
MADEN MÜHENDİSLİĞİ DEĞERLENDİRMELERİ

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Emrah DURGUT

Maden Mühendisliği Değerlendirmeleri

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Emrah DURGUT

yaz
yayınları

2025

Maden Mühendisliği Değerlendirmeleri

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Emrah DURGUT

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5838-87-2

Ekim 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Seramik Granüllerinin Akış Özelliklerine Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi.....	1
<i>Emrah DURGUT</i>	
Kaolin Cevherinin Özelliklerinin, Kullanım Alanlarının, Madencilik, Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme İşlemlerinin Değerlendirilmesi.....	22
<i>Fatma AKÇAY</i>	
Kalay (Sn) Cevherleşmeleri ve Zenginleştirme Yöntemleri.....	42
<i>Seda DEMİRCİ</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

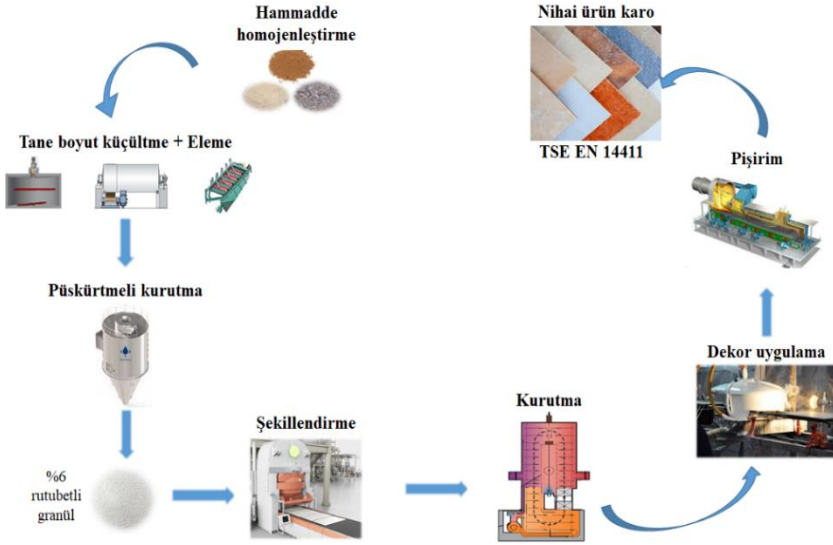
SERAMİK GRANÜLLERİNİN AKIŞ ÖZELLİKLERİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ

Emrah DURGUT¹

1. GİRİŞ

Seramik karolar, içinde yaşadığımız konutların yer ve duvar yüzeylerinde kaplama malzemesi olarak kullanılan inorganik içerikli ürünlerdir. Seramik karolar gelişen teknolojiyle birlikte sırlı, sırsız, duvar-yer-granit (porselen) iç-dış mekân olmak üzere çeşitli sınıflarda üretilmektedir. Seramik üretiminde bünye önemli bir yer kaplamaktadır. Seramik bünyeler farklı hammaddelerin reçetelerde belirlenen oranlarda hazırlanmasıyla oluşturulmaktadır. Bu aşamada hammaddeler homojenizasyon, kırma, öğütme, çamur hazırlama ve bu çamurun püskürtmeli kurutucu vasıtasıyla belirlenen rutubete ulaşmaya kadar kurutularak preste şekillendirilebilecek granül masse elde edilmesi proseslerine tabi tutulmaktadırlar. Şekillendirilen ham karolar kurutucularda mukavemetleri arttırılmak üzere rutubet içeriği %0.5'in altına düşürülmektedir. Sonrasında engop, sır, desen uygulama gibi dekorasyon işlemleri yapıldıktan sonra pişirilerek TSE EN 14411 standardına uygun olarak kullanıcılara gönderilmektedir (Şekil 1).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çan Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, emrahdurgut@comu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4637-7087.



Şekil 1. Seramik karo üretim süreci genel akım şeması

Bünyelerin kimyasal, mineralojik özelliklerinin yanı sıra granül özelliklerinin de üretim sürecine çeşitli etkileri bulunmaktadır. Günümüzde seramik karoları uygun geometrilere şekillendirmek için, ince boyutlu hammadde karışımlarının %5-6 rutubetli olacak şekilde sıkıştırıldığı presleme teknikleri tercih edilmektedir. Seramik bünyeleri oluşturan hammadde karışımları, sinterleme kapasitelerini artırmak için genellikle mikrometre boyut aralığına kadar öğütülmektedir. Akışkanlığı optimize etmek ve öğütülmüş tozların silolarda hem yığın yoğunluğunu hem de depolama kapasitesini artırmak için granülasyon işlemi uygulanmaktadır. Granülasyon işleminde, seramik çamuru atomize edilmek suretiyle püskürtülerek 550-600°C'deki sıcak hava akımı içinde kurutulmakta ve püskürtmeli kurutucu haznesi içerisinde aşağıya doğru düşmektedir. Püskürtmeli kurutucudaki sıcak gaz akımına karşı serbest düşüşüyle, bünye yapısındaki su buharlaşarak içi boş küreler şeklinde granüller oluşmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Ham seramik granüllerinin gösterimi

Granüllerin kullanım açısından önemli iki özelliği akışkanlık ve sıkıştırılabilirliktir. Pres kalıplarının ve siloların doldurulması için pürüzsüz yüzeylere ve yüksek kırılma mukavemetine sahip küresel şekilli granüller uygun olacaktır. Bununla birlikte, püskürtmeli kurutma sırasında veya sonrasında topaklanan seramik hammadde tanelerinden oluşan granüller, nispeten geniş bir tane boyutu dağılımına, pürüzlü ve gözenekli yüzeylere sahiptir. Ayrıca seramik granüller, akışkanlığı etkileyen rutubet ve organik kimyasal katkı malzemeleri de içerirler. Seramik granüller üretildikten sonra rutubet homojenizasyonunun sağlanması amacıyla 24 saat dinlendirilmektedir. Sonrasında ise kamyon veya konveyör bant sistemleriyle pres üstü silolarına taşındıktan sonra pres arkasına dökülerek seramik karo üretiminde kullanılmaktadırlar (Şekil 3).



Şekil 3. Seramik karo granüllerinin kamyonla beşiğere dökülmesinin (solda) ve pres arkasına beslenmesinin (sağda) gösterimi

Seramik granüllerinin taşınması, silolara doldurulup-boşaltılması aşamalarında akış özelliklerinin nihai ürün karakteristiği üzerinde etkileri bulunmaktadır. Ham seramik granüllerinin akışında seramik bünye içerisindeki mineral içeriği, mineral boyut dağılımı, asidik/bazik karakterli oluşu, granül tane boyutu dağılımı, şekli, rutubeti gibi etkenlerin yanında silo tasarımıyla ilgili parametreler de önemlidir. Seramik granül silolarındaki akış problemleri silo ve aktarım noktaları gibi yerlerde tıkanmalara yol açarak üretim kayıplarına neden olmaktadır. Bu çalışmada seramik granüllerinin akışını etkileyen parametreler, test yöntemleri ve etki mekanizmaları anlatılmaya çalışılmıştır.

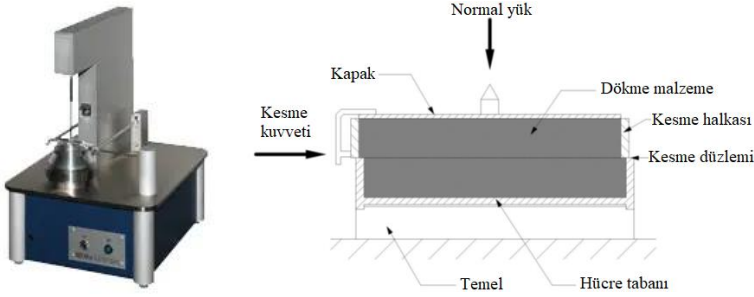
2. AKIŞ ÖZELLİĞİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Seramik masse granüllerinin silolara doldurulması, stoklanması, boşaltılması, pres kalıplarına boşaltılması aşamalarında taşıma amaçlı birçok aktarma işlemi yapılmaktadır. Bu noktalarda iyi bir granül akışı hem silolardaki birikme ve tıkanmaların önüne geçerken hem de üründe oluşabilecek hataları engellemektedir. Seramik granüllerinin akış özelliklerini etkileyen ekipman ve malzemeye ilgili çeşitli özellikler vardır. Ham seramik masse granüllerinin akış

özelliklerini belirlemek için aşağıdaki testlerin bir kısmı veya tamamı gerçekleştirilebilmektedir.

2.1. Kesme Mukavemeti

Farklı tane boyutlarına sahip bir granül masse yığınının akışı sırasında, iri taneli yığınlar bir bütün olarak hareket ederken, ince taneler birbiri üzerinde kaymaktadır. Granül akışının mukavemeti de ifade eden boyut dağılımıyla ilgili bir parametredir. Granüllerin sürtünmeye karşı direncini ölçmek suretiyle bu durumu simüle etmek için yüzey ve alt tabakaya paralel olarak uygulanan sabit bir yük altında kesme testleri yapılmaktadır. Doğrudan kesme mukavemetini belirlemek için Jenike Kayma Testi Hücresi, ELE testi hücresi, Schulze halka kesme hücresi gibi otomatik veya yarı otomatik cihazlar kullanılmaktadır (Shi ve diğ., 2018).



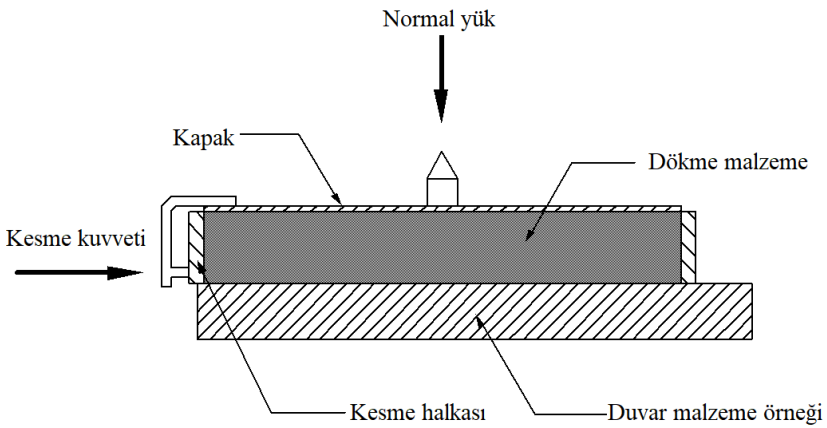
Şekil 4. Jenike doğrudan kesme test cihazı (solda) ve Jenike testi hücre kesit görünümü (sağda)

Şekil 4'te görülen Jenike doğrudan kesme test cihazı, dairesel kesitli bir kesme hücresiyle donatılmıştır. Bu hücrede bir yükleme sistemi vasıtasıyla hücreye dik olarak normal yük uygulanmaktadır. 2.5 mm/dk hızında yatay olarak hareket eden elektromekanik olarak tahrik edilen bir yükleme sapı vasıtasıyla kesme hareketi sağlanmakta ve kesme kuvveti bir gerilimölçer yük hücresiyle ölçülerek bilgisayar veri toplama sisteminde gösterilmektedir. Dökme seramik granülün farklı durumlardaki

kesme davranışlarının incelenmesi için farklı normal yüklerde kesilerek bir dizi akma serisi oluşturulur. Her bir anlık akma durumu için en az altı farklı kesme testi gerçekleştirilir (Jenike, 1976). Dökme granül massenin stoklama süresinin üzerindeki etkisi, kesme test cihazıyla birlikte bir konsolidasyon tezgahı kullanılarak belirlenebilir. Deney sırasında haznede bulunan numuneler, belirli bir basınç altında ve gerekli süre boyunca bir konsolidasyon düzlemine yerleştirilerek kesilir. Buradan üretilen sonuçlar ışığında, dökme malzemenin çeşitli akma özellikleri incelenmektedir.

