

**TANE ŞEKLİNİN GALEN CEVHERİNİN FLOTASYONUNA VE TOPAKLANMASINA ETKİSİ**Turan UYSAL<sup>1</sup>, Onur GÜVEN<sup>2\*</sup><sup>1</sup> Munzur Üniversitesi, Nadir Toprak Elementleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Tunceli, Türkiye Adresi, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-1643-6725><sup>2</sup> Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye Adresi, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-5267-9153>

Anahtar Kelimeler	Özet
<i>Galen, Şekil Faktörü, Topaklanma, Flotasyon.</i>	<i>Farklı şekil faktörlerine sahip tanelerle yürütülen flotasyon çalışmalarında daha köşeli tanelerin yuvarlak tanelere nazaran daha yüksek verimle kazanıldığı bilinmektedir. Bu durum flotasyon işlemlerinde şekil faktörünün rolünü göstermekte olup, uygulamalarda uygun tane morfolojisi ile önemli kazanımlar sağlanılabilmektedir. Bu çalışmada ise galen flotasyonu üzerine tane şeklinin etkisi çalışılmıştır. Bu amaçla -74+38 µm boyutunda hazırlanmış galen için şekil faktörü analizi yapılmıştır. Farklı şekil faktörüne sahip numunelere farklı KAX konsantrasyonlarında mikro-flotasyon ve agregasyon işlemleri yapılmıştır. Mikro-flotasyon sonuçlarına göre KAX konsantrasyonu na bağlı olarak artan tane-kabarcık etkileşimlerinde köşeli tanelerin kabarcıkla daha iyi bağlanmasıyla doğru orantılı olarak şekil faktörünün etkisinin arttığı ancak yüksek konsantrasyonlarda bu etkinin tam olarak gözlenmediği saptanmıştır.</i>

**THE EFFECT OF SHAPE FACTOR ON FLOTATION AND AGGREGATION OF GALENA ORE**

Keywords	Abstract
<i>Galena, Shape Factor, Aggregation, Flotation.</i>	<i>As well-known, the flotation studies performed with particles assaying different shape factors showed that more angular particles can be floated with higher recovery values. This finding presents the role of shape factors on flotation processes and also suggested that higher incomes can be obtained by suitable particle morphology. In this study, the effect of shape factor on galena flotation was investigated. For this aim, shape factor analysis was performed for particles within the -74+38 µm size range. Micro-flotation and aggregation tests were carried out with samples of different shape factors under different KAX concentrations. According to the micro-flotation results, the bubble-particle interactions increased depending on the KAX concentration. Thus, the effect of the shape factor increased in accordance with better interactions of angular particles with bubbles. However, this effect was not fully observed at high concentrations.</i>

Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 08.02.2022	Submission Date : 08.02.2022
Kabul Tarihi : 10.08.2022	Accepted Date : 10.08.2022

**1. Giriş**

Cevher hazırlamada öğütme işleminin türü ve koşullarının tane morfolojisi üzerinde önemli bir etkiye

sahip olduğu bilinmektedir. Taneler, minerallerin doğal yapısı ve boyut küçültme süreçlerinin bir sonucu olarak farklı morfolojik özellikler kazanırlar (Holt, 1981; Yekeler, Ulusoy ve Hiçyılmaz, 2004; Verrelli, Bruckard,

\* Sorumlu yazar; e-posta : [oguen@atu.edu.tr](mailto:oguen@atu.edu.tr)

Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Koh, Schwarz ve Follink, , 2014). Tane morfolojisi tanelerin fiziksel bir niteliği olup başlıca şekil faktörü ve pürüzlülük olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bunlardan şekil faktörü olarak sınıflanan yuvarlaklık, köşelilik, yassılık gibi parametreler iki boyutlu olarak değerlendirilirken, pürüzlülük ise üç boyutlu olarak değerlendirilmektedir.

Flotasyon işleminde istenen tanelerin yüzebilirliğini sağlamak için tanelerin seçimli olarak hidrofob yapılması gerekir. Bu amaçla, minerallerin yapılarına özgü kollektör reaktifler kullanılır. Oksit, silikat ve tuz tipi minerallerde kullanılan reaktifler genellikle 12 CH<sub>2</sub> grubundan daha uzun zincir içeren sürfaktanlardan oluşurken, sülfürlü minerallerin yüzebilmesi için 2-5 CH<sub>2</sub> gibi kısa zincirli ksantatlar yeterli olmaktadır (Fuerstaneu ve Pradip, 2005; Chandra ve Gerson, 2009).

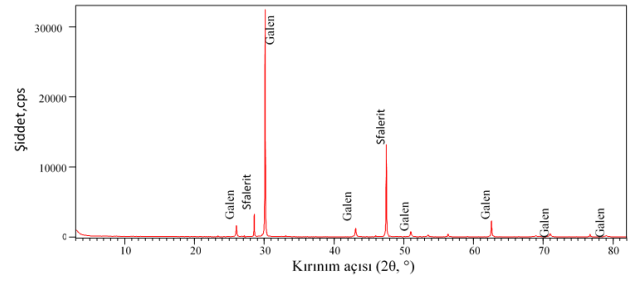
Topaklanma işleminde ise flotasyon işleminde olduğu gibi, tanelerin yapılarına özgü kimyasallar varlığında bir araya gelmektedir. Cevher hazırlamada özellikle katı-sıvı ayrımı işlemlerinde tanelerin agregasyon işlemi iki mekanizmaya bağlı olarak açıklanabilmektedir. Birinci mekanizma "koagülasyon" olup, yüzeylere inorganik iyon adsorpsiyonu ile tanelerin bir araya gelmesi sağlanırken, diğer mekanizma ise "flokülasyon" olup, taneler uzun zincirli organik polimerler ile biraraya getirilmektedir (Bulut ve Göktepe, 2012). Bu çalışma kapsamında incelenen topaklanma işleminde ise flotasyonla aynı şartlar altında (kollektörü türü, miktarı, pH değeri vb.) kondüsyonlanan tanelerin ortamda kabarcık olmadan ne ölçüde bir araya geldikleri incelenmiştir.

