



8-125 mm Kolemanit Cevherinin NIR/CCD Optik Ayırıcı ile Zenginleştirilmesi

Mustafa BARIŞ^{1,*}, Fazlı C. METİN¹, Nurtaç K. KARABULUT¹, Fatih ÖZYÜCEL¹

¹Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 06010 Ankara, Türkiye.

Öz

Bu çalışmada Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü ocaklarından kil, tuf, kireç taşı gibi minerallerle birlikte çıkan 8-125 mm Simav Ana Damar (SAD), Simav Tali Damar (STD) ve Tülü Sarı (TS) kolemanit cevherleri, yakın kızılötesi (NIR) ve görünür ışık (CCD) kaynakları kullanılan optik ayırıcılarla zenginleştirilmiştir. Çalışmalarda kırma, eleme ve yıkama işlemlerinden geçirilen tıvönan cevher 8-25 mm ve 25-125 mm tane boyutlarında zenginleştirme yapan iki optik ayırıcıya beslenmiş ve %22,10-39,30 B₂O₃ tenör aralığında beslenen cevherlerde 3,90-9,10 birim zenginleştirme sağlanmıştır. %93'ün üzerinde verimle yapılan zenginleştirme sonrası %2,20-11,10 B₂O₃ tenör aralığında atık açığa çıkmıştır.

Makale Bilgisi

Başvuru: 17/10/2017

Düzeltilme: 14/02/2017

Kabul: 12/03/2018

Anahtar Kelimeler

Optik ayırma,
Kolemanit,
Cevher zenginleştirme,
Yakın kızılötesi ışık,
Verim

Keywords

Optical sorting,
Colemanite,
Ore enrichment,
Near infrared,
Yield

Enrichment of 8-125 mm Colemanite Ores via NIR/CCD Optical Sorter

Abstract

In this study, 8-125 mm Simav Ana Damar (SAD), Simav Tali Damar (STD) and Tülü Sarı (TS) raw colemanite ores which extracted together with the minerals such as clay, tuff, limestone from the quarries of Bigadiç Boron Works Management of Eti Maden enriched by optical sorters used with near-infrared (NIR) and visible light (CCD) sources. In these works, the ore passing through the crushing, sieving and washing processes was fed to two optical sorters of 8-25 mm and 25-125 mm grain sizes and the 3.90-9.10 units enrichment was obtained in the ores fed at 22.10-39.30% B₂O₃ content. After enrichment made with over 93% yield, waste was found to be in the range of 2.20-11.10% B₂O₃ grade.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Malzemelerin spektroskopik özellikleri dikkate alınarak yapılan elektronik tabanlı optik ayırma yöntemi, endüstride üreticilerin zaman ve verim açısından avantaj elde ettiği ekonomik bir yöntemdir. Geniş dalga boyu aralığındaki elektromanyetik spektrum temelli sensörler sayesinde farklı birçok malzemenin tanımlanmasının mümkün olması, madencilik [1, 2] yansira geri dönüşüm [3] ve gıda ayırımı [4] gibi alanlarda da yoğun bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle geri dönüşümde metal, cam ve kağıt gibi malzemelerin zenginleştirilmesi başta olmak üzere [5] gıda sektöründe narenciye [6], hurma [7], yulaf [8] ve et [9] zenginleştirme gibi uygulamalarda optik ayırıcı kullanarak ekonomik açıdan avantaj elde etmek mümkündür.

Optik ayırma teknolojisinde alternatif akımdan (10⁴ m) gama ışınlarına (10⁻¹² m) kadar geniş elektromanyetik dalgaboyu spektrumunda tanımlama yapabilen sensörlerin tekli veya çoklu olarak kullanılabilmesi farklı birçok malzemenin tanımlanabilmesini imkanlı hale getirmektedir [10, 11]. Özellikle madencilik sektöründe fiziksel yolla tanımlanması oldukça zor olan girift yapıdaki minerallerin ayrıştırılması işleminde geleneksel yollara iyi bir alternatif olmuştur. Literatürde farklı birçok maden kaynaklarında optik ayırıcı ile zenginleştirme yapıldığı görülmektedir. Veerendra ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ferromanganez cevherinin görünür bölge ışık kaynağı ile tanımlanabileceğini ve cevher içerisindeki mangan, alumina ve demir minerallerinin zenginleştirilebileceğini ortaya koymuşlardır [12]. Tessier ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada benzer bir şekilde nikel cevherinin optik ayırıcı ile

*Mustafa BARIŞ, e-mail: mustafabaris@etimaden.gov.tr

zenginleştirilebileceğini göstermişlerdir [13]. Lane ve arkadaşları ise bakır, kurşun, çinko gibi madenlerin spektroskopik olarak tanımlamışlar ve optik ayırma için bir veri kaynağı oluşturmuşlardır [14]. Bu çalışmaların dışında kireçtaşı [15] ve kromit [16] cevherinin de görünür bölge ışık kaynağı ile tanımlanarak zenginleştirilebileceğine dair farklı çalışmalar yer almaktadır. Ancak her ne kadar literatürde görünür ışık bölgesi ile cevher tanımlama ve zenginleştirme çalışmaları yoğun olarak yer alsada minerallerin fiziksel özelliklerine göre görünür ışık kaynağının tanımlama için her zaman yeterli olmadığı, bu nedenle tanımlama için X ışını geçirimi (XRT) [17], yakın kızıl ötesi (NIR) [18, 19] ve mikrodalga [20, 21] gibi farklı sensörlere de ihtiyaç doğduğu görülmektedir.

Bu çalışmada, ticari değere sahip bor bileşiği olan kolemanit cevherinin görünür ışık ve yakın kızılötesi ışık bölgelerinde yük bağlaşıklık sensör (CCD) ve NIR sensör kullanılarak optik ayırma ile endüstriyel ölçekte zenginleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Uygulamalarda Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü Konsantratör Tesisindeki tromel yıkayıcıdan çıkan 8-125 mm Simav Ana Damar (SAD), Simav Tali Damar (STD) ve Tülü Sarı (TS) kolemanit cevherleri kullanılmıştır. Bor minerallerinin ikili tanımlama sensörü kullanılarak endüstriyel ölçekte optik ayırma teknolojisi ile zenginleştirilmesi adına ilk defa yapılan bu çalışma sonucunda %90'nın üzerinde verimle (B_2O_3 cinsinden metal kurtarma randımanı) zenginleştirme yapılabildiği ve düşük tenörlü ürünlere zenginleştirme ile ticari değer kazandırılabilirdiği ortaya konmuştur.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHOD)

2.1. Optik Ayırıcıların Özellikleri (Properties of Optical Sorters)



Zenginleştirme çalışmaları Commodas Ultrasort marka Pro Secondary NIR/CCD (PS) ve Pro Granulte NIR (PG) model optik ayırıcılarda gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar üzerinden cihazlara özel geliştirilmiş yazılım ile kontrol edilen optik ayırıcıların çalışma prensibi şematik olarak Şekil.1'de verilmiştir. Sistem temelde titreşimli besleyici, ışık kaynağı ve kamera, basınçlı hava valfleri ve ürün/atık bantlarından oluşmaktadır.



