



Original Research / Orijinal Araştırma

Sivas ili Kangal-Çartıl yöresi kromit cevherlerinin sarsıntılı masa zenginleştirme ürünlerinin çeşitli teknikler kullanılarak tane şekilleri açısından incelenmesi

investigation of shaking table products of chromite ore from Sivas Kangal-Çartıl region in terms of particle shapes by using various techniques

Uğur Ulusoy^{a,*}, Osman Nuri Atagün^{a,**}

^a Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, TÜRKİYE

Geliş-Received: 21 Mart - March 2022 • Kabul - Accepted: 14 Eylül - September 2022

ÖZ

Bu çalışmanın amacı; Sivas ili Kangal yöresinde faaliyet gösteren Aksu Madencilik kromit zenginleştirme tesisindeki iri ve ince sarsıntılı masa zenginleştirme devrelerinden alınan temsili örneklere ait tanelerin şekillerinin hızlı ve güvenilir sonuçlar veren dinamik görüntü analizi (DGA) ile incelenmesi, taramalı elektron mikroskop (SEM) ve stereo-mikroskop analizleriyle karşılaştırılması ve masa ayırmasındaki etkisinin yorumlanmasıdır. Her bir ölçümde 10,000'den fazla tanenin sayıldığı en az 4 tutarlı ölçümün ortalamasına göre, konsantre ürünlerinin (%95 güven aralığında) besleme, ara ürün ve artık ürünlerine göre en yüksek dairesellik (C) değerine sahip, artık ürünlerinin ise en düşük C değerine sahip (en uzun) tanelerden oluştuğu bulunmuştur. Bu sonuç, farklı şekilde tanelerin masa yüzeyi üzerinde farklı hareketler yapmasına dayandırılmaktadır. DGA görüntüleri, SEM görüntüleri ve stereo-mikroskop görüntüleri DGA sonuçlarını desteklemektedir ve literatürde daha önce bildirilen çalışmalar ile uyumludur. Sonuçlar, aynı boyut aralığında sarsıntılı masa ayırmasında sadece tane yoğunluğunun değil aynı zamanda tane şeklinin de ayırmaya etkisi olduğunu göstermektedir. Bu çalışma kromitin gravite zenginleştirilmesi devrelerinde, sarsıntılı masalara beslemek için daha yuvarlak taneler üreten öğütme sistemlerinin tercih edilerek daha yüksek ayırma veriminin elde edilebilmesine ışık tutacaktır.

Keywords: Tane şekli, Yuvarlaklık, Dinamik görüntü analizi, Sarsıntılı Masa, Kromit zenginleştirme

A B S T R A C T

The purpose of this study is not only to examine the shapes of representative samples taken from coarse and fine shaking table concentration circuits in a chromite concentration plant (Aksu Group Mining Industry Co. Inc.) operating in the Kangal region of Sivas, with dynamic image analysis (DIA) that gives fast and reliable results, but also to compare their results with scanning electron microscope (SEM) and stereo-microscope analyzes and to interpret the effect of their shapes on table separation. Based on more than 4 successive measurements for each sample by counting more than 10,000 particles, concentrate products (at 95% confidence interval) have the highest Circularity (C) values compared to other products, whereas tailing products have the lowest C values (elongated particles) compared to other products. The difference in shape of products is attributed to different movements of the particles on the table surface. In addition, DGA images, SEM images and stereo-microscope images support the DGA results and are compatible with previous studies in the literature. The results show that not only particle density but also particle shape has an effect on the shaking table separation at the same size range. The results of this study will shed light on the fact that higher separation efficiency can be obtained by preferring grinding systems that produce more rounded grains for feeding into shaking tables in chromite gravity enrichment circuits.

Keywords: Particle shape, Circularity, Dynamic image analysis, Shaking table, Chromite concentration

Giriş

Yüksek korozyona ve yüksek sıcaklığa karşı eşsiz bir direnç özelliğine sahip olan krom, kimyasal, refrakter ve metalurji endüstrilerinde yüksek önem arz etmektedir, dolayısıyla düşük kar-

bon enerji teknolojileri ve düşük karbon üretiminde önemli bir hammadde olarak düşünülmektedir (Guertin vd., 2005). Krom 2020 yılına göre Avrupa'nın tedarik riski bulunan hammaddeler

* Sorumlu yazar / Corresponding author: uulusoy@cumhuriyet.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-2634-7964>

** osmannuri@atagun.com.tr • <https://orcid.org/0000-0003-0032-2889>

listesinde gösterilse de ABD Enerji Departmanı ve Avusturalya Yer Bilimleri Departmanı tarafından kritik hammadde olarak nitelendirilmektedir (European Commission, 2020; Fortier vd., 2018; Mudd vd., 2018). Bu sebepten (Guertin vd., 2005). kromitin dünyadaki üretimi ve rezervi 2010 yılından 2019'a kadar giderek artmıştır. Örneğin, 2018 yılında bu değerler sırasıyla 43.000.000 ve 570.000.000 ton civarındadır. Kromit mineralinin metalurji, kimya ve refrakter endüstrilerinde kullanılması ve yüksek tenörlü cevherlerin günümüzde giderek azalması yüzünden düşük tenörlü kromit cevherlerinin zenginleştirilmesi giderek önem kazanmıştır. Günümüzde düşük tenörlü kromit cevherleri spiral ve sarsıntılı masalar gibi verimliliği yüksek gravite ayırıcıları tarafından diğer zenginleştirme yöntemlerine göre ucuz ve daha çevre dostu olduğu için tercih edilmekte, %46 Cr₂O₃'den yüksek tenörlü konsantreler üretilmektedir.

Geçen çeyrek yüzyılda fiziksel ayırma yöntemleri kullanan deneysel çalışmalar, tane boyutu ve şekli ile adlandırılan tane geometrisi kavramının önemini göstermiştir (Pita ve Castilho, 2016; Pita ve Castilho, 2017; Phengsaart vd., 2018; Richard vd., 2017).

Gravite zenginleştirme kromit ve gang minerali arasındaki özgül ağırlık farklılığına dayanan bir fiziksel ayırma yöntemidir ve su ortamında gravite kuvvetiyle farklı karışımda boyut, şekil ve yoğunluğa sahip tanelerin ayırımında kullanılır (Singh vd., 2014; Brits, 1991; Das, 2009). Bir başka ifadeyle gravite prosesi esasen taneleri yoğunluğa göre ayırdığı kadar, boyut ve şekle göre de ayırmaktadır (Aplan, 2003). Ayırma tanelerin büyük oranda hidrolik deplasmanına bağlı olduğu için onların şekilleri de davranışlarını etkilemektedir (Pryor, 1965).

Tane geometrisinin, gravite ayırıcılarından olan jiglerin (Pita ve Castilho, 2016; Phengsaart vd., 2018; Ahmed, 2011; Cierpisz vd., 2016; Kawatra ve Carao, 2013) optimizasyonunda, elektrostatik ayırmada (Richard vd., 2017) ve plastiklerin flotasyon ile ayırımında (Pita ve Castilho, 2017) önemli bir değişken olduğu çeşitli çalışmalar tarafından bildirilmiştir. Örneğin, jigle ayırmada, düşük yoğunluklu yüzen plastik tanelerinin düz ve yassı şekilli olduklarında ve batan yüksek yoğunluklu plastik tanelerin ise küresel şekilli olduklarında daha iyi performans verdikleri bildirilmiştir (Pita ve Castilho, 2016).

Sarsıntılı masa ayırmasında masanın asimetrik hareketi taneleri masanın uzun kenarı boyunca taneleri yoğunluk, boyut ve şekline göre ayırmaktadır (Sivamohan, 1985). Bir başka ifadeyle, karışık bir tane grubu içinde çeşitli boyut, şekil ve yoğunlukta taneler akan film zenginleştirmesinde engelli çökmeyle ayrılır (Richards ve Locke, 1940; Aplan, 2003). Gupta ve Yan (2006)'ın bildirdiğine göre, tane boyutu, katı özgül ağırlığı, su akış hızı, besleme hızı, eşik dizaynı, genlik, eğim, masa şekli gibi özelliklerin yanında tanelerin şekli de sarsıntılı masa prosesini etkileyen parametrelerden birisidir. Özellikle yassı taneler daha az yuvarlanma eğilimine sahiptirler ve ayırımı karmaşık hale getirirler. Verilen tipte bir cevherin gravite konsantrasyonunun uygulanabilirliği için yaygın olarak kullanılan konsantrasyon kriterinin sadece tanelerin ve ortamın yoğunlukları ile ilgili olduğu bilinmesine rağmen, aslında tane iriliği azaldıkça aynı konsantrasyon kriterinde gravite prosesinin zorluk derecesi azalmaktadır (Sebastien vd., 2012; Maharaj vd., 2012). Ayrıca ortam içinde hareket eden tanelerin hızları ortamdaki farklı direnç kuvvetlerine maruz kalan farklı şekildeki tanelerle de değişmektedir (Ofori-Sarpong ve Amankwah, 2011).