Bu çalışmada tane şeklinin flotasyon verimine ve tane topaklanmasına etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda galen numunesi kırılmış, öğütülmüş ve farklı sürelerde öğütülen tanelerin şekil faktörleri belirlenmiştir. Farklı şekil faktörü değerine sahip numunelerin mikro-flotasyon ve türbidite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonuçlarına bağlı olarak şekil faktörü değerleri ile flotasyon verimi ve topaklanma arasındaki ilişki araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Materyal

Galen numunesi, Akmetal madencilğe (Adana) ait ocaklardan iri boyutlu, olabildiğince saf numuneler seçilerek alınmıştır. Dış görünüşleri itibariyle tipik bir galenin renk ve yapısal özelliklerine sahip numunenin içeriği XRD yöntemi ile belirlenmiş ve Şekil 1'de verilmiştir. Buna göre numunenin %79 galen (PbS), %18 sfalerit (ZnS) minerallerinden oluştuğu belirlenmiştir. XRD analizine göre saptanan piklerin çoğunlukta ve yüksek pik şiddetinde galenden oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 1. Galen Numunesine Ait XRD Grafiği

Galen minerali kübik sistemde kristallenmektedir. Kristallerin biçimleri bazen küp, bazen de oktaeder şeklindedir. Galenin yoğunluğu 7,8 g/cm<sup>3</sup> ve Mohs sertliği 2,5'dir. İkizlenmesi (111)'e göredir ve küçük kesitlerinde bile dilinimi görmek mümkündür. Galen minerali kırılğan, dövülebilir, opak bir mineraldir.

### 2.2. Yöntem

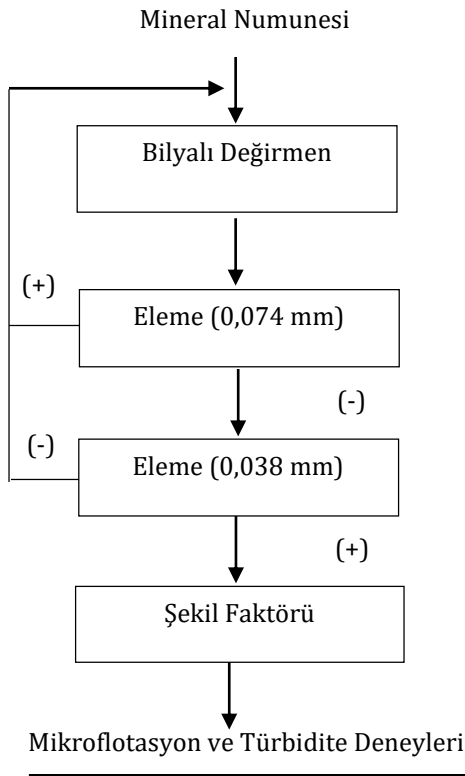
Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

#### 2.2.1. Kırma ve Öğütme İşlemleri

İri boyutlu galen numunelerinin boyutunu küçültmek amacıyla numune sırasıyla çeneli, konili ve merdaneli kırıcıdan geçirilmiştir. Farklı prensiplerde yapılan kırma işlemlerinde, malzemelerin yuvarlaklık indislerine olan etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemek amacıyla her kırıcı için kırma parametreleri sabit alınmıştır. Sözü edilen bu parametreler; laboratuvar tipi çeneli kırıcı için, giriş ve çıkış açıklıkları sırasıyla 100 ve 20 mm, laboratuvar tipi merdaneli kırıcı (merdane çapı: 240 mm) için merdaneler arası mesafe 2 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Konili kırıcıda, konik kısmın mesafesine bağlı olarak boğaz açıklığıyla ağız açıklıkları malzemenin tamamı 6 mm altına incek şekilde ayarlanmıştır. Öğütme işlemleri için merdaneli kırıcı çıkışından elde edilen galen numunelerinden en düşük yuvarlaklığa sahip olan -2+1 mm boyut grubu seçilmiştir. Malzemelerin aşırı öğünmesini önlemek ve şekil faktörünün kontrolünü sağlamak amacıyla öğütme deneyleri aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir. Flotasyon deneylerinde kullanılmak üzere Şekil 2'de verilen kırma ve öğütme işlemlerini içeren bir boyut küçültme devresi uygulanmıştır. Şekil 2'de görüldüğü üzere galen numuneleri çeneli, konili ve merdaneli kırıcılarda kırıldıktan sonra alınan temsili numuneler üzerinde, boyut analizi ve her bir boyut grubundan alınan temsili numuneler üzerinde görüntü analizi yapılmıştır.

Flotasyon çalışmaları için gerekli olan -74+38 µm boyut aralığında malzeme üretmek için bilyalı değirmen kullanılarak öğütme yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda

özellikle bu boyutun seçilmesinde, literatürde belirtildiği üzere daha düşük veya yüksek boyut aralıklarında, flotasyon verimlerinde oluşabilecek olası düşüşlerin önüne geçilmesinin yanı sıra bilhassa görüntü analizlerinde dar bir boyut aralığı kullanılarak flotasyon ve agregasyon deneylerinde tane morfolojisinin etkisinin daha iyi ortaya konulması amaçlanmaktadır (Trahar, 1981, Öteyaka ve Soto, 1995, Taşdemir, Taşdemir ve Öteyaka, 2007). Öğütme esnasında tanelerin şekil değişimini şekil faktörü analiziyle takip etmek amacıyla farklı öğütme sürelerinde (15, 30, 60, 120, 240, 480 ve 960 s) öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler Tablo 1’de verilen parametrelere bağlı kalınarak yapılmıştır. Her öğütme süresi ardından öğünen malzeme 74 µm ve 38 µm’lik eleklerden kuru olarak elenmiş ve 74 µm üstü malzeme ve 38 µm altı tekrar değirmene geri beslenerek ve U parametresi mümkün mertebe sabit tutularak öğütme işlemine devam edilmiştir. Öğütme sonucunda elde edilen -74+38 µm boyutundaki malzeme kuru eleme ile verimli bir eleme yapılamayacağından dolayı yaş eleme yapılması tartışılmış ancak galenin su ile temasında ortaya çıkabilecek olan korozyon ihtimaline karşı vazgeçilmiştir.