Şekil 1. Optik ayırıcı çalışma prensibi şematik gösterimi

Optik ayırma teknolojisinde tane boyut dağılımının dar aralıkta olması tanımlamayı kolaylaştıran ve verimi arttıran bir faktördür. Çalışmada kullanılan cihazlar optimum tane boyut dağılımına göre tasarlanmıştır. PS optik ayırıcı 25-125 mm tane boyutunda ayırım yapabilme özelliğine sahiptir. Ancak bu dağılımı iki ayrı tane boyutunda aynı anda gerçekleştirmektedir. Cihazın başlangıcına yerleştirilen YPT marka SD 1500X48000 model elek ve Sieve Bend sistemi yardımıyla 25-50 mm ve 50-125 mm tane boyutunda ayırımı yapılan cevherler PS optik ayırıcıya birbirine paralel iki hattan beslenmiştir. PG optik ayırıcının hattına ise -25 mm tane boyutundaki cevher beslenmiştir. Cihazın başlangıcına yerleştirilen Mogensen marka GOSAG 2012 model elek yardımıyla beslenen cevherin tane boyutu 8-25 mm aralığına getirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan optik ayırıcıların teknik özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. *Optik ayırıcıların teknik özellikleri*

	PS NIR/CCD	PG NIR
		
Titreşimli besleme genişliği	2500 cm	1000 cm
Tane boyut aralığı	25-125 mm	8-25 mm
Kapasite	40 ton/saat	12 ton/saat
Valf sayısı	156	304
Basınçlı hava	10 bar, maks.5 m ³ /dak	7,5 bar, maks.5 m ³ /dak

2.2. Kullanılan Cevherlerin Özellikleri ve Uygulama Parametreleri (Properties of Used Ores and Experimental Parameters)

Optik ayırma ile zenginleştirme çalışmalarında Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü ocaklarından çıkartılan üç farklı mineralojik yapıda kolemanit tuvönan cevheri kullanılmıştır. Cevherler optik ayırıcılara beslenmeden önce konsantratör tesisinde kırma, eleme ve yıkama işlemlerinden geçirilmiştir. Kullanılan cevherlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2’de verilmektedir.

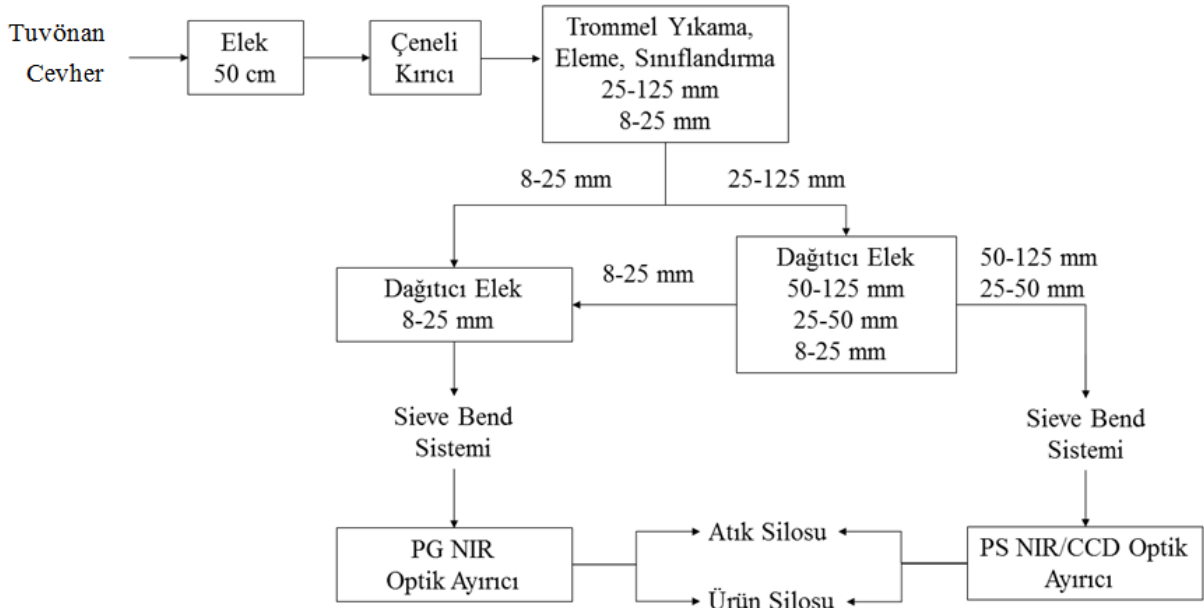
Tablo 2. *Kullanılan cevherlerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri*

		PS NIR/CCD	PG NIR
SAD - Simav Ana Damar	% B ₂ O ₃	39,30	38,60
STD - Simav Tali Damar	% B ₂ O ₃	39,60	32,40
TS - Tülü Sarı	% B ₂ O ₃	34,30	22,10
Dökme Yoğunluğu	gr/cm ³	1,5-1,6	1,5-1,6
Tane Boyutu	mm	25-125	8-25
Elek Altı (Ağırlıkça)	% max.	5	5
Elek Üstü (Ağırlıkça)	% max.	5	5
Nem	% max.	8	9
Atık Oranı (Ağırlıkça)	%	5-35	5-45
Atık Mineraller		Dolomit, Kalsit, Kil, Tüf, Jips, Marl, Kireç Taşı, SiO ₂ vb.	