Minerallerin tane şekli kullanılan kırıcı ve değirmenlere bağlı olduğundan, bazı araştırmacılar istenilen mineral tane şeklinin seçilecek uygun öğütme sistemi ile elde edilebileceğini ileri

sürmüşlerdir. Örneğin, Hiçyılmaz vd., (2006) çubuklu değirmende öğütülmüş kuvars tanelerinin, bilyalı ve otojen değirmende öğütülmüş tanelere göre daha yüksek uzunluk oranına sahip olduğunu bildirmiştir. Benzer olarak bilyalı öğütülmüş manyetit ürünlerinin çubuklu öğütülmüş ürünlere kıyasla daha çok sayıda uzun tane içerdiği bildirilmiştir (Dehghani vd., 2012). Little vd., (2017) Güney Afrika platinyum grubu cevheri diye bilinen UG2 cevheri için bilyalı değirmenin karıştırmalı değirmene kıyasla daha çok köşeli ve uzun taneler ürettiğini bildirmiştir. Ofori-Sarpong ve Amankwah (2011) çalışmalarında çekiçli, diskli ve titreşimli pülverizatör değirmenlerin sırasıyla küresel, puro şekilli ve pulsu taneler ürettiğini, bilyalı değirmenin ise pulsu ve düzensiz şekilli tanelerin bir karışımını ürettiğini bildirmiştir. Çekiçli, diskli, bilyalı ve titreşimli değirmenler ile hazırlanan malzemeler için sırasıyla 28,3; 24,0; 23,6 ve 21,7 zenginleştirme oranları elde edilmiştir. Bu nedenle, numuneler gravite zenginleştirme (Knelson konsantratörü) için hazırlanırken, daha çok yuvarlak taneleri serbest bırakma potansiyeline sahip bir değirmenin kullanılmasının avantaj yaratacağı bildirilmektedir.

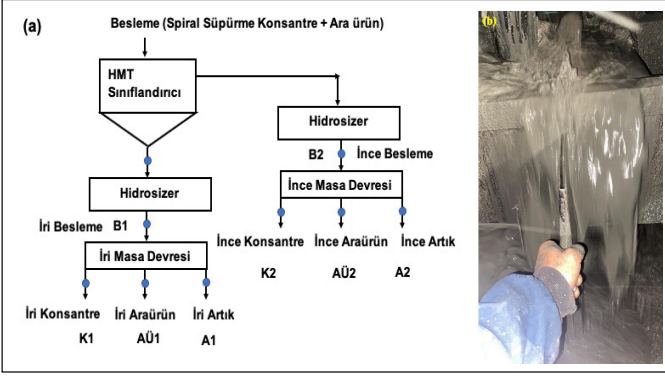
Yukarıda da anlatıldığı gibi minerallerin tane geometrisinin sarsıntılı masa ayırma performansı için önemli olmasına rağmen tane şekli ile sarsıntılı masa arasındaki ilişkiyi inceleyen çok az çalışma bulunmaktadır. Kademli ve Gülsoy (2012), mikanın feldspattan laminer (tabakamsı, yassı) şekilde olması yüzünden ayrılabilceğini vurgulayan çalışmada, -212+75 mikron boyutunda pulsu şekilli mika sarsıntılı masa kullanılarak feldspat mineralinden yüksek verimlilik ile ayrılabilceğini sonucunu bulmuşlardır. Benzer olarak Zhao vd., (2013) vanadyum içeren minerallerin sarsıntılı masayla gravite ayırımında şekil faktörünün de etkili olduğunu bildirmiştir. Her ne kadar laboratuvar ve pilot ölçekte sarsıntılı masa ile cevher zenginleştiren pek çok optimizasyon çalışması yapılmışsa da bir kromit zenginleştirme tesisinin sarsıntılı masa akışlarındaki tanelerin dinamik görüntü analizi (DGA) ile incelenmesi literatürde eksiktir.

Tanelerin şeklinin proseteki davranışlarına etkisinin önemi iyi bilindiğinden bu çalışmanın amacı, endüstriyel bir kromit zenginleştirme tesisinin gravite zenginleştirme devresi ürünlerinin tane şekillerini sayısal olarak, son yıllarda doğru ve hızlı ölçüm yapan DGA ile karakterize etmek, sonuçları dairesellik (C) parametresi ile ifade etmek, ölçüm sonuçlarının birbirinden farklılığını istatistiksel olarak test etmek, DGA sonuçlarını, SEM ve stereo-mikroskop analizi ile karşılaştırılmak, konsantr ve artık ürünlerinde hangi şekilde tanelerin dominant olduğunu ortaya çıkarmak, masa yüzeyi üzerinde değişik şekilde tanelerin nasıl hareket ettiğini ve son olarak, daha yüksek ayırma performansı için hangi şekilde tanelerin masaya beslenmesi gerektiğini ortaya koymaktır.

1. Malzeme ve yöntem

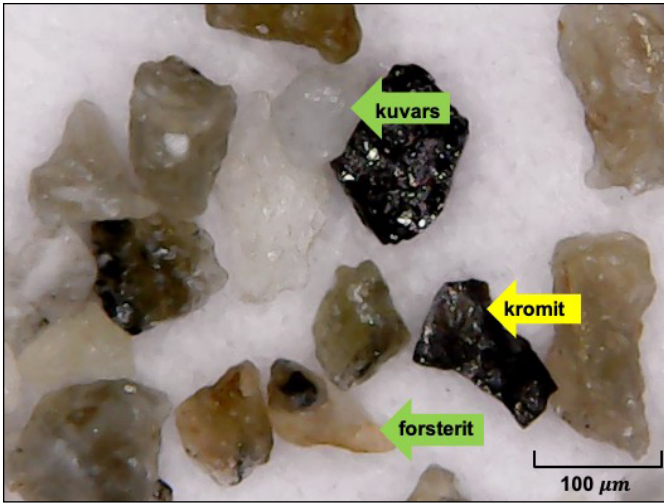
1.1. Örnek alma

Bu çalışma için Kangal-Çartlı yöresinde düşük tenörlü kromit cevherini gravite ayırma yöntemi ile zenginleştiren Aksu Madencilik kromit zenginleştirme tesisinden Şekil 1a' da gösterilen noktalardan, özel tasarlanmış dikdörtgen kesitli örnekleme aparatı (Şekil 1b) kullanılarak temsili örnekler toplanmıştır. 16 saat boyunca 30 dakika aralıklarla aynı miktarda alınan örnekler alüminyum tepelerde propan ocak ve fırın kullanılarak kurutulduktan sonra konileme-dörtleme yöntemi ile azaltılmıştır. Kimyasal analiz için ayrılan örnekler ve diğer örnekler etiketlenerek ayrı ayrı paketlenmiştir.



Şekil 1. (a) Sarsıntılı masa devre akışlarından alınan örnek noktaları, (b) Dikdörtgen kesitli örnek alma aparatı ile örnek alma

Sarsıntılı masa devrelerine beslenen kromit cevherinin mineralojik kompozisyonu Çizelge 1’de gösterildiği gibi birincil mineral olarak forsterit, brusit ve kromit içermektedir. Kuvars ve kalsit mineralleri de ikincil mineral olarak yer almaktadır. Tesise ait kromit cevherinin serbestleşme boyutu $-400 \mu\text{m}$ olduğu için, minerallerin stereo-mikroskop görüntülerini gösteren Şekil 2’den açıkça anlaşılacağı gibi masa beslemesine ait örneklerde bulunan tanelerin çoğu serbestleşmiş haldedir. Dolayısıyla tane şeklinin sarsıntılı masa devresi ile zenginleşmesine etkisinin incelenmesi için uygundur. Şekil 2’de siyah renkli taneler kromit mineralini, beyaz (kuvars), gri (kalsit), sarı (brusit), açık kahverengi (forsterit) vs. renkler de gang minerallerini temsil etmektedir. Kromit, forsterit, brusit, kalsit ve kuvars minerallerinin yoğunlukları sırasıyla 4,80; 3,27; 2,40; 2,65 ve 2,65 gr/cm^3 ’dür.



Şekil 2. Sarsıntılı masalara besleme örneğinde bulunan minerallerin stereo-mikroskop altında görünüşü

Çizelge 1. Tüvenan kromit cevherinin mineralojik analiz sonuçları

Mineral	Kromit	Forsterit	Brusit	Kalsit	Kuvars
Formül	$\text{FeO.Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Mg}_2(\text{SiO}_4)$	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	CaCO_3	SiO_2
Ağırlıkça % dağ.	5,249	86,464	5,477	1,239	0,205
Renk	siyah	yeşil, sarı, beyaz	beyaz, sarı, grimsi	beyaz, grimsi	beyaz, grimsi
Görünüm	metalik	transparan	transparan	Transparan, opak	Transparan, opak
Kristal sistem	izometrik	ortorombik	Trigonal-hegzagonal	hegzagonal	hegzagonal
Özgül ağırlık	4,80	3,27	2,40	2,65	2,65

İncelenen tesiste düşük tenörlü kromit cevheri öncelikle biliyalı değirmende 15 mm ’den 2 mm ’ye indirilmektedir. Daha sonra kaba ve süpürme devrelerinde ön zenginleştirme öncesi 5 katlı titreşimli elek ($-400 \mu\text{m}$) ve hidrosiklon ($-400+75 \mu\text{m}$) kullanılmıştır. Son olarak, $-400+75 \mu\text{m}$ boyut fraksiyonları spirallerde sınıflandırıldıktan sonra iri ($-400+75 \mu\text{m}$) ve ince ($-212+75 \mu\text{m}$) masalara besleme hazırlamak için HMT sizer (Crossflow) ve hidrosizer ekipmanları kullanılmıştır. Çizelge 2 bu çalışmada kullanılan sarsıntılı masaların özelliklerini ve işletme koşullarını özetlemektedir.

