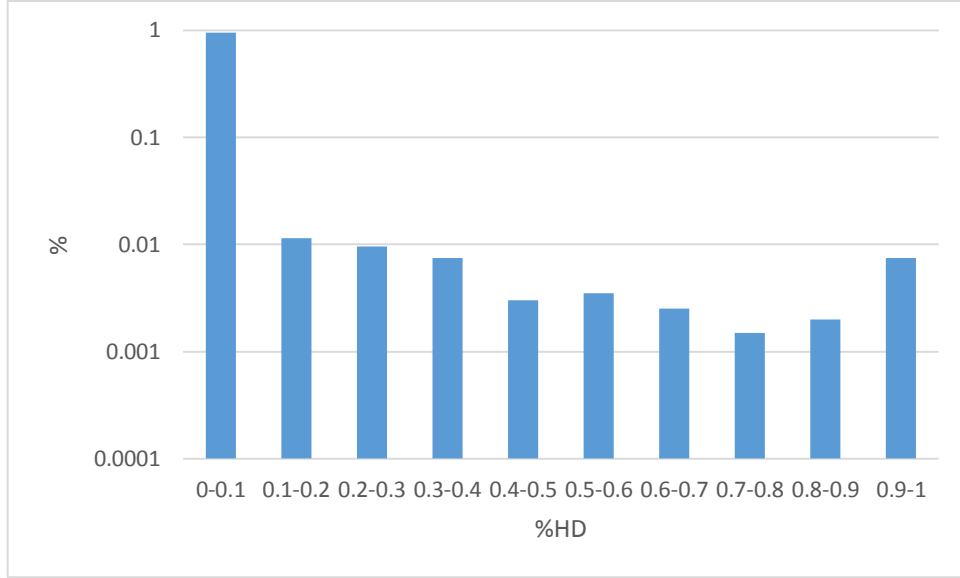
2. Ayırıcı		
HD	Tane sayısı	Tane sayısı
%	Adet	%
0-10	1959	97,95
10-20	10	0,50
20-30	8	0,40
30-40	10	0,50
40-50	4	0,20
50-60	1	0,05
60-70	1	0,05
70-80	1	0,05
80-90	3	0,15
90-100	3	0,15
Genel toplam	2000	100,00



Şekil 3.6. Ayırıcı 2 için %HD aralıklarındaki Sn içerikli tanelerin dağılımı

Tablo 3.5. Ayırıcı 3 için %HD aralıklarındaki Sn içerikli taneler

3.Ayırıcı		
%HD	Tane sayısı	Tane sayısı
%	Adet	%
0-10	1902	95,15
10-20	23	1,15
20-30	19	0,95
30-40	15	0,75
40-50	6	0,30
50-60	7	0,35
60-70	5	0,25
70-80	3	0,15
80-90	4	0,20
90-100	15	0,75
Genel toplam	1999	100,00



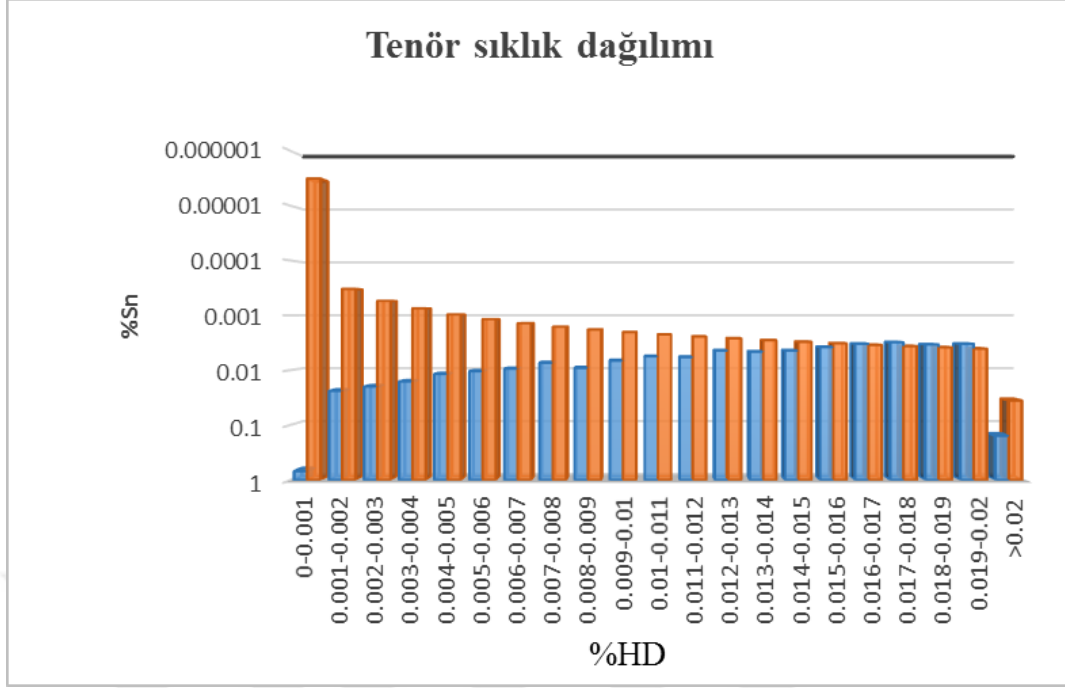
Şekil 3.7. Ayırıcı 3 için %HD aralıklarındaki Sn içerikli tanelerin dağılımı

Tenör sıklık dağılım verileri Tablo 3.6’da gösterilmektedir. Tabloda gösterildiği gibi %0-2 HD aralığında, toplam olarak 9999 adet tane modelleme için dikkate alınmıştır ve ortalama tenör değeri %0,58 dir. Besleme atık malzemesi olduğu için HD değeri arttıkça aralıkta bulunan tane sayısı azalmakta ve tenör değeri artmaktadır. Bu da numunede, malzemenin çoğunluğunun düşük tenörlü ve kesme tenörünün altında olduğunun göstergesidir.