2.2. Granül/duvar Arasındaki Sürtünme

Duvar sürtünmesi, dökme bir katı ile bir silo yüzeyi gibi düzlem arasındaki sürtünmeyi ifade etmektedir. Duvar sürtünme katsayısı veya sürtünme açısı, hem akış hem de mukavemet açısından silo tasarımı ve dökme katının yüzey üzerinde akacağı şut gibi ekipmanların tasarımı için de önemlidir (Scieszka ve Adamecki, 2013). Duvar sürtünme testi ölçümü, doğrudan kesme düzeneğinde granülün granüle temas ettiği hücre tabanı yerine granülün bir duvar malzemesini temsil eden bir yüzeyle temas ettirilmesiyle gerçekleştirilmektedir (**Şekil 5**).



Şekil 5. Duvar akma durumu test düzeneği

Duvar akma durumunu gösteren test boyunca dökme granül masse, bir duvar akma noktası oluşturmak için azaltılmış normal gerilim altında duvar malzemesi boyunca kesilir. Her bir duvar akma noktası için en az üç duvar sürtünme testi gerçekleştirilir. Düşük bir duvar sürtünme açısı, uygulanabilir kütle akışlı hazne tasarımı için özellikle önemlidir. Buradan silo yüzeylerinde granül masse ile kontakt halde bulunacak olan malzeme yüzeyleriyle ilgili bilgi edinilmektedir.

2.3. Sıkıştırılabilirlik

Seramik granüller, pres kalıbı gibi bir hazneye doldurulduğunda yerçekimi ve kohezif kuvvetlerin etkileşimi nedeniyle statik bir dengede bulunmaktadır. Bu doldurma sırasında hacimdeki değişim, tanelerin paketlenme geometrisinin yeniden düzenlenmesiyle sağlanmaktadır. Genel olarak bu tür geometrik yeniden düzenlemeler, gevşek durumdan daha sıkı paketlenmiş duruma geçiş olarak yorumlanmaktadır. Daha sıkı paketlenmiş granüllerin akışını sağlamak sıkışmamış, gevşek duruma göre daha zordur (Kaye ve diğ., 1995).



Şekil 6. Sıkıştırılabilirlik test cihazı (solda) ve sıkıştırma işleminin (sağda) gösterimi

Ham seramik granül malzemenin yığın yoğunluğu bir sıkıştırılabilirlik test cihazı kullanılarak belirlenmektedir. Şekil 6'da görülen cihaz ünitesi, dökme seramik granül masseyle

doldurulmuş farklı derinlik ve çapta bir hücreden oluşur. Öncelikle numuneye bir kapak ve ağırlık taşıyıcı vasıtasıyla yük uygulanmakta ve ardından numunenin sıkıştırılabilirliği bir lineer değişken diferansiyel transformatör vasıtasıyla ölçülmektedir. Numune hacminin, kütlesinin ve uygulanan yüklerin bilinmesi, yığın yoğunluğu ile ana konsolidasyon basıncı arasındaki ilişkinin belirlenmesini sağlamaktadır.

2.4. Nem İçeriği

Tanelerdeki nem türünün, kimyasal bağlı veya fiziksel bağlı olmasına göre yüzey özellikleri belirlemektedir. Ayrıca, hidrasyon ve dehidrasyonla oluşan taneler arası köprüler tarafından bir arada tutulan granüllerin akış özellikleri dolaylı ve kalıcı olarak etkilenmektedir. Nemin etkisi, granüllerin paketlenme derecesine veya gözenekliliğine bağlı olarak ta değişmektedir. Yüksek gözenekli ve kohezif bir malzemedeki nem, akışkanlığı önemli ölçüde etkilemez çünkü sıvı köprüsü oluşmadan tanenin içine nüfuz edebilir (Sun, 2016; Prokes ve diğ., 2024). Granül masse toplam nem içeriği dijital cihazlar vasıtasıyla veya numunenin 105°C'deki etüvde sabit tartıma gelinceye kadar kurutulması vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Şekil 7'de rutubet ölçümünde kullanılan etüv ve dijital rutubet ölçüm cihazı temsili olarak bulunmaktadır.



Şekil 7. Rutubet ölçümünde kullanılan etüv (solda) ve dijital rutubet ölçüm cihazı (sağda)

Genel olarak, granül rutubeti arttıkça, akma kabiliyeti azalmaktadır. Ana nedenlerden biri, taneler arasında oluşan su köprülerinin adsorbe su tabakasının kalınlığının artmasıdır (Fitzpatrick ve diğ., 2004; Franklin, 2012). Ayrıca, artan yüzey rutubetinin oluşturduğu taneler arası kohezyon, yüzey geriliminin artmasına da neden olmaktadır (Abou-Chakra ve Tüzün, 2000).

2.5. Yüzey Pürüzlülüğü

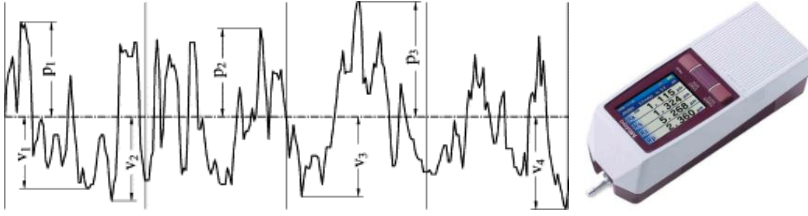
Yüzey pürüzlülüğü, teknik olarak, yüzeydeki çukurluklara bağlı olarak gerçek yüzeydeki en kısa dalga boylarının ölçümü ya da düzensiz kısa dalga uzunlukları biçiminde tanımlanır. Yüzeydeki pürüzlülükteki değişimler, sadece görsel farklılıklara değil, aynı zamanda malzemelerin diğer teknik niteliklerinde de çeşitli değişimlere sebep olur. Bu pürüzlülüğün analizinde farklı parametrelerden yararlanılır (Pelit ve Yaman, 2023). Bunlar arasında;

R_a , belirli bir örnekleme uzunluğu üzerindeki ortalama çizginin altı ve üstünde kalan mutlak düzensizliklerin aritmetik ortalaması;

R_q , bu sapmaların karekök ortalaması;

R_z ise profil boyunca ölçülen en yüksek beş tepe ile en derin beş çukurun ortalama yüksekliği arasındaki fark şeklinde tanımlanır.

Yüzey pürüzlülüğünün incelenmesinde temaslı ve temassız çeşitli araçlar ve teknikler kullanılırken, bu yöntemler arasında en yaygın olanları; elektrikle çalışan iğne uçlu cihazlar, yüzeye temas ederek yapılan ölçümlerin mekanik sistemlerle değerlendiren ve X ışınlarının kullanıldığı yöntemlerdir (Güllü ve diğ., 2003) (**Şekil 8**).



Şekil 8. Yüzey pürüzlülüğü (solda) ve ölçüm cihazının (sağda) gösterimi

Burada seramik granüllerinin tane boyut küçültme yöntemine bağlı olarak şekilleri ve pürüzlülük özellikleri değişmektedir. Diğer yandan granüllerin stoklanması veya taşınması sırasında değişen pürüzlülük değerleri de akış özelliklerini etkileyecektir (Dhami ve Viswanathan, 2024). Esasen, tanelerin yüzey pürüzlülüğündeki artış taneler arasındaki etkileşime katkıda bulunur. Bu da taneler arasındaki iç sürtünmenin artmasına ve dolayısıyla taneler arasındaki kohezyonun artmasına neden olur. Ayrıca, artan yüzey pürüzlülüğünün neden olduğu yüzey enerjisi, taneler arasındaki van der Waals kuvveti kaynaklı temassız çekim kuvvetine katkıda bulunur (Zhang, 2023).

2.6. Tane Boyut Dağılımı ve Şekli

Granül tane boyutu ve dağılımı; akışkanlık, yığın yoğunluğu, duruş açısı ve sıkıştırılabilirlik gibi özellikleri etkileyen önemli bir parametredir. Tane boyutundaki küçük bir değişiklik bile akışkanlıkta önemli değişikliklere yol açabilir. Bu da işletme verimliliğini ve nihai ürün kalitesini etkileyebilir. Tane boyutunun küçültülmesi, genellikle birim kütle başına artan yüzey alanı nedeniyle granül malzemelerin akışkanlığını azaltır. Taneler ne kadar ince olursa, aralarındaki temas alanı o kadar büyük olur ve bu da kohezyon kuvvetlerini artırarak malzemenin topaklanma olasılığını artırır (Kurz ve Münz, 1975). Daha ince ve düzensiz şekle sahip taneler sürtünmeyi artırarak akış şartlarını daha da kötüleştirir. Bunun aksine, daha

büyük ve daha küresel parçacıklar daha kolay akma eğilimindedir (Hann ve Stražišar, 2007). Bu nedenle karıştırma, presleme ve peletleme gibi işlemlerde malzeme akışını optimize etmek ve güvenilir bir performans elde etmek için tane boyutunu ve dağılımını anlayarak dikkatlice kontrol etmek esastır.