Çizelge 2. Kromit zenginleştirme tesisindeki sarsıntılı masaların çalışma şartları

Parametreler	İri Masa (Wilfley tipi)	İnce Masa (Wilfley tipi)
Uzunluk x genişlik x yükseklik (m)	L6,8 x W2,4 x H3,2	L6,8 x W2,4 x H3,2
Zenginleştirme Alanı (m^2)	8	8
Tane Boyu (μm)	- 400 + 75	- 212 + 75
Genlik (mm)	15 - 20	10 - 15
Yıkama Suyu (m^3/saat)	1,5 - 2	1,5 - 2
Besleme Miktarı (kg/ saat)	2,200	3,300
Eğim ($^\circ$)	3	3
Hız (dev/dak.)	290 - 310	300 -

Bu çalışmanın incelendiği tesiste tanelerin sınıflandırılmasında kullanılan HMTsizer ve Hidrosizer ekipmanlarının keskin bir ayırım gerçekleştirememesi yüzünden besleme alt boyutu $75 \mu\text{m}$ kadar inebilmektedir. Bu yüzden iri masa besleme tane boyutu $-400+75 \mu\text{m}$ olarak revize edilmiştir. Her ne kadar makalede DGA cihazının $250 \mu\text{m}$ mikrondan küçük tanelerde başarılı olduğu ifade edilse de önceki çalışmalarımızdan elde ettiğimiz tecrübelerle dayanarak ölçümlerde en iyi analiz boyutunun $-180+125 \mu\text{m}$ boyut fraksiyonu olması ve her iki masaya uygun olması nedeniyle $-180+125 \mu\text{m}$ mikron boyut fraksiyonunun kullanılması kararlaştırılmış ve bu boyutta örnekler hazırlamak için eleme yapılmıştır.

Bu çalışmada sarsıntılı masa akışlarına ait numunelerin tane şekillerinin zenginleşmeye etkisinin incelenmesi için alınan örnekler laboratuvarında kuru eleme (Endecotts elek makinasında, 40 genlik ve sürekli frekansta, 10 dakikada) işlemi ile $-180+125 \mu\text{m}$ boyutunda hazırlandıktan sonra Şekil 3’de görülen dönen otomatik örnekleyici (Quantachrome® Instruments) cihazı kullanarak $-250 \mu\text{m}$ ’dan küçük tanelerin şekillerini başarıyla görüntüleyen DGA cihazında kullanmak üzere daha az miktarlarda temsili örnekler alınmıştır. Çizelge 3’de gösterildiği üzere otomatik döner

örnekleyici diğer örnek alma teknikleri içinde güvenilirliği en yüksek yöntemdir.

Çizelge 3. Örnekleme metodlarının güvenilirliği (Allen, 1990)

Örnekleme Tekniği	STS
Konileme-dörtleme	6,81
Kaşıkla (Scoop sampling) örnekleme	5,14
Masa örnekleyici	2,09
Oluklu örnekleyici	1,01
Dönen (spinning riffing) örnekleyici	0,146



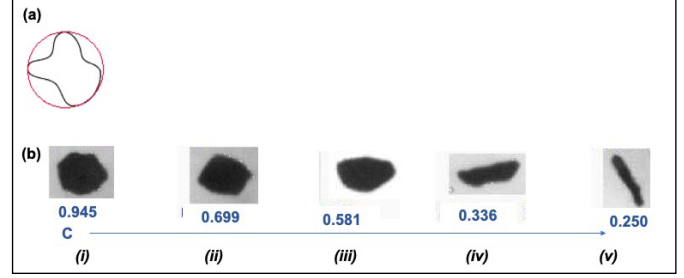
Şekil 3. Dönen otomatik mikro örnek bölücü (Quantachrome, 2021)

1.2. DGA ile Tane Şekli Karakterizasyonu

Dairesellik (Circularity: C), DGA cihazının dayandığı tane karakterizasyon modellerinden "Daire" modeline göre hesaplanan (yuvarlaklığın ya da küreselliğin bir ölçüsü) bir şekil parametresidir ve Şekil 4a' da görüldüğü gibi bir tanenin etrafını saran dairenin alanı olarak düşünülebilir. Eşitlik 1'den anlaşılacağı gibi alan ve çevreleyen daire çapından hesaplanan bir parametredir. C değeri, 0 ile 1 arasında değişen fraksiyonel bir ölçüdür, iğnemsiz taneler için 0'a yaklaşırsa, mükemmel bir daire için 1'e eşittir. Şekil 4b bu çalışmada kullanılan farklı şekildeki kromit tanelerinin alabileceği farklı C değerlerini göstermektedir. Açıkça görüldüğü gibi tanenin şekli yuvarlağa yakınsa C parametresi 1 değerine yaklaşmakta, küreselden saptıkça yani uzunlaştıkça 0 değerine doğru azalmaktadır.

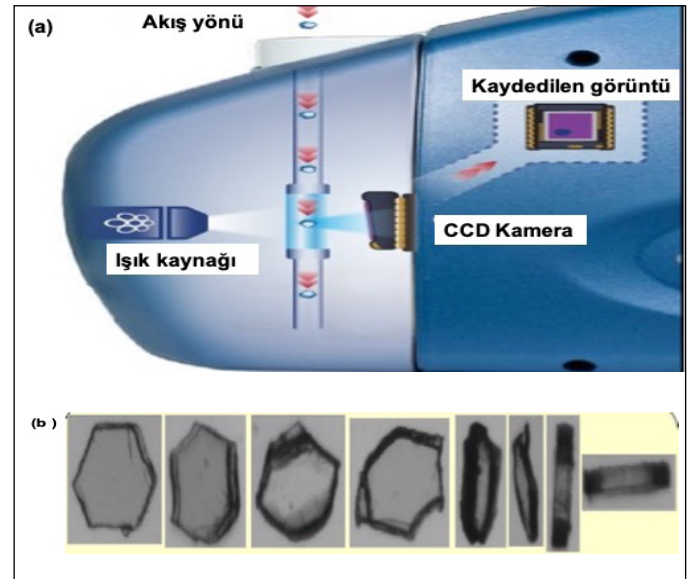
$$C = \frac{4A}{\pi D_{BC}^2} \quad (1)$$

Burada, A: alan, μm^2 , D_{BC} : çevreleyen daire çapı, μm , C: dairesellik, birimsiz,



Şekil 4. (a) Daire modeli (Vision Analytical, 2021), (b) DGA ölçümünde farklı tanelerin yuvarlaklık derecelerine göre C değerinin değişimi

DGA ölçümünde, taneler bir sıvı içinde homojen olarak süspansiyon edilmiştir. Taşıyıcı sıvı ile birlikte taneler ince bir akış hücresi içinden optik bir yoldan geçmektedir. Tanelerin gölgesinin yüksek-çözünürlüklü CCD kamera sensörü üzerine yansıtıldığı akış hücresi boyunca bir ışık kaynağı tarafından aydınlatılmaktadır. Akıştan 2 boyutlu görüntüler yakalanmakta ve kamera görüntüleri ana bilgisayara gönderilerek analiz edilmektedir. Taşıyıcı sıvıdaki tanelerin dispersiyonu ve süspansiyonu taşıyıcı sıvının yeniden sirkülasyonu ile sağlanmaktadır (Vision Analytical, 2021). Şekil 5a, devridaim yapan sıvı sistemi örnek hücrelerinden askıdaki taneleri taşıyarak bir CCD kameranın örneğin görüntüsünü alarak dijital bir görüntüye çevrilmesini ve nihai analiz için bilginin yazılıma gönderilmesini göstermektedir. Çalışma sonunda toplanan tane istatistikleri görüntüleme, yazdırma veya Excel formatına dönüştürülmektedir. İri ve ince sarsıntılı akışlarından alınan örneklerden otomatik örnekleyici kullanarak birkaç gr temsili numune alındıktan sonra, DGA cihazıyla şekil analizi için kullanılan numune kabında saf su ilave edilerek 5 dakika ultrasonik banyoda bekletilerek iyice disperse edilmiş ve nihayetinde damlalıklarla birkaç damla cihazın örnek besleme girişine ilave edilerek ölçüm yapılmıştır. Yüksek güvenilirlikte sonuç almak için en az 10 000 adet tane sayılmış ve istatistiksel sonuçlar görüntülerle birlikte toplandıktan sonra kaydedilmiştir. DGA genellikle temsili örnekler ve istatistiklerin yakalanması için rastgele oryantasyonu özelliğini kullanmaktadır (Şekil 5b). Şekil 5b' de tanenin rastgele görünümünü görmek için aynı tane döndürülmektedir. Kontrol edilmiş oryantasyon cihazı tanenin kritik bilgisini vermesi için bu görüntülerden sadece birini görmektedir.