Bu durumun daha net görülmesi için dağılım grafiği oluşturulmuştur. Tenör sıklık dağılım grafiği Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Tenör sıklık dağılımı verileri

HD aralığı	Örnek/Tane miktarı	Örnek/Tane miktarı	Sn içeriği
%	Adet	%	%
0-0,1	6881	68,81	0,00
0,1-0,2	237	2,37	0,03
0,2-0,3	198	1,98	0,05
0,3-0,4	160	1,60	0,07
0,4-0,5	117	1,17	0,10
0,5-0,6	104	1,04	0,12
0,6-0,7	94	0,94	0,14
0,7-0,8	73	0,73	0,16
0,8-0,9	91	0,91	0,18
0,9-1	67	0,67	0,20
1-1,1	56	0,56	0,22
1,1-1,2	58	0,58	0,24
1,2-1,3	44	0,44	0,26
1,3-1,4	46	0,46	0,28
1,4-1,5	44	0,44	0,30
1,5-1,6	38	0,38	0,32
1,6-1,7	33	0,33	0,35
1,7-1,8	31	0,31	0,36
1,8-1,9	34	0,34	0,38
1,9-2	33	0,33	0,41
>2	1560	15,60	3,55
Genel toplam	9999	100,00	0,58



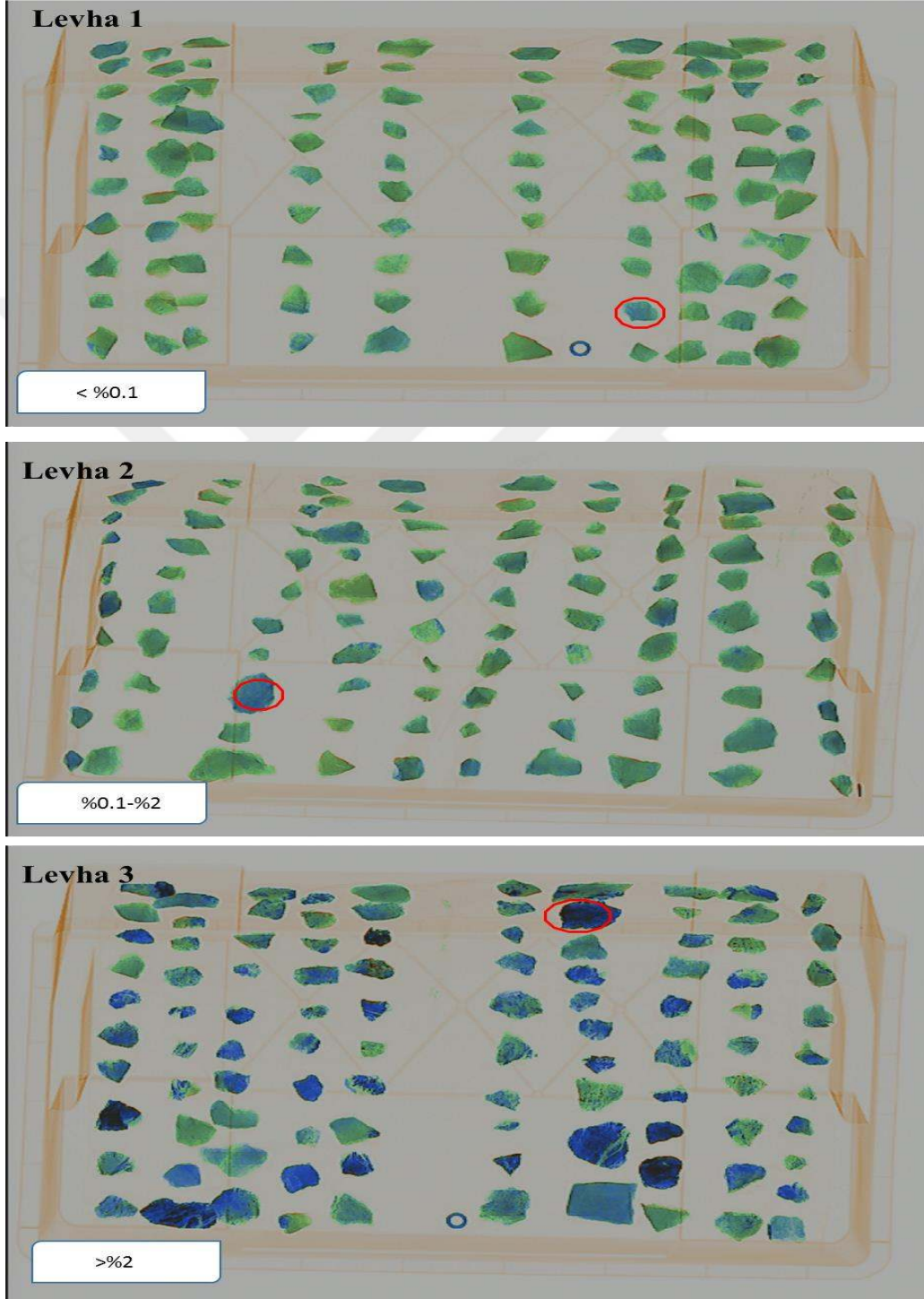
Şekil 3.8. %0-%2 HD aralığındaki tenör sıklık dağılımı

Değişikliklerin net görülmesi için grafik logaritmik ölçüde çizilmiştir. En düşük %HD aralığında (%0 - 0,1) tane sayısı diğer gruplara nazaran daha fazladır ancak tenör değeri çok düşüktür. %HD miktarı arttıkça tenör değeri de artmaktadır. Grafiğin okunuşu için ikinci sütün örnek verilerek şöyle yorumlanabilir: Malzemenin %2,37 si, %0,1-0,2 HD aralığındadır ve ortalama %0,03 değerinde tenöre sahiptir. Gösterilen aralıklarda tenör miktarındaki değişim çok düşüktür ve malzeme bu aralıklarda benzerlik göstermektedir.

3.4. Deney Levhaları

Şekil 3.9'da levha 1, levha 2 ve levha 3'ün taramadan sonraki görüntüleri gösterilmiştir. Görüntülerdeki renkler X-ışını tarayıcısının renk gradyanı ile karşılaştırılmıştır. Bu levhalarda, atom yoğunluğu yüksek olan element kalaydır. Levha 1 de kalay içeriği %0.1 den daha düşüktür yani yüksek atom yoğunluğu olan element miktarı çok azdır. Bu nedenle görüntüde mavi renk tonlarındaki alanlar yok denecek kadar azdır. Levha 2 de kalay içeriği %0.1-2 aralığındadır ve mavi bölgeler levha 1'e nazaran daha fazladır. Levha 3'te Kalay içeriği %2 den daha fazladır ve neredeyse tüm taneler yüksek

atom yoğunluğuna sahip element içermektedir. %HD değeri arttıkça hem kalay içerikli tanelerin sayısı hemde cevher içeren bölgelerin tonu daha koyu olarak gözükmetedir. Her bir levha görüntüsünde, örnek olarak kalay içerikli bir bölge kırmızı renkle işaretlenmiştir.