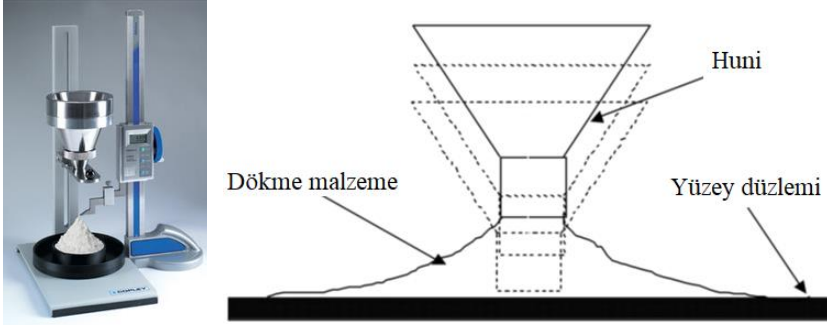


Şekil 9. Tane boyut dağılımının belirlenmesinde kullanılan elek seti ve cihazının gösterimi

Granül masse tane boyut dağılımları Şekil 9’da temsili olarak gösterilen bir elek setine konulduktan sonra elenen granüllerin kuru miktar üzerinden % değerleri olarak ifade edilmektedir. Granüller akış sırasında segregasyona uğrayarak tane boyut gruplarına göre ayrışabilmektedirler. Ayrıca granüllerin akış özellikleri farklı tane boyut gruplarına göre değişmektedir. 250 μm 'den büyük boyutlara sahip olan granüller genellikle orta derecede serbest akışlıdır. 100 μm 'den küçük boyutlara sahip olanlar ise kompakt haldedir ve akış sorunları yaşarlar. 10 μm 'den küçük molekül boyutlarına sahip olanlar ise genellikle kompakt haldedir ve yerçekimi altında akışa karşı koyarlar (Mills ve Sinka, 2013).

2.7. Duruş Açısı, Carr İndeksi ve Hausner Oranı

Granül massenin belirlenen duruş açısı, yatay düzlem ile bir dökme malzeme konisinin eğimi arasındaki ortalama açıdır. Duruş açısını belirlemek için, test edilecek malzemenin belirli bir miktarı, simetrik bir koni oluşturacak şekilde aynı malzemenin pürüzlü bir yüzeyine veya yatağına bir huni aracılığıyla çok dikkatli bir şekilde dökülür. Prosedürün bir örneği Şekil 10'da görülmektedir. Yatay düzlem ile koninin eğimi arasındaki açı koninin dört tarafında ölçülür. Bu prosedür üç kez tekrarlanır ve nihai duruş açısı kaydedilen tüm açıların ortalama değeri olarak belirlenir.



Şekil 11. Duruş açısı test cihazı (solda) ve prosedürünün (sağda) gösterimi

Granüllerin duruş açısının akış özellikleriyle birlikte ifade edilmesinde çeşitli deneysel yöntemler kullanılmaktadır:

- Yığın yoğunluk
- Sıkıştırılmış yoğunluk
- Hausner oranı
- Carr indeksi

Yığın yoğunluk, düzgün bir kaba konulan granül numunesinin kütlesinin, kabın üst yüzeyinin altındaki boşluğun hacmine bölünmesiyle elde edilen değeri ifade etmektedir. Bu

nedenle yığın yoğunluk, hem granül yoğunluğuna hem de granül yatağındaki tanelerin doğrusal olmayan konumuyla alakalıdır. Yığın yoğunluğun birimi “g/ml” veya “kg/cm³” olarak verilir. Granüllerin yığın yoğunluk değerleri numunenin yapısına, işlenmesine ve depolanmasına bağlıdır (Shah ve diğ., 2008). Yığın yoğunluk şu formül kullanılarak hesaplanabilir:

$$\text{Yığın yoğunluk} = \frac{\text{Kuru granül ağırlığı}}{\text{Yığın hacmi}}$$

Sıkıştırılmış yoğunluk, granül numunesini taşıyan kabın mekanik olarak vurulmasıyla elde edilen yoğunluktur. İlk tozun hacmini veya kütlesini gözlemledikten sonra, ölçüm silindirine mekanik olarak kütle değişimi gözlemlenmeyene kadar vurularak son hacim veya kütle okuması yapılarak belirlenir. Sıkıştırılmış yoğunluk aşağıdaki denklemle hesaplanabilir;

$$\text{Sıkıştırılmış yoğunluk} = \frac{\text{Kuru granül ağırlığı}}{\text{Sıkıştırılmış hacim}}$$

Sıkıştırılabilirlik, Carr indeksi olarak da ifade edilmektedir. Carr indeksi, toz akış özelliklerini tahmin etmek için kolay, hızlı ve tercih edilen bir tekniktir. Granül malzemenin yığın yoğunluğu; şekil, boyut, yüzey alanı, nem gibi etkenlerin birlikte uyumunun ikincil bir ölçüsüdür (Fuentes-González ve diğ., 2014). Aşağıdaki denklem uygulanarak hesaplanabilir;

$$\text{Carr indeksi (\%)} = \left[\frac{\text{Sıkıştırılmış yoğunluk} - \text{Yığın yoğunluk}}{\text{Sıkıştırılmış yoğunluk}} \right] \times 100$$

Hausner oranı, toz akış kolaylığının bir göstergesidir. Sıkıştırılmış yoğunluğun, yığın yoğunluğa oranıdır. Hausner

oranı değeri ne kadar düşükse, akış karakteristiği o kadar iyidir (Zhou ve diğ., 2009). Şu formül ile hesaplanabilir:

$$\text{Hausner oranı} = \frac{\text{Sıkıştırılmış yoğunluk}}{\text{Yığın yoğunluk}}$$

Katı partiküllerin duruş açısı, Carr indeksi ve Hausner oranına göre akış özelliklerinin tahmini ise Tablo 1'de belirtilmiştir (Sharma ve diğ., 2021).

Tablo 1. Duruş açısı, Carr indeksi ve Hausner oranına göre akış durumları (Goh ve diğ., 2018)

Akış	Duruş açısı	Carr İndeksi	Hausner oranı
Müthiş	25-30	<10	1.0-1.11
İyi	31-35	11-15	1.12-1.18
Yeterli	36-40	16-20	1.19-1.25
Orta	41-45	21-25	1.26-1.34
Zayıf	46-55	26-31	1.35-1.45
Çok zayıf	56-65	32-37	1.46-1.59
Çok çok zayıf	>66	>38	>1.60

Duruş açısı 40°'den küçükse tatmin edici akışkanlık, 40°'den büyükse süreklilik gösterir. Düzensiz ve homojen olmayan tanecik yüzeyleri, daha büyük bir duruş açısına neden olurlar. Ayrıca ince granül tane boyutu da, duruş açısını arttırmaktadır (Al-Hashemi ve Al-Amoudi, 2018).

3. GENEL DEĞERLENDİRME

Seramik karo üretimi, hammadde hazırlığından başlayarak şekillendirme, dekorasyon ve pişirme aşamalarını içeren çok aşamalı bir prosestir. Bu süreçte kullanılan seramik granüller, üretim verimliliği ve nihai ürün kalitesi açısından

kritik öneme sahiptir. Seramik granüller, seramik çamurunun püskürtmeli kurutucuda atomize edilmesiyle elde edilmekte; bu sayede küresel yapıda, homojen rutubet içeriğine sahip ve preslemeye uygun özellikler kazanmaktadır. Granül malzemenin silo, konveyör ve presleme gibi üretim hattı üzerindeki hareketliliği sırasında gösterdiği akış davranışı, çeşitli fiziksel ve kimyasal parametrelerden etkilenmektedir. Bu çalışma kapsamında, seramik granüllerinin akış özelliklerini etkileyen temel faktörler incelenmiştir. Bu faktörler arasında kesme mukavemeti, duvar sürtünmesi, sıkıştırılabilirlik, nem içeriği, yüzey pürüzlülüğü, tane boyutu ve şekli yer almaktadır. Ayrıca duruş açısı, Carr indeksi ve Hausner oranı gibi göstergeler kullanılarak granül malzemenin akışkanlık karakteristikleri değerlendirilmektedir.

Granüllerin akışkanlığı; tanecikler arası kohezyon, yüzey enerjisi, rutubet seviyesi ve geometrik yapı gibi etmenlerle doğrudan ilişkilidir. Özellikle granül şekli ve tane boyutu dağılımı, presleme öncesi homojen dolgu sağlanmasında belirleyici olmaktadır. Seramik granüllerinin tane boyut dağılımının ürün kalitesindeki sürekliliğin sağlanması açısından aynı oransal dağılımda olması çok önemlidir. Bu bağlamda seramik granüllerinin sistem içerisinde akışı sırasında segregasyona (tane boyuta göre ayrışma) uğraması ürün kalitesinde çatlak, mukavemet azalması, ebat değişimleri gibi sorunlara neden olacaktır. Segregasyon problemi üzerinde granül özellikleri, besleme-boşaltma yöntemleri ve silo dizaynı gibi parametreler etki etmektedir. Seramik granüllerinin silolara doldurulmasında uygun besleme aparatı seçimi segregasyonun engellenmesinde oldukça işe yaramaktadır. Doldurma sırasında büyük taneler çevreye, küçük taneler ise merkeze yönelmektedir. Huni türü akışta bu ayrışma korunur ve proseslerde ürün kalitesini olumsuz etkiler. Buna karşılık, kütle akışlı silolarda malzeme bütün kesit boyunca hareket ettiğinden, segregasyon etkisi

minimize edilmektedir. Ayrıca, köşeli silolarda ortaya bir dağıtıcı koyarak kenarlara doğru besleme yapmak doldurma sırasında segregasyonu engellemektedir. Siloya malzeme beslemesi sırasında kullanılan dağıtıcı türleri ve bulundukları konumlar değiştirilerek granül taneleri şekil ve boyutlarına göre uygun şekilde dağıtılabilmektedir. Boşaltma sırasında segregasyon probleminin çözülmesi için kullanılacak koninin çapı, silo çapıyla orantısı ve siloya konulacak malzeme birbiriyle ilişkilidir. Silonun konik kısmının açısı silodaki granülün duruş açısından daha dik olmalıdır. Diğer yandan boşaltma kapakları granül boşaltımını en hızlı yapacak şekilde geniş yapılmalıdır. Pres kalıpları doldurulurken olabildiğince hızlı ve az malzeme alacak şekilde tasarlanmalıdır. Granül, silo içerisinden boşalırken serbest düşecektir, dolayısıyla ne kadar az yüzeyle temas ederse segregasyon da o kadar az olacaktır. İç yüzeyi konik silolarda segregasyon problemi dikdörtgen kesitli silolara göre daha azdır. Konik dış açısının 60° 'den fazla olmaması gerekmektedir. Silo şekli dairesel ise giriş dairesel, dikdörtgensel ise silo girişi dikdörtgen olmalıdır yani silo şekliyle uyumlu olmalıdır. Dağıtıcı, silo şeklinden bağımsız olacak şekilde konik olmalıdır. Silo malzeme giriş alanı boşaltım alanıyla uyumlu olmalıdır. Segregasyonun engellenmesi için siloların doldurulmasında kullanılan distribütör ve boşaltılmasında kullanılan çubuk gibi aparatların silonun ve malzemenin türüne göre çalışılıp ona göre tasarlanması gerekmektedir.