Şekil 5. DGA cihazının çalışma mekanizması (a) görüntüleme prensibi ve (b) rastgele oryantasyon özelliği (Vision Analytical, 2021).

1.3. SEM Analizi

DGA için kullanılan aynı temsili örneklere ait taneler (iri ve ince masa devrelerindeki akışlardan alınan) taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelenmiştir. Alınan temsili örnekler toz halinde karbon bant üzerine düzenli olarak dağıtılarak numune tablasına (stub) yerleştirilip, vakum ile cihaza gönderildikten sonra geri saçınımlı elektron dedektörü ile 250 kat büyütme yapılarak görüntüler kaydedilmiştir. Bu analizde kullanılan SEM cihazı Tescan MIRA3 XMU model (Tescan Orsay Holding A.S., Çek Cumhuriyeti) olup 20 kv seviyesinde çalıştırılmıştır. Şekil 6' da ince masa konsantresine ait bir örneğin sırasıyla spektrumu ve element haritası verilmektedir. Görüldüğü gibi masa beslemesine ait tanelerin Bölüm 1.1'de numuneye ait özelliklerde anlatıldığı gibi kromit, forsterit, brusit ve hematit minerallerinden ibaret olduğu için, ince masa konsantresi O, Mg, Al, Si, Cr, Fe elementlerini içermektedir.

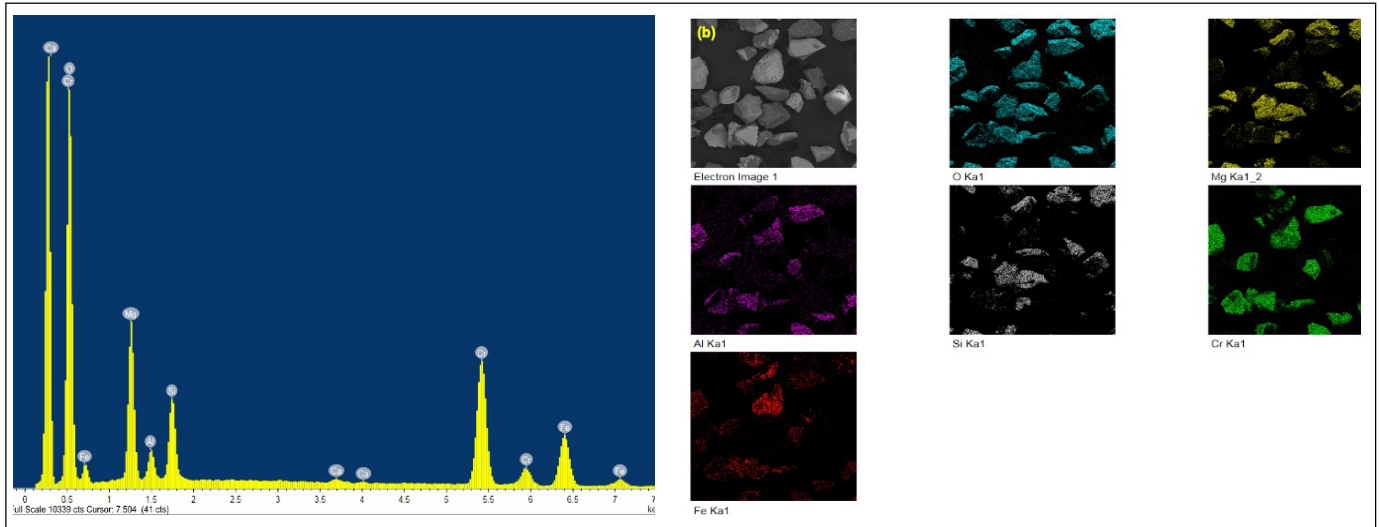
1.4. Stereo Mikroskop Analizi

DGA için kullanılan aynı temsili örneklere ait taneler (iri ve ince masa devrelerindeki akışlardan alınan) hem DGA hem de SEM analizi sonuçları ile karşılaştırmak için mineral tanelerinin renk farklılıklarını da yorumlayabilmeye imkân tanıyan stereo mikroskop (BOECO BM-1) altında da incelenmiştir.

2. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

2.1. DGA Sonuçları

Dinamik görüntü analizi ile iri ve ince masa akışlarından alınan örneklerin tane şekilleri dairesellik C parametresi cinsinden her bir ölçüm için en az 10 000 adet sayılarak ve en az 4 tutarlı ölçüm yapılarak aşağıdaki Çizelge 4 de özetlenmiştir. Çizelge 4'den açıkça görüldüğü gibi iri ve ince masa akışlarına ait taneler aynı C değerlerine sahip değildir. Şekil 7' de görüldüğü gibi örnekler ortalama C değerlerine göre karşılaştırıldığında hem iri hem de ince masa akışı için de " $K_{ort} > AÜ_{ort} > B_{ort} > A_{ort}$ " şeklinde ortak bir trend bulunmuştur. Bir başka ifadeyle, en yüksek C değerleri konsantre ürünlerinde en düşük C değerleri ise artık ürünlerinde görülmüştür. Şekil 8 bu sonucu desteklemektedir. Hem iri hem de ince masa akışlarındaki konsantre ve artık ürünlerine ait tanelerin şekilsel olarak birbirinden farklı olduğu açık bir şekilde fark edilmektedir. DGA sonuçları konsantreye ait tanelerin artığa ait tanelerden daha yuvarlak olduğu, bir başka ifadeyle artığa ait tanelerin konsantreye ait tanelere göre daha uzun olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar aynı numunelerin tane uzunluğunun göstergesi olan aspekt oranı (BRAR) değerleriyle uyumludur (Ulusoy ve Atagün, 2022).

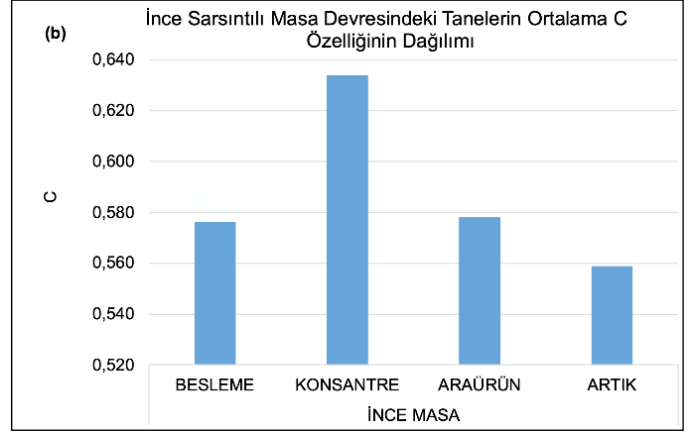
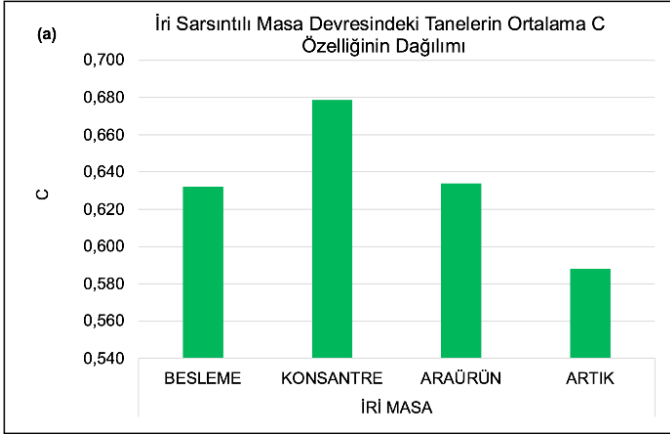


Şekil 6. (a) İnce masa konsantresinin SEM spektrumu, (b) İnce masa konsantresinin SEM ile belirlenen element dağılımı