Şekil 3.9. Farklı kalay içeriğine sahip deney levhalarının X ışını altındaki görüntüsü

3.5. Tahmin Edilen Karışım Değerleri

Ayırıcılar için karışım tablosu ve seçilen karışım değerleri Tablo 3.7, Tablo 3.8 ve Tablo 3.9’da verilmiştir. Tablolarda ürün miktarı ve atık miktarı tane (obje) sayısı olarak gösterilmektedir.

Tablo 3.7. Birinci ayırıcı için karışım katsayı tahmini ve seçilen karışım katsayıları

1.Ayırıcı		Karışım katsayısı							
Parametre	Birim	%WtP - PtW							
		10	4	8	11	7	10	5	4
Ürün miktarı	Adet	3069		2749		2697		2689	
Ürün tenörü	%Sn	1,79		1,86		1,91		2,05	
Atık miktarı	ton	6930		7250		7302		7310	
Atık tenörü	%Sn	0,04		0,09		0,08		0,04	
Metal Verimi	%	94,98		88,05		89,03		94,89	
Konsantre oranı	%	30,69		27,49		26,97		26,90	

Tablo 3.8. İkinci ayırıcı için karışım katsayı tahmini ve seçilen karışım katsayıları

2.Ayırıcı		Karışım katsayısı							
Parametre	Birim	%WtP - PtW							
		6	1	4	2	1	4	3	3
Ürün miktarı	Adet	528		383		238		310	
Ürün tenörü	%Sn	0,43		0,59		0,94		0,72	
Atık miktarı	ton	6782		6927		7072		7000	
Atık tenörü	%Sn	0,01		0,01		0,01		0,01	
Metal Verimi	%	84,67		83,51		82,36		82,51	
Konsantre oranı	%	7,22		5,24		3,25		4,24	

Tablo 3.9. Üçüncü ayırıcı için karışım katsayı tahmini ve seçilen karışım katsayıları

3.Ayırıcı		Karışım katsayısı							
Parametre	Birim	%WtP - PtW							
		6	2	5	3	4	1	3	3
Ürün miktarı	Adet	110		106		103		99	
Ürün tenörü	%Sn	2,01		2,06		2,12		2,18	
Atık miktarı	Ton	273		277		280		284	
Atık tenörü	%Sn	0,02		0,03		0,03		0,04	
Metal Verimi	%	97,40		96,30		96,30		95,30	
Konsantre oranı	%	29		28		27		26	

Karışım değerleri 1. ayırıcı için %5 ve %4, 2. ayırıcı için %4 ve %2, 3. ayırıcı için %6 ve %2 olarak seçilmiştir. Karışım katsayılarının okunuşu için 1.ayırıcıdan örnek verilerek şöyle açıklanabilir: atığın %5 i ürüne karışacaktır, ürün olarak algılanan malzemenin %4ü atık fraksiyonuna gönderilecektir.

3.6. Deney Sonucu Karışım Değerleri

Algılama ayırım değerleri, algılama verimliliğini göstermektedir. Bu çalışmada XRF tarama sonucu elde edilen %Sn değerleri ve yerleştirme tablosundaki ürüne gönderilen ürün sayısı, algılama karışım değerlerini elde etmek için kullanılmıştır. %Sn değerleri cihaz tarafından algılanan her bir taneye ait tenör değerleridir. Dolayısıyla tane içeriklerinin doğru ve hassas okunması, algılama verimliliğinin yüksek olduğunun göstergesidir. Bu iki veri serisi Pivot tablosu ile ilişkilendirilerek gruplandırılmıştır. Değişikliklerin net görülmesi için grup aralıkları %0,1 olarak seçilmiştir. Sonuçlar Tablo 3.10'da gösterilmiştir.

Tablo 3.10. Algılama karışım değerleri

Aralık	Sn içeriği	Karışım değerleri
%	%	%
0-0,1	0,02	19,31
0,1-0,2	0,15	52,63
0,2-0,3	0,23	57,14
0,3-0,4	0,36	66,67
0,4-0,5	0,45	75
0,5-0,6	0,57	75
0,6-0,7	0,64	100
0,7-0,8	0,73	66,67
0,8-0,9	0,83	100
0,9-1	0,97	100
1-1,1	-	-
1,1-1,2	1,15	100
1,2-1,3	1,24	100
1,3-1,4	-	-
1,4-1,5	1,46	100
1,5-1,6	1,55	100
1,6-1,7	1,69	100
1,7-1,8	-	-
1,8-1,9	1,88	100
1,9-2	1,98	100
>2	11,54	100

Kesme değerine yakın değerlerde karışım olayının fazla olması tablodan da anlaşılmaktadır. %0-0,1, %0,1-0,2 ve %0,2-0,3 gruplarında ürüne gönderilen ürün miktarı sırasıyla %19,31, %52,63 ve %57,14 tür. Yani belirlenen aralıktaki tanelerin %19,31 i ürün bölümüne gönderilmiş, geri kalanı atık olarak algılanmıştır. Ancak, üst gruplarda tenör değerlerinin kesme değerinden oldukça uzak olması, karışım katsayısında giderek azalmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, üst gruplarda ürünün %100 ü ürün bölümüne gönderilmiştir.

Yeniden hesaplanan mekanik verimlilik değerleri Tablo 3.11’de gösterilmiştir. Bu çalışmada üç farklı XRT ayırıcı için, mekanik etkiler nedeniyle ürünün atığa ve atığın ürüne karışma olasılığı yüzde olarak gösterilmiştir.