Segregasyonun minimize edilmesiyle sürdürülebilir kesme mukavemeti, duvar sürtünmesi ve sıkıştırılabilirlik özelliklerine sahip granüllerle birlikte üretim değişkenlikleri azalacaktır. Granüllerin üretildikleri silolarda bekletilmesiyle rutubet değişkenliklerinin önüne geçilebilmektedir. Bunun için silolarda uygun bekleme süreleriyle granül partilerinin içerisindeki rutubet değişiminin önüne geçilmiş olacaktır. Stabil yüzey pürüzlülüğünün sağlanmasında hammadde kırma ve

öğütme süreci iyi takip edilerek püskürtmeli kurutma aşamasındaki süspansiyon yoğunluğu, püskürtmeli kurutucunun basınç ve sıcaklık değerleri sabit tutulmaya çalışılmalıdır. Bu özelliklerle birlikte uygun yığın ve sıkıştırılmış yoğunluğa sahip akış özellikleri “müthiş” olan granüller hedeflenmelidir.

Sonuç olarak, seramik granüllerinin akış davranışı yalnızca malzeme özelliklerine değil, aynı zamanda ekipman tasarımı ve proses koşullarına da bağlıdır. Üretim süreçlerinde sürekliliğin ve kalite kontrolünün sağlanabilmesi için granül özelliklerinin bütünsel olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Abou-Chakra, H. & Tüzün, U. (2000). Microstructural blending of coal to enhance flowability. *Powder Technology*, 111(3), 200–209.

[https://doi.org/10.1016/s0032-5910\(99\)00285-5](https://doi.org/10.1016/s0032-5910(99)00285-5)

Al-Hashemi, H. M. B. & Al-Amoudi, O. S. B. (2018). A review on the angle of repose of granular materials. *Powder Technology*, 330, 397–417.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.003>

Dhami, H. S. & Viswanathan, K. (2024). Investigating particle morphology, quality, flowability and performance of abrasive-grinding based powders for directed energy deposition. *Powder Technology*, 437, 119533.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119533>

Fitzpatrick, J., Barringer, S., & Iqbal, T. (2003). Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 399–405.
[https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(03\)00147-x](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(03)00147-x)

Franklin, S. V. (2012). Geometric cohesion in granular materials. *Physics Today*, 65(9), 70–71.
<https://doi.org/10.1063/pt.3.1726>

Fuentes-González, K. I., & Villafuerte-Robles, L. (2014). Powder Flowability as a Functionality Parameter Of The Excipient Galeniq 720. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 6(9), 66–74.
<http://innovareacademics.in/journals/index.php/ijpps/article/view/3201/0>

- Goh, H. P., Heng, P. W. S. & Liew, C. V. (2018). Comparative evaluation of powder flow parameters with reference to particle size and shape. *International Journal of Pharmaceutics*, 547(1–2), 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.05.059>
- Güllü, A., Özdemir, A. & Demir, H. (2003). Yüzey pürüzlülüğü ölçme yöntemleri ve mukayesesi. *Teknoloji*, 6(1–2), 79–92. <https://app.trdizin.gov.tr/makale/TXpFME16WTI/yuzey-puruzlulugu-olcme-yontemleri-ve-mukayesesi>
- Hann, D. & Stražišar, J. (2007). Influence of particle size distribution, moisture content, and particle shape on the flow properties of bulk solids. *Instrumentation Science & Technology*, 35(5), 571–584. <https://doi.org/10.1080/10739140701540453>
- Jenike, A.W. 'Storage and Flow of Solids', Bulletin 123, University of Utah, 7th Printing, Revised November 1976.
- Kaye, B. H., Gratton-Liimatainen, J. & Lloyd, J. (1995). The effect of flowagents on the rheology of a plastic powder. *Particle & Particle Systems Characterization*, 12(4), 194–197. <https://doi.org/10.1002/ppsc.19950120406>
- Kurz, H. & Münz, G. (1975). The influence of particle size distribution on the flow properties of limestone powders. *Powder Technology*, 11(1), 37–40. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(75\)80020-9](https://doi.org/10.1016/0032-5910(75)80020-9)
- Mills, L. & Sinka, I. (2013). Effect of particle size and density on the die fill of powders. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 84(3), 642–652. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2013.01.012>

- Pelit, H. & Yaman, Ö. (2023). Aşındırıcı su jeti sisteminde farklı parametrelerle kesilmiş lif levhanın pürüzlülük özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C Tasarım ve Teknoloji*, 11(4), 1046–1054. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1367899>
- Prokes, R., Jezerska, L., Gelnar, D., Zegzulka, J., & Zidek, M. (2024). Internal friction and flowability of clay powder depend on particle moisture, size and normal stress. *Powder Technology*, 446, 120184. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120184>
- Scieszka, S. F., & Adamecki, D. (2013). The importance of wall friction between particulate solids and elastomeric belt. *Powder Technology*, 245, 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.04.031>
- Shah, R. B., Tawakkul, M. A., & Khan, M. A. (2008). Comparative evaluation of flow for pharmaceutical powders and granules. *AAPS PharmSciTech*, 9(1), 250–258. <https://doi.org/10.1208/s12249-008-9046-8>
- Sharma, S., Sharma, T., Deep, M., & Sharma, A. (2021). Techniques to determine powder flow properties. *CGC International Journal of Contemporary Technology and Research*, 3(2), 199–204. <https://doi.org/10.46860/cgcijctr.2021.06.31.199>
- Shi, H., Mohanty, R., Chakravarty, S., Cabiscol, R., Morgeneyer, M., Zetzener, H., Ooi, J. Y., Kwade, A., Luding, S., & Magnanimo, V. (2017). Effect of particle size and cohesion on powder yielding and flow. *KONA Powder and Particle Journal*, 35(0), 226–250. <https://doi.org/10.14356/kona.2018014>
- Sun, C. C. (2015). Quantifying effects of moisture content on flow properties of microcrystalline cellulose using a ring shear tester. *Powder Technology*, 289, 104–108. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.044>

- TS EN 14411 2016 Seramik karolar - Tarifler, sınıflandırma, karakteristikler, performans sürekliliğinin değerlendirilmesi ve doğrulanması ve işaretleme, Türk Standartları Enstitüsü.
- Van Burkalow, A. (1945). ANGLE OF REPOSE AND ANGLE OF SLIDING FRICTION: AN EXPERIMENTAL STUDY. *Geological Society of America Bulletin*, 56(6), 669. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56)
- Zhang, P., Bi, N. Z., Yu, N. H., Wang, R., Sun, N. G., & Zhang, N. S. (2023). Effect of particle surface roughness on the flowability and spreadability of Haynes 230 powder during laser powder bed fusion process. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 4444-4454. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.173>
- Zhou, Q., Armstrong, B., Larson, I., Stewart, P. J., & Morton, D. A. (2009). Improving powder flow properties of a cohesive lactose monohydrate powder by intensive mechanical dry coating. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 99(2), 969-981. <https://doi.org/10.1002/jps.21885>

KAOLİN CEVHERİNİN ÖZELLİKLERİNİN, KULLANIM ALANLARININ, MADENCİLİK, CEVHER HAZIRLAMA VE ZENGİNLEŞTİRME İŞLEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Fatma AKÇAY¹

1. GİRİŞ

Kil minerallerinin yüzün üzerinde belgelenmiş endüstriyel uygulaması bulunması bu hammaddeleri önemli endüstriyel mineraller yaparken, nano ölçekli karakterizasyon yöntemlerinin gelişmesi kil minerallerinin eşsiz özelliklerinin öğrenilmesini ve endüstriyel uygulamalarının daha da gelişmesini sağlamaktadır. Killer; proses endüstrilerinde, tarımsal uygulamalarda, mühendislik ve inşaat uygulamalarında, çevresel iyileştirmede, jeolojide ve diğer birçok çeşitli uygulamada kullanılmaktadır. Tanım olarak kil terimi; ince taneli, doğal, topraksı malzemeleri ifade etmektedir (Grim, 1942). Kil, bir kayaç terimi olarak ve ayrıca tane boyutu terimi olarak da kullanılır. Tane boyutu terimi olarak, en küçük parçacıklardan oluşan boyut grubu kil fraksiyonu olarak adlandırılır. Wentworth ölçeği, kil tane boyutunu 4 μm 'den daha ince olarak tanımlar (Wentworth, 1922). Bu tanım birçok mühendis ve toprak bilimci tarafından kullanılırken, diğer yandan kil bilimcileri genellikle 2 μm 'yi kil boyutunun üst sınırı olarak kabul ederler. Grim (1968), kil kavramını, genel olarak kil mineralleri olarak bilinen bir grubun bir veya daha fazla üyesinin son derece küçük kristal parçacıklarından oluştuğu

¹ Öğr. Gör., Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çan Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, fatma.akcy@comu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4212-8929.

şeklinde belirtmiştir. Kimyasal anlamda kil mineralleri, sulu alüminyum silikatlardır ve bu minerallerin bazılarında demir ve magnezyum, alüminyumun yerini alır. Bazılarında ise yapıda temel bileşenler olarak alkali ve toprak alkali elementler bulunur.

Kil mineral grupları bu özelliklerine göre kaolin, smektit, paligorskit-sepiolit illit, klorit ve karışık tabakalı killer olarak sınıflandırılmıştır (Martin-Vivaldi ve Robertson, 1971). Kil cevherinin dokusu; bileşenlerin tane boyut dağılımını, tanecik şeklini, kil tanelerinin birbirlerine göre yönelimini ve tanecikleri birbirine bağlayan kuvvetlerin birlikte etkilerini ifade eder. Tane boyut dağılımı ve şekli, kaolin grubu killer için önemli bir parametredir. Taneciklerin yönelimi ve onları birbirine bağlayan kuvvetler, çökme ortamı hakkında çok fazla bilgi verebilir. Günümüzde ise, kil minerallerinin X-ışını difraksiyonu, elektron mikroskobu, kızılötesi spektroskopisi ve diferansiyel termal analiz gibi yöntemlerle özelliklerinin belirlenmesi kil minerallerinin yeni birçok özelliğinin daha fazla öğrenilmesini sağlamaktadır.

