

## TANE MORFOLOJİSİNİN KABARCİK-TANE YAPIŞMA SÜRESİNE VE FLOTASYON VERİMİNE OLAN ETKİSİ

Onur GÜVEN <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Adana  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-5267-9153>

Anahtar Kelimeler	Öz
Flotasyon Pürüzlülük Kabarcık Cam Küresi Köşelilik	<i>Tanelerin ıslanabilirlik özelliklerindeki farklarından faydalanan bir zenginleştirme yöntemi olan flotasyon prosesinde, verimin artırılması için ortam özelliklerinin yanı sıra, tanelerin fiziksel özelliklerinin de değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, farklı morfolojik özelliklere sahip cam küresi tanelerinin flotasyon karakteristiklerinin yanı sıra kabarcık-tane yapışma sürelerindeki değişimler de incelenmiştir. Sonuç olarak yalnızca pürüzlülüğün ele alındığı deneylerde artan pürüzlülük değerlerinde daha düşük kabarcık-tane yapışma süreleriyle beraber, daha yüksek flotasyon verimleri elde edilirken hem pürüzlülük hem köşelilik parametresinin incelendiği deneylerde ise artan pürüzlülük değerlerinde daha yüksek kabarcık-tane yapışma süreleriyle orantılı olarak daha düşük flotasyon verimleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar tane üretim yöntemlerinin kontrolü ile flotasyon verimlerinin artırılabilmesine dair ışık tutmaktadır.</i>

## THE EFFECT OF PARTICLE MORPHOLOGY ON BUBBLE-PARTICLE ATTACHMENT TIME AND FLOTATION

Keywords	Abstract
Flotation Roughness, Bubble Glass Bead	<i>Flotation process is a beneficiation method that takes advantage of the differences in the wettability properties of the particles. Besides the properties of medium, the physical properties of particles should be considered for increasing its efficiency. In this context, the analysis of particle morphology is very important in terms of revealing particle-particle interactions as well as bubble-particle interactions. In this study, besides the flotation characteristics of glass beads with different morphological properties, the changes in bubble-particle attachment times were investigated. As a result, higher flotation efficiencies were obtained in parallel with lower bubble-particle attachment times at increasing roughness within the experiments for investigating the effect of only roughness values. However lower flotation efficiencies were obtained upon increasing roughness values in parallel with higher bubble-particle attachment times within the experiments for evaluating the effects of both roughness and angularity. These results shed light on the fact that flotation recoveries can be increased by controlling particle production methods.</i>

Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 27.07.2021	Submission Date : 27.07.2021
Kabul Tarihi : 24.10.2021	Accepted Date : 24.10.2021

Sorumlu yazar; e-posta : [oguvan@atu.edu.tr](mailto:oguvan@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/>).

## 1. Giriş

Son yıllarda, giderek daha ince boyutlarda mümkün hale gelen zenginleştirme işlemlerinde, tanelerin ıslanabilirlik özelliklerini esas alan "flotasyon" işlemlerinde pH, reaktif türü, reaktif konsantrasyonu, tane boyutu gibi parametrelerle birlikte, tane morfolojisinin etkisiyle ilgili araştırmalar yer almaktadır (Güven, Özdemir, Karaagaçlıoğlu ve Çelik, 2015; Güven ve Çelik, 2016; Güven ve diğ., 2020; Hassas, Güven, Bastürkü ve Çelik, 2021; Rahimi, Dehghani, Rezai ve Aslani, 2012; Uysal ve diğ., 2021; Verelli, Bruckard, Koh, Schwarz ve Follink., 2014; Zhu ve diğ., 2020). Bu çalışmalardan örneğin, kompleks sülfür cevherlerinin kuru ve yaş ortamda öğütülmesinin flotasyon kinetiğine yönelik etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada (Feng ve Aldrich, 2000), kuru öğütme neticesinde oluşan yüzeylerin, yaş öğütmede oluşan yüzeylere göre daha pürüzlü hale geldiği ve flotasyon kinetiğinin daha yüksek olduğu ortaya konulmuştur. Öğütme ortamlarının etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada bilyalı, çubuklu ve otojen değirmenle öğütme işlemlerinin kuvars tanelerinin öğütülme sonrasındaki şekil faktörlerinin ve pürüzlülük katsayılarının yanı sıra flotasyon verimlerine olan etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, çubuklu değirmende üretilen köşeli tanelerin daha yüksek flotasyon verimine sahip olduğu belirlenmiştir (Ulusoy Yekeler ve Hıcıymaz, 2003). Literatürde yer alan bilyalı değirmende öğütülen kuvars numuneleriyle yapılan zamana bağlı flotasyon kinetiğinin incelendiği bir çalışmada, ilk dakikalarda daha köşeli tanelerin ürün olarak alındığı, ilerleyen sürelerde ise daha yuvarlak tanelerin ürün kısmından geldiği belirlenmiştir. Rezai, Rahimi, Aslani, Eslamian ve Dehghani, 2010). Güven ve diğ., 2015, asitle muamele ve öğütme proseslerinden sonra farklı pürüzlülük derecelerine sahip cam küreleriyle yapılan deneyler sonucunda, artan pürüzlülük değerlerine paralel olarak tanelerin daha yüksek flotasyon kinetik değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı grup tarafından yapılan (Güven ve Çelik, 2016) cam kürelerinin flotasyonu sırasında düşük kollektör konsantrasyonlarında iken pürüzlülüğün, yüksek konsantrasyonda ise hem pürüzlülük hem de yuvarlaklık parametresinin değerine göre flotasyon verimlerinin değişim gösterdiği belirlenmiştir (Güven ve Çelik, 2016). Daha güncel bir çalışmada öğütme şartlarının sfelarit flotasyonundaki etkisi araştırılmış ve diğer çalışmalarda elde edilen sonuçların aksine artan yuvarlaklık ve pürüzlülük değerlerinde daha yüksek flotasyon verimlerinin elde edilebildiği belirlenmiştir.

Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlarla ilgili genel bir çıkarım yapıldığında, üretim şartlarına bağlı olarak değişen morfoljik özellikler neticesinde daha yüksek flotasyon verimlerinin elde edilebildiği gösterilmiştir. Flotasyon sonuçlarının yanı sıra özellikle tane pürüzlülüğünün taneler arasındaki etkileşimde ne derecede etkili olduğunu belirlemek amacıyla yürütülen

teorik hesaplamalarda da tane pürüzlülüğü arttıkça enerji bariyerinin düştüğü ve böylelikle verimin daha yüksek olacağı teorik olarak ifade edilmektedir (Güven, Çelik ve Drelich, 2015). Literatürde benzer birçok çalışma yer almasına karşın, artan pürüzlülük ve köşelilik değerlerinde kabarcık-tane etkileşimlerinin ölçümünün yapıldığı ve bu ölçümlerin flotasyon değerleriyle arasındaki ilişkiyi ortaya koyan çok az çalışma yer almaktadır (Uysal ve diğ., 2021, Verelli ve diğ., 2014).