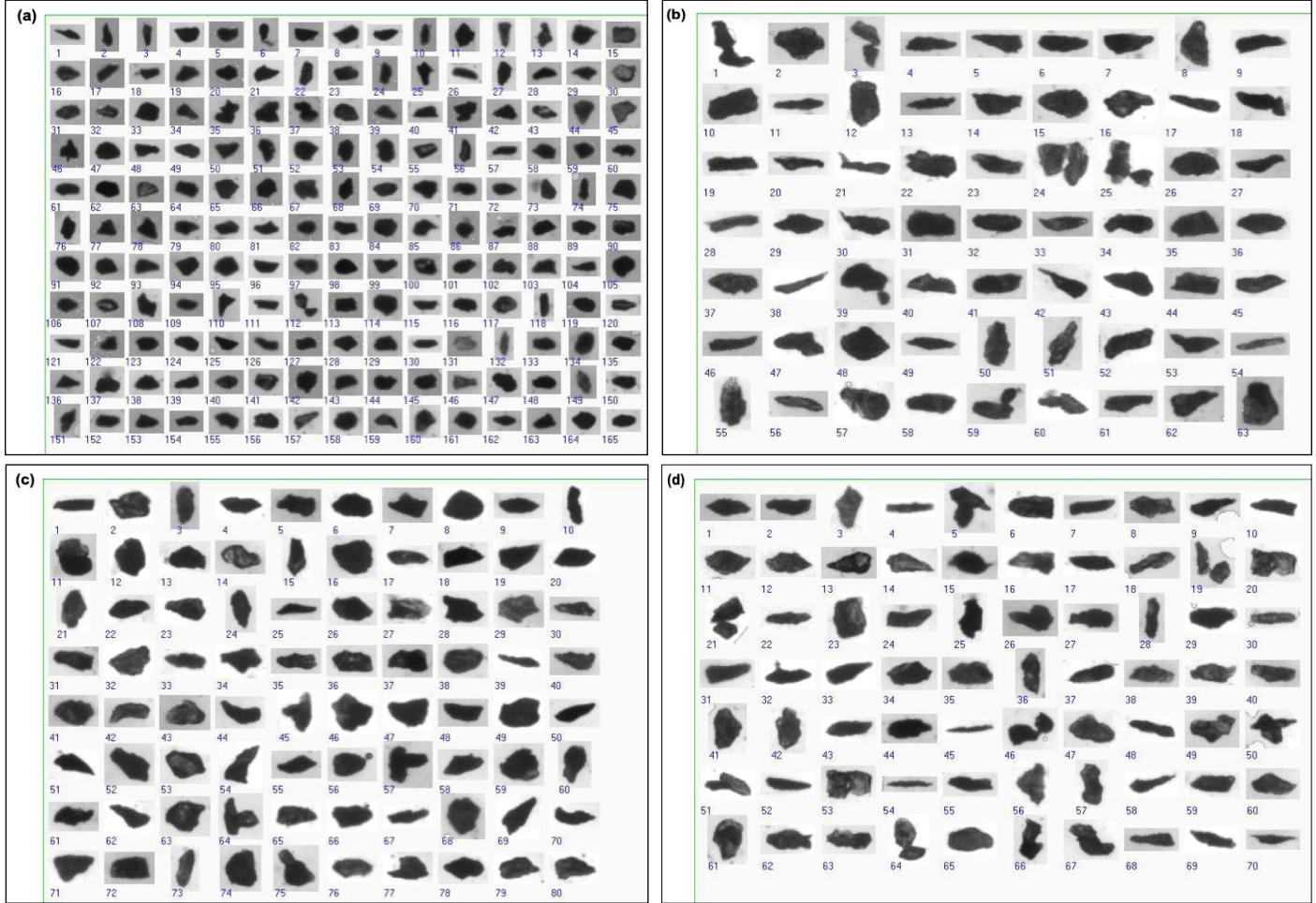
Çizelge 4. İri ve ince masa akışlarına ait tanelerin ölçülmüş C sonuçları

Masa	Örnek Adı	C*			
		1. Ölçüm (st. sap.)	2. Ölçüm (st. sap.)	3. Ölçüm (st. sap.)	4. Ölçüm (st. sap.)
İri	Besleme (B1)	0,577 (0,145)	0,678 (0,196)	0,630 (0,174)	0,644 (0,180)
	Konsantre (K1)	0,662 (0,175)	0,668 (0,179)	0,684 (0,181)	0,701 (0,189)
	Ara Ürün (AÜ1)	0,613 (0,168)	0,626 (0,175)	0,649 (0,198)	0,648 (0,184)
	Artık (A1)	0,571 (0,152)	0,582 (0,151)	0,606 (0,174)	0,594 (0,161)
İnce	Besleme (B2)	0,579 (0,165)	0,584 (0,156)	0,566 (0,155)	0,576 (0,154)
	Konsantre (K2)	0,627 (0,160)	0,640 (0,159)	0,635 (0,167)	0,634 (0,166)
	Ara Ürün (AÜ2)	0,580 (0,151)	0,584 (0,156)	0,570 (0,150)	0,578 (0,151)
	Artık (A2)	0,544 (0,160)	0,570 (0,152)	0,562 (0,158)	0,559 (0,157)

* DGA tekniği ile her bir ölçüm için en az 10 000 tane sayılmıştır.



Şekil 7. (a) İri ve (b) ince sarsıntılı masa akışlarından alınan örneklere ait tanelerin DGA ile ölçülmüş C değerlerinin kıyaslanması



Şekil 8. İri ve ince masa ürünlerine ait DGA görüntüleri, (a) İri masa konsantre (b) İri masa artık, (c) İnce masa konsantre (d) İnce masa artık

2.2. DGA Sonuçlarının İstatistiksel Değerlendirilmesi

ANOVA (varyans analizi) iki veya daha çok gruba ait verilerin arasındaki anlamlı farklılığı test eden ve varyanslarını kıyaslamak için kullanılan bir istatistiksel tekniktir. Tek yönlü ANOVA tekniği genellikle test edilen popülasyonların ortalamalarının eşit olduğu H_0 hipotezi ($H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$) veya eşit olmadığı H_1 hipotezini (H_1 : ortalamaların en az 1 tanesi farklı) ispatlamak için kullanılmaktadır. Hem iri hem de ince masa akışları için DGA tekniği ile ölçülen C değerlerinin farklılığını ya da aynı olup olmadığını test etmek için gerçekleştirilen ANOVA tekniği IBM® SPSS® Statistics Version 26 programı kullanılarak uygulanmıştır. 1. ölçüm sonuçlarına göre

ince masa akışlarındaki tanelerinin ortalama C parametresinin ANOVA test sonuçları (Çizelge 5) özetlenmiştir. Çizelge 5’de (kırmızı renkle çerçevesiz) .000 olarak bulunan “Anlamlılık” değeri ($\alpha=0,05$ yani %95 güven aralığında) değerinden küçük olduğu için H_0 hipotezi reddedilir ve “gruplar arasında anlamlı farklar bulunmaktadır, $F(3, 27578) = 226.015, p = .000$ ” şeklinde raporlanır. Dolayısıyla uygulanan ANOVA testlerinde bu gruplar arasında anlamlı bir farkın olduğunu gösterir. Bir başka ifadeyle hem iri hem de ince masa akışlarında besleme, konsantre, ara ürün ve artık için ölçülen C değerleri birbirinin aynısı değildir. Diğer ölçümlerde Çizelge 5’de örnek olarak verilen sonuçlarla uyumludur.

Çizelge 5. 1. İnce masaya ait akışların 1. ölçümle belirlenmiş ortalama C değerlerinin ANOVA testi sonucu (alfa=0,05)

Varyansların Homojenlik Testi		Levene İstatistiği	df1	df2	Anlamlılık*
Ortalamalara göre		35,998	3	27578	,000
Medyanlara göre		36,310	3	27578	,000
Medyan ve df değerlerine göre		36,310	3	27504,969	,000
ANOVA C	Karelerin toplamı	df	Ortalama kareler	F	Anlamlılık**
Gruplar arasında	17,781	3	5,927	226,015	,000
Gruplar içinde	723,210	27578	,026		
Toplam	740,991	27581			

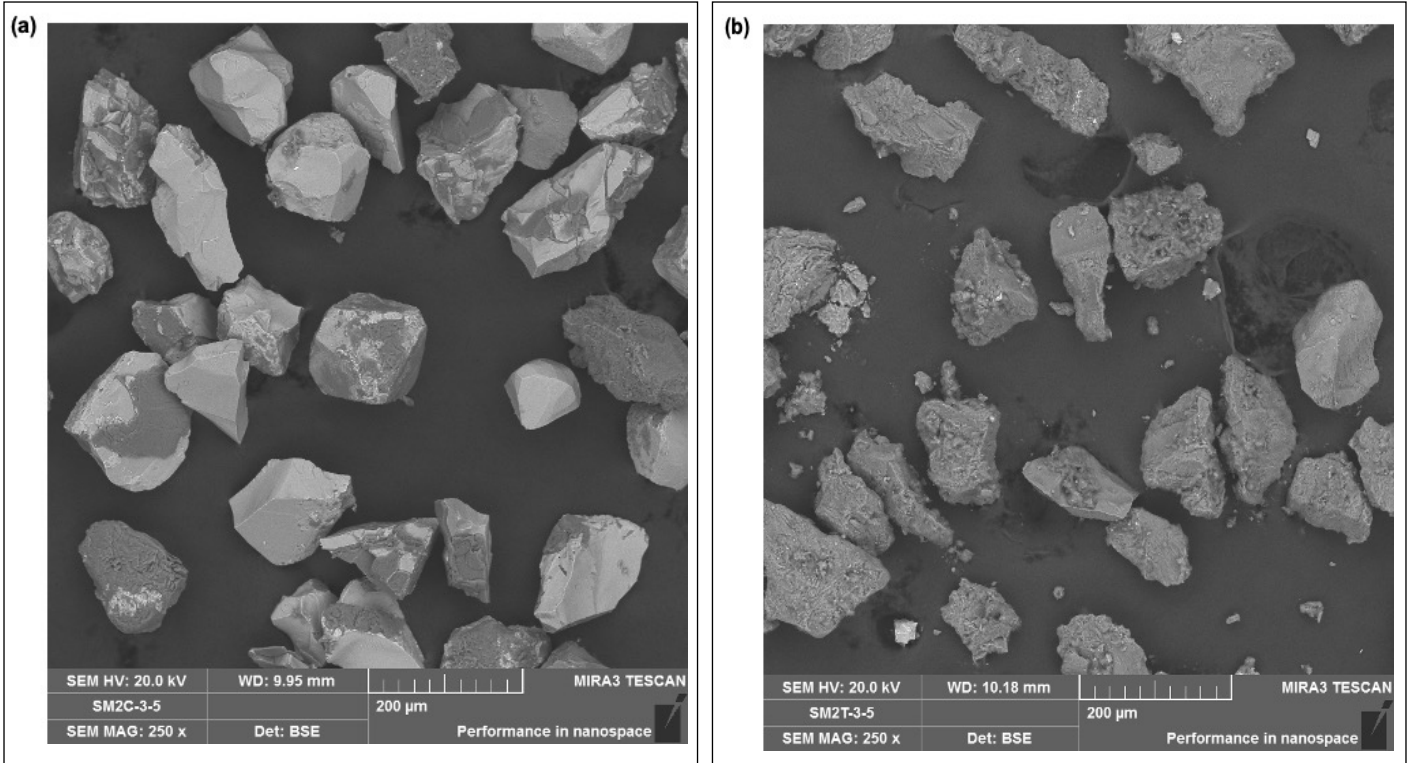
* Varyansların homojenlik testi anlamlıdır