Cevherlerin optik ayırma işlemi öncesi mineralojik tanımlamaları yapılmıştır. Tanımlamalarda elle ayıklama ile yapılan ayırma elde edilen minerallerin kimyasal kompozisyonlarının belirlenmesinde Bruker Marka XRF cihazında yapılan analizlerinden yararlanılmıştır. Kimyasal yapıları belirlenen minerallerin spektral analizleri Thermo marka FITR cihazında (Nicolet IS10 model) yapılmıştır. Ürün olarak belirlenen kolemanit ve atık olarak belirlenen diğer mineraller optik ayırıcılara operatör yazılımı ile tanıtılmıştır. Tanıtma sonrası yapılan zenginleştirme işlemleri her bir cevher için ayrı ayrı ortalama 120’şer dakika sürdürülmüştür. Bu süre içerisinde PS optik ayırıcıya SAD cevheri 38,30 ton/saat, STD

cevheri 32,80 ton/saat ve TS cevheri 21,50 ton/saat kapasitelerde beslenmiştir. PG optik ayırıcıya ise SAD ve STD cevheri 12,00 ton/saat kapasiteyle, TS cevheri ise 7,00 ton/saat kapasiteyle beslenmiştir. Çalışmada SAD, STD ve TS cevherleri için sırasıyla; PS optik ayırıcıda 76,60 ton, 65,60 ton ve 43,00 ton, PG optik ayırıcıda 24,00 ton, 24,00 ton ve 14,00 ton cevher kullanılmıştır. Besleme kapasitelerindeki farklılık cevherlerin mineralojik yapılarından kaynaklanmaktadır.

Konsantratör tesisinin başlangıcında yer alan ve tüvönan cevherin ocaktan çıkarılmasının ardından istenilen tane boyutuna indirilmesi amacıyla kullanılan çeneli kırıcıda mineralojik yapı nedeniyle farklı tane boyutu dağılımlarında besleme cevherleri elde edilmektedir. Bu durum, tüvönan cevherin içeriğine göre besleme kapasitesinde değişime neden olmaktadır.



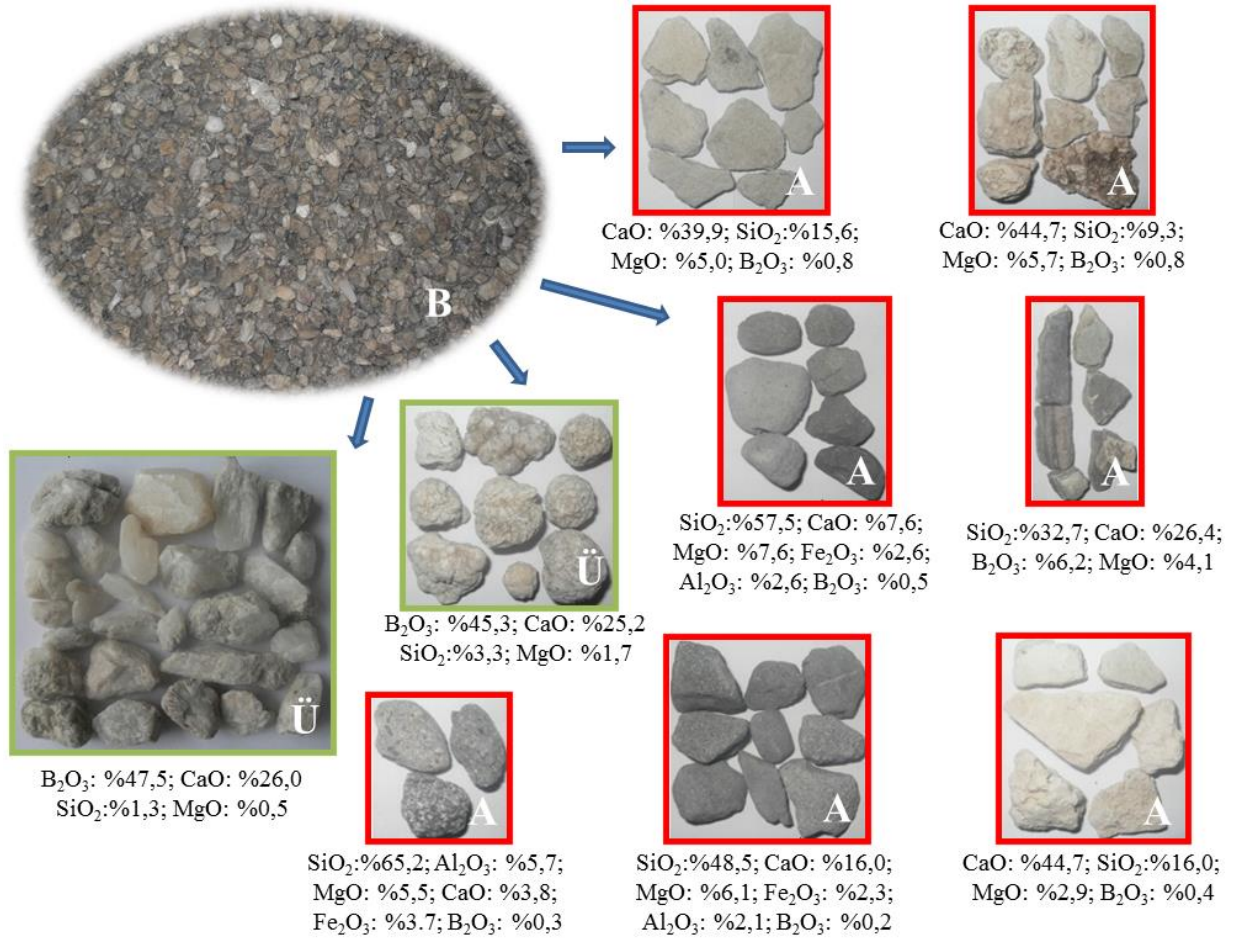
Şekil 2. Cevher zenginleştirme işleminin şematik gösterimi

Zenginleştirme, ortam sıcaklığında (~25 °C) gerçekleştirilmiş ve proses süresince her 30 dakikada besleme, ürün ve atık bandından numune alınarak BS5688-2:1979 analiz standardında B₂O₃ analizi yapılmıştır. Cevher zenginleştirme işleminin şematik gösterimi Şekil 2’de verilmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Cevher Tanımlamaları (Describing of The Ores)

Optik ayırma ile zenginleştirme çalışmalarında kullanılan cevherlerin içerisindeki ürün olarak kabul edilen kolemanit ve atık olarak kabul edilen yan kayaçların elle ayrımı sonrası yapılan XRF analizi ve bor analizi sonrası minerallerin temel kimyasal bileşenleri belirlenmiştir. Şekil 3’te minerallerin ayırmaya esas temel kimyasal kompozisyonları verilmiştir. Şekilden analiz örneğinde iki farklı fiziksel yapıya sahip kolemanit cevherinin olduğu ve bu cevherlerin sırasıyla %45,3 ve %47,5 B₂O₃ içeriğine sahip olduğu görülmektedir. Ürün olarak değerlendirilmeyen diğer minerallerin ise çok düşük oranda B₂O₃ içerdiği, ağırlıklı yapıların CaO, SiO₂, MgO ve Na₂O bileşiklerinden oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca minerallerin kimyasal analizleri yapıların genelinin hidratlı bileşikler olduğunu göstermiştir.