Bu veriler ışığında bu çalışmanın amacı farklı köşelilik ve pürüzlülük derecelerine sahip cam küresi numunelerinin flotasyon verimi değerleri ve kabarcık-tane yapışma süresi değerleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktır.

## 2. Malzeme ve Yöntem

### 2.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda Potters Glass Beads (Avustralya)® endüstriden temin edilen -800+125 µm ve -150+90 µm aralığındaki numuneler kullanılmıştır. Numuneye ait kimyasal ve morfolojik özellikler, İ.T.Ü. Jeoloji Mühendisliği Laboratuvarlarında yer alan XRF (Bruker Marka S8 Tiger Model, Almanya, X Işını Floresans Cihazı), S.E.M (Taramalı Elektron Mikroskopu) ve B.E.T. (Brunauer-Emmett-Teller) analizleri ile belirlenmiştir. Deneysel çalışmalara esas olan numunelerin XRF analiz sonuçları, numunede %61,3 oranında Si, geri kalan kısımda ise Na, Ca, Mg, Al ve Fe yer aldığını göstermektedir (Tablo 1). Mikroflotasyon deneyleri alkil eter propilen amin R-O-(CH<sub>2</sub>)<sub>3</sub>-NH<sub>2</sub> formülüne sahip ticari bir kollektör olan Clariant firmasına (İsviçre) ait Flotigam EDA-B ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalarda distile su kullanılmış olup, suyun TDS (Toplam Çözülmüş Katı Değeri) miktarı ortalama 10 ppm olarak belirlenmiştir.

Tablo 1

XRF Analiz Sonuçları	
Element	Miktar, %
Si	61,3
Ca	14,8
Na	13,1
Al	6,0
Mg	3,8
Fe	1,0

Farklı boyut gruplarındaki cam küreleri literatürde yer alan "Yıkama Prosedürleri" izlenerek yüzeylerinde

olması muhtemel organik ve inorganik kontaminasyonlar ortadan kaldırılmıştır (Verelli, Koh, Bruckard ve Schawtz, 2012). Bu işlemler sırasında ilk olarak cam küreleri öncelikle sülfürik asitle muamele edilmiş sonrasında yüzeylerde kalması muhtemel asitin uzaklaştırılması amacıyla pH değeri sabitlenene kadar saf suyla karıştırılmıştır. Karıştırma işlemleri sırasında manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Sonrasında sodyum hidroksil ile muamele edilen cam küreleri, bir önceki aşamada olduğu gibi pH değeri sabitlenene kadar saf su ile karıştırıldıktan sonra, yüzeyde kalması muhtemel bazik bileşenlerin uzaklaştırılması amacıyla saf su ile birçok sefer yıkama yapılarak, pH değeri sabitlendikten sonra temizleme işleminin tamamlandığına karar verilmiştir. Bu bağlamda iri boyuttaki cam kürelerinin pH değeri 7,1, daha ince boyutta cam kürelerinin pH değeri ise 7,2 'de sabitlenmiştir.

## 2.2. Yöntem

### 2.2.1. Aşındırma İşlemleri

Cam küresi yüzeylerinin aşındırılması esasına dayanan işlemlerde literatürde yer alan prosedür izlenmiştir (Dang-Vu, Hupka ve Drzymala, 2006). Bu prosedüre göre taneler hacimce %10 olan HF çözeltisi içerisinde 5 dak bekletildikten sonra, yüzeyleri orijinaline göre nispeten pürüzlü hale gelen küreler, aşındırıcı solüsyon içerisinde (%35 distile su, %30 (%49 v/v HF asit) ve %30 oranında v/v %35'lik KHF<sub>2</sub>) yüzey aşındırıcı solüsyon ile 60 sn, 120 sn, 240 sn ve 480 sn sürelerinde işlem görerek yüzeyleri modifiye edilmiştir (Karakas ve Hassas, 2016). Bu işlem sonrasında, tekrardan HF içerisine konulan karışım yukarıda bahsedilen süreler (60, 120, 240 ve 480 sn) boyunca manyetik karıştırıcı ile 360 rpm hızında karıştırılmıştır. Aşındırma işlemlerinde literatürde yer alan prosedür doğrudan uygulanmış olup, farklı konsantrasyonlarda ve farklı tür asitlerle yapılan aşındırma sonucunda cam küresi yüzeyleri bir sonraki kısımlarda S.E.M görüntüleriyle gösterileceği üzere pürüzlülüğün etkisinin incelenmesi için uygun hale gelmektedir. Malzeme 7.2 pH değerine gelene kadar distile su ile yıkanan cam küreleri bu işlem sonrasında 1 gece 105°C'de bekletildikten sonra cam kaplar içinde muhafaza edilmiştir.

### 2.2.2. Öğütme Şartları

Literatürde gerek cam küreleri gerekse diğer endüstriyel mineraller için ayrıntılı olarak incelenen öğütme koşulları (Hassas ve diğ., 2021; Verelli, ve diğ., 2014; Ulusoy ve Yekeler, 2004) bu çalışma kapsamında da bilyalı değirmenlerin etkinliği açısından incelenmiş olup, seramik bilyalı değirmende %40 bilya şarjı ile, %60 katı oranında ve 150 µm aralıklı elek kontrolü olarak 20+10+10 dak öğütme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her süre sonunda 106 µm aralıklı elek kullanılarak mikro-flotasyon deneyleri için -

150+106 µm aralığında malzeme elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında pürüzsüz tanelerle yapılan öğütme işleminin yanısıra öncesinde asitle muamele edilmiş taneler de öğütülerek pürüzlülükle birlikte şekil faktörünün etkisi de incelenmiştir.

### 2.2.3. Tane Morfolojisinin Analizi

Farklı koşullarda yüzeyleri modifiye edilen cam kürelerinin, yüzey özellikleri yüksek büyütme oranlarında İstanbul Teknik Üniversitesi (İ.T.Ü.) Membran Teknolojileri Merkez Laboratuvarlarında yer alan QUANTA FEG250 (FEI Company, Amerika Birleşik Devletleri) model taramalı elektron mikroskopuyla (S.E.M), 20 kV voltaj altında 50-1500× büyütme oranlarında görüntülenmiştir. Ölçümler sırasında iletkenliği sağlamak amacıyla cam küreler alüminyum kalıplara çift taraflı bantlarla tutturulduktan sonra, altın-platin alaşımlarla 5 nm kalınlık elde edilecek şekilde kaplanmıştır. Dijital görüntüler (512 × 512 piksel boyutlarında) dPict7 yazılımıyla (Geller Mikro Analitik, Topsfield MA) işlenmiştir.