Tablo 3.11. Hesaplama sonucu elde edilen mekanik verimlilik değerleri

Ayırma Parametresi	Değer	1.Ayırıcı	2.Ayırıcı	3.Ayırıcı
Atığa giden ürün (PtW)	%	2	1	1
Ürüne giden atık (WtP)	%	10,43	10,54	2,93

Mekanik verimlilik değerleri, literatürde bulunan değerlerden farklı olarak bulunmuştur. Bunun nedeni aşağıdaki gibi açıklanmaktadır.

- i. Çalışmada, algılama karışım değerleri ile paralel olarak, mekanik verimlilik değerleride her bir tane için hesaplanmıştır. Literatürde bulunan mekanik verimlilik değerleri kilogram ürün için hesaplanmış olup her kilo ürün için yüzde değerleri göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışma için bulunan mekanik verimlilik değerleri daha güvenilirdir.

3.7. Proses Modellemenin Doğrulanması ve Akım Şeması Seçimi

Elde edilen algılama karışım değerleri ile mekanik verimlilik değerlerini kullanarak her bir ayırıcıya ait toplam karışım değerleri bulunmuştur. Nihai karışım değerleri Tablo 3.12’de gösterilmiştir. Bu değerler gerçek karışım değerleridir ve modellemenin doğruluğunu teyit etmek için, modellemedeki tahmini karışım değerleri yerine kullanılmıştır. Her bir ayırıcıya ait deney sonrası oluşturulan proses tabloları Ek Tablo 4, Ek Tablo 5 ve Ek Tablo 6 da verilmiştir.

Tabloya göre, her üç ayırıcı için, tenör değeri arttıkça karışım miktarı azalmaktadır. Dolayısıyla ürün bölümüne gönderilen ürün miktarı da artmaktadır. Ancak, en yüksek tenör değerlerinde bile ayırma verimli %100 değildir. Bu durum mekanik etkiden kaynaklanmaktadır. Yüksek tenör değerlerinde algılama verimliliği %100 olsa bile mekanik hatalardan kaynaklı karışım olayı gözlenmektedir.

Tablo 3.12. Her bir ayırıcıya ait proses karışım katsayıları

Sn aralığı	Karışım Katsayıları		
	1.Ayırıcı	2.Ayırıcı	3.Ayırıcı
%	%	%	%
0-0,1	27,34	27,62	21,48
0,1-0,2	56,52	57,10	53,49
0,2-0,3	60,47	61,09	57,83
0,3-0,4	68,81	69,51	66,98
0,4-0,5	76,11	76,89	74,98
0,5-0,6	73,50	74,25	74,25
0,6-0,7	98	99	99
0,7-0,8	65,33	66	66
0,8-0,9	98	99	99
0,9-1	98	99	99
1-1,1	-	-	-
1,1-1,2	98	99	99
1,2-1,3	98	99	99
1,3-1,4	-	-	-
1,4-1,5	98	99	99
1,5-1,6	98	99	99
1,6-1,7	98	99	99
1,7-1,8	-	-	-
1,8-1,9	98	99	99
1,9-2	98	99	99
>2	98	99	99

Modelleme ve deney sonucu elde edilen ön zenginleştirme değerleri Tablo 3.13'te gösterilerek karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.13. Modellemede ve deney sonucu elde edilen ön zenginleştirme değerleri

Parametre	Test sonuçları			Modelleme sonuçları	
	Birim	1.Akım şeması	2.Akım şeması	1.Akım şeması	2.Akım şeması
Besleme tenörü	%	0,58	0,58	0,58	0,58
Konsantre tenörü	%	0,93	1,15	1,87	2,05
Atık tenörü	%	0,01	0,01	0,01	0,01
Konsantre Oranı	%	61,35	49,75	30,73	27,99
Sn kazanma Verimi	%	99,10	98,98	99,17	99,05

Modelleme ve deney sonuçlarının karşılaştırması:

- Modelleme sonucu her iki akım şeması için, atık tenörü %0,01 olarak bulunmuştur. Deney sonucu atık tenörü %0,01 bulunarak, modelleme sonucunu doğrulamaktadır.
- %verim değerleri 1. akım şemada %99,17 ve 2. akım şemada %99,05 olarak hesaplanmıştır. Deney sonucu %verim değerleri sırasıyla %99,10 ve %98,98 olarak bulunmuştur. Bu değerler modelleme sonuçlarına çok yakın değerlerdir ve modellemeyi doğrulamaktadır.
- Modelleme sonucu konsantre tenörü 1. akım şeması için %1,87 ve 2. akım şeması için %2,05 olarak bulunmuştur. Deney sonucu bu değerler sırasıyla %0,93 ve %1,15 olarak elde edilmiştir. Bu değerler modelleme değerlerinden daha düşüktür. Modellemedeki konsantre oranı değerleri 1. akım şeması için %30,73 ve 2. akım şeması için %27,99 olarak elde edilmiştir. Deney sonucu konsantre oranı değerleri birinci ve ikinci akım şemaları için sırasıyla %61,35 ve %49,75 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler modelleme sonuçlarından daha yüksek olarak bulunmuştur.

Konsantre oranı ve tenör değerlerinin farklı bulunması modellemenin doğruluğu reddetmek için yeterli neden değildir. Ancak, bu durumun aşağıdaki iki nedenden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

- Konsantre oranı ve ürün tenörünü doğrulamak için 300 adetten daha fazla tanenin deneye tabi tutulması gerekmektedir.
- Modellemedeki partition katsayıları, toplam ayırıcı sahasına ait üretim verilerinden yola çıkarak tahmin edilmiştir. Ayırıcı sahasına ait üretim verileri her bir ayırıcıya ait partition katsayılarının tahmini için yeterli değildir.