Şekil 2. Deneysel Akım Şeması

Tablo 1

-2+1 mm (Merdaneli Kırıcı Çıkışı) Boyut Grubu İçin Belirlenen Öğütme Parametreleri

Parametreler	Değerler
Değirmen Hacmi (mL)	5600
Bilya Sayısı	30
Bilyaların toplam ağırlığı (g)	4803
Malzeme miktarı (g)	658
U değeri	0,5
Bilya yükleme oranı (J)	0,2
Besleme boyutu (mm)	-2+1
Bilya çapı (cm)	3,0
Görünür bilya yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> )	7,73
Yığın yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> )	2,94
Ortalama bilya ağırlığı (g)	160,1
Mineral yükleme oranı (Fc)	0,04

Tablo 1’de bulunan değirmen hacmi, malzemenin yığın yoğunluğu, bilya yoğunluğu, bilya ağırlığı gibi temel parametreler kullanılarak U değeri, bilya yükleme oranı ve mineral yükleme oranı gibi parametrelerin eldesinde ise aşağıdaki eşitlikler (Eşitlik 1, Eşitlik 2, Eşitlik 3) kullanılmıştır (Çelik, 1977).

$$J = \frac{(\text{Ortalama bilya ağırlığı} / \text{Bilya yoğunluğu}) \times \frac{1}{0,6}}{(\text{Değirmen hacmi})} \quad (1)$$

$$Fc = \frac{(\text{Malzeme ağırlığı} / \text{Malzemenin yığın yoğunluğu})}{(\text{Değirmen hacmi})} \quad (2)$$

$$U = \frac{Fc}{0,4 \times J} \quad (3)$$

### 2.2.2. Görüntü Analizi

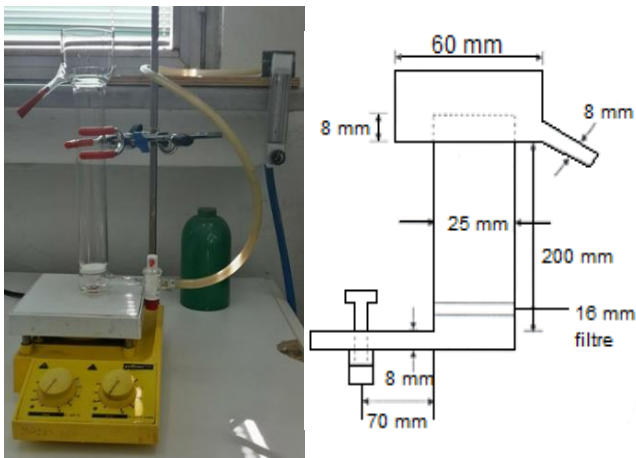
Galen numunelerinin morfolojik özelliklerini belirlemek amacıyla -74+38 µm boyut aralığına öğütülmüş numuneler öğütme süresine bağlı olarak şekil faktörü analizine tabi tutulmuştur. Elde edilen her bir numunedeki tanelerin fotoğrafları dijital kamera kullanılarak alınmış ve her bir görüntü öğütme süresine bağlı olarak Image J programı kullanılarak analiz edilmiştir. Image J programı aracılığıyla tanelerin yuvarlaklık, uzama oranı, yassılık ve göreceli uzunluk parametreleri elde edilebilmektedir. Görüntü analizi programı ile yüksek hassasiyetli yuvarlaklık hesabı için kullanılan denklem aşağıdaki Eşitlik.(4)’te verilmiştir (Xia, 2017).

$$\text{Yuvarlaklık} = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (4)$$

Burada; "A" tanenin alanı ve "P" ise çevre uzunluğu olmak üzere program tarafından hesaplanan değerlerdir. Yuvarlaklık arttığı takdirde yüksek hassasiyetli yuvarlaklık 1'e yaklaşır. Eğer tanenin yuvarlaklığı azalıyorsa yüksek hassasiyetli yuvarlaklık 0'a yaklaşır.

### 2.2.3. Mikro-flotasyon Deneyleri

Mikro-flotasyon deneyleri 25x220 mm boyutlarında 150 mL hacimli 15 µm fritli kolon hücrede manyetik karıştırıcı ile yapılmıştır. Hücre içinde bulunan numunenin çökmesini engellemek için manyetik karıştırıcı tercih edilmiştir. Galen numunesinin flotasyonu için toplayıcı olarak ECS Kimya firmasından alınan Potasyum Amil Ksantat (KAX) kullanılmıştır. KAX ( $C_5H_{11}OCS_2K$ ; Mw: 202,37 g/mol), sülfürlü cevherlerin flotasyonunda yaygın olarak kullanılan, oldukça kuvvetli, seçici olmayan bir toplayıcıdır. Mikro-flotasyon deneyleri için farklı konsantrasyonlarda KAX çözeltisi hazırlanmış, hazırlanan KAX çözeltisinin içerisine -74+38 µm boyutunda 1 g galen numunesi eklendikten sonra 5 dakika boyunca manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Toplayıcı ile kıvamlandırılan süspansiyon mikro-flotasyon hücresine aktarıldıktan sonra, manyetik balık ile süspansiyon karıştırırken hücreye 1 dakika boyunca 50 cm<sup>3</sup>/dk akış hızında 3 Psi basınçlı N<sub>2</sub> gazı verilerek flotasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Flotasyon deneyi sonucunda elde edilen yüzen ve batan ürünler filtre kağıdında süzülükten sonra etüvde kurutulmuş ve flotasyon verimleri hesaplanmıştır. Tüm flotasyon deneyleri doğal pH'da (7,35±0,03) ve kıvam süresi (5 dakika), karıştırma hızı (480 devir/dakika), hava akış hızı (50 cm<sup>3</sup>/dk) parametreleri sabit tutularak yapılmıştır. Şekil 3'de mikro-flotasyon deney düzeneği ve flotasyon hücresinin boyutları verilmiştir.