Şekil 3. Cevherlerin karışımından alınan örneklerin kimyasal kompozisyonu, B: Besleme, Ü: Ürün, A: Atık

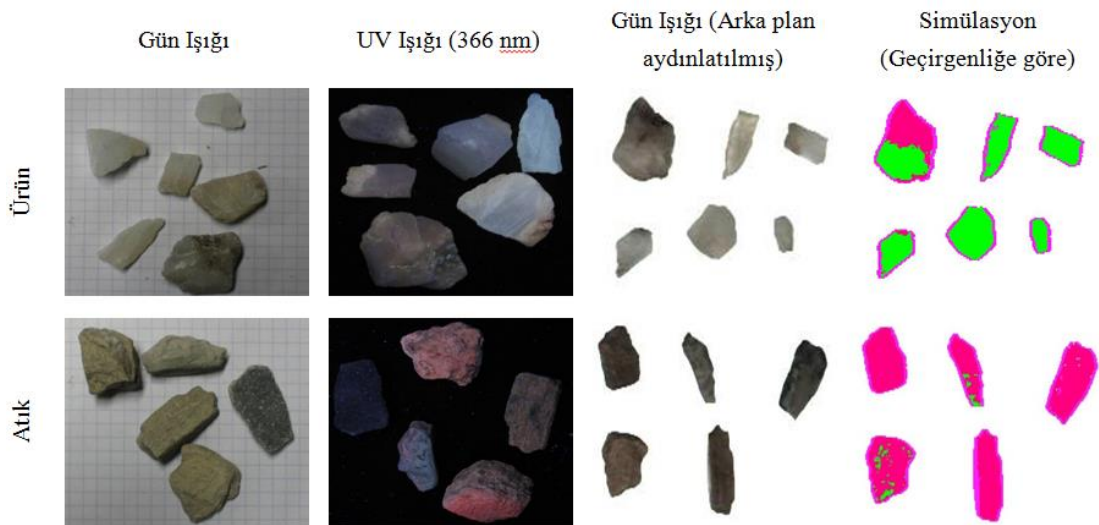
Minerallerin ve doğal kaynakların optik ayırıcı ile ayrıştırılmasında Tablo 3'te gösterilen geniş aralıkta dalga boyuna sahip sensörler kullanılabilir. Radyometrik sensörlerle gama salınımları esas alınarak petrol yakıtları ve nadir toprak elementlerinin zenginleştirilmesi, x-ışını geçirimli sensörlerle atomik yoğunluğa bağlı olarak ana metaller, nadir toprak elementleri, endüstriyel mineraller, petrol yakıtları ve elmasların zenginleştirilmesi veya geri kazanımı mümkündür. Elmas kazanımında ayrıca x-ışını altında görünür ışınımaya dayalı XRF teknolojisi de kullanılmaktadır. Endüstriyel minerallerin zenginleştirilmesinde en yaygın kullanılan optik ayırma sensörleri ise minerallerin ışığı emme/yansıtma/geçirgenlik karakteristiklerine dayalı görünür ışık CCD sensörü, monokromatik (tek renkli) emme/yansıtma karakteristiklerine bağlı fotometrik sensörler ve emme/yansıtma karakteristiklerine bağlı yakın kızılötesi sensörlerdir [10, 11].

Çalışmada kolemanitin zenginleştirilmesinde en etkin sensörün belirlenmesi amacıyla, sabit hat üzerinde farklı filtreler yardımıyla ayarlanabilen laboratuvar ölçekli ışık kaynakları altında denemeler yapılmıştır. Denemelerde her bir cevherden 5 kg numune kullanılmıştır. Optik ayırıcı besleme cevheri içerisinde seçilen kolemanit ve atık minerallerin gün ışığı ve 366 nm ışık kaynağı altındaki görüntüleri Şekil 4'te verilmektedir. Şekilden UV ışığının ayırma için uygun olmadığı, minerallerin UV ışığı altındaki spesifik farklılıklarının optik ayırma için yeterince ayırt edici fark ortaya koyamadığı tespit edilmiştir. Ayrıca gün ışığı CCD geçirgenlik özelliğine göre simüle edilmiş görüntülerden minerallerin büyük ölçüde tanımlanabildiği belirlenmiştir. Ancak CCD sensörün yeterli olmadığı, özellikle kalsiyum karbonat esaslı minerallerle bor minerallerinin kompakt yapıda olduğu serbest tanelerde başarısız olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle yakın kızılötesi ışık kaynağı ile mineral tanımlama çalışması yapılması ihtiyacı doğmuştur.

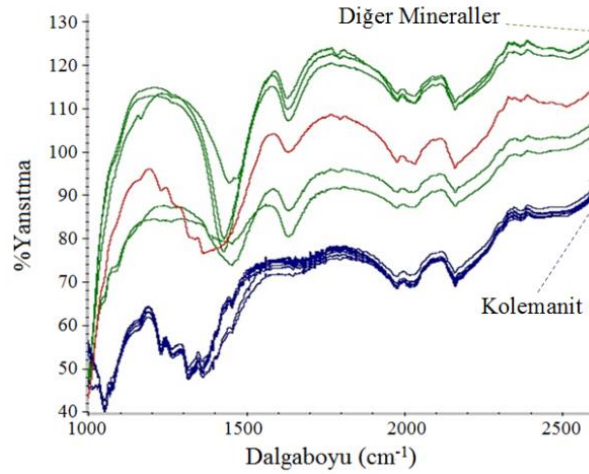
Tablo 3. Madencilik endüstrisinde kullanılan sensör sistemleri