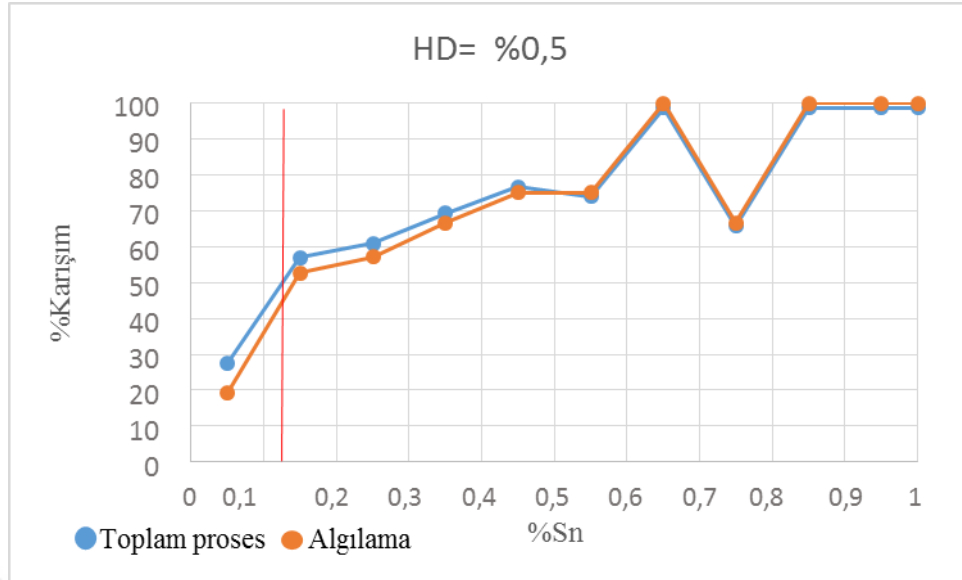
Çalışmada kullanılan her iki akım şeması, benzer yol izlemektedir ancak 2. akım şemasında, 2. ayırıcının ürününü değerlendirmek için bir ayırıcı daha eklenmiştir. Bu ayırıcının gerekli olup olmadığı veriler üzerinden aşağıdaki gibi tartışılmıştır.

Deney sonucuna göre, 3. ayırıcıdan elde edilen ürün miktarı 11 tph'a karşılık gelmektedir. Yani saatte 239 tonluk beslemeden, sadece 11 ton ürün bu ayırıcıyla ayrılacaktır. Bu miktar ürünü kazanmak için ek bir ayırıcının devreye alınması, tamamıyla tesisin ekonomik modeline bağlıdır.

Bunun yanı sıra, 3. ayırıcının çalışmasıyla konsantre oranı ve verim değerlerinde de düşüş gözlenmiştir. Verim değerleri 1. akım şemasında %99,10 iken 2. akım şemasında %98,98 e düşmüştür. Konsantre oranı %61,35'den %49,75 e düşmüştür. Yani 3. ayırıcının çalışmasıyla atık olarak daha fazla malzeme ayrılacaktır ancak ayırma esnasında, kazanılan ürün miktarında çok az bir kayıp yaşanacaktır. Eğer daha fazla atığı devreden çıkartmak için %0,12 lik kayıp göz ardı edilebilirse, bu ayırıcıyı kullanmak tavsiye edilebilir. Dolayısıyla 3. ayırıcının gerekliliği tesisin ekonomik modeliyle doğrudan bağlantılıdır.

3.7.1. Kesme Tenörünün Doğrulanması

Deney sonucu elde edilen karışım değerleri ve %Sn değerleriyle, karışım grafiği oluşturulmuştur. Grafik üzerinde, karışım kesme noktasıyla (cutpoint) %Sn kesme tenörünün doğruluğunu araştırmak mümkündür. Karışım kesme noktası, kabul ve ret fraksiyonları arasında eşit miktarda bölünen malzemenin, bağıl (nispi) yoğunluğudur. Bu noktada karışım katsayısı %50 dir. Yani bu noktada bir tanenin, atık veya ürün bölümüne gönderilme olasılığı %50 dir. Bu nokta D50 ile gösterilir (Sanders, 2007). Grafik üzerinde D50 noktası kırmızı çizgiyle işaretlenmiştir. Bu nokta üzerinden, %Sn değeri yaklaşık %0,12 olarak bulunmuştur. Partition grafiği Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Karışım grafiği

Grafik üzerinde turuncu renkli eğri algılama verimliliği ve mavi renkli eğri proses verimliliğini göstermektedir. Proses verimliliği ayırıcı tesis verimini göstermektedir ve üç ayırıcının ortalama verimlilik değeridir. Düşük %Sn değerlerinde, ürün bölümüne gönderilen tane miktarı azdır. Ürün tenörü düşüktür ve kesme tenörüne yakın olduğu için atık ve ürünün yanlış yerleştirme riski çok yüksektir. Ancak %Sn değeri arttığı için yanlış yerleştirme riski düşerek taneler içeriklerine göre doğru fraksiyonlara gönderilmiştir. Algılama ve proses karışım grafikleri aşağıdaki gibi yorumlanmaktadır.

- Grafik üzerindeki gösterilen %0,12 kesme tenörü, modelleme için kullanılan %0,1 kesme tenörüne çok yakın olarak bulunmuştur. Bu durum modelleme için kullanılan kesme tenörünün doğru olduğunu göstermektedir.
- Yüksek tenör değerlerinde, malzeme %100 olarak algılanmıştır. Ancak proses verimlilik, mekanik verimliliğinin etkisiyle %98-%99 a düşmüştür.
- Grafikte, proses verimlilik grafiği algılama verimlilik grafiğinden daha üstte konumlandığı gözükmemektedir. Düşük tenör değerlerinde, ürüne karışan atık sayısı fazladır. Bu durum, toplam ürün fraksiyonuna gönderilen tane sayısında artışa neden olmuştur. Ürün sayısındaki artış, proses grafiğinin algılama grafiğinden daha üstte konumlanmasına sebep olmaktadır.

4. SONUÇLAR

Minsur S.A. San Rafael dünyanın en büyük yeraltı kalay işletmesidir. Bu işletme gravimetrik ve flotasyondan oluşan iki ana zenginleştirme devresi aracılığıyla kalay cevheri üretmektedir. Ancak son yıllarda zenginleştirme maliyeti yüksek olan düşük tenörlü pasa cevherin değerlendirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu amaçla sensör temelli ayırıcılarla, zenginleştirme işlemlerine girmeden önce atığın uzaklaştırılarak ön zenginleştirme yapılması amaçlanmıştır. Bu işlem besleme tenörünü arttırarak verimin artmasına neden olmaktadır.