Şekil 3. Deneylerde Kullanılan Mikro-Flotasyon Deney Düzeneği ve Flotasyon Hücresinin Boyutları (Uysal, Karaağaçhoğlu ve Güven, 2021)

### 2.2.4. Türbidite Deneyleri

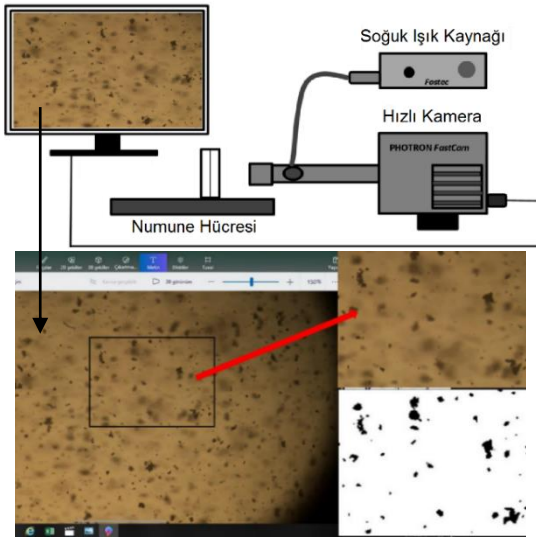
Tanelerin topaklanma davranışlarını incelemek amacıyla WTW Turb430IR model türbidite cihazı kullanılmıştır. Türbidite testleri, DIN ISO27027 standartına uygun taşınabilir türbidimetre ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem "Nephelometrik Yöntem" olarak da tanımlanmakta olup, bulanıklık derecesi belirli bir yönde dağılan ışık yoğunluğu esas alınarak türbidite belirlenmektedir. Türbidimetre ölçümleri öncesinde 0,02-1100 NTU bulanıklık farkını ölçebilecek hassasiyette olan türbidimetre, cihazın "AMCO Clear" standartlarına uygun olarak hazırlanmış 1000, 10 ve 0,02 NTU değerlerinde olan standart sıvılarıyla kalibre edilmiştir.

Türbidite deneyleri için farklı KAX konsantrasyonlarında %0,316 pülpte katı oranında (PKO) hazırlanan çözeltilere, numune eklendikten sonra 5 dakika kondüsyonlanmıştır. Hazırlanan çözeltiler 20 cm<sup>3</sup> hacimli cam tüpler (yükseklik: 48 mm, yarıçap: 20 mm) içinde türbidimetre cihazına yerleştirilerek türbidite ölçümleri alınmıştır. Çökme süresinin bulanıklığa olan etkisini belirlemek amacıyla 5, 15, 30, 45, 60 ve 90 saniyelerdeki bulanıklık değerleri (NTU, Nefelometrik Bulanıklık Birimi) ölçülmüştür. Türbidite ölçümlerinde yapılan ön testler sonucu uygun bulunan %0,316 PKO ve 30 s bekleme süresi esas alınmıştır.

### 2.2.5. Görüntü Alma İşlemi

Tane-tane etkileşimlerinin in-situ incelenmesi için tanelerin sıvı içindeki çökme davranışını görüntüleyen bir yöntem izlenmiştir.

Bu yöntemde görüntü alma işlemi için PHOTRON marka, FastcamMini model hızlı kamera, Fostec marka soğuk ışık kaynağı ve özel yaptırılan cam hücreler kullanılmıştır. Farklı konsantrasyonlardaki mineral taneciklerinin topaklanma davranışları, hızlı kamera ile kısa süreli görüntülenmiş, alınan görüntüler Paint ve Excel üzerinde görüntü analiz programı kullanılarak işlenmiştir. Hızlı kamera ile görüntü alma ve işleme düzeneği Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Hızlı Kamera ile Görüntü Alma ve İşleme (Uysal, Karaağaçlıoğlu ve Güven, 2021)

Görüntü alma çalışmalarında, farklı hücre tiplerinde alınan görüntüler karşılaştırılmış, sıvı derinliğinin yüksek olduğu hücrelerde alınan görüntülerde tanelerin davranışları net olarak seçilememiştir. Sıvı derinliği azaldıkça serbest tanelerin davranışları daha iyi izlenebilmiş ve daha net görüntüler alınmıştır. Bu nedenle, temel çekimlerde kullanılmak üzere sıvı derinliği azaltılmış (2 mm), cam izleme pencerelerinin olduğu özel hücre yaptırılmış ve ölçümler bu hücrede yapılmıştır. Hızlı kamera ile alınan 30'ar saniyelik görüntüler, yavaşlatılmış mod'da kaydedilmiştir. Alınan bu görüntülerden, monitördeki yeniden izleme sırasında anlık görüntü kaydı yapılmıştır. Bu görüntü Paint programına aktarılarak, görüntü üzerinden belirlenen bölüm kopyalanarak Excel dosyasına aktarılmış ve görüntü işleme seçeneklerinden yararlanılarak görüntünün arka fonunda kalan gölgeler silinmiş ve taneler netleştirilmiştir.

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA

#### 3.1. Kırıcıların Tane Morfolojisine Etkisi

Çalışma kapsamında, galen numunelerinin kırma karakteristikleri üç farklı kırıcıda (çeneli, konili ve merdaneli) incelenmiştir. Kırma sonrası yapılan elek analizlerinden elde edilen farklı boyut aralıklarındaki numunelerin yuvarlaklık indisleri görüntü analizi ile belirlenmiştir. Görüntü analizinde alınan ölçümlerde her kırıcı çıkışında -2+1 mm boyut aralığındaki tanelerin görüntüleri Şekil 5'de verilmiştir.