### 2.2.4. B.E.T. Analizleri

Tane pürüzlülüklerinin belirlenmesinde S.E.M analizlerinden elde edilen görüntülerin yanısıra B.E.T. analizlerinde kullanılmıştır. B.E.T. analizleri İ.T.Ü. Maden Mühendisliği laboratuvarlarında yer alan Quantachrome Autosorp-1 MP (Anton Paar, Avustralya) cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu analizler sırasında ölçüm ortamı olarak N<sub>2</sub> gazı kullanılmış olup, yüzey alanı ölçümlerinde etkili olabilecek olan yüzey nemi etkisini bertaraf etmek amacıyla numuneler bir gece öncesinde 105°C etüvde bekletilmiştir. B.E.T. analizlerinden elde edilen değerler ile aşağıda yer alan Denklem 1 kullanılarak tanelerin pürüzlülük katsayıları belirlenmiştir.

$$R_{BET} = A_{BET} \times d \times \left(\frac{D}{6}\right) \quad (1)$$

Burada R<sub>BET</sub>, B.E.T. analizleriyle belirlenen pürüzlülük katsayısını, A<sub>BET</sub>, B.E.T. analiziyle belirlenen yüzey alanını, d, katı yoğunluk değerini (g/cm<sup>3</sup>) ve D/6, tanelerin ortalama çap değerini (cm) ifade etmektedir (Rezai ve diğ., 2010).

### 2.2.5. Görüntü Analizleri

-150+106 µm boyut aralığında tanelerin üretiminde izlenen yaş öğütme şartlarının tanelerin şekil faktörleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla görüntü analizi testleri yapılmış olup, bu testlerde Olympus

marka binoküler mikroskopla 2× optik büyütme oranında çekilen fotoğrafların Leica QWin Image Analysis programında işlenmesiyle ortaya konulan şekil faktörü analizlerinden elde edilen veriler kullanılarak şekil faktörü değerlerinden köşelilik parametresi Denklem 2 kullanılarak hesap edilmiştir (Bulut, Guven ve Perek, 2010).

$$Köşelilik = \frac{4\pi x A x 1.064}{P^2} \quad (2)$$

### 2.2.6. Mikro-Flotasyon Deneyleri

Deneyel çalışmalarda farklı pürüzlülük katsayılarına sahip numunelerle birlikte, farklı öğütme koşulları sonucunda şekil faktörleri değişen numunelerin flotasyon karakteristikleri incelenmiştir. Deneyler 150 cm<sup>3</sup> mikro-flotasyon hücresinde, öncesinde 5 dak boyunca kollektör çözeltisi içinde kondüsyonlanan 1 gr cam küreleriyle yapılmıştır. Tüm deneyel çalışmalarda malzemenin kendi pH değeri olan 7,2 değerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda 10 ppm MIBC (Metil izobütül karbinol) katkısından sonra, 50 cm<sup>3</sup>/dak hava verilerek, 1 dak flotasyon süresinden sonra, yüzen ve batan numuneler 105°C sıcaklığa ayarlanmış olan etüvde kurutulduktan sonra ürünlerin ağırlığına bağlı hesaplamalar yapılmıştır.

### 2.2.7. Kabarcık-Tane Yapışma Süresi Tayini Ölçümleri

Deneyel çalışmalarda malzemelerin flotasyon karakteristikleriyle birlikte flotasyon işlemleri sırasında önemli bir role sahip olan kabarcık-tane yapışma süresinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda yapılmıştır. Bu çalışmalarda İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Mühendisliği Bölümü, Yüzey Kimyası laboratuvarında yer alan "Kabarcık-Tane Yapışma Süresi Tayin" cihazı (BKT-100, Bratton Engineering, and Technical Associates, LLC, USA) kullanılmıştır. Deneyel çalışmalarda mikro-flotasyon deneyleri ile aynı koşulları sağlamak amacıyla yaklaşık 0,2 gr malzeme 20 cc kollektör konsantrasyonu içerisinde 5 dak karıştırıldıktan sonra, bu karışım içerisinde damlalık yardımıyla alınan numune 1 cm<sup>3</sup> hacimli numune kabına aktarılmaktadır. Metodun temel prensibi belirli bir boyutta oluşturulan kabarcığın (2 mm), kullanılan yazılım içerisinde öncesinde tanımlanan süre boyunca tane yatağı ile temasıdır. Ölçüm yapılan mineral yatağının farklı bölgelerine tekrarlı olarak yaklaşılarak elde edilen sonuçlar, sonrasında istatistiki olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda flotasyon ile aynı konsantrasyonlarda gerçekleştirilen deneylerde mineral yatağının farklı noktalarından en az 15 ölçüm alınmıştır. Ve nihai

değerlendirmede yapışma veriminin %50 olduğu değer yapışma süresi olarak kabul edilmektedir.

Bu çalışmada Araştırma ve Yayın Etiğine uyulmuştur.