Tez kapsamında, XRT sensör temelli ayırıcıların performans tahmini için bir modelleme çalışması hazırlanmıştır ve modellemeyi doğrulamak için bir deney çalışması yapılmıştır. Çalışmalarda Minsur S.A. döküm sahasına ait %0,6 tenörlü kasiterit pasa cevher numunesi kullanılmıştır. Modelleme çalışmasının ana girdisi olarak obje listeleri kullanılmıştır ve önerilen iki farklı akım şemasını takip edecek şekilde hazırlanmıştır. Modelleme karışım değerleri ile kalibre edilmiştir. Çalışma kapsamında ayırıcı sahası için belirlenen ön zenginleştirme değerleri hedef değerler olarak belirlenmiştir.

Deney sonucuna göre 1. akım şemasında %0,93 Sn tenörlü bir konsantre %99,10 verim ile elde etmek mümkündür. 2. akım şeması için %1,15 Sn tenörlü bir konsantre %98,98 verim ile elde edilmiştir. Deney sonucu her iki akım şeması için atık tenörü modellemeyle aynı olarak %0,01 Sn bulunmuştur. Deney çalışması Sn kazanma verimleri ve atık tenörü değerlerini doğrulamaktadır. Ancak, farklı faktörlere bağlı olarak, modellemeye göre konsantre tenörü daha düşük ve konsantreye alma oranları daha yüksek bulunmuştur. Bu faktörler ayırıcı ön zenginleştirme tesisine ait üretim verileri ve karışım katsayılarıdır. Deney sonuçlarına göre sahaya uygun akım şeması seçilmiştir.

Uygulanan modellemeyle ön zenginleştirme değerlerine yakın değerler elde etmek mümkündür. Ancak deney çalışması modellemede kısıtlamalar olduğunu göstermektedir. Bu kısıtlamalar ayırıcılara ait üretim verileri, karışım katsayıları ve deneye tabi tutulan tane sayısıdır. Deney sonuçlarına bakıldığında, ikinci akım şemasının sahaya daha uygun olduğu belirlenmiştir. Ancak, işletme maliyetlerine bağlı olarak üçüncü ayırıcının gerekliliği tercihe bırakılmıştır.

5. ÖNERİLER

Gelecek araştırmacı için aşağıdaki alanları araştırmak önerilmektedir;

- i. Modellemede karışım katsayıları, ayırıcı sahasına ait üretim verilerinden yola çıkarak tahmin edilmiştir. Her bir ayırıcıya ait üretim verilerini elde ederek ve bu değerlerden yola çıkarak karışım katsayıları tahmin edilmelidir.
- ii. Her bir %HD aralığı için 100 adetten daha fazla taneyi deneye tabi tutarak, çalışmayı detaylandırmak ve sonuçların güvenilirliğini artırmak mümkündür.
- iii. İkinci veya üçüncü ayırıcıdan önce kırmanın etkisi araştırılmalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Adams, J., Lewis, Ph. ve Disney, M., 2018. Decoupling Canopy Structure and Leaf Biochemistry: Testing the Utility of Directional Area Scattering Factor (DASF), MDPI Journals, 10, 12, 1911.
- Adams, J.A.S. ve Gasparini, P., 1970. Gamma-ray Spectrometry of Rocks (Methods in geochemistry and geophysics), 10, First Edition, 308s, Elsevier Publishing Company, Amsterdam,
- Anderson, C., Tin Statistics and Information. United States Geological Survey, von minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/index.html, 10 Eylül 2020.
- Anselmi, B. ve Harbeck, H., 2000. Multicolor Optical Soting: A Large Scale Application in A Feldspar Treatment Plant in Sardina-Italy, Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress Kitabı13: 11-9, 11-16.
- Arvidson, B.R., 2002. Photometric Ore Sorting, Mineral Processing Plant Design, Practise and Control Proceedings Mular et al (eds.) Society of Mining, Metall & Exploration, 1, 1033 -1048, Colorado, USA.
- Barlow, D., 2001. Glass recycling – The UK Scene, Recycling and Reuse of Glass Cullet, Proceedings of International Symposium of the Concrete Technology Unit, Thomas Telford publishers, 1, 11 -14, London, UK.
- Batchelor, A.R., Ferrari-John, R.S., Katrib, J., Udoudo, O., Jones, D.A., Dodds, C. ve Kingman, S.W., 2016. Pilot Scale Microwave Sorting of Porphyry Copper Ores: Part 1 - Laboratory Investigation, Minerals Engineering Journal, 98, 303-327.
- Beckmann, M., 2020. Kişisel Görüşme, Teknik Yönetici, Tomra Sorting GmbH.
- Benavides, P. C., 2020. Kişisel Görüşme, Metalurji Uzmanı Proses yöneticisi, Minsur S.A.
- Berg, M.J. ve Sorensen, C.M., 2018. A Review and Reassessment of Diffraction, Scattering and Shadows in Electrodynamics, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 210, 225-239, USA.
- Cremers, D.A. ve Radziemski, L.J., 2013. Handbook of Laser Induced Breakdown Spectroscopy, Second Edition, 426s, John Wiley & Sons Ltd Publications, Chichester, England.

- Cutmore, N.G., Evans, T.G., McEwan, A.J., Rogers, C.A. ve Stoddard, S.L., 2000. Low Frequency Microwave Technique for On-line Measurement of Moisture, Elsevier Publishing, 13, 14-15, 1615-1622.
- Dalmijn, W.L. ve De Jong, T.P.R., 2004. Sorting systems for recycling and waste treatment, 25e seminarie Het beheer van afvalstoffen, Brussels.
- Danoczi, J. ve Koursaris, A., 2008. Development of Luminescent Diamond Simulants for X-ray Recovery, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 108, 2, 89-97.
- Davis, E.R., 2000. Image Processing for the Food Industry; 37, 312s, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Dehler, M., 2003. Optical Sorting of Ceramic Raw material, Tile and Brick International Journal, 19, 4, 248-251..
- Gaft, M., Sapir-Sofer, I., Modiano, H. ve Stana, R., 2007. Laser-induced Spectroscopy for Bulk Minerals Online Analyses, Journal of Spectrochimica Acta Part B, 62, 12, 1496-1503.
- Gülcan, E., 2020. A Novel Approach for Sensor Based Sorting Performance Determination, Minerals Engineering, 146, 15, 106-130.
- Kamradt, A., Borg, G., Schaefer, J., Kruse, S., Fiedler, M. Romm, Ph. ve Ark., 2012. An Integrated Process for Innovative Extraction of Metals from Kupferschiefer Mine Dumps, Germany, WILEY-VCH Verlag GmbH and Co., 84, 10, 1694-1703, Weinheim.
- Kattentidt, H.U.R., De jong, T.P.R., and Dalmijn, W.L. 2003. Multi-sensor Identification and Sorting of Bulk Solids. Control Engng. Practice. 11 41-47.
- Ketelhodt, L.V., 2009. Viability of Optical Sorting of Gold Waste Rock Dumps, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Journal, 271-278.
- Ketelhodt, L.V. ve Bergmann, C., 2010. Dual Energy X-Ray Transmission Sorting of Coal, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 110, 7, 371-378.
- Kingman, S.W., Jackson, K., Cumbane, A., Bradshaw, S.M., Rowson, N.A. ve Greenwood, R., 2004. Recent Developments in Microwave-assisted Comminution, International Journal of Mineral Processing, 74, 71-83.
- Kingman, S.W., Vorster, W. ve Rowson, N.A., 1999. The Influence of Mineralogy on Microwave Assisted Grinding, Minerals Engineering, 13, 3, 313-327.