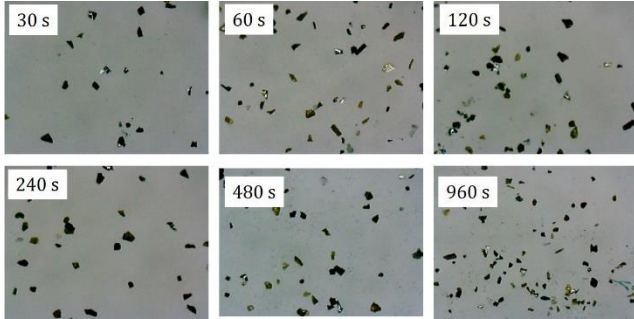
Şekil 5. Galen Numunesinde Sırasıyla Çeneli, Konili ve Merdaneli Kırıcı Çıkışı (-2+1 Mm) Tanelerin Görünümü

Şekil 5'de görüldüğü üzere çeneli kırıcı çıkışı taneler daha köşeli bir yapı gösterirken, konili ve merdaneli kırıcı çıkışı tanelerde, bu köşelerin kırılarak daha yuvarlak hale geldiği görülmüştür. Literatürde bu görüşü destekleyici olarak çeneli kırıcı ile elde edilen taneler ile yapılan morfolojik incelemelerde, tane şeklinin tane boyutuyla ilişkili olduğu belirtilmiştir (Tsubaki ve Jumbo, 1979). Bir diğer çalışmada, kırma sırasında yapılan besleme tipine bağlı olarak tane şeklinin değişebileceği belirtilmiştir. Çalışmada kırıcıya kademeli olarak yapılan besleme sonrasında tane-tane etkileşimleri sürekli beslemeye göre daha az olacağı belirtilmiştir. Ancak endüstriyel işlemlerde olduğu gibi sürekli besleme durumunda ise, kırıcı kırma sırasında bir tane matrisiyle kaplanacağı için, daha fazla tane-tane etkileşimi meydana gelecek ve sonrasında yapılacak öğütmeye beslenecek olan tanelerin daha yuvarlak olacağı belirtilmiştir (Durney ve Meloy, 1986). Bu durum endüstriyel anlamda değerlendirilecek olursa, flotasyon işlemleri öncesinde yapılan kırma ve öğütme işlemlerinde temsili numuneler alınarak tane morfolojisinin değerlendirilmesi durumunda, diğer parametreler sabit kalırken, flotasyon verimlerinde meydana gelen değişimlerin irdelenmesinde morfolojik değişimlerinde etkisi ortaya konulabilecektir. Dolayısıyla elde edilen bu sonuçlar, tanelerin kendi özellikleriyle ilintili olup, aynı şartlarda yapılan kırma işlemlerinde yüzeylerin aşınması ya da kırma sırasında köşelerinin kopması ile sürtünerek aşınması halinde, daha yüksek yuvarlaklığa sahip taneler elde edilebilmektedir. Bir başka çalışmada da belirtildiği şekilde, malzemeye uygulanan kuvvet ne kadar yüksek olursa, kırma işlemi sonrasında tanelerin yuvarlak kısımlarının öğütücü ortamla kırılması neticesinde daha köşeli ve düzensiz taneler meydana gelebilmektedir (Kaya, Hogg ve Kumar, 2002).

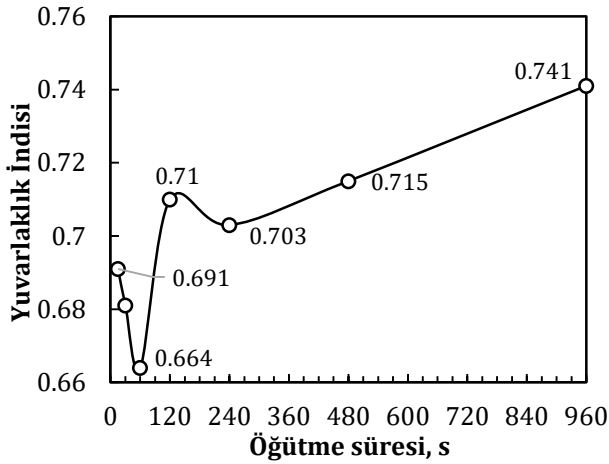
#### 3.2. Öğütmenin Tane Morfolojisine Etkisi

Yuvarlaklığı nispeten düşük olan -2+1 mm boyut grubunda galen numunelerinin öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Öğütme işlemi 15, 30, 60, 120, 240, 480 ve 960 saniye öğütme sürelerinde bilyalı değirmenlerde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra her bir öğütme süresinde elde edilen ürün elemeye tabi tutularak -74+38 µm boyutlu malzeme ayrılmış ve bu fraksiyonun yuvarlaklık indisi ve pürüzlülük ölçümleri

yapılmıştır. Galen numunesi için öğütme süresine bağlı yuvarlaklık indisi sonuçları ve her bir süreye ait temsili görüntüler Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Galen Numunesinin Öğütme Süresine Bağlı Temsili Görüntüler

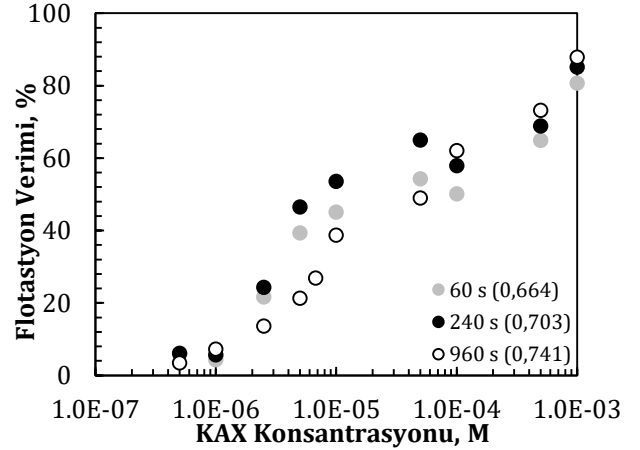


Şekil 7. Galen Numunesinin Öğütme Süresine Bağlı Şekil Faktörü Değişimi

Şekil 7'de şekil faktörünün değişimi incelendiğinde öncelikle azalma, artma, sonra tekrar hafifçe azalma ve tekrar artma şeklinde gözlenmiştir. Galenin kübik kristal yapısından dolayı yuvarlaklık indisinde çok belirgin bir değişimin olmadığı en düşük (60 s) ile en yüksek yuvarlaklığa (960 s) sahip tanelerin arasındaki değişimin sadece 0,077 olduğu belirlenmiştir. Şekil faktörüne bağlı olarak flotasyon çalışmaları için düşük, orta ve yüksek yuvarlaklığa sahip olan 60 s, 240 s ve 960 s öğütülmüş numuneler seçilmiştir.