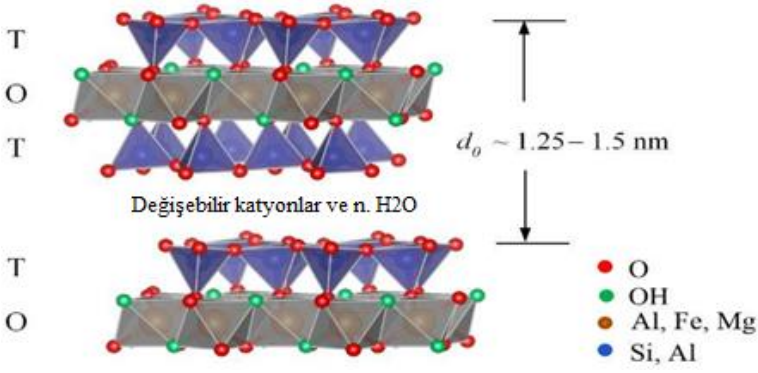
Bu çalışmada kaolin grubu kil minerallerinin yapısındaki safsızlıkların, tane boyut ve şeklinin, mineralojik yapısının, elektriksel yüzey özelliklerinin, iyon değişimi kapasitesinin, adsorpsiyon özelliklerinin, reolojik davranışlarının ve parlaklık/renk gibi fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal özelliklerinin cevher hazırlama/zenginleştirme ve kullanım alanları üzerinde etkileri literatür bilgileriyle desteklenerek araştırılmıştır. Diğer yandan kaolin üretiminde kullanılan madencilik yöntemleri açıklanmıştır.

2. KAOLİN GRUBU KİL MİNERALLERİ ve ÖZELLİKLERİ

Kaolin hem bir kayaç terimi hem de bir mineral terimidir. Bir kayaç terimi olarak kaolin, kayacın ağırlıklı olarak

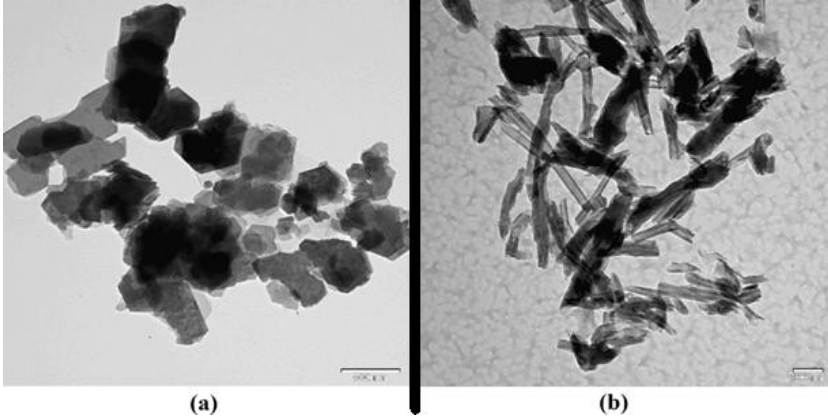
kaolinit ve/veya diğer kaolin minerallerinden oluştuğu anlamına gelir. Kaolin; kaolinit, dikit, nakrit ve halloysit minerallerinin grup adıdır. Kaolinit, açık ara en yaygın kaolin mineralidir. Dikit, nakrit ve halloysit nispeten daha nadirdir. Kaolinit ile birlikte tortul çökellerde oluşum örnekleri olmasına rağmen, bu son üç mineral genellikle hidrotermal alterasyonla oluşmuştur (Fulignati, 2020). Bu grup yapısal olarak, bir tetrahedral tabaka ve bir oktahedral tabakanın tekrarlanmasıyla oluşur. Oktahedral tabaka; alüminyum, demir ve magnezyum atomlarının düzgün sekiz yüzlü moleküler geometriye sahip koordinasyonla düzenlendiği, sıkı bir şekilde paketlenmiş oksijen ve hidroksillerden oluşur. Pozitif değerliği üç olan alüminyum, oktahedral tabakada bulunan katyon olduğunda, yükleri dengelemek için olası konumların sadece üçte ikisi doldurulur. Konumların sadece üçte ikisi doldurulduğunda, mineral dioktahedral olarak adlandırılır.

Pozitif yükü iki olan magnezyum mevcut olduğunda, yapıyı dengelemek için üç konumun tümü doldurulur ve mineral trioktahedral olarak adlandırılır (Kloprogge, 2018). İkinci yapısal birim ise, merkezinde silisyum atomunun bulunduğu düzgün bir dört yüzlü moleküler geometri şeklinde düzenlenmiş dört oksijen veya muhtemelen hidroksilden eşit uzaklıkta olduğu silika tetrahedral tabakayı ifade etmektedir. Bu tetrahedronlar, silika tetrahedral tabaka olarak adlandırılan yapıyı oluşturmak için iki yatay yönde sonsuz olarak tekrarlanan altıgen bir ağ oluşturmak üzere düzenlenmiştir. Silika tetrahedral tabaka ve oktahedral tabaka, oksijenleri veya hidroksilleri paylaşarak birleşir ve bu tabakaların tekrarlanmasına göre kil mineral tabakası olarak adlandırılan yapıları oluşturur (**Şekil 1**).



Şekil 1. Kaolin grubu kil mineralleri yapısal gösterimi (Wang ve diğ., 2020).

Oktahedral ve tetrahedral tabakaların düzeni ve bileşimi, fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki farklılıkların çoğunu açıklamaktadır. Kaolinit için yapısal formül $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ve teorik kimyasal bileşim % 46.54 SiO_2 , % 39.50 Al_2O_3 ve %13.96 H_2O şeklindedir. Morfolojik anlamda ise kaolinit grubu kil mineralleri genellikle kaolinit minerali gibi altıgen plakalar şeklinde oluşurken, halloysit ise tüp şeklinde oluşmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. (a) Kaolinit, (b) halloysit minerallerinin TEM görüntüleri (Durgut ve diğ., 2022a).

Kaolin grubu kil minerallerindeki farklılıklar, birim katmanların üst üste yığılma biçimidir. Birim tabakanın kalınlığı 7.13 Å'dur. Halloysit katmanlar arasında bir su molekülü tabakası ve bazal aralığı 10.25 Å olan hidrate form ve diğeri ise bazal aralığı 7.13 Å olan dehidrate form olmak üzere iki şekilde oluşur. Hidrate formda dehidrate forma göre tabakalar arası 2 mol daha fazla su bulunduğundan dolayı bazal aralıkta artmaktadır. Uluslararası İsimlendirme Komitesi, bu iki formu belirtmek için 7 Å halloysit ve 10 Å halloysit terimlerini önermiştir (Murray, 2006). Kaolin grubu kil mineralleri oluşum itibarıyla ana kayacın yakınlarında istiflendiği için yapısına çok fazla safsızlık girmemekte dolayısıyla diğer elementlerin çok az ikamesine sahip olmaktadır. Bu nedenle, sulu süspansiyonlarında kaolinit tabakası üzerindeki yük minimumdur ve dolayısıyla çok düşük kation değişim kapasitesine sahiptir. Yapıya çok fazla safsızlık girmediğinden dolayı rengi de doğal olan beyaza yakın olmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Kaolin cevherinin temsili bir görüntüsü.

Kaolin grubu kil minerallerinin, yapısındaki alüminyum ve silisyum yerine diğer elementlerin çok az ikamesi olabilir. 0.67 Å iyonik yarıçapına sahip olan ferrik demir, 0.57 Å iyonik yarıçapına sahip alüminyum yerine sınırlı olarak ikame edebilir (McBride, 1988). Biraz alüminyum, tetrahedral tabakada silisyumun yerini alabilir, ancak yine bu ikame çok sınırlıdır. Kaolinit kafesindeki sınırlı iyon değişimi nedeniyle, baz değişim ve adsorpsiyon kapasitesi, smektit ve paligorskit-sepiyolite kıyasla düşüktür. Tipik olarak, kaolinitin baz değişim kapasitesi $1\text{-}15 \text{ meq}/100 \text{ g}$ aralığındadır (Coles ve Yong, 2002). Saf kaolin yatakları, genellikle yüksek katı konsantrasyonlarında iyi akış özellikleri sergilemekle birlikte tane boyut dağılımı, tane şekli, yapıdaki safsızlıkların türü, çözünür tuz içeriği ve kristal yapı gibi faktörler viskozite üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Miranda-Trevino ve Coles, 2003). Bazı kaolinlerin iyi reolojiye sahip olmasının nedenleri, yapıda yük eksikliğinin çok az olması veya hiç olmaması, nispeten düşük bir yüzey alanına ($8\text{-}15 \text{ m}^2/\text{g}$) sahip olmaları, iyi kristal morfolojiye sahip olmaları ve iyi, ancak nispeten geniş parçacık boyutu dağılımı olarak belirtilmiştir (Du ve diğ., 2010).

Kaolinit, yumuşak olması (Mohs sertliği ≈ 1.5) nedeniyle aşındırıcı bir mineral değildir. Bu özellik, birçok endüstriyel uygulamada çok önemlidir çünkü kaolin, temas ettiği hemen hemen tüm malzemelerden daha yumuşaktır ve bu nedenle kullanıldığı ekipman ve makinelerde aşınma/yıpranma oranı düşüktür. Sinterleme sonrası yüksek eğilme dayanımı ve beyaza yakın bir renge sahiptir. Bu özellikler, kaolini çok önemli bir seramik hammadde yapar. Önemli olabilecek diğer fiziksel ve kimyasal özellikler ise, kaolinin nispeten geniş bir pH aralığında (pH: 4-9) kimyasal olarak inert olması, hem ısı hem de elektrik için düşük iletkenliğe sahip olması, hidrofilik olması, suda kolayca dağılması ve kalsinasyonla mükemmel dolgu malzemesi üretilmesidir (Prasad ve diğ., 1991).