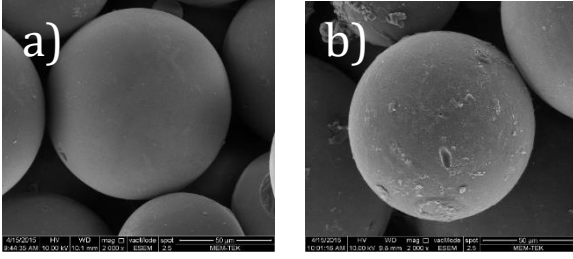
## 3. Bulgular

### 3.1. Pürüzlülüğün Etkisinin İncelenmesi

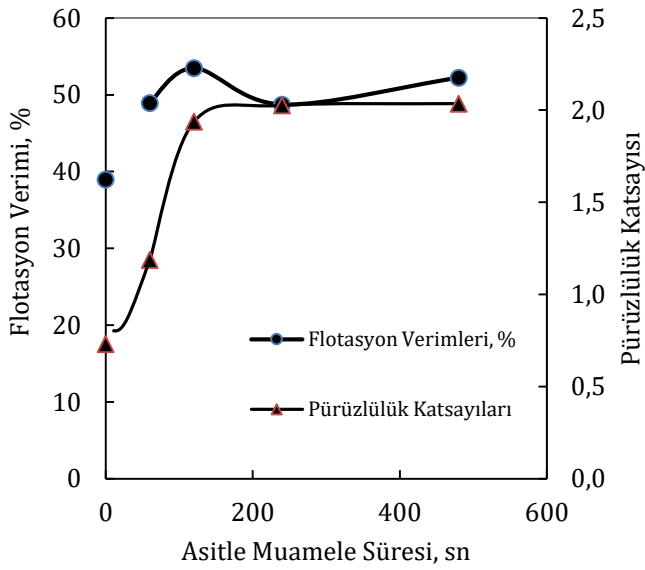
İlk seri deneylerde yalnızca pürüzlülüğün etkisini gösterebilmek amacıyla yuvarlak oldukları Şekil 1a'daki S.E.M fotoğrafında görülen -150+106 µm boyutundaki cam küresi taneleri asitle belirli sürelerde muamele edilerek yüzeylerinde pürüzlülükler oluşturulmuştur. Farklı pürüzlülükler sahip tanelerin B.E.T. analizleriyle belirlenen pürüzlülük katsayıları ile aynı şartlar altında yapılan flotasyon deneylerinin sonuçları ve kabarcık-tane yapışma süreleri ise sırasıyla Şekil 2 ve 3'te gösterilmektedir.

Şekil 2'de de görülebileceği üzere pürüzlülük katsayısı 0,74 olduğunda flotasyon verim değeri %39 iken bu değer pürüzlülük katsayısı 1,94'e çıktığında %53,5'e yükselmiştir. Literatürde tane pürüzlülüğünün etkisinin araştırıldığı çalışmalarda, genel itibariyle pürüzlülüğün artmasına paralel şekilde flotasyon verimlerinin yükseldiği belirlenmiştir. Örneğin düşük SDS (Sodyum Dodesil Sülfat) konsantrasyonlarında (1,06x10<sup>-5</sup> M) yapılan bir çalışmada flotasyon verimleri tane pürüzlülüğüyle paralel olarak değişim gösterirken, daha yüksek konsantrasyonlarda (9,76 x10<sup>-5</sup>, 5,52 x10<sup>-4</sup> M), bu trend pürüzlülüğe olduğu kadar şekil faktörüne de bağlı olarak değişim göstermektedir (Guven, Karakas, Kodrazi ve Celik, 2016). Aynı deney prosedürünün izlendiği bir diğer çalışmada cam kürelerinin amin varlığında flotasyon karakteristiklerinin incelendiği deneylerde 1x10<sup>-6</sup> M amin konsantrasyonunda flotasyon verim değerleri pürüzlülüğün bir fonksiyonu olarak değişim gösterirken, kollektör konsantrasyonu 1x10<sup>-3</sup> M'a yükseltildiğinde, tane köşeliliğinin daha etkin bir parametre olduğu belirlenmiştir (Guven ve Çelik, 2016)

Ayrıca daha güncel bir çalışmada pürüzlülüğün manganez flotasyonuna pozitif yönde etki yaptığı belirlenmiş olup (Zhu ve diğ., 2020), artan pürüzlülüğe paralel olarak daha yüksek flotasyon kinetik katsayıları elde edilmiştir. Ancak literatürde pürüzlülüğün negatif yönde etkilediğini belirten çalışmalarda mevcuttur. Örneğin doğal hidrofobik özellik gösteren talk mineraliyle yapılan deneyel çalışmalarda artan pürüzlülük değerlerinde malzemenin islanabilirlik derecesinin artacağı belirlenmiştir (Yekeler, Ulusoy ve Hicyılmaz, 2004). Bu durumda üretim şartlarıyla birlikte tanelerin yapısal özelliklerinin de flotasyon sırasında değerlendirilmesi gerekmektedir.

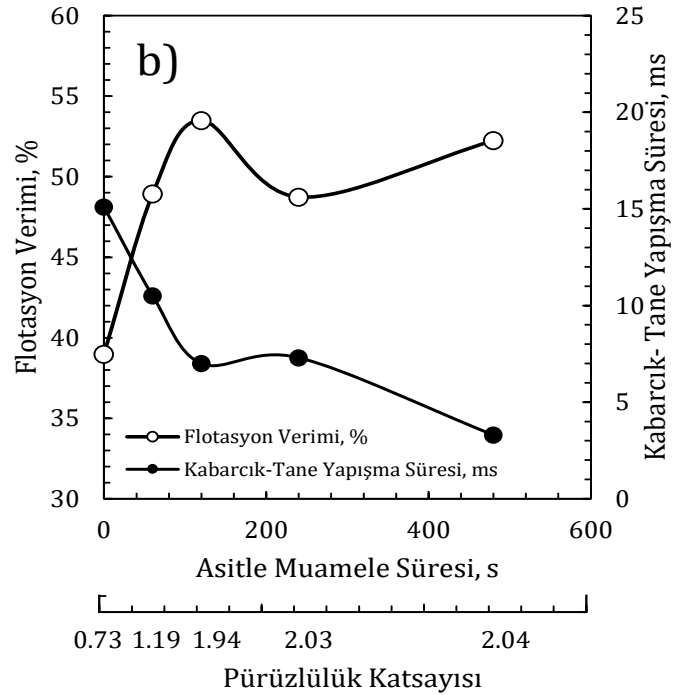
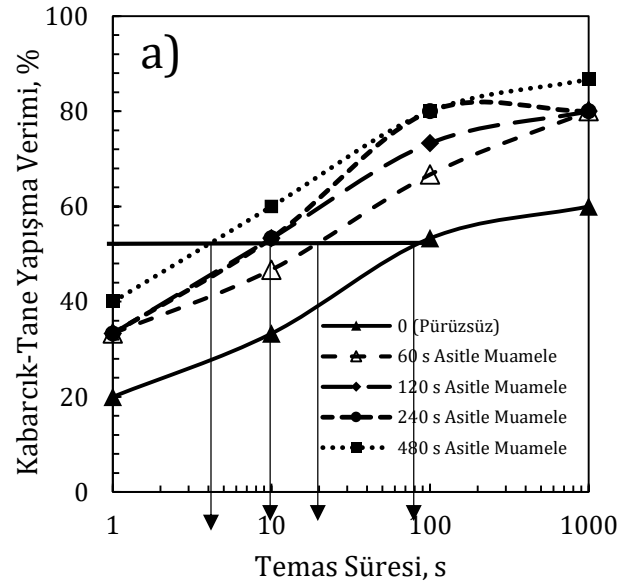


Şekil 1. a) Pürüzsüz Cam Küresi Tanesinin 2000× Büyütme Oranında S.E.M Görüntüsü b) Asitle 240 Sn. Muamele Edilmiş Cam Küresi Tanesinin 2000× Büyütme Oranında S.E.M Görüntüsü