Elektromanyetik Spektrum	Dalga Boyu (m)	Sensör Tipi/Teknoloji	Tanımlamada Kullanılan Malzeme	Uygulama Alanları
Gama Işınları	10^{-12} 10^{-11}	RM (Radyometrik)	Doğal gama ışınması	Yakıt, değerli metaller
X Işınları	10^{-10} 10^{-9} 10^{-8}	X Işını Geçirimi (XRT) X Işını Floresansı (XRF)	Atomik Yoğunluk Görünür Floresan X-ışını Floresansı	Ana metaller, Değerli Metaller, Endüstriyel Mineraller, Elmas, Yakıt
Ultraviyole (UV) Görünür Işık	10^{-7} 10^{-6}	CCD Kamera	Yansıtma, Soğurma, Geçirgenlik, Şekil Monokromatik	Ana metaller, Değerli Metaller, Endüstriyel Mineraller, Elmas
Yakın Kızıl Ötesi (NIR) Işınları	10^{-5} 10^{-4}	Fotometrik (PM) Yakın Kızılötesi Spektroskopisi (NIR)	Yansıtma, Soğurma	Ana Metaller
Kızılötesi (IR) Işınları	10^{-3} 10^{-2} 10^{-1}	Kızılötesi Kamera (IR) Mikrodalga Azalımı Termal Kızılötesi Görüntüleme ile	Isı iletkenliği, Yayıma	Ana Metaller
Mikrodalgalar	10^0	Mikrodalga Isıtma (MW-IRT)	Seçici geçirgenlik	Ana Metaller
Radyo Dalgaları	10^1 10^2	Radyofrekans Isıtma (RF)		
Alternatif Akım (AC)	10^3 10^4	Elektromanyetik Sensör (EM)	İletkenlik, Geçirimlik	Ana Metaller

Minerallerin yakın kızılötesi ışık kaynağında tanımlamaları yapılmadan önce FTIR analizi yapılmıştır. Analizde minerallerin üzerine gönderilen kızılötesi ışınlar moleküler yapıdaki bağlarda bozunma yapmaksızın titreşimini sağlamaktadır. Bu titreşimlerin ölçümü ile mineraldeki fonksiyonel gruplar tespit edilmektedir. Şekil 5'te optik ayırıcıya beslenen kolemanit ve diğer minerallerin 1000-2500 nm dalga boyu aralığındaki elde edilen spektral grafiği verilmiştir.

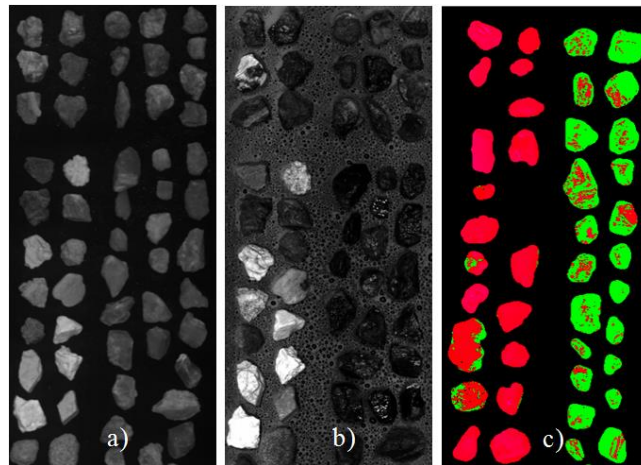


Şekil 4. Minerallerin gün ışığı ve UV ışığı altındaki görüntüleri ve geçirgenliğe göre simülasyon görüntüsü



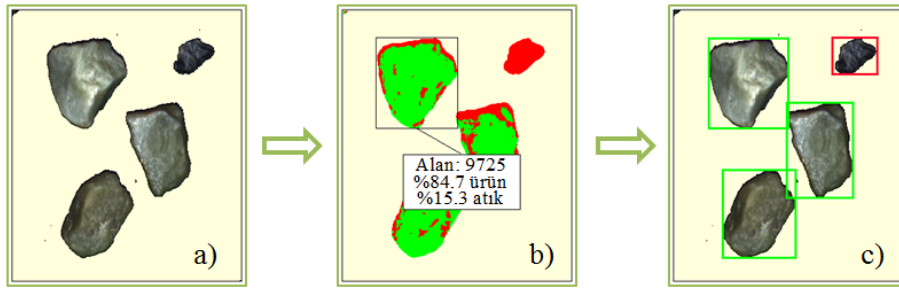
Şekil 5. Cevher içerisindeki minerallerin spektral grafiği

Literatürde kolemanitin ve bor bileşiklerinin FTIR analizini konu alan detaylı çalışmalar yer almaktadır [22, 23]. Bu çalışmalarda kolemanitin 1339 cm^{-1} ve 1368 cm^{-1} dalga boylarında $\text{B}_3\text{-O}$ bağları, 1045 cm^{-1} ve 1124 cm^{-1} dalga boylarında $\text{B}_4\text{-O}$ bağları yer aldığı belirtilmektedir. Şekil 5'te yer alan grafik literatürle örtüşür niteliktedir. Ayrıca $1000\text{-}2500\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığında yapılan spektroskopik analiz kolemanit ile cevher içerisinde bulunan diğer serbest mineral yapıların birbirinden farklı özellikler gösterdiğini ve bu özellikleri ile ayırım yapmanın mümkün olduğunu göstermektedir. Şekil 5'te verilen grafiğe göre atık ve ürün arasındaki spektroskopik kızılötesi bölgesinde diğer sensörlerden daha başarılı bir ayırım yapma imkanı olduğu görülmektedir. Bu nedenle grafiğe göre 1339 cm^{-1} ve 1368 cm^{-1} dalga boylarına göre önce filtre yardımıyla ışık kaynağı $1000\text{-}1700\text{ nm}$ dalga boyu aralığında tutularak Şekil 6-a'daki görüntü alınmıştır. Daha sonra yine filtreler yardımıyla ışın dalga boyu daha da sınırlandırılarak en keskin ayırımın 1424 nm 'de alınabildiği tespit edilmiştir (Şekil 6-b). Şekil 6-b de gözle yapılan değerlendirme sonucunda kolemanitin gönderilen NIR ışınlarını absorbe ettiği, atıkların ise gelen ışınları yansıttığı sonucuna ulaşılmıştır. 1424 nm dalga boyunda alınan görüntünün mineral tanımlama programında simülasyonu yapılarak alansal segmentasyon gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 6-c'de minerallerin segmente edilmiş simülasyon görüntüsü verilmektedir. Bu görüntüde kırmızı olan bölümler kolemanit bakımından yoksun ve yeşil olan bölgeler kolemanit bakımından zengin bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 6. Minerallerin kamera ve simülasyon görüntüleri; a) $1000\text{-}1700\text{ nm}$ dalga boyunda minerallerin görüntüsü, b) 1424 nm filtre altında minerallerin görüntüsü, c) Minerallerin segmentasyonu ve simülasyon görüntüsü

Kolemanit içeriği bakımından tanımlamaları yapılan cevherlerin zenginleştirilmesi için ürün veya atık tanımlamalarının da ayrıca yapılması gerekmektedir. Bu işlem, mineral tanımlama yazılımında kırmızı ve yeşil bölgelerin piksel yoğunluk dağılımlarına göre gerçekleştirilmektedir. Şekil 7’de mineral tanımlama yazılımının tanımlama aşamaları verilmiştir. Burada önce yazılım tarafından kameradan 1424 nm dalga boyu ışık altında alınan görüntünün simülasyonu üzerinde kırmızı ve yeşil bölgelerin piksel sayılarına göre yüzde alanları belirlenmektedir. Daha sonra kullanıcı isteğine bağlı olarak ürünün sınıflandırılması yapılmaktadır. Çalışmalarda ürün tanımlaması %40 ve üzeri yeşil tespit edilen mineraller ürün olarak belirlenmiş ve zenginleştirme işlemi bu orana göre gerçekleştirilmiştir. Bu oranın yüksek tutulması zenginleştirme verimini düşürecek ve cevher kaybını arttıracak, düşük tutulması ise zenginleştirme miktarını azaltacaktır.