3. KAOLİN CEVHERİNİN ARAŞTIRILMASI

Bir kil yatağı keşfedildiğinde, rezerv alanını, yatak kalınlığını, örtü toprağının türünü ve cevherin kalitesini belirlemek için bir sondaj programı başlatılır. Hem karot hem de burğu matkapları, arama ve maden rezervinin geliştirilmesinde kullanılır. Kaolin rezervinin daha detaylı kontrolü için örtü toprağı kaldırıldıktan sonra yakın aralıklı sondajlar yapılmaktadır. Yüzeye yakın yataklanmış kaolin yataklarını değerlendirmek için yaklaşık 1 m çapında ve 30 m derinliğinde kazılmış test kuyularından elle numune alma yöntemi kullanılabilir. Derinde bulunan kaolin yatakları için numune alma işlemi kaolin cevheri bulunan bölgenin temizlendikten sonra kamyonla monteli matkapların kullanılmasıyla gerçekleştirilmektedir (Jarošová ve Staněk, 2021). Kaolin sondajında örtü toprağı, cevherin üst seviyesine ulaşılana kadar bir burğu kullanılarak delinir ve ardından kaolin yatağını delmek için bir karotiyer kullanılır. Maden yatağının boyut ve kalitesinin daha detaylı araştırılması gerekiyorsa sondaj delikleri daha sık olacak şekilde uygulanmaktadır. Sondaj işleminden sağlanan bilgiler örtü toprağının kalınlığı, cevherin türü, kalitesi ve yatak kalınlığı hakkında veri sağlamakta, böylece dekapaj oranı belirlenmektedir. Maden yatağının ekonomik olup olmadığını belirten dekapaj oranı, kaolin kalınlığı üzerindeki örtü toprağının kalınlığını ifade etmektedir ve bu oran ne kadar düşükse, madencilik maliyeti de o kadar düşük olur. Çalışılan bölgede su geliri fazlaysa veya kaolin yatağının hemen altındaki kum kütlelerinde artezyen suyu varsa, potansiyel yeraltı suyu sorunlarını değerlendirmek için de ayrıca sondaj uygulaması gerçekleştirilmektedir. Hidrotermal kaynaklı kaolin veya bentonit yataklarında, sondaj deliği konumları, alterasyon bölgesinin topografyasına, şekline ve boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Diğer yandan, kaolin yatağının hidrotermal olarak yataklanması ya da faylar, kıvrımlar, farklı

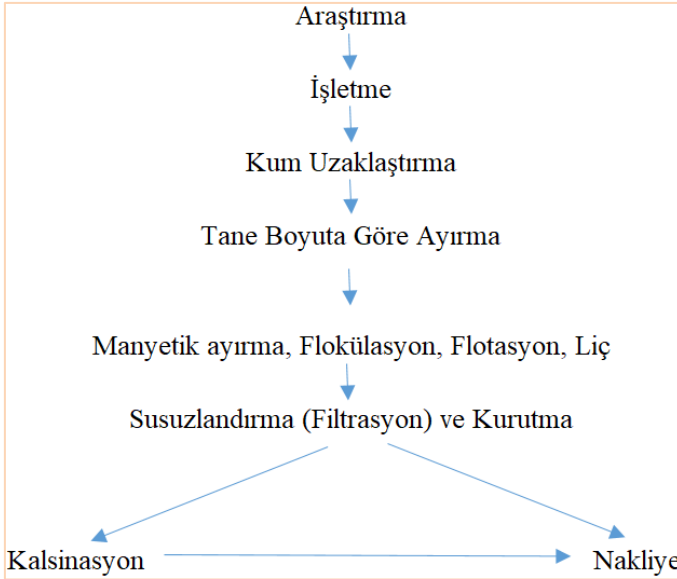
eğimli yataklar tarafından yapısal olarak bölünmesi durumunda sondaj ve numune alma programı çok farklıdır. Bu durumda konusunda uzmanlaşmış bir jeolog veya maden mühendisinin profesyonel tavsiyesi, uygun bir sondaj ve numune alma planı hazırlanmasında işin doğru yapılması açısından çok önemlidir. Çoğu kil yatağının araştırılmasında rezervin boyutunu ve kalitesini belirlemek için oluşturulan sondaj ağı delikler arasındaki mesafe, topografya, jeoloji, yanal genişlik ve su geliri hususları dahil olmak üzere çeşitli faktörlere dayalı oluşturulmaktadır.

4. KAOLİN MADENCİLİĞİ VE CEVHER HAZIRLAMA

Sondaj çalışmalarını takiben bir maden planı belirlendikten sonra arazi temizlenir ve örtü toprağı kaldırılmaya başlanır. Dünya üzerindeki birçok büyük kaolin yataklarında jeolojik oluşum mekanizması dolayısıyla açık ocak madenciligi yöntemleri uygulanmaktadır. Örtü toprağının kaldırılması için büyük arazi kamyonları, hidrolik bekolar ve ekskavatörleri içeren çeşitli dekapaj yöntemleri kullanılır. Örtü toprağının ıslak veya nispeten yoğun olması durumunda bazen dozerler tarafından itilen kendinden yüklemeli sıyrıcılar, dekapaj malzemesini maden alanı dışına boşaltan büyük çekme halatlı ekskavatörler ve bant konveyörler kullanılır. Örtü toprağı kaldırıldıktan sonra, burada kullanılan yöntemlerin hemen hemen aynısı kullanılarak kaolin cevheri çıkarılır (Hanein ve diğ., 2021). Kaolin yatağı içerisinde önemli kalite farklılıkları olabileceğinden dolayı seçimli üretim ve yatak içerisinde ayırma gerekli olabilmektedir. Genel uygulama, müşterinin talep ettiği kaolin cevheri çıkarmak ve uygun şekilde stoklamaktır. Parlaklık, renk, viskozite, kum oranı gibi fiziksel ve kimyasal kriterlerin oluşturduğu özelliklere bağlı kriterler belirlenerek çeşitli stoklar oluşturulur.

4.1. Kaolin Cevherinin Sulu Ortamda Zenginleştirilmesi

Satış için istenilen kriterlere sahip olmayan kaolin stoklarının daha ekonomik olarak değerlendirilmesi için yaş zenginleştirme işlemleri uygulanmaktadır (Omiogbemi ve diğ., 2022; Huang ve diğ., 2024; Kizi ve Kizi, 2025). Stok sahasından gelen kaolin, su ve dispersant ilave edilerek blungere (karıştırıcıya) yüklenecek karıştırılmaktadır. Bu esnada kaolin cevheri sulu ortamda dispers hale gelirken plastik olmayan mineraller ise iri boyutta kalmakta ve karıştırma sonrası elenerek ayrılmaktadır. Blunger'daki katı madde oranı cevheri oluşturan süspansiyonun viskozitesine bağlı olacak şekilde farklı pülpte katı oranlarında (PKO) ayarlanabilmesine rağmen bu oran endüstride genellikle %40-60 arasında değişmektedir. Yaş zenginleştirme için genelleştirilmiş bir akış şeması Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Kaolin cevherinin genel bir yaş zenginleştirme akım şeması.

Müşterinin talebine göre uygun özellikte olan kaolin cevherleri doğrudan kullanılabilirdiği gibi farklı özelliklere sahip stoklar istenilen kaliteye ulaşmak amacıyla karıştırılarak da kullanılabilir. Stokların sulu ortamda homojenleştirme işleminde sabit veya mobil karıştırıcılar kullanılmaktadır. Bu karıştırıcılar kaolin topraklarını ince taneciklere ayıran yüksek beygir gücüne sahip hızlı karıştırıcılardır. Kaolin topraklarını dağıtmak için karıştırıcılar kullanılırken bu tanecikleri stabil halde birbirinden ayrı tutmak için sisteme dispersantlar da eklenmektedir aksi takdirde kaolin tanecikleri yeniden toplanmaktadır (Durgut, 2022b).

Kaolin tabakasının kenarlarında bulunan pozitif (+) yükler ve yüzeyinde bulunan negatif (-) yükler tarafından elektriksel olarak çekilerek büyük topraklar oluşturur. Sulu ortamlarda kaolinit plakaları yüzeylerindeki yük dengesizliğini nötrlemek için toprak halde bulunmaktadır. Ancak ortama negatif (-) yüklü iyonlar ilave edildiğinde bu iyonlar pozitif yüklü kenarlara iyonik anlamda bağlanarak kaolinin tüm yüzeyinin negatif (-) yüklü olmasını sağlayacaktır. Bu durumda taneler birbirini iterek dispers hale gelecektir. Bu amaçla kullanılan en yaygın kimyasal dağıtıcılar; sodyum silikat, sodyum heksametafosfat, tetrasodyum pirofosfat ve sodyum poliakrilat'tır (Li ve diğ., 2022; Ma ve diğ., 2023). Eklenen dağıtıcı miktarı kaolin cevherinin yapısına bağlı olarak yaklaşık kaolinin kuru ağırlığına göre %0.2-0.6 oranındadır.

Kaolin bir süspansiyon halinde dağıtıldıktan bir sonraki adım içerisindeki iri boyutlu plastik olmayan safsızlıkların uzaklaştırılmasıdır. Bu safsızlıklar sulu ortamda karıştırma sonrası 44 µm'den daha iri boyutlu tane grubunu ifade etmektedir (Pérez-Arévalo ve diğ., 2025). Kaolin cevherinin içerisindeki bu safsızlıklar genellikle kuvars kumu, mika ve bir dizi ağır minerallerden oluşur (Raghavan ve diğ., 2003). Safsızlıkların ayrılması için yaygın bir yöntem, süspansiyonun

kütüklü dağıtıcı-yıkayıcılardan geçirilmesidir. Kütüklü dağıtıcı-yıkayıcı sisteminde kil minerallerinin aksine sulu ortamda dağılmadan kalan iri boyutlu tanecikler öncelikle dibe çökmekte sürüklenme aparatlarıyla çıkarılarak sistemden uzaklaştırılmaktadır. Süspansiyon içerisinde yüzen ince boyutlu kaolin cevheri ise sistemin diğer ucundan taşarak alınmaktadır. Pul şeklinde olan mika, kuvars ve ağır mineraller kadar yavaş çökmediğinden yüzen kaolin cevheriyle birlikte taşarak yapıda olabilecek diğer safsızlıklarla birlikte titreşimli bir elekte ayrılmaktadır. Safsızlıklarından arındırılan konsantre kaolin süspansiyonu stok havuzlarına gönderilmektedir. Stok havuzları, ayrıca kaolinlerin viskozite ve parlaklık özelliklerini değerlendirmek için de kullanılır.