### 3.3. Mikroflotasyon Deneilerinin Sonuçları

Farklı şekil faktörüne sahip galen numunelerinin kollektör konsantrasyonlarına bağlı olarak yapılan mikroflotasyon sonuçları Şekil 8'de verilmiştir.



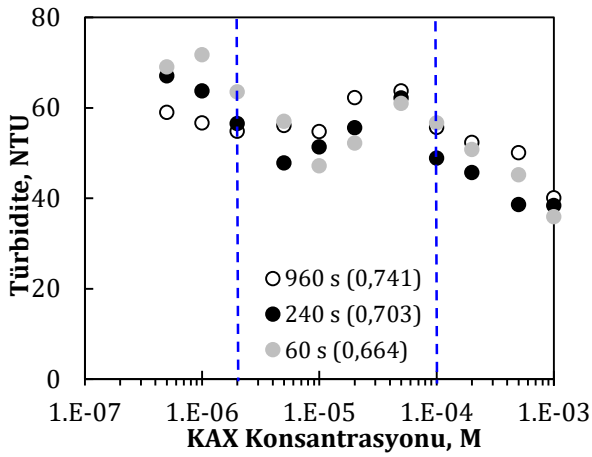
Şekil 8. Galen Numunesinin Flotasyon Verimine Şekil Faktörünün Etkisi

Şekil 8'de iki farklı bölge olduğu, birinci bölgede  $5 \times 10^{-5}$  M konsantrasyona kadar yuvarlaklığı orta derece olan 240 s'lik öğütme sonrasında yapılan flotasyonun en yüksek verime sahip olduğu bu konsantrasyondan sonra ise 240 s ve 60 s'de ani bir düşüş olduğu gözlenmiştir. İkinci bölgede yani yüksek konsantrasyonda yuvarlaklığın artması ile verimin arttığı gözlenmiştir. Tane köşeliliğinin etkisinin anlamlı bir sonuç vermemesinin nedeni galen numunesinin safliğinin düşük olması, yüksek konsantrasyonlarda kuvvetli bir kollektör olan KAX'ın selektiviteyi azaltması, şekil faktörü değerlerinin birbirine çok yakın olması ve farklı kırınım gösteren minerallerden (sfalerit, kuvars) kaynaklandığı düşünülmektedir.

Literatürde tek mineral sistemlerinde tane köşeliliği arttıkça flotasyon veriminin yükseldiği bilinmektedir (Ahmed, 2010; Rahimi, Dehghani ve Rezai, 2012; Güven ve Çelik, 2016; Uysal ve diğ., 2021a). Ancak bu numunede farklı kırılma özelliklerine sahip üç farklı (galen, sfalerit ve kuvars) cevher bulunduğu için, elde edilen yuvarlaklık değerinin değerlendirilmesinde, her bir mineralin etkisi farklı olmaktadır. Bu nedenle elde edilen yuvarlaklık değeri cevherde bulunan bütün minerallerin ortalama bir değeri olup, yalnızca majör bileşen olan galen ele alınmaktadır. Ancak tekli mineral sistemlerinde daha farklı sonuçlar elde edilebilmektedir (Güven ve Celik, 2016).

### 3.4. Agregasyon Deneileri

Tanelerin topaklanma davranışını ortaya çıkarabilmek için flotasyon işleminde kullanılan kollektör konsantrasyonlarında türbidite çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda galen numunesinin türbidite sonuçları Şekil 9'da verilmiştir.



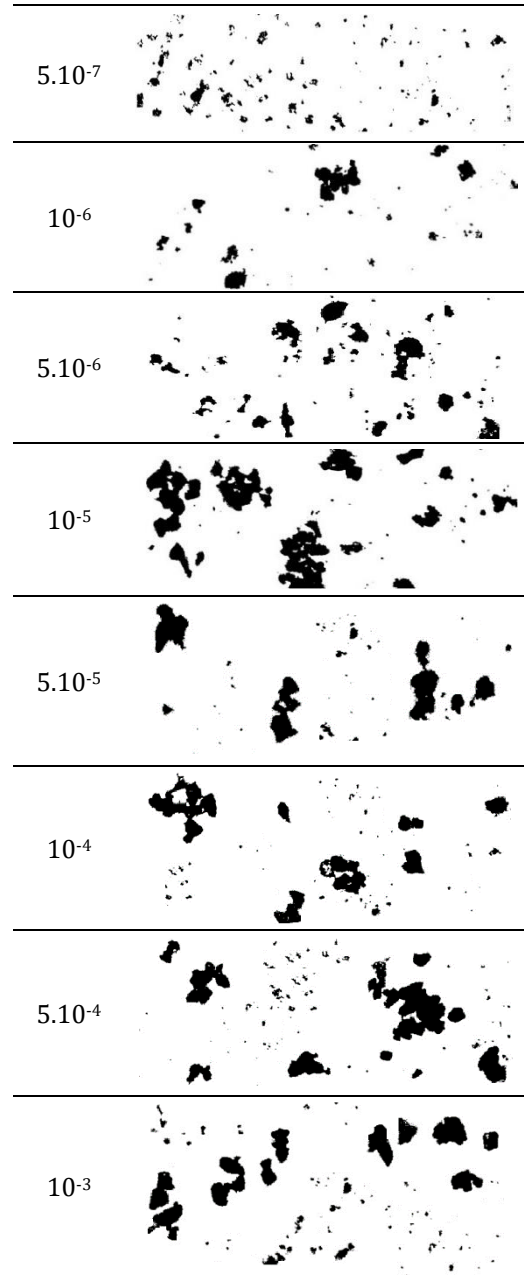
Şekil 9. Farklı Yuvarlaklığa Sahip Galen Numunelerinin Türbidite Sonuçları

Şekil 9'da farklı yuvarlaklığa sahip galen numunelerinin türbidite sonuçlarında, flotasyon sonucunda elde edilen korelasyon yakalanamamıştır. Bunun sebebi şekil faktörü değerlerinin birbirine çok yakın olması ve bu boyut aralığındaki galenin çok hızlı çökmesinden ötürü, türbidite ölçümleri alınmamıştır. En yüksek yuvarlaklığa sahip 960 s (0,741) ile en düşük yuvarlaklığa sahip 60 s (0,664) arasındaki fark sadece 0,077'dir. Nitekim 960 s (0,741) yuvarlaklığa sahip numunenin standart sapması  $\pm 0,082$  olması bu durumu açıklamaktadır.