Şekil 7. Mineral tanımlama yazılımının tanımlama aşamaları a) Kamera görüntüsü, b) Alan belirleme, c) Ürün sınıflandırma

3.2. Zenginleştirme Çalışmaları (Enrichment Experiments)

Optik ayırıcı cihazına beslenen cevherin düzgün dağılımlı olması zenginleştirme oranı ve zenginleştirme verimi için önem arz etmektedir. Bu dağılım sistemin başlangıcında yer alan titreşimli besleme hattı ile sağlanmaktadır. Hattan cihaza düzgün dağılımla beslemesi yapılan cevhere, dikey düşüş eksenine dik konumlandırılmış ışık kaynağından ışınlar gönderilmekte, cevherden yansıyan ışınlar yüksek çözünürlüklü kamera tarafından alınmaktadır. Bu aşamada cevherin minerolojik yapısına göre ışının belli bir miktarı cevher tarafından soğurulmaktadır. Yansıyan ışınlar göre alınan görüntüler veri işleme merkezi üzerinden bilgisayara gönderilmektedir. Bilgisayarda kurulu yazılım yardımıyla daha önceden tanımlanmış verilere göre görüntüsü alınan cevher tanesinin ne kadar ürün ve ne kadar atıktan oluştuğu belirlenmektedir. Atık olduğu tespit edilen tanenin serbest düşüş koordinatında yer alan valfin açılmasıyla açığa çıkan basınçlı hava yardımıyla rotası değiştirilerek atığa ayrılması sağlanmaktadır. Tanenin serbest atışa başlaması ile valfin açılması arasında 2 milisaniyeden daha kısa bir süre geçmektedir. Ürünler ise serbest atış hareketini tamamlayarak ürün bölümüne düşmektedir.

Cevher tanımlama işlemlerinin ardından yapılan zenginleştirme çalışmalarında 25-125 mm ve 8-25 mm tane boyut dağılımda SAD, STD ve TS cevherleri cihaza beslenmiştir. Her bir cevher için 120 dakika yapılan optik ayırma sonuçları Tablo 4’te verilmektedir. Tabloda görüldüğü gibi yapılan çalışmada 25-125 mm cevherlerde %97’nin üzerinde, 8-25 mm cevherlerde ise %93’ün üzerinde verim elde edilmiştir. Zenginleştirme oranlarında ise cevherlerin minerolojik yapısına göre değişiklik olduğu, en yüksek zenginleştirme oranının %9 B₂O₃’ün üzerinde TS cevherinde elde edildiği tabloda görülmektedir. Bu durumun, TS cevherinin giriş tenörünün düşük olması, yapısında daha fazla serbest ürün ve atık mineralleri barındırması ve minerolojik yapısı nedeniyle düşük kapasitede besleme yapılmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Beslenen cevher tenörünün düşük olması ürün tenöründe daha fazla artış elde edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Optik ayırma ile zenginleştirme işleminde besleme kapasitesinin artması zenginleştirme miktarını olumsuz etkileyen bir faktördür. Besleme kapasitesindeki artış tanecikler arası serbestleşmeyi olumsuz etkilemekte ve birbirine yakın olan minerallerin doğru tanımlanmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca basınçlı hava ile atığın ayrılması sırasında hava valfinin etki alanında yoğun minerallerin yer almasına neden olmaktadır. Tespit edilen atık mineralin beslemeden ayrılması için valfin açılması ve basınçlı havanın atık minerale çarpması sırasında yoğunluk nedeniyle

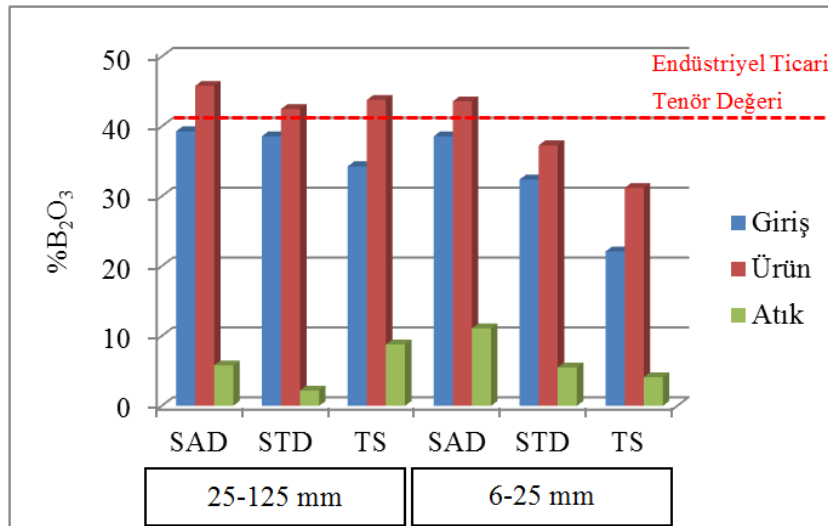
yakınında bulunan ürün de atığa ayrılabilir. Bu durum verimi, zenginleştirme miktarını, ürün ve atık tenörünü olumsuz etkileyen bir durumdur.

Dünya genelinde endüstriyel alanda özellikle cam yünü ve cam elyafı üretiminde ticari olarak minimum %40 B₂O₃ tenörlü öğütülmüş kolemanit kullanıldığı bilinmektedir. Ayrıca bor madenciliğinde mineralin atık olarak adlandırılabilmesi için B₂O₃ tenör değerinin %10 altında olması gerekmektedir. Şekil 8’de verilen grafikte besleme cevherlerinin tamamının endüstriyel tüketim tenörünün altında olduğu, optik ayırma sonucunda 25-125 mm SAD, STD ve TS cevherlerinde ve 8-25 mm SAD cevherinde %40 B₂O₃ tenörünün üzerinde ticari değeri olan ürün elde edildiği görülmektedir. 8-25 mm STD ve TS cevherlerinde ise giriş tenörü ve cevherin mineralojik yapısına bağlı olarak %30-40 B₂O₃ aralığında ürün elde edilmiştir. Zenginleşmiş bu ürünlerin elde edilen yüksek tenörlü diğer ürünlerle paçal edilerek satışı mümkündür. Ayrıca tüm çalışmalarda elde edilen atıkların genelinde %10 tenörün altına ulaşılmıştır.