- Kleine, C., Wotruba, H. ve Robben, M., 2011. A New Tool for Mining Engineers-the Sensor-based Sorter, 22nd World Mining Congress & Expo, 1-3, Istanbul.
- Knapp, H., Neubert, K., Schropp, C. ve Wotruba, H., 2014. Viable Applications of Sensor-based Sorting for the Processing of Mineral Resources, WILEY-VCH Verlag, 1, 3, 86-95, Weinheim.
- Lane, G.R., Martin, C. ve Pirard, E., 2008. Techniques and applications for predictive metallurgy and ore characterization using optical image analysis. *Minerals Engineering* 21, 568–577.
- Lessard, J., Sweetser, W., Bartram, K., Figueroa, J. ve McHugh, L., 2016. Bridging The Gap: Understanding The Economic Impact of Ore Sorting on A Mineral Processing Circuit, *Minerals Engineering*, 91, 92-96.
- Manouchehri, H.R., Mosser, A. ve Gaul, F., 2016. Techno-Economic Aspect of Ore Sorting – Is Sorting A Missing Part in Mining Industry? A Case Study at Sandvik’s Mittersill Tungsten Mine, XXVIII International Mineral Processing Congress.
- Manouchehri, H.R., 2003. Sorting: Possibilities, Limitations and Future, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- Mesina, M.B., De Jong, T. P. R. ve Dalmijn W. L., 2007. Automatic Sorting of Scrap Metals With A Combined Electromagnetic and Dual Energy X-Ray Transmission Sensor, *International Journal of Mineral Processing*, 82, 222-232.
- Mlynarczyk, M.S.J., Sherlock, R.L. ve Williams-Jones, A.E., 2003. San Rafael, Peru: geology and structure of the world’s richest tin lode, *Miner Deposita*, 38, 555-567.
- Mutz, S., Pretz, Th., Makowe, J., Hilbk-Kortenbruck, F., Aydin, Ü. ve Noll, R., 2003. Sorting of secondary aluminium by automatic picking, XXII IMPC International Mineral Processing Congress, Cape Town.
- Nienhaus, K. ve Pretz, T., 2014. Sensor Technologies: Impulses for the Raw Materials Industry, Wotruba, H., 50, 459s, Shaker Verlag GmbH, Aachen.
- Nölte, S., 2013. Comparison of Mechanical Processes on Different Sensor-based Sorting Machine Platforms, Yüksek lisans Tezi, RWTH Aachen University, Unit of Mineral Processing, Aachen, Germany.
- Öz, C. ve Özer, Ö., 2019. Seramik Arkeometrisinde Spektroskopik Yöntemlerin Uygulanması ve Yorumlanması: XRF, XRD, *Seramik Araştırmaları Dergisi*, 1, 136-153.
- Rayner, J. (ed) 2005. *Materials Recycling Handbook*. Emap MacLaren Ltd. Publications

- Robben, C., 2014. Characteristics of Sensor-based Sorting Technology and Implementation in Mining, Doktora Tezi, RWTH Aachen University Unit of Mineral Processing, Aachen, Germany.
- Robben, C., 2020. Kişisel Görüşme, Firmanın Kurucusu ve Sorting/Sorter Uzmanı Six-S Mühendislik Firması,.
- Robben, C., Condori, P., Pinto, A., Machaca, R. ve Takala, A., 2020. X-ray Transmission Based Ore Sorting at the San Rafael Tin Mine, Journal of Minerals Engineering, 145, 105870.
- Robben, C. ve Mosser, A., 2014. X-ray-Transmission-based Sorting at the Mittersill Tungsten Mine, In Proceedings of the 27th International Mineral Processing Conference IMPC, Santiago, Chile.
- Robben, C. ve Takala, A., 2018. High volume sensor-based ore sorting solutions, In Proceedings of the Sensor-Based Sorting and Control Conference, Aachen, Germany.
- Robben, C. ve Wotruba, H., 2019. Sensor-based Ore Sorting Technology in Mining - Past Present and Future, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 9, 9, 523, Switzerland.
- Robben M., 2011, Intelligent Sensor Systems, Mineral Processing, Vol. 4.
- Robben, M. ve Wotruba, H., 2010. Near-infrared Sorting for Minerals, GDMB Verlag GmbH, 122.
- Robben, M.R., Knapp, H., Dehler, M. ve Wotruba, H., 2013. X-Ray Transmission Sorting of Tungsten Ore, Optical Characterization of Materials Conference Proceedings (OCM), KIT Scientific Publishing, 245-258, Germany.
- Salter, J.D. ve Wyatt, N.P.G., 1991. Sorting in the Minerals Industry: Past Present and Future, Journal of Minerals Engineering, 4, 7-11, 779-796, England.
- Sanders, G.J., 2007. The principles of Coal Preparation, Fourth Edition, 534s, Australian Coal Preparation Society, Newcastle.
- Uçurum, M., 2015. Kalsit Madenciliğin Geleceğinde Optik Ayırma Teknolojilerinin Yeri ve Önemi, Niğde Üniversitesi Mühendislik bilimleri Dergisi, 4, 1, 40-46.
- Udoudo, O.B., 2010. Modelling the Efficiency of an Automated Sensor Based Sorter, Doktora Tezi, The University of Exeter, Earth Resources Department, Exeter, England.
- URL-1, https://tr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A7%C4%B1sal_%C3%A7%C3%B6z%C3%BCn%C3%BCrl%C3%BCk. 8 Haziran 2020.