Konsantre kaolin süspansiyonunun boyuta göre sınıflandırılmasında hazne (bowl) tipi santrifüjler, hidroseparatorler veya hidrosiklonlar kullanılmaktadır. Tane boyutlarına göre sınıflandırılan kaolin süspansiyonlarının filterpreste su içeriği bir miktar uzaklaştırıldıktan sonra kurutularak dolgu killeri elde edilmektedir. İnce boyutlu süspansiyon daha sonra demir ve titanyum minerallerini ayıran yüksek yoğunluklu bir manyetik ayırıcıdan geçirilerek manyetik karakterli mineraller uzaklaştırılmaktadır. Manyetik ayırma işlemi, 2-6 Tesla arasında değişen alan kuvvetlerine sahip güçlü mıknatısların kullanılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu ayırıcılardaki manyetik alan şiddeti, sıvı helyum soğutmalı süper iletken bobinler kullanılarak elde edilir ve bu da elektrik gücünde önemli tasarruf sağlar. Kaolin süspansiyonu, enerji verildiğinde manyetik mineralleri ayıran ve manyetik olmayan kaolinitin matristen geçmesine izin veren oldukça sıkıştırılmış ince paslanmaz çelik yün matrisi içerisinden geçirilmektedir. Bu aşamada manyetik olmayan kaolin cevheri matristen geçmekte manyetik karakterli mineraller ise manyetik alandan etkilenecek matris tarafından çekilmektedir. Manyetik alan ve ürün

giriş/çıkışı periyodik olarak kapatılarak matris temizlenmekte ve böylece kaolin cevheri içerisindeki manyetik mineraller uzaklaştırılmaktadır. Manyetik ayırma işleminde kaolin cevheri içerisinde ilmenit, manyetit, biyotit, hematit gibi demirli mineraller ve anatas, rutil gibi titanyumlu mineraller ayrılmaktadır (Bertolino ve diğ., 2010). Kaolin endüstrisinde kullanılmak üzere yüksek alan şiddetli yaşı manyetik ayırmanın geliştirilmesi, ticari olarak kullanılabilen kaolin rezervlerinde büyük bir artışa neden olmuştur. Ayrıca ince boyutlu demir ve titanyum içeren mineralleri ayırmak için flokülasyon ve flotasyon yöntemleri de uygulanmaktadır. Kaolin cevherinin renk değerlerine etki eden anatas mineralini uzaklaştırmak için toplayıcı olarak kalsiyum karbonat varlığında flotasyon yapılmıştır (Mathur, 2002). Kaolin cevherinin flotasyonunda anatas minerali, pülp içine püskürtülen hava kabarcıklarına yapışmasına neden olan bir reaktif ile seçici olarak kaplanır. Anatas içeren hava kabarcığı yüzdürme hücresinin yüzeyine yükselir ve sıyrılıp atılır. Denver tipi flotasyon hücreleri en yaygın kullanılan ekipman olmakla birlikte son zamanlarda, ince tanelerin ayrılması için geliştiren ve aynı zamanda ürün geri kazanımını artıran dikey kolon tipi yüzdürme hücreleri de kullanılmaktadır. Flotasyon yöntemiyle %2,5'e kadar içeren kaolin cevherinin TiO_2 içeriği %2.5'ten yüzde 0,3'e kadar düşürülebilmektedir. Seçimli flokülasyon, TiO_2 yüzdesini azaltmak için kullanılabilecek başka bir yöntemdir. Bu işlem yüzdürmenin tersidir, çünkü bu yöntemde anatas minerali seçimli olarak floküle edilmektedir, böylece kaolin dağılmış bir durumda asılı kalırken anatas çökerek sistemden ayrılmaktadır. Daha sonra floküle edilmiş anatas, atık su barajlarına gönderilmektedir (Önen ve diğ., 2018).

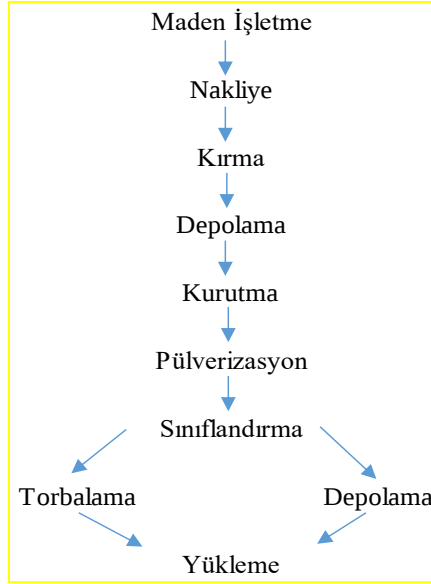
İnce boyut fraksiyonunu içeren süspansiyon üretilecek konsantrenin renk, parlaklık değerlerine bağlı olarak doğrudan liç işlemine gönderilebilmektedir. Liç işlemi, kaolinin kalitesine

olumsuz etkiyen demir bileşiklerinin bir kısmının çözündürüldüğü 2.5-3 arasındaki bir pH'da yapılan bir yöntemdir. Liç aşamasında, güçlü bir indirgeme ajanı olan sodyum hidrosülfid, ferrik demiri ferröz demire indirmek için pülpe eklenir ve daha sonra sülfat radikali ile birleşerek çözünür bir demir sülfat, FeSO_4 oluşturur. Demir sülfat, işlemin bir sonraki adımı olan filtrasyon adımıyla uzaklaştırılır. Liç işleminden sonra, süspansiyon fazla suyunun ve çözünür demir sülfatın uzaklaştırması için filtreler pompalanır. Daha fazla demir sülfatı uzaklaştırmak ve filtre kekini yıkanmak için malzeme genellikle suyla yıkanmaktadır. Genel olarak, liç işleminden sonra katı madde oranı yaklaşık %25'tir. Kaolinin susuzlaştırılması için büyük döner vakumlu filtreler veya basınçlı filtreler kullanılarak katı madde yüzdesi %60-65'e çıkarılır. Filtrelemeden sonra, filtre keki yeniden disperse edilerek sprey kurutucuya pompalanmakta ve iyice kurutulmuş dökme olacak şekilde veya torbalanarak sevkiyata hazır hale getirilmektedir.

Katma değerli ürünler üretmek için kullanılan bir diğer özel yöntem ise kalsinasyon işlemidir. Bu yöntemde kaolin konsantresi döner veya büyük ocaklı kalsinatörlere beslenerek 1300°C'ye kadar ısıtılarak işleme tabi tutulmaktadır. 1300°C'de kalsine edilmiş malzeme, refrakter tuğlaların yapımında kullanılmak üzere granül hale getirilmektedir. Pigment olarak kullanılacak kalsine kaolinin üretmek için 1000-1050°C sıcaklıkları uygulanmaktadır. Kalsinasyon işlemiyle elde edilen metakaolin, çeşitli uygulamalarda kullanılan amorf bir alümina ve silika karışımıdır. 980°C'deki faz değişimi, amorf metakaolini, mullite (Al_2SiO_5) dönüştürür.

4.2. Kaolin Cevherinin Kuru Ortamda Zenginleştirilmesi

Bazı kaolinler, kuru olarak daha basit ve daha az maliyetli olarak zenginleştirilir (Hayat ve diğ., 2021). Daha düşük maliyetli ve daha düşük kaliteli ürünler cam elyafı ve çimento üretiminde kullanılabilir. Şekil 6, kaolinin kuru işlenmesi için tipik bir akış şemasını göstermektedir. Kuru işlemde, kaolin ürününün özellikleri neredeyse tamamen madenden teslim edilen ham kil kalitesine bağlıdır. Bu nedenle, belirli özelliğe sahip bir ürünü üretmek için kuru olarak zenginleştirilebilecek özellikte kaolinler seçilmelidir. Kuru işlemde işlenebilecek üst kum yüzdesi sınırı genellikle yaklaşık %7'dir.



Şekil 6. Kaolin cevherinin genel bir kuru zenginleştirme akım şeması.

Çıkarılan kaolin, tane boyut küçültme tesisine taşınır ve büyük depolama bölmelerine yerleştirilir. Boyut küçültme işlemine tabi tutulan kaolin parçacıklarının boyutu yumurta

boyutu veya daha küçüktür. Bu boyuttaki kaolin topakları, nemi %6 veya daha azına düşüren bir döner kurutucuya beslenir. Kurutulmuş kaolin, valsli veya çekiçli değirmenlerde veya başka bir boyut küçültme cihazında toz haline getirilir. Gerektiğinde toz haline getirilmiş ürünü daha da kurutmak için bu adımda ısıtılmış hava kullanılabilir. Toz haline getirilmiş kaolin, kum büyüklüğündeki partikülleri uzaklaştırmak için genellikle havayla sınıflandırılır. Ayrıca, ince tane boyutlu ürünler bir hava sınıflandırma sistemi kullanılarak üretilebilir. Ürün daha sonra müşteriye kamyonla veya torbalarda sevk edilir.

5. SONUÇ

Kil mineralleri, çok yönlü fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde sanayinin birçok alanında kritik hammaddeler arasında yer almaktadır. Özellikle kaolin grubu kil mineralleri; düşük iyon değişim kapasitesi, yüksek beyazlık ve parlaklık değerleri, düşük aşındırıcılık ve termal kararlılık gibi üstün özellikleriyle seramik, kâğıt, boya, plastik ve refrakter endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu minerallerin yapılarını oluşturan tetrahedral ve oktahedral tabakalar ile aralarındaki düzen, kaolinit, dikit, nakrit ve halloysit gibi minerallerin özelliklerini ve uygulama alanlarını belirleyen temel faktörlerdir.

Kaolin cevherinin fiziksel ve kimyasal karakteri, içerdiği safsızlıkların türü, tane boyutu ve morfolojisi ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, cevherin rezerv araştırmasından başlayarak zenginleştirilmesine kadar geçen tüm süreçlerin bilimsel yöntemlerle yönetilmesi büyük önem taşır. Yüzeye yakın yataklarda açık ocak madenciliği yaygın olarak kullanılmakta; cevher çıkarımı sonrası ise çeşitli yaş zenginleştirme yöntemleriyle kaolinit dışı bileşenler sistematik olarak ayrılmaktadır. Bu süreçte dispersant kullanımı,

taneciklerin stabilizasyonu açısından kritik rol oynamaktadır. Ayrıca, manyetik ayırma, flotasyon ve liç gibi ileri teknolojilere dayalı yöntemlerle demir ve titanyum içeriği azaltılarak kaolinin optik ve fonksiyonel kalitesi artırılmaktadır.

Zenginleştirme süreçleri sonrası kaolin, doğal haliyle veya ısıtılma işlemine tabi tutularak kalsine edilmiş formda pazarlanmakta; böylece ürün parlaklığı artırılmakta, yeni kullanım alanları kazanılmaktadır. Bunun yanında, yüzey modifikasyonları ile kaolinitin organofilik veya hidrofobik karaktere dönüştürülmesi, bu minerali farklı sektörler için daha işlevsel kılmaktadır. Tüm bu işlemler, kaolin kaynaklarının daha verimli kullanılmasını ve düşük kaliteli rezervlerin de ekonomik olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

Sonuç olarak, kaolin grubu kil mineralleri, sahip oldukları kristal yapılar, kimyasal bileşimler ve yüzey özellikleri sayesinde günümüzde yüksek katma değerli ürünlerin üretiminde vazgeçilmez konuma gelmiştir. Bu bağlamda, cevher karakterizasyonundan başlayarak zenginleştirme ve uygulama süreçlerine kadar olan tüm aşamalar, disiplinler arası bir yaklaşımla ele alınmalı ve sürekli geliştirilen teknolojilerle desteklenmelidir.