### 3.5. Görüntü Alma İşlemleri

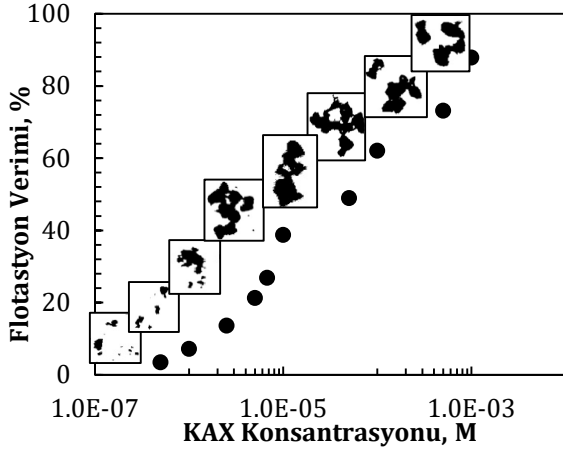
Flotasyon işleminde kullanılan konsantrasyonlarda ve aynı katı oranında hazırlanan süspansiyonların temsili hızlı kamera görüntüleri Şekil 10'da verilmiştir. Konsantrasyona bağlı flotasyon-topaklanma ilişkisi ise Şekil 11'de verilmiştir.

Şekil 10 incelendiğinde ucuca bağlanarak büyüyen topakların oluştuğu ancak  $1 \times 10^{-4}$  M konsantrasyondan sonra bu topakların disperse olarak daha küçük topaklar haline dönüştüğü görülmüştür. Ayrıca flotasyon sonucuyla görüntülerinin uyumlu olduğu  $1 \times 10^{-4}$  M konsantrasyondan sonra topakların dağılmasıyla birlikte flotasyon veriminin düştüğü Şekil 10'da gözlenmiştir.



Şekil 10. Farklı KAX Konsantrasyonlarında Hazırlanan Galen Pülplerinin Hızlı Kamera ile Alınan Temsili Görüntüleri

Hızlı kamera görüntülerinden edinilen genel kanı, sfalerit ve galen gibi levhamsı veya uzun taneli minerallerde topaklanma zincir benzeri ucuca bağlanma şeklinde olduğu yorumu yapılmaktadır (Uysal, Güven ve Karaagacılıoğlu, 2021b). Galen mineralinde  $1 \times 10^{-4}$  M konsantrasyonuna kadar ucuca topaklanma oluşumu gözlenmiş bu konsantrasyondan sonra topak belirli bir büyüklüğe ulaştığında duraylılığını kaybederek uç uca bağlandığı noktalardan koparak küçüldüğü gözlenmiştir.



Şekil 11. Konsantrasyona Bağlı Galen Numunesinin Flotasyon ve Topaklanma İlişkisi

Bu araştırma sonucunda öne sürülen temel olgu düşük KAX konsantrasyonlarında topaklanmanın olmadığı daha yüksek konsantrasyonlarda ise tekli topaklanmanın yanısıra topaklanmanın ikili, üçlü ve çoklu taneler halinde yoğun bir biçimde artarak devam ettiği ve buna paralel olarak flotasyon veriminde ani bir yükseliş olduğu belirlenmiştir. Nitekim flotasyon sırasında oluşan bu topakların kabarcıklara tutunmasıyla daha yüksek flotasyon verimleri elde edilmekte iken, türbidite ölçümlerinde ise daha düşük değerler elde edilebilmektedir. Ancak yüksek KAX konsantrasyonlarında ise oluşan topakların disperse olmasıyla birlikte flotasyon verim artış hızının hafif azalarak devam ettiği görülmüştür. Konuyla ilgili literatürde yer alan örneğin alümina flotasyonu ile ilgili bir çalışmada, düşük sodyum dodesil sülfat (SDS) konsantrasyonlarında daha pürüzlü tanelerin, yüksek konsantrasyonlarda ise daha köşeli tanelerin yüzebildiği gösterilmiştir. Bu durum ayrıca hızlı kamera görüntüleriyle de gösterilmiş olup, tane morfolojisinin tane-tane etkileşimlerinde olduğu kadar, tane-kabarcık etkileşimindeki rolü gösterilmiştir (Güven, Karakaş, Kodrazi ve Çelik, 2016). Bir diğer güncel bir çalışmada tane morfolojisinin sfeliritin flotasyon ve agregasyonuna olan etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, bu çalışmadan çıkan sonuçların aksine, daha yuvarlak tanelerle yapılan flotasyon sonuçlarının köşeli tanelere göre daha yüksek sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Benzer şekilde, daha köşeli tanelerin aynı sürelerde daha yüksek türbidite değerleri gösterdiği belirlenmiştir. Ancak pürüzlülük açısından bir değerlendirme yapıldığında ise, pürüzlü olan tanelerin gerek daha yüksek flotasyon verimiyle gerekse daha düşük türbidite değerleriyle daha iyi agregasyon gösterilmiştir (Uysal ve diğ., 2021a)

Bu araştırma sonucunda elde edilen sonuçlarda tane şekil faktörünün gerek flotasyona gerekse agregasyon işlemlerine olan etkisi gösterilmiş olup, literatürde yer alan çalışmalarla uyum göstermektedir.