- URL-2, <https://www.kuark.org/2013/05/isik-ve-elektromanyetik-spektrum/#:~:text=Gama%20I%C5%9F%C4%B1nlar%C4%B1%3A%20Dalgaboyu%20%2C03,ve%20radyoaktif%20atomlar%20taraf%C4%B1ndan%20%C3%BCretilir.> 8 Haziran 2020.
- URL-3, <https://www.tomra.com/en/sorting/mining/sorting-equipment/com-series/com-xrt/how-it-works-xrt>. 15 Haziran 2020.
- URL-4, <https://www.tomra.com/en/sorting/mining/sorting-equipment/com-series>. 15 Haziran 2020.
- URL-5, <https://www.tomra.com/en/sorting/mining/mining-technology>. 17 Haziran 2020.
- URL-6, <https://www.tomra.com/en-gb/sorting/mining/sorting-equipment/pro-series>. 17 Haziran 2020.
- URL-7, <https://clarkscience8.weebly.com/behavior-of-waves.html>. 15 Kasım 2020.
- URL-8, https://en.wikipedia.org/wiki/Sensor-based_sorting#Ore-type_diversion 20 Kasım 2020.
- URL-9, https://tr.wikipedia.org/wiki/Optik_mikroskop 27 Şubat 2021.
- Wills, B.A. ve Finch, J., 2016. Wills Mineral Processing Technology: An Introduction To the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, Eighth Edition, Butterworth-Heinemann Publishing, Oxford, UK.
- Wotruba, H., 2006. Is the Minerals Industry Missing a Chance?, XXIII International Mineral Processing Congress, 1, 3-8, 21-29.
- Wotruba, H., 2020. Kişisel Görüşme, AMR Birim Başkanı, RWTH Aachen Üniversitesi AMR Birimi.
- Wotruba, H. ve Harbeck, H., 2010. Sensor-based Sorting, Ullmann's Encyclopedia of Industrial chemistry, 32, 395-404, Germany.
- Wotruba, H. ve Neubert, K., 2014. State of the Art and New Development s in Sensor-based Sorting Applications, the 14th International Mineral Processing Symposium, Kuşadası, Turkey, 47-53.
- Young, A., Veras, M., Neto, D., Otávio, P.C. ve Sampaio, C., 2017. Application of Automatic Sensor Based Sorting to Mining Ores, SME Anual Meeting Conference, Denver, CO.

7. EKLER

EK Tablo 1. Modellemedeki 1. ayırıcının proses tablosu

Besleme				Ürün			Atık		
HD aralıkları	Tane sayısı	m	Sn	Tane sayısı	m	Sn	Tane sayısı	m	Sn
%	Adet	%	%	Adet	%	%	Adet	%	%
0- 0,1	6881	68,82	0,00	413	15,75	0,00	6468	87,67	0,00
0,1- 0,2	237	2,37	0,03	14	0,54	0,03	223	3,02	0,03
0,2- 0,3	198	1,98	0,05	12	0,45	0,05	186	2,52	0,05
0,3- 0,4	160	1,60	0,07	10	0,37	0,07	150	2,04	0,07
0,4- 0,5	117	1,17	0,10	7	0,27	0,10	110	1,49	0,10
0,5- 0,6	104	1,04	0,12	94	3,57	0,12	10	0,14	0,12
0,6- 0,7	94	0,94	0,14	85	3,23	0,14	9	0,13	0,14
0,7- 0,8	73	0,73	0,16	66	2,51	0,16	7	0,10	0,16
0,8- 0,9	91	0,91	0,18	82	3,12	0,18	9	0,12	0,18
0,9- 1	67	0,67	0,20	60	2,30	0,20	7	0,09	0,20
1- 1,1	56	0,56	0,22	50	1,92	0,22	6	0,08	0,22
1,1- 1,2	58	0,58	0,24	52	1,99	0,24	6	0,08	0,24
1,2- 1,3	44	0,44	0,26	40	1,51	0,26	4	0,06	0,26
1,3- 1,4	46	0,46	0,28	41	1,58	0,28	5	0,06	0,28
1,4- 1,5	44	0,44	0,30	40	1,51	0,30	4	0,06	0,30
1, 5- 1,6	38	0,38	0,32	34	1,30	0,32	4	0,05	0,32
1,6- 1,7	33	0,33	0,35	30	1,13	0,35	3	0,04	0,35
1,7- 1,8	31	0,31	0,36	28	1,06	0,36	3	0,04	0,36
1,8- 1,9	34	0,34	0,38	31	1,17	0,38	3	0,05	0,38
1,9- 2	33	0,33	0,41	30	1,13	0,41	3	0,04	0,41
> 2	1560	15,60	3,55	1404	53,57	3,55	156	2,11	3,55
Toplam	9999	100,00	0,58	2621	100,00	2,05	7378	100,00	0,04
Konsantre	tph	64							
Konsantre oranı	%	26,90							
Tenör	%	2,05							
Verim	%	94,89							

ÖZGEÇMİŞ

Aysa MOSLEMIYEKAN, İlk, orta ve lise eğitimini İranda tamamladı. Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünü kazanarak mesleki hayatına ilk adımını attı. Lisans eğitimini tamamladı. Yüksek lisans eğitimine Karadeniz Teknik Üniversitesinde aktif olarak başladı. Aynı sene Erasmus+ programından burs kazanarak Almanya Tomra Sorting GmbH firmasında yüksek lisans staj çalışmasını yaptı. RWTH Aachen Üniversitesi Cevher Zenginleştirme Biriminde (AMR) Öğrenci Asistanı olarak çalışmaya ve aynı bölümde yüksek lisans tez çalışmasını yapmaya başladı. MOSLEMIYEKAN'ın ana dili Farsça ve Azericedir. C2 seviyesinde Türkçe, C1 seviyesinde İngilizce ve A1 seviyesinde Almanca bilmektedir.