



Orijinal Araştırma / Original Research

Tane pürüzlülüğünün galen mineralinin flotasyonu ve topaklanmasına etkisi

Effect of particle roughness on flotation and aggregation of galena mineral

Turan Uysal^{a,*}, İbrahim Ethem Karaagaçlıoğlu^{b,**}, Onur Güven^{c,***}^a İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE^b Harran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Şanlıurfa, TÜRKİYE^c Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Adana, TÜRKİYE

Geliş-Received: 20 Nisan/April 2021 • Kabul-Accepted: 13 Temmuz/July 2021

Ö Z

Flotasyon işlemlerinde tane boyutu ve tane morfolojisi gibi tanelerin fiziksel özellikleri, hem tane-tane hem de tane-kabarık etkileşimlerinde önemli bir rol oynar ve bu da onları flotasyon işlemlerinin değerlendirilmesinde çok önemli kılmaktadır. Bu çalışmada, farklı sürelerde pürüzlendirilen galen tanelerinin pürüzlülük süresine bağlı olarak elde edilen morfolojik özelliklerinin flotasyon verimi ve topaklanma özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçlarına göre artan pürüzlülük değerlerinde tanelerin flotasyon ve topaklanma özelliklerinin önemli oranda arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak tanelerin tercihli üretimi ile flotasyonun daha düşük toplayıcı konsantrasyonuna ötelenerek daha verimli hale getirilebileceği belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Galen, Pürüzlülük, Topaklanma, Flotasyon

A B S T R A C T

Physical properties of particles such as particle size and particle morphology plays an important role on both particle-particle and particle-bubble interactions which makes them very important on evaluation of flotation processes. In this study, the contribution of roughness of galena particles produced as a function of abrasion time was investigated on their flotation recovery and aggregation characteristics. According to the results of experimental studies, it was found that the flotation and aggregation characteristics increased in proportion to their roughness value. As a result, it was determined that with the preferential production of particles, flotation can be made more efficient by shifting to lower collector concentration.

Keywords: Galena, Roughness, Aggregation, Flotation

Giriş

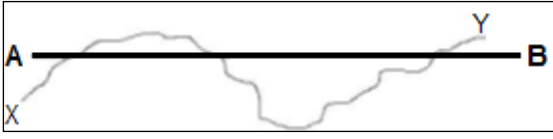
Günümüzde giderek küçülen serbestleşme boyutları, yüzey özelliklerini esas alan flotasyon yönteminin önemini artırmaktadır. Bu yöntemin değerlendirilmesinde reaktif tipi, reaktif dozajı, pH, tane boyutunun yanı sıra, tane şekli ve tane pürüzlülüğü gibi parametreler önemlidir. Bu parametrelerden tane morfolojisi, tanelerin yüzey şekillerinin incelendiği bir alandır. Son yıllarda literatürde tane şekli ve tane pürüzlülüğü üzerine yapılan çalışma-

ların arttığı gözlenmiştir. Bu çalışmalarda tane pürüzlülüğünün artmasıyla flotasyon verimi ve tane agregasyonunun önemli miktarda arttığı belirtilmiştir (Yekeler vd., 2003; Ulusoy vd., 2005; Rezaei vd., 2010; Güven vd., 2015; Güven vd., 2016; Güven vd., 2018; Güven vd., 2020; Uysal vd., 2021).

Tane morfolojisi tanelerin fiziksel bir niteliği olup başlıca şekil faktörü ve pürüzlülük olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bunlardan şekil faktörü olarak sınıflanan yuvarlaklık, köşellilik ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author: turan.uysal@inonu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-1643-6725>** karaagaclioglu@harran.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-2838-0514>*** oguven@atu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-5267-9153>

yassılık gibi parametreler iki boyutlu olarak değerlendirilirken, pürüzlülük ise üç boyutlu olarak değerlendirilmektedir. Tane morfolojisi için önemli parametrelerden biri olan pürüzlülük katı yüzeyindeki topografyaya bağlı olarak meydana gelmektedir (Rezai vd., 2010). Pürüzlülüğün temsili görünümü Şekil 1’de, formülü ise Eşitlik 1’de görüldüğü üzere tanımlanmaktadır (Rahimi vd., 2012).