#### 4. Sonuçlar

Çalışma kapsamında farklı şekil faktörü değerlerine sahip galen numunelerinin flotasyon ve topaklanma davranışları incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Mikro-flotasyon deneylerinde KAX konsantrasyonu arttıkça şekil faktörünün etkisinin arttığı ancak yüksek konsantrasyonlarda bu etkinin tam olarak gözlenmediği saptanmıştır. Bunun nedeni kullanılan numunelerin çok yüksek saflıkta olmaması, yüksek konsantrasyonlarda kuvvetli bir kollektör olan KAX'ın selektiviteyi azaltması ve şekil faktörü değerlerinin birbirine çok yakın olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
2. Farklı KAX konsantrasyonlarında yapılan türbidite ölçümlerinde  $5 \times 10^{-7}$  M KAX konsantrasyonunda türbidite değeri 69.07 NTU iken, daha yüksek konsantrasyonlarda oluşan agregatlar neticesinde bu değer 35.9 NTU'ya düştüğü belirlenmiştir. Nitekim hızlı kamera ile yapılan incelemelerde de benzer bir trend elde edilmiştir.

#### Teşekkür

Yazarlar çalışmaya verdiği destekten dolayı TÜBİTAK'a (117M659 no'lu Proje ve TÜBİTAK 2218) teşekkür ederler.

#### Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Turan UYSAL, literatür araştırması, deneylerin gerçekleştirilmesinde, sonuçların değerlendirilmesi ve makale yazımında, Onur GÜVEN literatür araştırması, sonuçların değerlendirilmesi ve makale yazımında katkı sağlamışlardır.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

#### Kaynaklar

- Ahmed, M.M. (2010). Effect of comminution on particle shape and surface roughness and their relation to flotation process, *International Journal of Mineral Processing*, 94 (3-4) 180-191. doi: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2010.02.007>
- Bulut, G. ve Göktepe, F. (2012). Madencilik ve cevher hazırlama işlemlerinde kullanılan kimyasallar, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25, 1, 37-56.



- Chandra, A.P. ve Gerson, A.R. (2009). A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145 (1-2), 97-110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.001>
- Çelik, M.S. (1977). (Yüksek Lisans Tezi), Pennsylvania State Üniversitesi, USA.
- Durney, T. E. Ve Meloy, T.P. (1986). Particle shape effects due to crushing method and size. *International Journal of Mineral Processing*, 16, 109-123. doi: [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(86\)90078-5](https://doi.org/10.1016/0301-7516(86)90078-5)
- Fuerstenau, D. ve Pradip, P. (2005). Zeta Potentials in the flotation of oxide and silicate minerals. *Advances in Colloid and Interface Science*. 114-115, 9-26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2004.08.006>
- Güven, O. ve Çelik, M.S. (2016). Interplay of particle shape and surface roughness to reach maximum flotation efficiencies depending on collector concentration. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 37 (6), 412-417. doi: <https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1218873>
- Güven, O., Karakaş, F., Kodrazi, N. Çelik, M.S. (2016). Dependence of morphology on anionic flotation of alumina. *International Journal of Mineral Processing*, 156 (10), 69-74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.06.006>
- Holt, C. B. (1981). The shape of particles produced by comminution-a review. *Powder Technology*, 28 (1):59-63. doi: [http://doi.org/10.1016/0032-5910\(81\)87010-6](http://doi.org/10.1016/0032-5910(81)87010-6)
- Kaya, E., Hogg, R. ve Kumar, S.R. (2002). Particle shape modification in comminution, *KONA*, 20, 188-195. doi: <http://doi.org/10.14356/kona.2002021>
- Öteyaka, B. ve Soto, H. (1995). Modeling of negative bias column for coarse particles flotation, *Minerals Engineering*, 8, (1-2), 91-100. doi: [http://doi.org/10.1016/09892-6875\(94\)00105-L](http://doi.org/10.1016/09892-6875(94)00105-L)
- Rahimi, M., Dehghani, F. ve Rezai, B. (2012). Influence of the roughness and shape of quartz particles on their flotation kinetics. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 19, 4, 284-289. doi: <http://doi.org/10.1007/s12613-012-0552-z>
- Taşdemir, A., Taşdemir, T. ve Öteyaka, B. (2007). The effect of particle size and some operating parameters in the separation tank and the downcomer on the Jameson cell recovery. *Minerals Engineering*, 20, 15, 1331-1336. doi: <http://doi.org/10.1016/mineng.2007.08/007>.
- Trahar, W.J. (1981). A rational interpretation of the role of particle size in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 8,4, 289-327 doi: [http://doi.org/10.1016/0301-7516\(81\)90019-3](http://doi.org/10.1016/0301-7516(81)90019-3)
- Tsubaki J. ve Jimbo, G. (1979). A proposed new characterization of particle shape and its application. *Powder Technology*, 22, 161-169. doi: [http://doi.org/10.1016/0032-5910\(79\)80022-4](http://doi.org/10.1016/0032-5910(79)80022-4)
- Uysal, T., Güven O., Ozdemir, O., Karaagaciloglu, I.E., Tunç, B. ve Çelik, M.S. (2021a). Contribution of particle morphology on flotation and aggregation of sphalerite particles. *Minerals Engineering*, 165, 106860. doi: <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106860>
- Uysal, T., Güven O. ve Karaagaciloglu, I.E. (2021b). Tane pürüzlülüğünün galen mineralinin flotasyonu ve topaklanmasına etkisi. *Scientific Mining Journal*, 60(4), 191-196. doi: <http://doi.org/10.30797/madencilik.922988>
- Uysal, T, Güven, O., errelli, D.I., Bruckard, W.J., Koh, P.T.L., Schwarz ve M.P
- Verrelli, D.I., Bruckard, W.J., Koh, P.T.L., Schwarz ve M.P., Follink, B. 2014. Particle shape effects in flotation. Part 1: Microscale experimental observations, *Minerals Engineering*, 58, 80-89. doi: <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.004>
- Xia, W., 2017. Role of particle shape in the floatability of mineral particle: An overview of recent advances, *Powder Technology*, 317, 104-116. doi: <http://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.04.050>
- Yekeler, M., Ulusoy ve U., Hiçyılmaz, C. (2004). Effect of particle shape and roughness of talc mineral ground by different mills on the wettability and floatability. *Powder Technology*, 140 (1-2), 68-78. doi: <http://doi.org/10.1016/j.powtec.2003.12.012>