** Gruplar arasındaki farkın anlamlı olduğunu gösteren p-değeri

2.3. SEM sonuçları

DGA için kullanılan iri ve ince masa devrelerindeki akışlardan alınan aynı temsili örnekler için elde edilen sonuçların SEM ile bakıldığında da desteklendiği görülmüştür (Şekil 9). Bir başka ifadeyle, artık ürünlerine ait tanelerin genellikle konsantre ürünlerindeki tanelere kıyasla daha uzun olduğu bulunmuştur.

yuvarlağa yakın şekilde ve daha çok kromit taneleri görülmüştür (Şekil 10a). Artık ürününe (Şekil 10b) ait tanelerin içinde çok az oranda küçük kromit taneleri gözlenmiş, fakat şekilsel olarak değerlendirildiğinde daha çok ince, uzun, çubuğumsu şekilli tanelerden ibaret olduğu bulunmuştur. Diğer taraftan ara üründe bulunan tanelerin konsantre ürünündeki taneler kadar yuvarlak

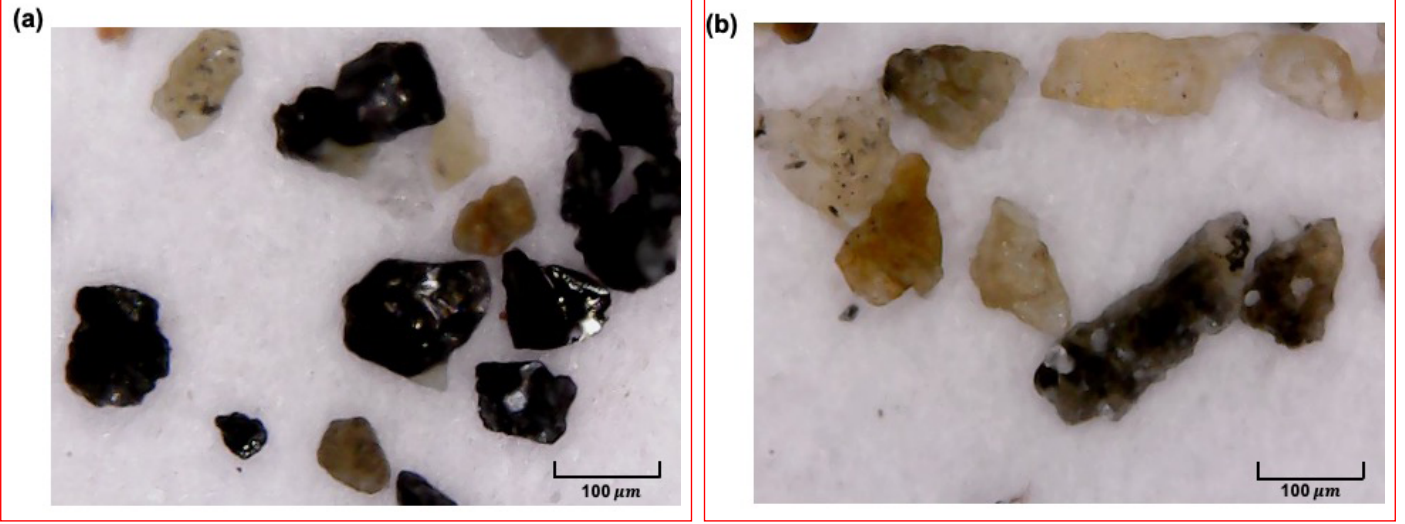


Şekil 9. SEM görüntülerinin kıyaslanması (a) İri masa konsantre ve (b) artık ürünlerine ait taneler (x250).

2.4. Stereo-mikroskop analizi sonuçları

DGA için kullanılan iri ve ince masa devrelerindeki akışlardan alınan aynı temsili örnekler için elde edilen sonuçların farklı renk ve şekilde taneleri görebilmemize imkân tanıyan stereo-mikroskop analizi ile de desteklendiği bulunmuştur. Genel olarak az oranda kromit tanesi içeren besleme ürününde değişik şekilli taneler gözlemlenirken, konsantre ürününde

şekilli olmadıkları ve de artık ürünündeki taneler gibi uzun olmadıkları görülmüştür. Ayrıca bağlı tanelerde görülmektedir. Bu sonuç sarsıntılı masa yüzeyi üzerindeki ayırma sadece tanelerin yoğunluğu ve boyutunun değil şekillerinin de etkili olduğunu göstermektedir.

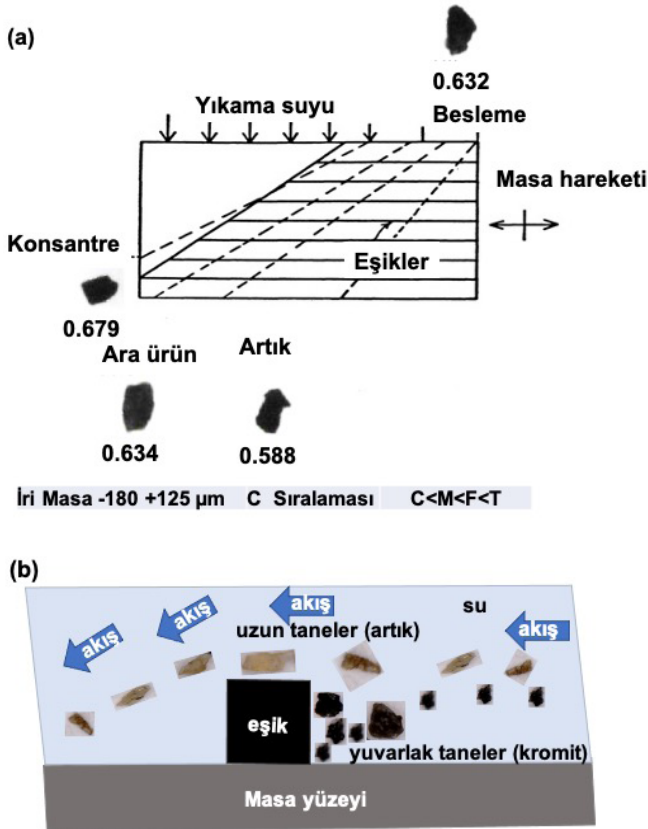


Şekil 10. Stereo-mikroskop görüntülerinin kıyaslanması (a) İri masada zenginleştirilen konsantre ve (b) İri masada zenginleştirilen artık (x40).

2.5. Masa yüzeyi üzerinde çeşitli şekilde tanelerin hareketi

Farklı şekildeki tanelerin masa yüzeyinde ince su filmi içerisinde farklı karşı koyma kuvvetlerine (drag forces) maruz kalmaları sarsıntılı masa ayırmasında akan su içinde çeşitli hızlardaki tanelerin farklı hareketlerine sebep olmaktadır (Ofori-Sarpong ve Amankwah, 2011). Bir sarsıntılı masa zenginleştirme prosesinde tanelerin şekillerinin, boyut ve yoğunlukları kadar etkin bir parametre olduğu iyi bilindiğinden, karışık özellikteki besleme tanelerinin yıkama suyu ve eşik etkisi ile hangi yolu izleyerek, hangi ürünlere doğru hareket ettikleri şematik olarak Şekil 11a'da gösterilmiştir.