Şekil 1. Katı yüzey profili

$$\text{Pürüzlülük} = \frac{\text{XY yüzeyinin gerçek alanı}}{\text{AB diye tanımlanan yüzeyin alanı}} \quad (1)$$

Flotasyon işleminde istenen tanelerin yüzeybilirliğini sağlamak için tanelerin seçimli olarak hidrofob yapılması gerekir. Taneleri seçimli olarak hidrofobik hale getirmek için, minerallerin yapılarına özgü toplayıcı reaktifler kullanılır (Fuerstenau vd., 1995). Bu toplayıcı reaktifler oksit, silikat ve tuz tipi minerallerde genellikle 12 CH₂ grubundan daha uzun zincir içeren sürfaktanlardan (Amin, piridin ve sülfosin gibi) oluşurken, sülfürlü mineraller için ise 2-5 CH₂ gibi kısa zincirli ksantatlardan oluşmaktadır (Fuerstenau ve Pradip, 2005; Chandra ve Gerson, 2009). Süspansiyondaki toplayıcı konsantrasyonu arttıkça yüzeylenen tanelerin miktarı ile birlikte flotasyon verimleri de artar ve bu artış, bir eşik noktasında ani olarak hızlandıktan sonra azalarak devam etmektedir. Bu eşik noktasına literatürde genellikle hemimisel konsantrasyonu (HMC) adı verilmektedir (Fuerstenau vd., 1964; Somasundaran ve Fuerstenau, 1966).

Bu çalışmada öğütme sırasında pürüzlülük bakımından avantajlı olan tanelerin tercihli üretimi ile flotasyonun daha düşük toplayıcı konsantrasyonlarına ötelenerek daha verimli hale getirilebilirliği sorgulanmıştır. Bu kapsamda pürüzlendirilen galen numunelerinin mikro-flotasyon ve türbidite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonuçlarına bağlı olarak pürüzlülük değerleri ile flotasyon verimi ve topaklanma arasındaki ilişki araştırılmıştır.

1. Malzeme ve yöntem

1.1. Malzeme

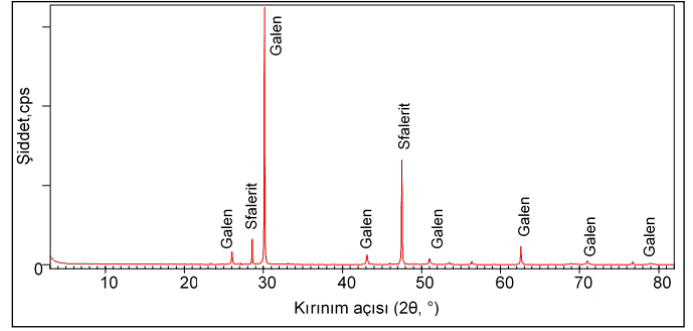
Galen numunesi, Adana’da yer alan Akmetal Madencilik San. ve Tic. A.Ş.’ye ait Horzum (Adana) kurşun-çinko ocaklarından iri boyutlu, olabildiğince saf numuneler seçilerek alınmıştır. Dış görünüşleri itibarıyla tipik bir galenin renk ve yapısal özelliklerine sahip numunenin içeriği XRD yöntemi ile belirlenmiş ve Şekil 2’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.

Galen minerali kübik sistemde kristallenmektedir. Kristallerin biçimleri bazen küp, bazen de oktaeder şeklindedir. Galenin yoğunluğu 7,8 g/cm³ ve Mohs sertliği 2,5’dir. İkizlenmesi (111)’e göredir ve küçük kesitlerinde bile dilinimi görmek mümkündür. Galen minerali kırılğan, dövülebilir, opak bir mineraldir.

1.2. Yöntem

1.2.1. Kıрма ve öğütme işlemleri

Galen numunelerinin boyutunu küçültmek için numune, sırasıyla çeneli, konili ve merdaneli kırıcıda kırıldıktan sonra bilyalı değirmende 960 s boyunca kesikli ve kapalı devre öğütülmüştür. Öğütme işlemi sonrası galenin su ile temasında ortaya çıkabilecek olan korozyon ihtimaline karşı malzeme kuru olarak -0,074+0,038 mm boyut aralığında Retch Otomatik Elek sarsma makinası kullanılarak elenmiştir.