Tablo 4. Optik ayırcı zenginleştirme sonuçları

		Giriş Tenörü	Ürün Tenörü	Atık Tenörü	Zenginleştirme	Verim
		%B ₂ O ₃	%B ₂ O ₃	%B ₂ O ₃	%B ₂ O ₃	%
25-125 mm	SAD	39,30	45,80	5,80	6,50	97,15
	STD	38,60	42,50	2,20	3,90	98,75
	TS	34,30	43,80	8,80	9,50	97,60
8-25 mm	SAD	38,60	43,60	11,10	5,00	95,20
	STD	32,40	37,30	5,50	4,90	97,35
	TS	22,10	31,20	4,10	9,10	93,15

Yapılan optik ayırma çalışmaları 25-125 mm kolemanit cevherinin NIR/CCD optik ayırma ile endüstriyel ölçekte zenginleştirilebildiğini göstermiştir. Beslenen cevherin yapılan kimyasal analizlerinde kolemanit olarak ayrılan cevherlerin yapısında kilitli (girift) halde yer alan safsızlıklardan dolayı teorik değer olan %50,81 B₂O₃ değerine ulaşamadığı, en fazla %45,80 B₂O₃ değerlerine ulaşabildiği tespit edilmiştir. Atıkların ise %2,20-11,10 B₂O₃ arasında değişen tenör değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Atıklar da ürünler gibi girift yapıya sahiptir ve içerisinde düşük miktarda fiziksel yolla ayrılması mümkün olmayan B₂O₃ bulunmaktadır. Atıktaki girift B₂O₃’ün kazanımı için ise kimyasal yöntemlerin uygulanması önerilmektedir.



Şekil 8. Giriş, ürün ve atık minerallerinin tenörleri

Çalışmaya konu olan optik ayırma ile zenginleştirme sisteminin endüstriyel açıdan uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi amacıyla mevcut zenginleştirme yöntemiyle karşılaştırılması yapılmıştır. Günümüz koşullarında bor işletmeleri konsantratör tesislerinde tuvönan cevherin zenginleştirilmesi, kırma, eleme ve yıkama işlemlerinin ardından insan gücü ile elle ayıklama (triyaj) yapılarak gerçekleştirilmektedir. Triyaj işleminde 25-125 mm boyutundaki cevher konveyör bant üzerinden geçerken işçiler tarafından el ve göz yordamıyla atık mineraller cevher içerisinden ayıklanmaktadır. Ancak bu işlem uzun süreli dikkat gerektiren yorucu bir iştir. Zamanla çalışanların dikkatinin azalması ve konsantrasyonun kaybolması işin kontrolünü zorlaştırmakta, buna bağlı olarak kapasitede ve zenginleştirme veriminde düşüş yaşanmaktadır. Ürün ve atıktan oluşan girift yapıdaki minerallerin insan gözü ile tanımlanmasının güç olması verimi etkileyen diğer bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca -25 mm cevherin triyaj ile zenginleştirilmesi yapılamamakta ve bu durum tesis veriminin düşmesine neden olmaktadır.

Triyaj işleminde 30 ton/saat kapasiteli tek hatta üç vardiyada 45 işçi çalışmaktadır. Zenginleştirme sonrası elde edilen ürünün tamamına yakını %40 B₂O₃ tenörlü öğütülmüş ürün olarak piyasaya sunulduğundan triyaj ile elde edilen ürünün düşük tenörlü farklı ürünlerle paçal edilebilmesi amacıyla minimum %41 B₂O₃ tenörlü olması beklenmektedir. Yılda 330 gün 24 saat üzerinden 3 vardiyada çalışan 45 işçinin işletmeye yıllık maliyeti bugünkü koşullarda 500.000 \$'ı bulmaktadır. Bu maliyet kalemi sadece 25-125 mm cevherin zenginleştirilmesini kapsamakta, zenginleştirilememiş 8-25 mm cevherde ise işletmeye ekstra stok maliyeti doğmaktadır.

Çalışmada kullanılan optik ayırıcıların ticari değeri yaklaşık 730.000 \$ (PS-420.000 \$ ve PG-310.000 \$)'dir. Sistemin çalışır duruma getirilmesi için gerekli olan yardımcı ekipmanlar (kompresör, devreye alma yedekleri vb.), kurulum maliyeti (nakliye, montaj vb.) ve diğer giderlerin (eğitim, yedek parça vb.) toplamı yaklaşık 150.000 \$'ı bulmaktadır. Sistemin çalışır hale gelmesi için toplamda yaklaşık 880.000 \$ ilk kurulum maliyeti oluşmaktadır. Çalışır durumdaki tesisi 330 gün 24 saat faal olarak çalıştırmak için 9 işçi yeterli olmaktadır ve bu işçilerin işletmeye bugünkü koşullardaki yıllık maliyeti yaklaşık 100.000 \$'dır. Sistemin bir yıllık operasyon maliyeti ise yaklaşık 60.000 \$ olarak karşımıza çıkmaktadır. Sonuç olarak optik ayırma tesisinin işletmeye yıllık maliyeti yaklaşık 160.000 \$'dır.

Bugünkü koşullarda 25-125 mm boyutundaki cevher triyaj yöntemiyle zenginleştirilebilmekte ancak 8-25 mm cevher için optik ayırma teknolojisinin dışında herhangi bir fiziksel zenginleştirme işlemi uygulanması mümkün görülmemektedir. Çalışmada elde edilen zenginleştirme verilerine göre, sadece PG cihazında 12 ton/saat kapasite ile beslenen SAD ve STD cevherlerinden yaklaşık 8 ton/saat minimum %40 B₂O₃ tenörlü ticari değere sahip ürün elde edilebildiğini göstermiştir. Söz konusu cevherin ticari satış fiyatı 200-240 \$/ton arasında, öğütülmüş haldeki satış fiyatı ise 400-450 \$/ton'dur. Bu da sadece PG cihazıyla yapılan zenginleştirmeden yılda 12.500.000 \$ gelir elde edilebileceğini göstermektedir.