Şekil 2. Yuvarlak Pürüzlü Tanelerle Yapılan Flotasyon Deneyleri ( $10^{-4}$  M kollektör konsantrasyonunda, pH: 7,2, 10 ppm MIBC eklentisi, Asitle Muamele Süreleri: 60, 120, 240, 480 sn)

Nitekim yalnızca pürüzlülük parametresinin etkisinin araştırıldığı bu deney serisinin sonuçları daha önceki deney serilerinden de elde edilen sonuçları doğrular nitelikte olup, herhangi bir şekil faktörü etkinliği olmadığı takdirde tane pürüzlülüğünün flotasyon verimlerinde etkin parametre olarak rol alacağı sonucu çıkmaktadır (Güven ve Çelik, 2016)



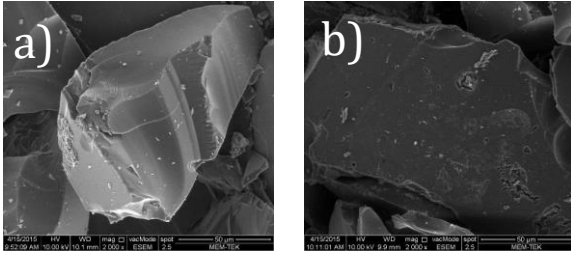
Şekil 3. a) Kabarcık-Tane Yapışma Verimine Bağlı Olarak Elde Edilen Temas Süreleri (%50 verimin elde edildiği süre yapışma süresi olarak adlandırılmaktadır) b) Asitle Muamele Süresine Bağlı Olarak Elde Edilen Pürüzlülük Katsayılarına Bağ Yuvarlak Pürüzlü Tanelerle Yapılan Kabarcık-Tane Yapışma Süresi Ölçümleri (Asitle Muamele Süreleri: 60, 120, 240,480 sn)

Bu sonuçlar kabarcık-tane yapışma süreleri açısından değerlendirilecek olursa (Şekil 3), kabarcık-tane yapışma süresinin düşmesiyle birlikte flotasyon veriminin artış gerçekleşmektedir. Bu durum kabarcık-tane etkileşimlerinde pürüzlülüğün önemli bir etkisi olduğunu göstermekte olup, literatürde yer alan önceki

çalışmalarda sunulan enerji bariyerleri ile ilgili hipotezleri de destekler nitelikte olmaktadır (Güven ve diğ., 2015).

### 3.2. Öğütülmüş Tanelerle Yürütülen Deneysel Çalışmalar

Bu deney serisinde ise  $-800+125 \mu\text{m}$  boyut aralığındaki taneler "Yöntem" kısmında anlatılan öğütme koşulları uygulanarak  $-150+106 \mu\text{m}$  boyutlarında taneler elde edilmiştir. Öğütme işleminin ardından farklı şekil faktörlerine sahip hale gelen taneler asitle belirli sürelerde muamele edilerek farklı derecelerde pürüzlü yüzeylere sahip olmuşlardır. Elde edilen tanelere ait yüksek büyütme oranlarında çekilen S.E.M görüntüleri Şekil 4a-b'de gösterilmektedir.



Şekil 4. a) Öğütülmüş Cam Küresi Tanesinin 2000x Büyütme Oranında S.E.M Görüntüsü b) Öğütme Sonrası Asitle 240 Sn. Muamele Edilmiş Cam Küresi Tanesinin 2000x Büyütme Oranında S.E.M Görüntüsü

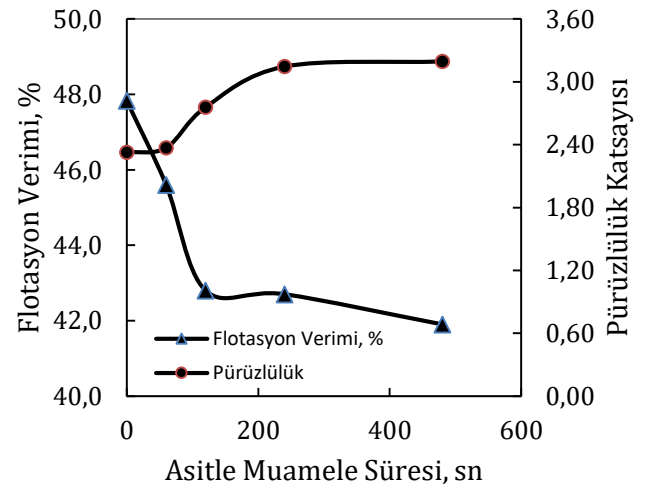
Şekil 4a-b'den de görülebileceği üzere öğütme sonrasında orijinal olarak yuvarlak olan tanelerin daha köşeli bir hal aldığı görülmektedir. Şekil 4a-b'de ayrıca tanelerin yüzeylerinin daha pürüzlü hale geldiği görülebilmektedir.

Bu durumda flotasyon verimlerinin incelenmesinde başlıca iki parametrenin etkinliği düşünülecek olup bunlar şekil faktörleri ve pürüzlülüktür. Bir önceki deney serisiyle aynı şartlarda flote edilen tanelerin şekil faktörlerinden köşelilik, pürüzlülük katsayıları ve flotasyon verimleri arasındaki ilişki Şekil 5 ve 6'da gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ilk deney serisinde artırıcı bir etki yaratan pürüzlülük katsayısının negatif bir etki oluşturduğu düşünülebilir ancak bu durumun açıklanmasında pürüzlülüğün çok kabarcığın taneyle karşılaştığı şekil faktörü etkisinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu konuda literatürde yer alan çalışmalarda farklı trendler elde edildiği belirlenmiştir. Örneğin, cam küreleriyle gerçekleştirilen bir çalışmada malzemenin köşeliliği arttıkça flotasyon veriminin yükseldiği sonucuna ulaşmışlardır (Koh, Hao, Smith, Chau ve Bruckard, 2009). Benzer şekilde öğütme şartlarının incelendiği deney serilerinde artan köşelilikle birlikte flotasyon