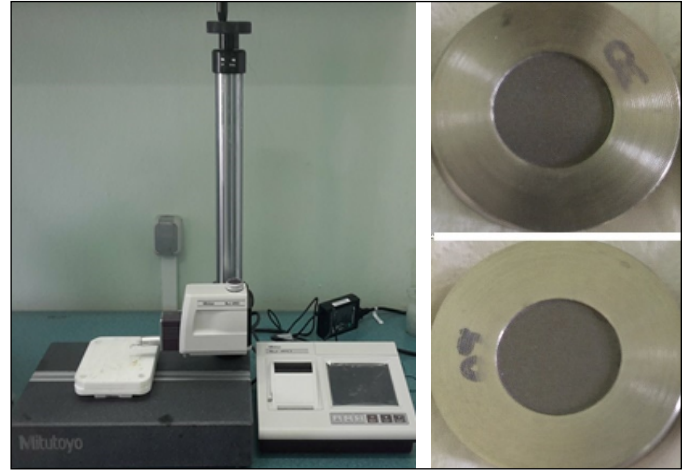


Şekil 2. Galen numunesine ait XRD grafiği

1.2.2. Pürüzlülük ölçümleri

Öğütülen galen numunesinin pürüzlendirme işlemi, -0,015 mm boyutunda, sertliği yaklaşık 9,5 civarında olan silisyum karbür (SiC) ile 4:1 (SiC: Galen numunesi) oranında Falcon tüpünde farklı pürüzlendirme sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Ardından titreşimli elek yardımı (-0,038 mm) ile SiC elek altına alınmış ve pürüzlendirilmiş numunelerden ayrılmıştır. Elde edilen pürüzlendirilmiş numuneler 10 MPa basınç altında 5 dakika boyunca preslenmiş ve pürüzlülük ölçümü için pelet numuneler elde edilmiştir. Peletlerin pürüzlülük değerini belirleyebilmek için ise Mitutoyo marka profilometre ile ölçümler yapılmıştır.

Profilometre ve peletlenmiş numunelerin genel görünümü Şekil 3’de, deneysel akış şeması ise Şekil 4’de verilmiştir. Peletlenmiş numune üzerinde dikey olarak yaklaşılan bir elmas iğne aracılığıyla belirli bir mesafe boyunca temaslı ölçümler alınmıştır. Her pelet yüzeyinde olabildiğince fazla ölçüm (~15 ölçüm) alınmaya çalışılmış ve alınan ölçümlerin ortalaması pürüzlülük değeri olarak kabul edilmiştir.

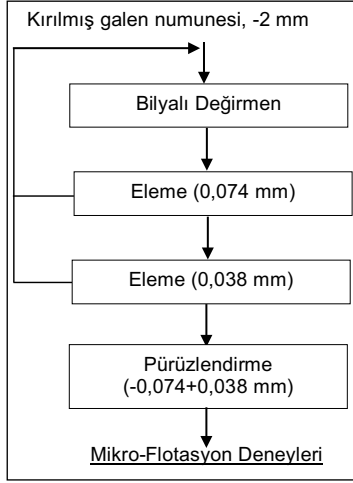


Şekil 3. Profilometre ve peletlenmiş numunelerin genel görünümü

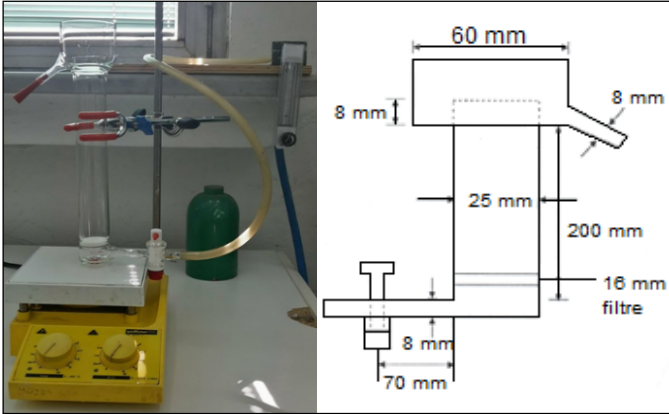
1.2.3. Mikro-flotasyon deneyleri

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 (C₅H₁₁OCS₂K; 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 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 karıştırıcı hücreye 1 dakika boyunca $50 \text{ cm}^3/\text{dk}$ akış hızında 3 Psi basınçlı N_2 gazı verilerek flotasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Flotasyon deneyi sonucunda elde edilen yüzen ve batan ürünler vakum filtrasyon yöntemi ile filtre kağıdında süzülükten sonra etüvde kurutulmuş ve flotasyon verimleri hesaplanmıştır. Flotasyon verimi, yüzen madde ağırlığının besleme ağırlığına oranının yüzde olarak hesaplanmasıdır. Tüm flotasyon deneyleri doğal pH'da ($7,35 \pm 0,03$) ve kıvam süresi (5 dakika), karıştırma hızı (480 devir/dakika), hava akış hızı ($50 \text{ cm}^3/\text{dk}$) parametreleri sabit tutularak yapılmıştır. Şekil 5'de mikro-flotasyon deney düzeneği ve flotasyon hücresinin boyutları verilmiştir.