25-125 mm boyutundaki cevherde uygulanmakta olan mevcut triyaj işleminde ürün tenörü cevher çeşidine göre %40-45 B₂O₃ arasında değişmektedir. Çalışmada elde edilen veriler, optik ayırma ile zenginleştirme işleminin ürün tenörü açısından (%42,50-45,80) daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu sonuçlar optik ayırmanın endüstriyel ve ticari açıdan kolemanit cevheri zenginleştirmede başarılı bir yöntem olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışma ile uluslararası alanda geniş tane boyut dağılımlı kolemanit cevheri ile ilk kez yapılan ve endüstriyel uygulaması bulunan bir yöntemin çıktıları ortaya konularak literatüre katkı sağlanmıştır. Çalışmanın çıktıları değerlendirildiğinde, yeni çalışmalarda farklı bor mineralleri ile farklı spektroskopik ışık kaynaklarında yöntemin denenmesinde fayda olacağı düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü'nün ocaklarında farklı damarlardan alınan kolemanit cevherleri, 8-25 mm ve 25-125 mm tane boyutlarında birbirine paralel çalışan ve NIR/CCD ışık kaynağı bulunan iki cihazla zenginleştirmeye tabi tutulmuştur. Zenginleştirme işlemlerinde %34,30-39,30 B₂O₃ tenörüne sahip 25-125 mm cevherlerde %97'nin üzerinde verimle 3,90-9,50 aralığında zenginleştirme sağlanmıştır. %22,10-38,60 B₂O₃ tenörüne sahip 8-25 mm cevherlerde ise %93'nün üzerinde verimle 4,90-9,10 aralığında zenginleştirme sağlanmıştır. Tüm çalışmalarda zenginleştirme sonrası %2,20-11,10 B₂O₃ tenör aralığında

atık açığa çıkmıştır. Optik ayırma teknolojisinin kolemanit cevherinin zenginleştirilmesi için endüstriyel ölçekte uygulanabilir bir yöntem olduğu ortaya konmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çalışmayı destekleyen Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğüne, çalışmaya katkı sağlayan Tomra GmbH, Optosort GmbH ve BTW-Binder GmbH firmalarına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. W. Barry, N. M. Tim, Ore Sorting, Wills' Mineral Processing Technology 7th Edition, Burlington, A.B.D., 2006.
- [2] C. Çelik, Cevher zenginleştirmede gelişen teknolojiler: Optik zenginleştirme, Madencilik Türkiye, 4 (2010) 40-43.
- [3] T. Petra, W. Markus, P. Thomas, Industrial application for inline material sorting using hyperspectral imaging in the NIR range, Real-Time Imaging, 11 (2005) 99-107.
- [4] P. Williams, K. Norris, Near-infrared technology in the agricultural and food industries, American Association of Cereal Chemists, Wisconsin, A.B.D., 1987.
- [5] P. G. Sathish, H. Subrata, T. Atul, A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling, Waste Manage., 60 (2017) 56-74.
- [6] J. Blasco, N. Aleixos, J. Gomez, E. Molto, Citrus sorting by identification of the most common defects using multispectral computer vision, J. Food Eng., 83 (2007) 384-393.
- [7] P. Razieh, R. G. Hamid, S. Hadi, Z. N. Fariborz, M. V. Mohammad, Study on an automatic sorting system for date fruits, J. Saudi Soc. Agric. Sci., 14 (2015) 83-90.
- [8] S. Silvia, C. Daniela, M. Federico, B. Giuseppe, Classification of oat and groat kernels using NIR hyperspectral imaging, Talanta, 103 (2013) 276-284.
- [9] I. Mage, J. P. Wol, F. Bjerke, V. Segtnan, On-line sorting of meat trimmings into targeted fat categories, J. Food Eng., 115 (2013) 306-313.
- [10] B. Murphy, J. Zyl, G. Domingo, Underground preconcentration by ore sorting and coarse gravity separation, Narrow Vein Mining Conference , Perth-West Aust., 26-27 Mart, 2012.
- [11] A. R. Batchelor, R. S. Ferrari-John, J. Katrib, O. Udoudo, D. A. Jones, C. Dodds, S. W. Kingman, Pilot scale microwave sorting of porphyry copper ores: Part 1-Laboratory investigations, Miner. Eng., 98 (2016) 303-327.
- [12] S. Veerendra, S. M. Rao, Application of image processing and radial basis neural network techniques for ore sorting and ore classification, Miner. Eng., 18 (2005)1412-1420.
- [13] J. Tessier, C. Duchesne, G. Bartolacci, A machine vision approach to on-line estimation of run-of-mine ore composition on conveyor belts, Miner. Eng., 20 (2007)1129-1144.
- [14] G. R. Lane, C. Martin, E. Pirard, Techniques and applications for predictive metallurgy and ore characterization using optical image analysis, Miner. Eng., 21 (2008) 568-577.

- [15] C. Snehamoy, B. Ashis, S. Biswajit, K. P. Samir, Image-based quality monitoring system of limestone ore grades, *Comput. Ind.*, 61 (2010) 391-408.
- [16] L. Sophie, D. Godefroid, B. David, Eric P., Optical analysis of particle size and chromite liberation from pulp samples of a UG2 ore regrinding circuit, *Miner. Eng.*, 24 (2011) 1340-1347.
- [17] L. Joseph, S. William, B. Kai, F. Jesus, M. Larry, Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit, *Miner. Eng.*, 91 (2016) 92-99.
- [18] M. Barış, S. Albayrak, F. C. Metin, O. Ünaldı, E. Tektaş, “Enrichment of 8-25 mm Colemanite Middlings by Optical Sorting”, XVII. International Boron, Borides and Related Materials, 255, İstanbul-Türkiye, 11-17 Eylül, 2011.
- [19] S. Gannouni, N. N. Rebai, S. Abdeljaoued, A spectroscopic approach to assess heavy metals contents of the mine waste of jalta and bougrine in the north of Tunisia, *J. Geog. Inf. Syst.*, 4 (2012) 242-253.
- [20] N. G. Cutmore, Y. Liu, A. G. Middleton, Ore characterisation and sorting, *Miner. Eng.*, 10:4 (1997) 421-426.
- [21] N. G. Cutmore, Y. Liu, A. G. Middleton, On-line ore characterisation and sorting, *Miner. Eng.*, 11:9 (1998) 843-847.
- [22] Derek P., George W.L., Donald L.S., ATR-FTIR spectroscopic studies of boric acid adsorption on hydrous ferric oxide, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67:14 (2003) 2551-2560.
- [23] A. Budak, M. Gonen, Extraction of boric acid from colemanite mineral by supercritical carbon dioxide, *J. Supercrit. Fluids*, 92 (2014) 183-189.