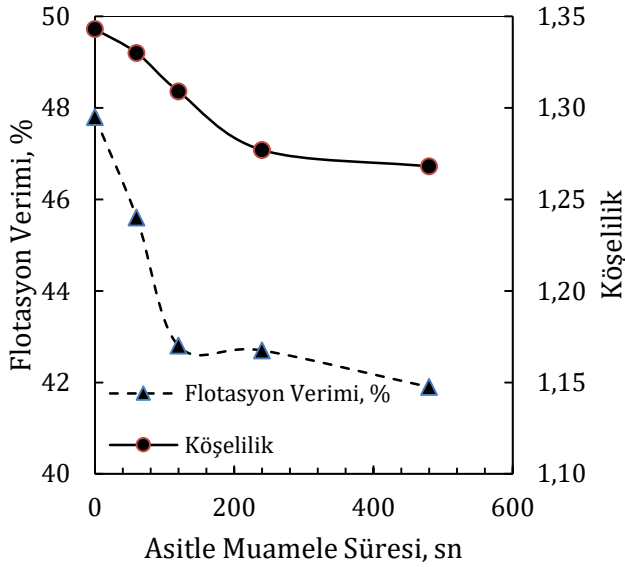
veriminin yükseldiği ancak benzer şekilde pürüzlülük katsayısı arttıkça verimin düştüğü yorumunu yapmışlardır (Ulusoy ve diğ., 2003). Bu konuda yapılan güncel çalışmalarda tanelerin ilk aşamada tane yüzeylerinde yer alan köşelerle temasa geçtiği gösterilmiştir (Verelli ve diğ., 2014).

Şekil 5 ve 6'da da benzer bir trend elde edildiği görülmekte olup, malzemenin pürüzlülüğü artmasına karşın, köşelilik parametresiyle orantılı olarak köşeliliğinde meydana gelen azalmalar neticesinde flotasyon verimlerinde düşüşler ölçülmüştür. Elde edilen bu sonuçlara benzer şekilde, güncel çalışmada cam kürelerinin flotasyonunda düşük konsantrasyonlarda pürüzlülüğün etkisi ile yüksek konsantrasyonlarda ise şekil faktörünün daha etken olduğu belirlenmiştir (Güven ve diğ., 2016). Dolayısıyla deneysel çalışmaların yapıldığı  $10^{-4}$  M konsantrasyonu amin flotasyonunda ortalama bir değer olduğu için köşelilik parametresinin pürüzlülüğe göre daha etken bir parametre olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Öğütülmüş Tanelerle Yapılan Flotasyon Deneylerinde Pürüzlülüğün Etkisi ( $10^{-4}$  M Kollektör Konsantrasyonunda, pH: 7,1, 10 ppm MIBC Eklentisi, Asitle Muamele Süreleri: 60, 120, 240, 480 sn)

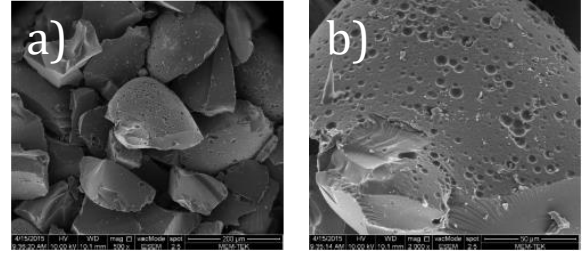




Şekil 6. Öğütülmüş Tanelerle Yapılan Flotasyon Deneylerinde Köşelilik Parametresinin Etkisi ( $10^{-4}$  M Kollektör Konsantrasyonunda, pH: 7,1, 10 ppm MIBC Eklentisi, Asitle Muamele Süreleri: 60, 120, 240, 480 sn)

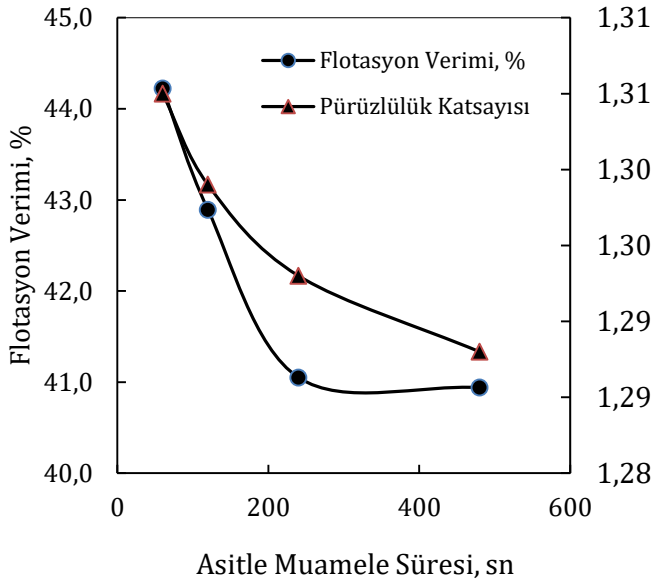
### 3.3. Asitle Muamele Edildikten Sonra Öğütülen Tanelerle Yürütülen Deneysel Çalışmalar

Bu deney serisinde ise asitle muamele edildikten sonra öğütülen  $-800+125 \mu\text{m}$  boyutundaki tanelerin flotasyona olan etkileri araştırılmıştır. Literatürde yer alan çalışmalarda genellikle asitle muamele öğütme sonrasında uygulandığı için, bu deneyin sonuçları pürüzlü olan tanelerin öğütüldüğü zaman flotasyonla zenginleştirilmesini ne ölçüde etkileyeceğini göstermesi bakımından farklı bir yaklaşım sunacaktır. Şekil 7a-b'deki S.E.M görüntülerinden görülebileceği üzere asitle etkileşim süresine bağlı olarak pürüzlülük seviyesi önemli ölçüde yükselmiştir. Bu deney serisinde gözlenen bir diğer durum tanelerin bir önceki deney serisinden elde edilen tanelere göre nispeten daha az köşeli olmalarıdır. Ancak elde edilen bu sonuçlar asitle muameleden ziyade nispeten köşeli olan tanelerin öğütme işlemleri sonucunda daha yuvarlak bir şekil almasıyla açıklanabilir. Gerek bu deney serisinde gerekse bir önceki deney serisinde flotasyon verimlerinin değerlendirilmesinde pürüzlülüğün çok şekil faktörleri ön plana çıkmaktadır. Zira Şekil 8'den de açıkça görülebileceği üzere 1,31 köşelilik değerinde iken flotasyon %44,2'lik bir flotasyon verimi elde edilebiliyorken bu değer köşelilik değeriyle doğru orantılı olarak azalmaktadır.