Şekil 4. Deneysel akış şeması



Şekil 5. Deneysel akış şeması. Sol tarafta mikro-flotasyon deney düzeneği ve flotasyon hücresinin boyutları gösterilmiştir. Sağ tarafta, 60 mm genişlik, 200 mm yükseklik, 8 mm çaplı giriş ve çıkış, 25 mm iç çap, 16 mm filtre ve 70 mm genişlikli taban gibi teknik detaylar belirtilmiştir.

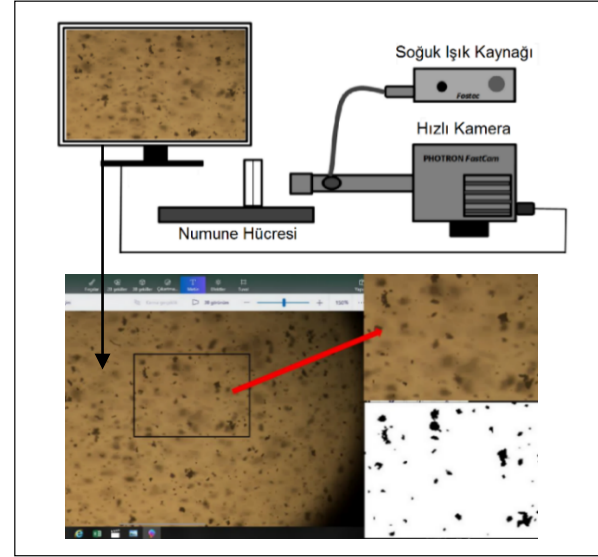
1.2.4. Türbidite deneyleri

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 çözeltiler, numune eklendikten sonra 5 dakika kondüsyonlanmıştır. Hazırlanan çözeltiler 20 cm^3 hacimli cam tüpler (yükseklik: 48 mm, yarıçap: 20 mm) içinde türbidimet-

re 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.

1.2.5. Görüntü alma işlemi

Tane-tane etkileşimlerinin in-situ incelenmesi için tanelerin sıvı içindeki çökme davranışını görüntüleyen bir yöntem izlenmiştir. Bu yöntemde görüntü alma işlemi için PHOTRON marka, Fast-camMini 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 6'da verilmiştir.



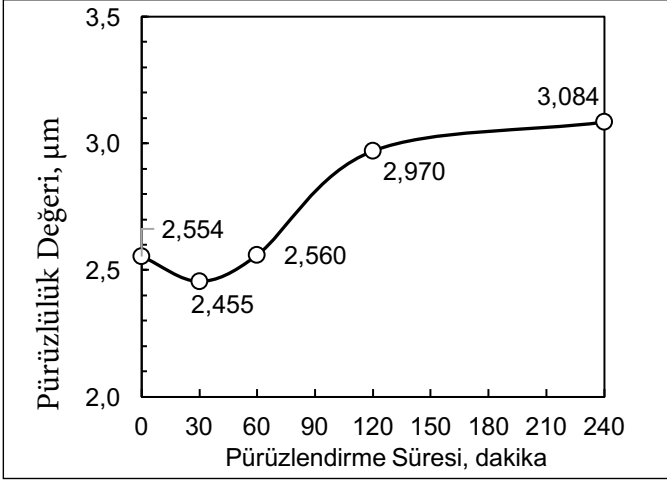
Şekil 6. Hızlı kamera ile görüntü alma ve işleme

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 aktararak, görüntü üzerinden belirlenen bölüm kopyalanarak Excel dosyasına aktarılmış ve görüntü işleme seçeneklerinden yararlanılarak görüntünün arka fonunda kalan gölgeler silinmiş ve taneler netleştirilmiştir.

2. Bulgular ve tartışma

2.1. Pürüzlülük ölçüm sonuçları

Pürüzlülük ölçümlerinde 15 ölçüm yapılmış, ortalama pürüzlülük değeri ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. 60 dakika gibi kısa sürelerde pürüzlülük değerlerinde belirgin bir artış gözlenmediği için 240 dakikaya kadar pürüzlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Standart sapma değerleri 0, 30, 60, 120 ve 240 dakika için sırasıyla 0,149; 0,318; 0,240; 0,304 ve 0,492 olarak belirlenmiştir. Galen numunesinin farklı sürelerde pürüzlendirilmesi sonucu pürüzlülük sonuçları Şekil 7'de verilmiştir.