Bu çalışmada incelenen kromit zenginleştirme tesisine ait iri ve ince masa akışlarından alınan besleme, konsantre, ara ürün ve artık tanelerinin farklı boyut ve yoğunlukta olmalarının yanında farklı şekillere de sahip olduklarının tespit edilmesi Şekil 11b'de masa yüzeyinde bulunan eşiklerde gerçekleşen engelli çöküş sınıflandırmasına göre açıklanmıştır. Masaya beslenen ağır, siyah renkli ve yuvarlağa yakın şekilli kromit tanelerinin eşik dibinde çökerek biriktiği ve eşik boyunca konsantreye doğru taşınmakta olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan açık renkli hafif ve daha uzun gang minerali tanelerinin de su akışı sayesinde eşikleri kolayca aşarak sonraki eşiklere doğru masanın ya ara ürün ya da artık kenarlarına doğru hareket ettikleri düşünülmektedir (Gupta ve Yan, 2006). Bir başka ifadeyle küresel taneler masa yüzeyinde yuvarlanarak hareket ederken, yassı taneler ise kayarak hareket etmiştir (Sivamohan, 1985). Walsh ve Kelly (1992) mika gibi yassı şekle sahip tanelerin yoğunluğa dayalı bazı uygulamalarda akan film tabakasının üstüne doğru hareket ettiklerini bildirmiştir. Bununla ilgili olarak uzunluğu yüksek olan tanelerin büyük yüzey alanları yüzünden masanın artık ucuna doğru hareket etme eğilimine sahip oldukları da bazı araştırmacılar tarafından ileri sürülmektedir (Napier-Munn ve Alford, 1991). Aslında bu durum yuvarlak tanelerin daha büyük direnç kuvvetlerine sahip olmalarıyla ilgilidir (Thompson, 1958; Boucher, 2017).



Şekil 11. (a) İri sarsıntılı masalarda tanelerin şekillerinin dağılımı ve (b) eşik etkisiyle masa üzerinde konsantre ve artığa ait tanelerin farklı hareketi

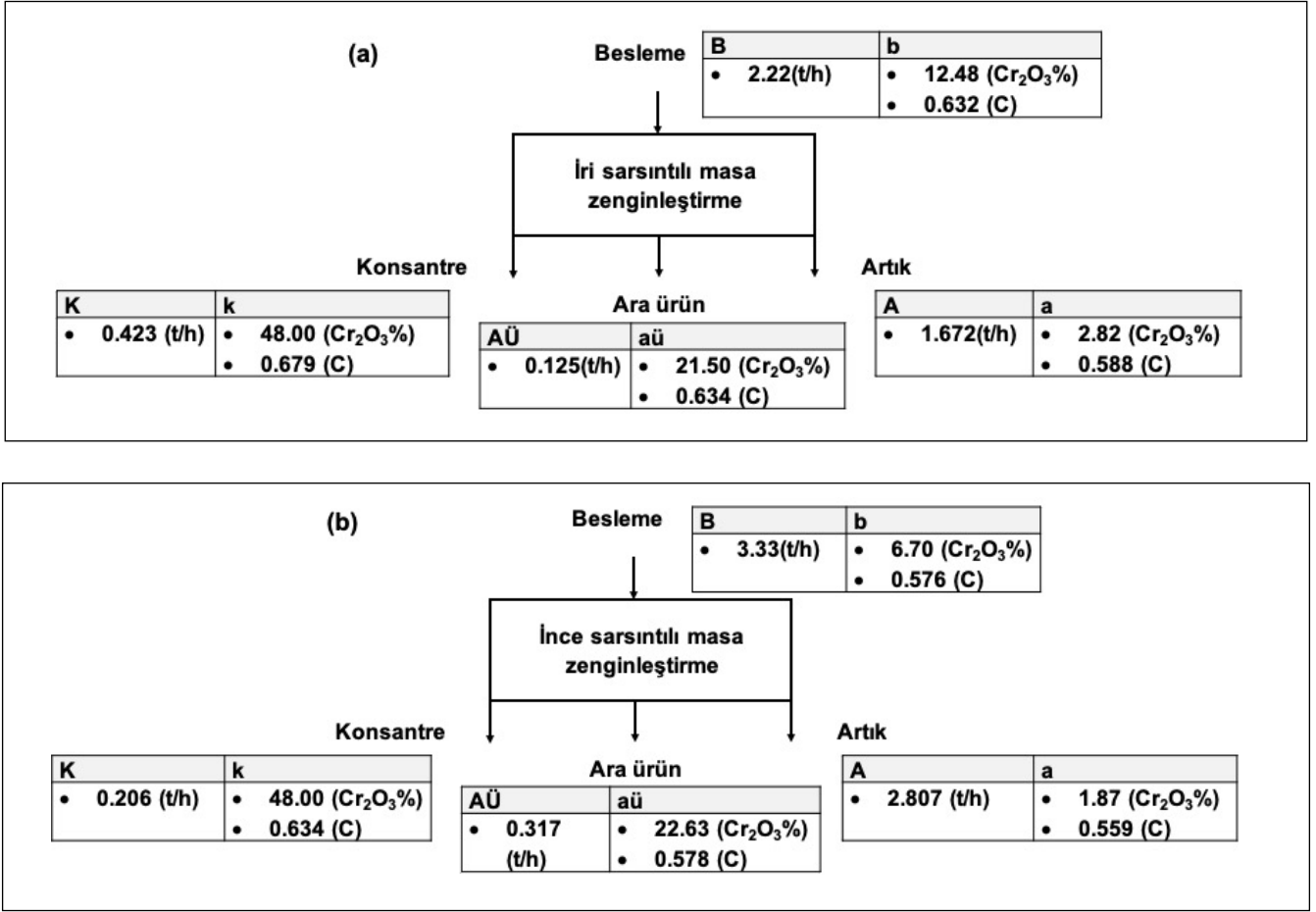
2.6. Metalurjik Denge Hesaplamaları

Genellikle tesis metal zenginleştirme devrelerinde toplam malzeme ve metal dengesi düşünüldüğünde her bir akışın kütle veya metal dengesine bakılmaktadır. Şekil 12'de gösterilen üç ürünlü (konsantre, ara ürün, artık) basit bir ayırma prosesi için B, b, K, k, AÜ, aü, A, a sırasıyla besleme, konsantre, ara ürün ve artığın kütle akış hızı ve tenör değerleri ile ifade edildiğinde, genellikle kütle ve bileşen dengesi aşağıda verilen Eşitlik 2 ve 3'e göre tenör üzerinden kolaylıkla yapılmaktadır.

$$B=K+A\bar{U}+A \quad (2)$$

$$Bb=Kk+A\bar{u}a+Aa \quad (3)$$

Fakat bileşen dengesi tenörün dışında su/katı oranı, tane boyutu, katı yüzdesi, yoğunluk, tane şekli ve hidrofobisite gibi diğer özellikler üzerinden de doğru bir şekilde kurulabilmektedir (Wills ve Finch 2016; Drzymala, 2007). Bu çalışmada, b, k, aü, a ile gösterilen tenör değerleri kullanılarak önce kütle akış hızları dengelenmiştir, daha sonra dengelenen kütle akış hızlarına göre C tane şekil parametresi kullanılmıştır.



Şekil 12. İri ve (a) ince (b) masa akışlarının tenör, tonaj ve ortalama C değerlerinin dağılımı

İncelenen kromit zenginleştirme tesisindeki hem iri hem de ince sarsıntılı masa akışlarından temsili olarak alınan besleme, konsantre, ara ürün ve artık örneklerinin 3'ü Eşitlikte tenörler yerine C değerleri kullanılarak sistemin yaklaşık olarak dengeye geldiği görülmüştür. Sonuçlar Çizelge 6'de özetlenmiştir. 3'ü Eşitliğe göre C değerlerinin kısmen (çok az farkla) dengelenmesi ürünlerin kütle akış hızlarının ve tenörlerin net olarak belirlenememesi ve sonuçların zamana

göre dalgalanmasından kaynaklanmasına dayandırılmaktadır. Buna rağmen söz konusu tesisin gravite zenginleştirme devresi için metalurjik denge hesaplarında tenör yerine C değerlerinin kullanılabilceği, dolayısıyla sarsıntılı masa akışlarındaki tanelerin şekilsel dağılımlarının tutarlı olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca istatistiksel hipotez testi ile kanıtlanan her ürününün yuvarlaklık değerlerinin farklılığı, SEM ve mikroskop çalışmalarının sonuçları ile de desteklemiştir.

Çizelge 6. DGA ortalama C değerleri ile birlikte tenör ve ürün tonaj değerleri

Masa	Örnek Adı	C _{ort} *	C Sıralaması	Tenör (%Cr ₂ O ₃)	Tonaj (t/saat)
İri	Besleme (B1)	0,632		12,48	2,220
	Konsantre (K1)	0,679		48,00	0,423
	Ara Ürün (AÜ1)	0,634	K1>AÜ1>B1>A1	21,50	0,125
	Artık (A1)	0,588		2,82	1,672
İnce	Besleme (B2)	0,576		6,70	3,330
	Konsantre (K2)	0,634		48,00	0,206
	Ara Ürün (AÜ2)	0,578	K2>AÜ2>B2>A2	22,63	0,317
	Artık (A2)	0,559		1,87	2,807

* En az 10 000 tane sayılarak gerçekleştirilen her bir ölçümden 4 tekrar yapılarak ortalaması alınmıştır.