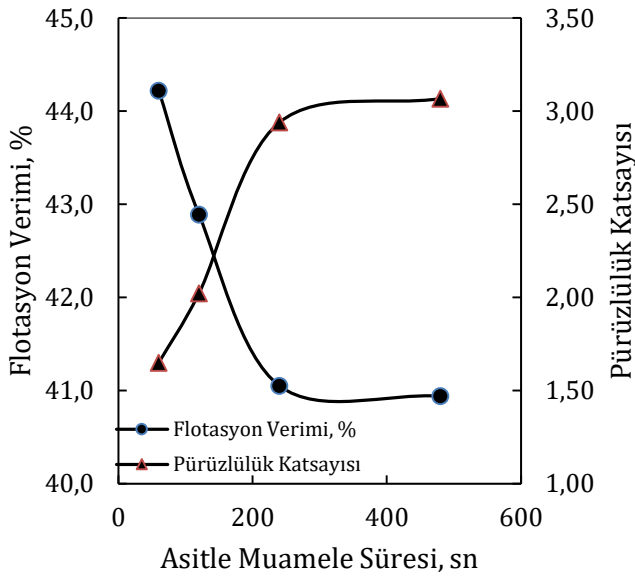


Şekil 7a. 240 s Asitle Muamele Edildikten Sonra Öğütülen Tanelerin 500× Büyütme Oranında S.E.M Görüntüsü b) 240 s Asitle Muamele Edildikten Sonra Öğütülen Tanelerin 2000× Büyütme Oranında S.E.M Görüntüsü

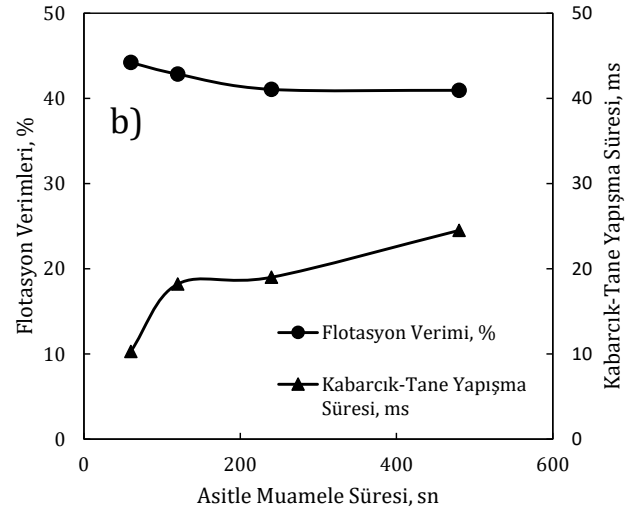
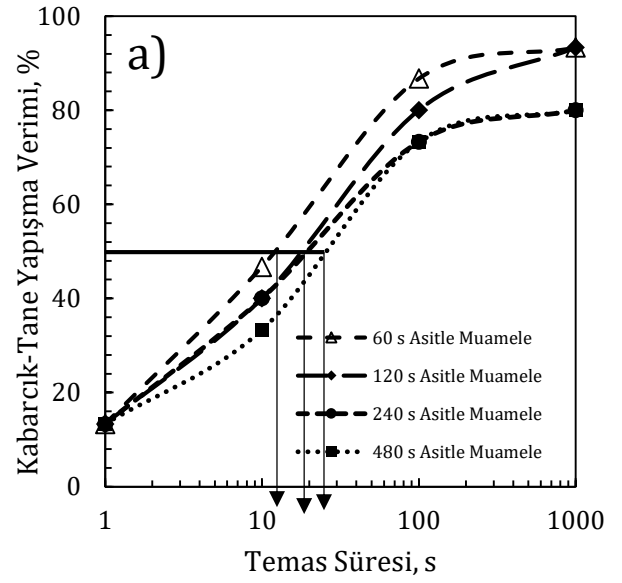
Ancak pürüzlülük değerleri açısından bir değerlendirme yapıldığında ise, tam tersi bir trend elde edilmekte olup, asitle muamele süresine bağlı olarak flotasyon veriminin düştüğü gözlenmektedir. Şekil 9'da da görülebileceği üzere pürüzlülük katsayısı 1,649 iken flotasyon verim değeri %44,2'lerde kalırken bu değer pürüzlülük katsayısı 3,067'e çıktığında %40,9'a inmiştir. Bu sonuçlarla ilgili olarak kabarcık-tane etkileşimlerinin ölçüldüğü deney serisi sonuçları da bu bulguları destekler niteliktedir (Şekil 10). Nitekim Şekil 10a ve 10b'den anlaşılabilir üzere düşük pürüzlülük değerlerinde daha düşük kabarcık yapışma verimi elde edilmekte iken (Örneğin pürüzlülük katsayısı 60 s asitle muamele sonucunda elde edilen cam küresi numunesi için temas süresi yaklaşık 11 ms iken bu değer daha yüksek pürüzlülük katsayısına sahip 480 s asitle muamele edilen numune için yaklaşık 24 ms olmuştur. Elde edilen bu sonuçlar yalnızca pürüzlülüğün incelendiği deneysel sonuçlarla farklı bir trend sunmaktadır. Çünkü ilk deney serisinde malzemenin yüzeyleri yalnızca asitle muamele sonrasında belirli oranlarda değişim gösteriyor iken, bu deney serisinde ise gerek asitle muamele gerekse öğütme gibi işlemlerin birlikte kullanılması sonucunda  $10^{-4}$  M gibi cam kürelerinin flotasyonunda ortalama bir flotasyon verimi sunan amin konsantrasyonunda, tane-kabarcık etkileşimlerinde yalnızca pürüzlülüğün değil tane köşelilik oranının da ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bir diğer deyişle malzemenin flotasyon verim değerleri incelendiğinde, tane köşelilik oranlarıyla doğru orantılı iken, pürüzlülük değerleriyle ters orantılı olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Asitle Muamele Edildikten Sonra Öğütülen Cam Kürelerinin Flotasyonunda Köşellilik Parametresinin Etkisi ( $10^{-4}$  M kollektör konsantrasyonunda, pH: 7,1, 10 ppm MIBC eklentisi, Asitle Muamele Süreleri: 60, 120, 240, 480 sn)



Şekil 9. Asitle Muamele Edildikten Sonra Öğütülen Cam Kürelerinin Flotasyonunda Pürüzlülük Katsayısının Etkisi ( $10^{-4}$  M kollektör konsantrasyonunda, pH: 7,1, 10 ppm MIBC eklentisi, Asitle Muamele Süreleri: 60, 120, 240, 480 sn)



Şekil 10. a) Asitle Muamele Edildikten Sonra Öğütülen Cam Kürelerinin Kabarcık-Tane Yapışma Süresi b) Asitle Muamele Edildikten Sonra Öğütülen Cam Kürelerinin Flotasyon Verimi Değerleri