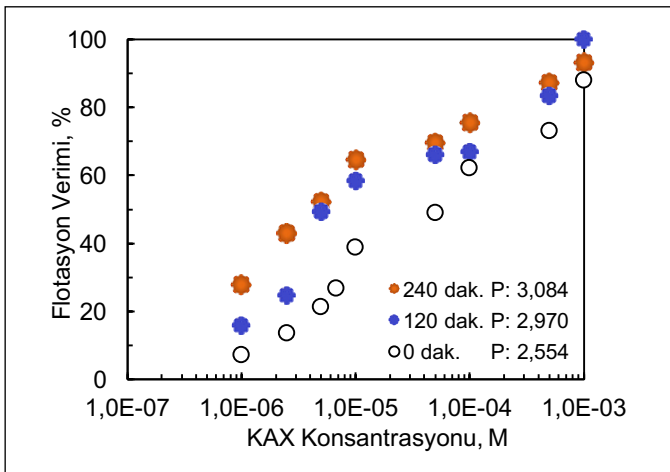


Şekil 7. Pürüzlendirme süresi ile pürüzlülük değeri değişimi (SiC-Galen miktarı oranı:4:1)

Şekil 7'de galenin pürüzlülük değeri 120 dakikaya kadar hızlı bir artış sergilemiş iken 120 ile 240 dakika arasında bu artış hızı yavaşlamıştır. 0 dakikada (pürüzlendirilmemiş) galenin pürüzlülük değerinin 30 ve 60 dakikaya nispeten yüksek olmasının nedeni galenin kübik yapıya sahip olması ve 30 ve 60 dakika pürüzlendirme ile birlikte tanenin doğal pürüzlü yapısının azalmasından dolayıdır. 60 dakikadan sonra artışın sebebi ise pürüzlendirme süresinin artmasıyla mineral kenarlarında/yüzeyinde yeni pürüzlü yüzeyler oluşmasından kaynaklanmaktadır. Pürüzlülük değerlerine bağlı olarak flotasyon çalışmaları için 0, 120 ve 240 dakika pürüzlendirilmiş numuneler seçilmiştir. Tane pürüzlülüğünün etkisini belirleyebilmek amacıyla düşük, orta ve yüksek pürüzlülük derecesine sahip numuneler seçilerek mikro-flotasyon deneyleri yapılmıştır.

2.2. Mikro-flotasyon deneylerinin sonuçları

Flotasyon verimi üzerine tane pürüzlülüğünün etkisini araştırmak üzere farklı sürelerde pürüzlendirilmiş galen numuneleri ile mikro-flotasyon deneyleri yapılmıştır. Deneyler tekrarlı olarak yapılmış ve tekrarlı sonuçların standart sapma değerlerinin en düşük ve en yüksek değişim değerleri, 0 dakika için 0,31-1,41; 120 dakika için 0,65-2,12; 240 dakika için 0,4-2,82 olduğu belirlenmiştir. Bu deneylere ait sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Galen tanelerinin flotasyon verimi üzerine pürüzlülüğün etkisi (Flotasyon süresi: 1 dk., Hava akış hızı: 50 cm³/dk, Karıştırma hızı: 480 dev/dk, doğal pH)

Şekil 8'de pürüzlendirilmemiş (0 dk) ve 120, 240 dakika boyunca pürüzlendirilmiş galen numunelerinin mikro-flotasyon sonuçları incelendiğinde pürüzlendirilmiş numunelerin flotasyon verimi belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Pürüzlendirilmemiş numunenin (0 dakika) 10⁻⁶ M'da flotasyon sonucu %7,19 iken 240 dakika pürüzlendirilmiş numunenin verimi %27,78'dir. Bu sonuca göre pürüzlendirmenin etkisiyle flotasyon verimlerinde 3,8 katlık büyük bir (%20,59) artış olduğu belirlenmiştir. 120 ve 240 dakika pürüzlendirilmiş numunelerin flotasyon verimleri kıyaslandığında genel olarak birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Bunun sebebi pürüzlülük değerlerinin süreye bağlı olarak büyük değişim göstermediği ve birbirine yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

Deney sonucuna göre düşük konsantrasyonlarda pürüzlülüğün etkisi yüksek iken yüksek KAX konsantrasyonlarda pürüzlülüğün etkisinin azaldığı gözlenmiştir. Literatürde benzer olarak, pürüzlülüğün düşük konsantrasyonlarda etkili olduğu, şekil faktörünün ise hem düşük hem yüksek konsantrasyon aralıklarında etkili bir parametre olduğu ortaya konulmuştur (Güven vd., 2016). Rezaei vd. (2010), yaptıkları çalışmada ise flotasyon hız sabitlerindeki artışın pürüzlülük özellikleriyle doğru orantılı olduğunu belirtmişlerdir.