Sonuç

Sivas İli Kangal-Çartlı Yöresi kromit cevherleri işleyen Aksu Madencilik kromit zenginleştirme tesisine ait iri ve ince sarsıntılı masa devrelerindeki besleme, konsantre, ara ürün ve artık akışlarından alınan örnekler, rastgele oryantasyon ve sirkülasyon özelliğine sahip yüksek istatistiksel sonuç veren üç boyutlu dinamik görüntü analizi (DGA) ile Dairesellik (C) şekil parametresi cinsinden başarıyla ölçülmüştür. DGA ile belirlenen C değerlerinin istatistiksel anlamlılık testi tek yönlü ANOVA ile %95 güven aralığında test edilmiştir. DGA sonuçları hem iri hem ince masalarda her iki boyut fraksiyonu içinde konsantre ürünlerinin, diğer ürünlere kıyasla daha yuvarlak tanelerden oluştuğu, artık ürünlerinin ise daha uzun tanelerden oluştuğunu göstermiştir. Aynı örnekler için DGA görüntüleri, SEM görüntüleri ve stereo-mikroskop görüntüleri de DGA sonuçlarını desteklemektedir ve literatürde daha önce bildirilen çalışmalar ile uyumludur. DGA, SEM ve stereo-mikroskop sonuçları aynı tane boyutu aralığında, sadece tanelerin yoğunluklarının değil, tanelerin şekillerinin de ayırmaya etkisinin olduğunu göstermektedir. Literatürde de aralarında yeteri kadar yoğunluk farkı olan yuvarlak ve pulsu yapıda olan mineral tanelerinin gravite tekniği ile ayrılabilirdiği bildirilmiştir. Sonuç olarak, bilyalı değirmende cevherin öğütülmesi sonucunda kromitin daha yuvarlak tanelerden, diğer gang minerallerinin ise daha çubuksuz tanelerden ibaret olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma kromit cevherlerinin gravite ile zenginleştirmesinde daha yüksek ayırma performansı elde etmek için bilyalı veya otojen değirmen gibi uygun bir öğütme sisteminin kullanılmasıyla daha yuvarlak şekillere sahip tanelerin üretilmesini ve masaya beslenmesinin önemli olabileceğini göstermiştir.

Teşekkür

Aksu Grup Madencilik San. A.Ş.'ye örnekler ve tesis verilerinin kullanımına verdiği izin için minnetle teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Ahmed, M. M. 2011. Optimization of a jigging process using statistical technique. *International Journal Coal Preparation and Utilization*. 31, 112–123.

Allen, T. 1990. *Particle size measurement*. fourth ed. New York: Chapman & Hall.

Aplan, F. F. 2003. Chapter 6: Gravity Concentration, Fuerstenau, M. C. ve Han, K. N. (Ed.). *Principles of Mineral Processing*. Littleton, Co: SME. 185-219.

Boucher, D. 2017, Observation of iron ore particle flow in a mineral spiral concentrator by position emission particle tracking (PEPT), [Doktora tezi]. [Montreal]: McGill University.

Brits, B. R. 1991, Effect of particle size in gravity separation processes at Palabora, South Africa, Palabora Mining Company, South Africa, Institution of Mining and Metallurgy, African Mining '91, Institution of Mining and Metallurgy.

Cierpisz, S., Kryca, M., Sobierajski, W. 2016. Control of coal separation in a jig using a radiometric meter, *Minerals Engineering*. 95, 59–65.

Das, A. 2009, Chapter 1, *Mineral Processing. A Continuing Education Course for Metallurgy for Engineers*. December 14-16, 2009, Jamshedpur: NML, 1-37.

Dehghani, F., Rahimi, M., Rezai, B. 2012. Influence of particle shape on the flotation of magnetite, alone and in the presence of quartz particles, December, *Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 113(12), 905-911.

Drzymala, J. 2007. *Mineral Processing, Foundations of theory and practice of mineralurgy*, 1st edition, Wrocław University of Technology: Oficyna Wydawnicza PWr., www.ig.pwr.wroc.pl/minproc, ISBN 978-83-7493-362-9, 32.

European Commission, 2020. Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Factsheets on Non-critical Raw Materials, p. 70.

Fortier, S. M., Nassar, N. T., Lederer, G. W., Brainard, Jamie, Gambogi, Joseph, McCullough, E.A. 2018. Draft critical mineral list—Summary of methodology and background information—U.S. Geological Survey technical input document in response to Secretarial Order No. 3359: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1021, 15 p., <https://doi.org/10.3133/ofr20181021>, <https://pubs.usgs.gov/of/2018/1021/ofr20181021.pdf>, [Erişim tarihi: 8 Mart 2021].

Guertin, J., Cynthia, J. A. J., Avakian, P. 2005. *Chromium (VI) Handbook*. Independent Environmental Technical Evaluation Group (IETEG).

Gupta, A., Yan, D. S. 2006. *Introduction to Mineral Processing Design and Operation*, Gupta A. ve Yan, D. (Ed.). Amsterdam: Elsevier. 2nd eds.

Hicyilmaz, C., Ulusoy, U., Bilgen, S., Yekeler, M., Akdogan, G. 2006. Response of rough and acute surfaces of pyrite with 3-D approach to the flotation. *Journal of Mining Science*. 42, 393-402.

Kademli, M., Gülsoy, O. Y. 2012. The role of particle size and solid contents of feed on mica-feldspar separation in gravity concentration. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 48(2), 645–654.

Kawatra, S. K., Caraon, J. T. 2013. *Beneficiation of Phosphate Ore*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration: Colorado.

Little, L., Mainza, A. N., Becker, M., Wiese, J. 2017. Fine grinding: How mill type affects particle shape characteristics and mineral liberation, *Minerals Engineering*. 111, 148-157.

Maharaj, L., Loveday, B. K., Pocock, J. 2012. Gravity separation of a UG-2 ore secondary sample of the reduction of chromite minerals. *Minerals Engineering*. 30, 99-101.

Mudd, G. M., Werner, T. T., Weng, Z.-H., Yellishetty, M., Yuan, Y., McAlpine, S. R. B., Skirrow, R. G., Czarnota, K. 2018. *Critical Minerals in Australia: A Review of Opportunities and Research Needs, Records 2018/051*. Geoscience Australia, Canberra. Available at: <https://ecat.ga.gov.au/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/124161> [Erişim tarihi: 8 Mart 2021].

Napier-Munn, T. J., Alford, R. A. 1991. The causes of heavy mineral loss from mineral sands wet concentrators. *The AusIMM Proceedings*, 19–30.

Ofori-Sarpong, G., Amankwah, R.K. 2011. Comminution environment and gold particle morphology: effects on gravity concentration. *Minerals Engineering*. 24, 590-592.

Phengsaart, T., Ito, M., Hamaya, N., Tabelin, C.B., Hiroyoshi, N. 2018. Improvement of jig efficiency by shape separation, and a novel method to estimate the separation efficiency of metal wires in crushed electronic wastes using bending behavior and “entanglement factor,” *Minerals Engineering*. 129, 54-62.

Pita, F., Castilho, A. 2016. Influence of shape and size of the particles on jigging separation of plastics mixture, *Waste Management*. 48, 89-94.

Pita, F., Castilho, A. 2017. Separation of plastics by froth flotation. The role of size, shape and density of the particles, *Waste Management*. 60, 91-99.

- Pryor, E. J. 1965. Mineral Processing. 3rd ed., Amsterdam: Elsevier, 349.
- Quantachrome, 2021. <http://www.quantachrome.com>, [Erişim tarihi: 8 Mart 2021].
- Richard, G., Touhami, S., Zeghloul, T., Dascalescu, L. 2017. Optimization of metals and plastics recovery from electric cable wastes using a plate-type electrostatic separator, Waste Management, 60, 112-122.
- Richards, R.L., Locke, S.B. 1940. Textbook of Ore Dressing. 3rd ed. New York: McGraw-Hill.
- Sebastien, J., Rabotin, K., Bourgeois, F., Climent, E. 2012. Experimental validation of a fluid dynamics based model of the UF Falcon concentrator in the ultrafine range. Separation and Purification Technology. 92, 129-135.
- Singh, R. K., Dey, S., Mohanta, M. K., Das, A. 2014. Enhancing the Utilization Potential of a Low Grade Chromite Ore through Extensive Physical Separation, Separation Science and Technology. 49(12), 1937-1945, DOI: 10.1080/01496395.2014.903495.
- Sivamohan, R. 1985. A Study of Gravity Concentration with emphasis on surface phenomena, 45D, [Doktora tezi]. [Norrboten]: Lulea University of Technology.
- Thompson, J. V. 1958. The humphreys spiral concentrator its place in ore dressing, Mining Engineering. (January) 84-87.
- Ulusoy, U. ve Atagun, O. N. 2022. Particle shape characterization of shaking table streams in a Turkish chromite concentration plant by using dynamic imaging and microscopical techniques, Particulate Science and Technology, DOI: 10.1080/02726351.2022.2046666. [Erişim tarihi: 8 Mart 2022].
- Vision Analytical, 2021. Why particle shape is important. <https://particle-shape.com/why-particle-shape-is-important>, [Erişim tarihi: 8 Mart 2021].
- Walsh, D. E., Kelly, E. G. 1992. An investigation of the performance of a spiral using radioactive gold tracers. Minerals and Metallurgical processing. 105-109, August.
- Wills, B. A., Finch, J. 2016. Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, 8th Edition, Oxford: Butterworth Heine- mann, ISBN: 9780080970530.
- Zhao, Y. Zhang, Y. Bao, S. Liu, T. Bian, Y. Liu, X. Jiang M. 2013. Separation factor of shaking table for vanadium pre-concentration from stone coal, Separation and Purification Technology, 115, 92-99.