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada öğütme şartlarının ve asitle muamele işlemlerinin cam kürelerinin morfolojik özelliklerine olan etkilerinin yanı sıra, kabarcık-tane yapışma sürelerine ve flotasyon verimlerine etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak orijinal cam küreleriyle yapılan deneysel çalışmalarda asitle muamele işlemleri sonucunda pürüzlülük katsayısı 0,73'ten 2,04'e artarken, kabarcık-tane yapışma süresi ise 15 ms'den 3 ms'e azalmıştır. Bunun neticesinde flotasyon verimi %39'dan %53'e artmıştır. Öğütülmüş malzeme ile yapılan deneysel çalışmalarda ise pürüzlülük katsayısı 2,33'ten 3,19'a artarken, flotasyon verimi %47,8'den %41,9'a azalmıştır. Benzer bir trend asitle muamele



edildikten sonra öğütülen numuneler içinde elde edilmiş olup, pürüzlülük katsayısı 1,649'dan 3,067'ye artmasına karşın, flotasyon verimi %44,2'den %40,9'a azalmıştır. Bu durum kabarcık-tane etkileşim süreleriyle de doğrulanmış olup, 60 s asitle muamele sonrasında bu süre yaklaşık 11 ms ölçülürken, 480 s muamele sonrasında ise 24,5 ms olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla bu çalışmadan elde edilen sonuçlara bağlı olarak, öğütme, asitle muamele ve her ikisinin kombinasyonu şeklinde yapılan çalışmalarda, tane morfolojisinin kabarcık-tane etkileşim sürelerine ve flotasyon verimlerine olan etkisinin farklı olacağı belirlenmiş olup, ileride benzer konularda yapılacak çalışmalar için yol gösterici olmaktadır.

### Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

- Bulut G., Guven, O. ve Perek, T. (2010). Effect of shape factor on coal flotation, Proceedings of Pittsburgh Coal Conference, Istanbul, Turkey, 1, 10
- Dang-Vu T., Hupka, J. ve Drzymala, J. (2006). Impact of roughness on hydrophobicity of particles measured by the Washburn method, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 40, 45-52. Erişim Adresi: <http://www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/pdf/2007/s45-52.pdf>
- Feng, D. ve Aldrich, C., (2000). A Comparison of the flotation of ore from the Merensky Reef after wet and dry grinding. *International Journal of Mineral Processing*, 60(2), 115-129. doi: [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(00\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(00)00010-7)
- Guven, O., Ozdemir, O., Karaagaciloglu, I. E. ve Çelik, M.S., (2015). Surface morphologies and floatability of sand-blasted quartz particles, *Minerals Engineering*, 70, 1-7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.08.007>
- Guven O., Celik, M.S. ve Drelich, J. (2015). Flotation of methylated roughened glass particles and analysis of particle-bubble energy barrier, *Minerals Engineering*, 79, 125-132. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.06.003>
- Guven, O. ve Celik, 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>
- Guven, O., Karakas, F., Kodrazi, N. ve Celik, M.S., (2016). Dependence of morphology on anionic flotation of alumina. *International Journal of Mineral Processing*, 156, 69-74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.06.006>
- Guven, O., Serdengeçti, M.T., Tunc, B., Ozdemir, O., Karaagaciloglu, İ.E. ve Celik, M.S., (2020). Effect of particle shape properties on selective separation of chromite from serpentine by flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 56 (5), 818-828. doi: <https://doi.org/10.37190/ppmp/125734>
- Hassas, B.V., Guven, O., Bastürkcü, E. ve Çelik, M.S., (2021). Morphological Changes of Glass Bead Particles upon an Abrasive Blasting as Characterized by Settling and Flotation Experiments, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 57 (2), 157-168. doi: <https://doi.org/10.37190/ppmp/133288>
- Karakas, F. ve Hassas, V. B., (2016). Effect of surface roughness on interaction of particles in flotation, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 52, 18-34. doi: <http://dx.doi.org/10.5277/ppmp160102>
- Koh, P.T.L., Hao, F.P., Smith, L.K., Chau, T.T. ve Bruckard, W.J., (2009). The effect of particle shape and hydrophobicity in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 93 (2), 128-134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.07.007>
- Rahimi, M., Dehghani, F., Rezai, B. ve Aslani, M.R., (2012). Influence of the roughness and shape of quartz on their flotation kinetics. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 19(4), 284-289. doi: <http://doi.org/10.1007/s12613-012-0552>
- Rezai, M., Rahimi, M., Aslani, M.R., Eslamian A. ve Dehghani, F., (2010). *Relationship Between Surface Roughness of Minerals and their Flotation Kinetics*. In: *Proceedings of the XI International Seminar on Mineral Processing Technology*, Editors: R. Singh, A. Das, P.K. Banerjee, K.K. Bhattacharyya, N.G. Goswami, 232-238. Erişim Adresi: [https://www.researchgate.net/publication/257758756\\_Influence\\_of\\_surface\\_roughness\\_on\\_flotation\\_kinetics\\_of\\_quartz](https://www.researchgate.net/publication/257758756_Influence_of_surface_roughness_on_flotation_kinetics_of_quartz)
- Ulusoy, U. ve Yekeler, M., (2004). Variation of critical surface tension for wetting of minerals with roughness determined by Surtronic 3+ instrument. *International Journal of Mineral Processing*, 74, 61-69. doi: <http://doi.org/10.1016/j.minpro.2003.09.001>
- Ulusoy, U., Yekeler, M. ve Hiçyılmaz, C., (2003). Determination of shape, morphological and wettability properties of quartz and their correlations. *Minerals Engineering*, 16, 951-964. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.07.002>

Uysal, T., Guven, O., Ozdemir, O., Karaagaclioglu, İ.E., Tunc, B. ve Celik, M.S., (2021). Contribution of particle morphology on flotation and aggregation of sphalerite particles. *Minerals Engineering*, 165, 106860. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106860>

Verrelli, D.I., Koh, P.T.L., Bruckard, W.J. ve Schwarz, M.P., (2012). Variations in the induction period for particle-bubble attachment. *Minerals Engineering*, 36-38, 219-230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.03.034>

Verelli D.I., Bruckard, W., Koh, P.T., Schwarz, M. P. Ve Follink, B. (2014). Particle shape effects in flotation. Part 1: Microscale experimental observations, *Minerals Engineering*, 58, 80-89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.004>

Yekeler, M., Ulusoy, U. ve Hiçyılmaz, C. (2004). Effect of particle shape and roughness of talc mineral ground by different mills on the wettability and floatability, *Powder Technology*, 140, 68-78. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2003.12.012>

Zhu, Z., Wang, D., Yang, B., Yin, W., Ardakani, M., Yao, J. ve Drelich, J.W. (2020). Effect of nano-sized roughness on the flotation of magnesite particles and particle-bubble interaction. *Minerals Engineering*, 151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106340>