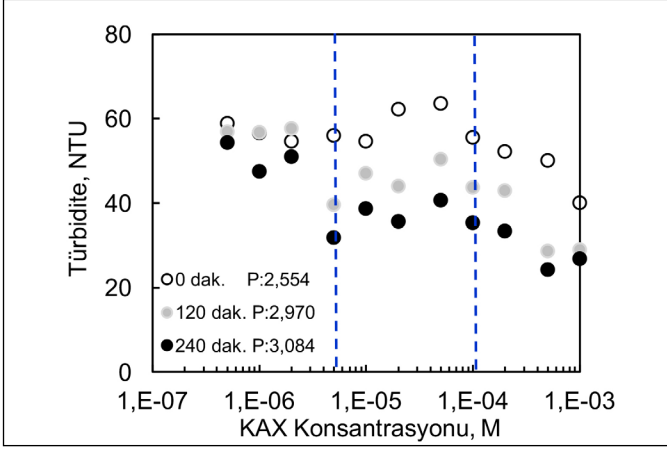
2.3. Türbidite deneyi sonuçları

Tanelerin topaklanma davranışını ortaya çıkarabilmek için flotasyon işlemi kullanılan toplayıcı konsantrasyonlarında türbidite çalışmaları da yapılmıştır. Pürüzlendirilmemiş galen numunesinin farklı sürelerde (5, 15, 30, 60 ve 90 saniye) elde edilen türbidite sonuçları Çizelge 1'de, pürüzlendirmenin türbidite üzerine etkisi ise Şekil 9'da verilmiştir.

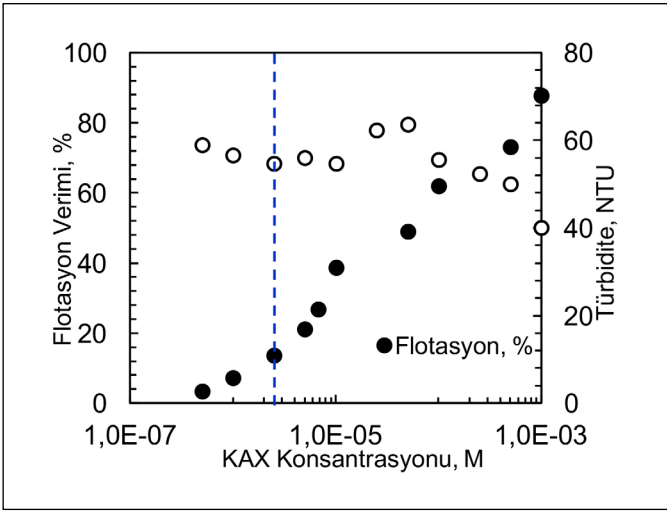
Çizelge 1. -0,074+0,038 mm pürüzlendirilmemiş galen numunesinin farklı sürelerde elde edilen türbidite sonuçları

KAX, M	5 s	15 s	30 s	60 s	90 s
5,E-07	60,1	53,1	51,1	48,5	46,5
1,E-06	58,4	49,3	43,9	35,6	40,4
2,E-06	56,6	48,8	41,3	39,9	38,6
5,E-06	57,9	47,6	42,2	40,7	39,5
1,E-05	56,9	48,1	42,7	40,1	39,1
2,E-05	63,7	65,2	57,2	50,7	47,2
5,E-05	66,8	58,3	54,5	53,4	52,7
1,E-04	59,1	58,7	56,1	57,7	57,4
2,E-04	55,8	51,9	48,6	47,7	47,8
5,E-04	60,6	54,6	52,2	51,1	50,5
1,E-03	60,0	55,7	52,3	51,5	51,0

Tane pürüzlülüğü arttıkça tanelerin topaklanmasında, özellikle yüksek konsantrasyonlarda önemli ölçüde artış olduğu Şekil 9'da gösterilmiştir. 1.10⁻⁵ M KAX konsantrasyonunda, pürüzlülük değeri 2,554 olan pürüzlendirilmemiş numunenin ortalama türbidite değeri 54,77 NTU iken, pürüzlülük değeri 3,084 olan 240 dakika pürüzlendirilmiş taneler için bu değer 38,77 NTU'ya gerilemiştir. Türbidite deneyleri sırasında pürüzlü tanelerin topaklandığı gözlenirken, pürüzlendirilmemiş tanelerde belirgin bir topak oluşumu gözlenmemiştir. Türbidite çalışmaları ve deneysel gözlemler, pürüzlülüğün topaklanma oluşumuna neden olduğu ve topaklanmayı artırdığını göstermiştir. Flotasyon verimleriyle türbidite sonuçlarının ilişkisi ise Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 9. Pürüzlendirilmemiş ve pürüzlendirilmiş galen numunesinin türbidite sonuçları



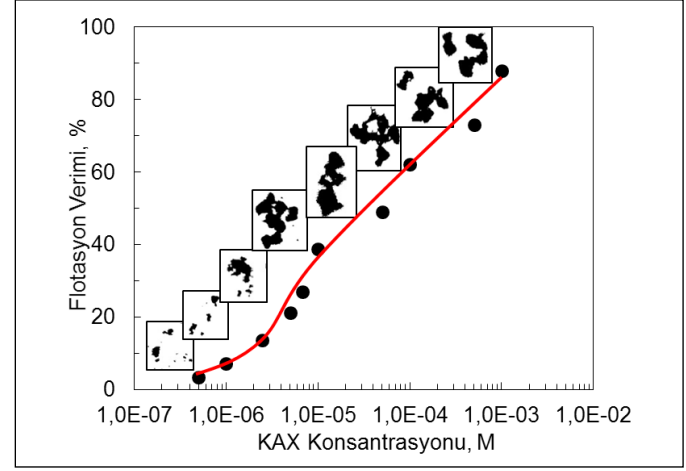
Şekil 10. Galen numunesinin KAX konsantrasyonuna bağlı flotasyon verimi-türbidite ilişkisi

Şekil 10, flotasyon verimi arttıkça türbidite değerinin genel olarak azaldığını göstermektedir. Flotasyon verimleri incelendiğinde; $2,5 \cdot 10^{-6}$ M KAX konsantrasyonunda tane-tane etkileşimlerinin artması sonucu flotasyon veriminin hızla arttığı büküm noktası net olarak görülmektedir. Galen minerali için bu büküm noktasının çok keskin olmamakla birlikte $2,5 \cdot 10^{-6}$ M'da oluştuğu belirlenmiştir. Büküm noktası ile Kritik Topaklanma Konsantrasyonu (KTK) mukayese edilmiş ve mavi kesikli çizgilerle belirtilmiştir. Büküm noktası ve KTK noktalarının ($2,5 \cdot 10^{-6}$) örtüşmediği görülmektedir. Yani büküm noktasında flotasyon veriminin hızla arttığı gözlenirken, topaklanmayla birlikte türbidite değerinin hızla azalmadığı gözlenmiştir. Bunun sebebinin, kullandığımız numunelerin saflığının düşük olması ve numunede bulunan galen ve sfalerit minerallerinin yoğunluk farklarından dolayı kademeli çökme gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Büküm noktasının, oksitli ve silikatlı mineraller için hemimisel oluşumuna bağlı olduğu düşünülse de, sülfürlü mineral+KAX sisteminde hemimisel oluşumundan değil de metal-toplayıcı etkileşiminden kaynaklandığı öne sürülmektedir (Uysal vd., 2021). Bu çalışma da, galen gibi sülfürlü minerallerin flotasyonunda metal-toplayıcı etkileşiminin daha önemli olduğu değerlendirilmektedir. Sülfürlü minerallerde büküm noktası oluşum mekanizması, toplayıcı moleküllerinin mineral yüzeylerindeki etkileşimini artırmasıyla, topak oluşumunun da artması ve flotasyon veriminin buna bağlı ani yükseldiği şeklinde açıklanabilmektedir.

2.4. Görüntü analizi

Flotasyon verimindeki ani artışın nedenini daha net açıklayabilmek amacıyla flotasyon işleminde kullanılan herbir konsantrasyonda hazırlanan galen pülplerinin hızlı kamera görüntüleri çekilmiştir. Bu çekilen görüntüler işlenerek elde edilen görüntülerle flotasyon-topaklanma ilişkisi ortaya konulmuş ve Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Galen numunesinin KAX konsantrasyonuna bağlı flotasyon verimi-topaklanma ilişkisi (Flotasyon süresi: 1 dk, Hava akış hızı: $50 \text{ cm}^3/\text{dk}$, Karıştırma hızı: $480 \text{ dev}/\text{dk}$, doğal pH)

Flotasyon sonuçlarıyla hızlı kamera görüntülerinin de uyumlu olduğu Şekil 11'de görülmektedir. $1 \cdot 10^{-4}$ M KAX konsantrasyonuna kadar topaklanmanın arttığı, $1 \cdot 10^{-4}$ M konsantrasyon değerinden sonra topaklanmada çözümler gözlenmiş ve buna bağlı olarak flotasyon veriminin $5 \cdot 10^{-4}$ M'da düştüğü gözlenmiştir. $1 \cdot 10^{-3}$ M'da ise daha küçük zincir formda uç uca bağlanmaların gözlendiği ve kuvvetli bir kollektör olan KAX'ın selektiviteyi azaltmasından dolayı flotasyon veriminde artış olduğu değerlendirilmektedir.

Hızlı kamera görüntülerinden edinilen topaklanma oluşumuna ait genel kanı, galen gibi levhamsı veya uzun taneli minerallerde topaklanmanın zincirleme formda uçuca bağlanma şeklinde olduğudur. $1 \cdot 10^{-4}$ M konsantrasyondan sonra oluşan topakların, büyüdükçe duraylılığını kaybederek uç uca bağlandığı noktalardan koparak küçüldüğü de gözlenmiştir. Hızlı kamera görüntülerinde, bazı tanelerin kabarcığa yapışmadan önce metal-toplayıcı etkileşimine bağlı olarak topaklandığı da belirlenmiştir.

Sonuçlar

Çalışma kapsamında farklı pürüzlülük değerlerine sahip galen numunelerinin flotasyon ve topaklanma davranışları incelenmiştir. Flotasyon verimi-konsantrasyon eğrisinde rastladığımız büküm noktası ve büküm noktası oluşum mekanizması araştırılmıştır. Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Pürüzlülük değeri arttıkça flotasyon veriminin önemli miktarda arttığı ve pürüzlülük arttıkça flotasyon verim-konsantrasyon eğrisinin sola doğru ötelenildiği tespit edilmiştir.

2. Pürüzlülük etkisinin düşük konsantrasyonlarda daha etkin, yüksek KAX konsantrasyonlarında ise azaldığı belirlenmiştir. Bunun nedeninin; kullanılan numunelerin çok yüksek saflıkta olmaması ve yüksek konsantrasyonlarda kuvvetli bir toplayıcı olan KAX'ın selektiviteyi azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3. Türbidite deneylerinde pürüzlülük arttıkça türbidite değerinin ciddi oranda düştüğü, pürüzlü tanelerin topaklanmaya daha eğilimli olduğu belirlenmiştir.

4. Sonuç olarak galen için pürüzlülüğün etkin olduğu, flotasyonda daha düşük toplayıcı konsantrasyonlarında daha yüksek verim elde edilebileceği bu çalışmada gösterilmiştir. Bu sayede tanelerin tercihli üretimi ile hem teknik hem de ekonomik açıdan daha verimli hale getirilebileceği belirlenmiştir.

Teşekkür

Yazarlar çalışmaya verdiği destekten dolayı TÜBİTAK (117M659 no'lu Proje ve TÜBİTAK 2218) ve projede bursiyer olarak görev alan Arş. Grv. Berivan Tunç'a teşekkür ederler.

Kaynaklar

Chandra, A.P., 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.

Fuerstenau, D.W., Healy, T.W., Somasundaran. P. 1964. The role of the hydrocarbon chain of alkyl collectors in flotation. *Transactions of the Society of Mining Engineers of AIME*. 229, 321-24.

Fuerstenau, D.W. 1995. A century of developments in the chemistry of flotation, In *Froth Flotation: A Century of Innovation*. Editör: Fuerstenau, M.C., Graeme, J., Yoon, R.H. Michigan: SME Publication.

Fuerstenau, D., Pradip, P. 2005. Zeta Potentials in the flotation of oxide and silicate minerals. *Advances in Colloid and Interface Science*. 114-115, 9-26.

Güven, O., Çelik, M.S., Drelich, J. 2015. Flotation of methylated roughened glass particles and analysis of particle-bubble energy barrier. *Minerals Engineering*. 79, 125-132.

Güven, O., 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.

Güven, O., Karakas, F., Kodrazi, N., Çelik, M. S. 2017. Dependence of morphology on anionic flotation of alumina. *International Journal of Mineral Processing*. 156, 69-74.

Güven, O., Serdengecti, M.T., Tunc, B., Ozdemir, O., Karaagaciloglu, I.E., Çelik, 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.

Rahimi, M., Dehghani, F., 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.

Rezai, B., Rahimi, M., Aslani, M.R., Eslamian, A., Dehghani F. 2010. Relationship between surface roughness of minerals and their flotation kinetics. In *Proceedings of the XI International Mineral Processing and Technology Congress*. 232-238.

Somasundaran, P., Fuerstenau, D.W. 1996. Mechanism of alkyl sulfonate adsorption at the alumina-water interface. *J. Phys. Chem.* 70, 90.

Ulusoy, U., Yekeler, M. 2005. Correlation of the surface roughness of some industrial with their wettability parameters. *Chemical Engineering and Processing*. 44, 557-565.

Uysal, T., Guven O., Ozdemir, O., Karaagaciloglu, I.E., Tunç, B., Çelik, M.S. 2021. Contribution of particle morphology on flotation and aggregation of sphalerite particles. *Minerals Engineering*. 165, 106860.

Yekeler, M., Ulusoy, 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.