KAYNAKLAR

- Bertolino, L. C., Rossi, A. M., Scorzelli, R. B. & Torem, M. L. (2010). Influence of iron on kaolin whiteness: An electron paramagnetic resonance study. *Applied Clay Science*, 49(3), 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.04.022>
- Coles, C. & Yong, R. (2002). Aspects of kaolinite characterization and retention of Pb and Cd. *Applied Clay Science*, 22(1–2), 39–45. [https://doi.org/10.1016/s0169-1317\(02\)00110-2](https://doi.org/10.1016/s0169-1317(02)00110-2)
- Du, J., Morris, G., Pushkarova, R. A. & St C Smart, R. (2010). Effect of surface structure of kaolinite on aggregation, settling rate, and bed density. *Langmuir*, 26(16), 13227–13235. <https://doi.org/10.1021/la100088n>
- Durgut, E., Cinar, M., Terzi, M., Unver, I. K., Yildirim, Y. & Ozdemir, O. (2022a). Evaluation of different dispersants on the Dispersion/Sedimentation behavior of halloysite, kaolinite, and quartz suspensions in the enrichment of halloysite ore by mechanical dispersion. *Minerals*, 12(11), 1426. <https://doi.org/10.3390/min12111426>
- Durgut, E., Cinar, M., Terzi, M., Unver, I. K., Yildirim, Y., Boylu, F. & Ozdemir, O. (2022b). Effect of Blunging/Dispersion Parameters on Separation of Halloysite Nanotubes from Gangue Minerals. *Minerals*, 12(6), 683. <https://doi.org/10.3390/min12060683>
- Fulignati, P. (2020). Clay minerals in hydrothermal systems. *Minerals*, 10(10), 919. <https://doi.org/10.3390/min10100919>
- Grim, R. E. (1942). Modern concepts of clay materials. *The Journal of Geology*, 50(3), 225–275. <https://doi.org/10.1086/625050>

- Grim, R. E. (1968). Clay Mineralogy, 2nd Edition. McGraw-Hill, New York, 596
- Hanein, T., Thienel, K., Zunino, F., Marsh, A. T. M., Maier, M., Wang, B., . . . Martirena-Hernández, F. (2021). Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL. *Materials and Structures*, 55(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01807-6>
- Hayat, M. B., Danishwar, M., Hamid, A., Zaid, M. M. & Emad, M. Z. (2021). Quadratic Mathematical Modeling of Sustainable Dry Beneficiation of Kaolin. *Minerals*, 11(4), 429. <https://doi.org/10.3390/min11040429>
- Huang, H., Li, S., Gou, H., Zhang, N. & Liu, L. (2024). Efficient Recovery of Feldspar, Quartz, and Kaolin from Weathered Granite. *Minerals*, 14(3), 300. <https://doi.org/10.3390/min14030300>
- Jarošová, M. & Staněk, F. (2021). Spatial Modelling of Kaolin Deposit Demonstrated on the Jimlíkov-East Deposit, Karlovy Vary, Czech Republic. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(11), 788. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110788>
- Kizi, N. K. M. O. & Kizi, N. Y. S. J. (2025). Improvement of the Technology for the Enrichment of Kaolin-Containing Ores. *Deleted Journal*, 3(6), 17–20. <https://doi.org/10.62536/sjehss.2025.v3.i6.pp17-20>
- Kloprogge, J. (2018). Introduction. In *Springer mineralogy* (pp. 1–11). https://doi.org/10.1007/978-3-030-02373-7_1
- Li, W., Yu, Y., Xiong, D., Qi, Z., Fu, S. & Yu, X. (2022). Effects of chemical dispersant on the surface properties of kaolin and aggregation with spilled oil. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(20), 30496–30506. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17746-2>

- Ma, Q., Li, Y., Liu, J., Ying, H., Han, H. & Chen, X. (2023). Enhanced dispersing properties of kaolin due to high-strength kneading process. *Applied Clay Science*, 247, 107218. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107218>
- Martin-Vivaldi, J. I. & Robertson, R. H. S. (1971). Palygorskite and sepiolite (the hormites). Chapter in *Electron Optical Investigation of Clays*. Gard, J.A., ed. Mineralogical Society Monograph No. 31, London, pp. 255–275
- Mathur, S. (2002). Kaolin Flotation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 256(1), 153–158. <https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8271>
- McBride, M. B. (1988). *Chemistry of Clays and Clay Minerals*, Edited by A. C. D. Newman. Wiley-Interscience, New York, Mineralogical Society Monograph 6, 1987. 469 pp., hardbound, US\$110.00 (ISBN 0-471-01141-X). *Clays and Clay Minerals*, 36(5), 480. <https://doi.org/10.1346/ccmn.1988.0360515>
- Miranda-Trevino, J. C. & Coles, C. A. (2003). Kaolinite properties, structure and influence of metal retention on pH. *Applied Clay Science*, 23(1–4), 133–139. [https://doi.org/10.1016/s0169-1317\(03\)00095-4](https://doi.org/10.1016/s0169-1317(03)00095-4)
- Murray, H. H. (2006). Chapter 2 Structure and Composition of the Clay Minerals and their Physical and Chemical Properties. In *Developments in clay science* (pp. 7–31). [https://doi.org/10.1016/s1572-4352\(06\)02002-2](https://doi.org/10.1016/s1572-4352(06)02002-2)
- Omiogbemi, I. M., Yawas, D. S., Das, A., Afolayan, M. O., Dauda, E. T., Kumar, R., . . . Chowdhury, S. G. (2022). Mechanical properties and corrosion behaviour of duplex stainless steel weldment using novel electrodes. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26974-6>

- Önen, V., Göçer, M. & Taner, H. A. (2018). Kaolen Süspansiyonlarının Susuzlaştırılmasında Koagülant ve Flokülantların Etkisi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 297–305. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.386810>
- Pérez-Arévalo, S., Millán-Franco, M. A., Aguilar-Reyes, B. O. & Reyes-Gasga, J. (2025). Structural and Chemical Characterization of Kaolinite from the Capula Clay in Michoacán Region, Mexico, By X-Ray Diffraction and Electron Microscopy. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.09.227>
- Prasad, M. S., Reid, K. & Murray, H. (1991). Kaolin: processing, properties and applications. *Applied Clay Science*, 6(2), 87–119. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(91\)90001-p](https://doi.org/10.1016/0169-1317(91)90001-p)
- Raghavan, P., Chandrasekhar, S., Vogt, V. & Gock, E. (2003). Separation of titaniferous impurities from kaolin by high shear pretreatment and froth flotation. *Applied Clay Science*, 25(1–2), 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2003.09.003>
- Wang, X., Li, Y. & Wang, H. (2020). Structural characterization of octahedral sheet in dioctahedral smectites by thermal analysis. *Minerals*, 10(4), 347. <https://doi.org/10.3390/min10040347>
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), 377–392. <https://doi.org/10.1086/622910>

KALAY (Sn) CEVHERLEŞMELERİ VE ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Seda DEMİRCİ¹

1. GİRİŞ

Kalay (Sn), insanlık tarihinde önemli bir yere sahip olan stratejik metallere aittir. Yaklaşık 5000 yıl önce bakırla alaşım oluşturmasıyla Bronz Çağı'nın başlamasına öncülük etmiş ve bu dönemde alet, silah ve süs eşyalarının üretiminde temel malzeme olmuştur. Arkeometrik bulgular, kalayın ilk kez M.Ö. 3.500'lü yıllarda Küçük Asya uygarlıklarında kullanıldığını ve Anadolu'da da erken dönem üretim faaliyetlerinin var olduğunu göstermektedir (Pehlivan ve Alpan, 1986).

Jeolojik olarak kalay cevherleşmeleri yataklarının % 85'i geç evre granitik sokulumlarla ilişkili magmatik-hidrotermal sistemler içerisinde gelişmektedir. Kalay zenginleşmesi genellikle yüksek derecede fraksiyonlaşmış granitlerle, özellikle ilmenit-serisi granitlerle ilişkilidir. Bu granitlerin düşük oksidasyon durumları, Sn^{2+} 'in uyumsuz davranışını destekleyerek magmatik evrim sürecinde kalayın konsantrasyonunu artırır. Greisen, damar, skarn ve plaser tipi yataklar en yaygın kalay cevheri tipleridir (Lehman, 2020; Handoko ve ark., 2023; Bargawa, 2023; Ni ve ark, 2023).

Latince *stannum* kelimesinden türetilen ve periyodik cetvelde “Sn” simgesiyle gösterilen kalay, atom numarası 50 ve atom ağırlığı 118.6 olan bir geçiş metalidir. Düşük karbonlu bir ekonomiye geçiş için orta dereceli kritik metaller arasında

¹ Öğr. Gör. Dr., Çukurova Üniversitesi, Aladağ Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, demircis@cu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9577-4970.

sınıflandırılan kalay, düşük karbonlu teknolojilerde kritik bir metal olarak değerlendirilmektedir (Kamili ve ark., 2017, Moss ve ark, 2013).

Normal koşullar altında kararlı allotropu β -kalay olan element, tetragonal kristal sisteminde bulunur ve gümüş beyazı renkte, dövülebilir bir metaldir. Daha düşük sıcaklıklarda ise gri renkli, yoğunluğu daha az ve kübik yapı α -kalaya dönüşmektedir. Kalayın ergime noktası 232 °C, kaynama noktası 2602 °C, özgül ağırlığı ise 7.3 g/cm³'tür (Moss ve ark, 2013).

Kalay yatakları genellikle damar tipi, ağsal veya disemine yapılar şeklinde gelişim göstermektedir. Birincil kalay yataklarındaki Sn tenörü genellikle %0,5-5 arasında değişmektedir. İklimsel ayrışma süreçleri sonucunda serbestleşen kasiterit minerali, akarsular tarafından taşınarak düzlük alanlarda birikmekte ve ikincil (plaser) kalay yataklarını oluşturmaktadır. Ekonomik açıdan en önemli ve zenginleşmiş plaser yatakları denizel kökenlidir. Birincil cevher kaynaklarında ekonomik tenör için kesme değeri %0,41 Sn olarak belirlenmiştir. İşletmeye alınan cevherlerde genellikle %0,2–0,5 Sn ve üzeri tenörler ekonomik kabul edilmektedir (Bargawa, 2023). Zenginleştirme sonrası elde edilen kalay konsantresi için ekonomik tenör genellikle %35–74 Sn aralığındadır (Parbrear, 2015).

2. KALAYIN GÜNÜMÜZDE KULLANIM ALANLARI

Modern dönemde kalay, elektronik sanayinin gelişimiyle birlikte yeniden stratejik önem kazanmıştır. Ayrıca demir ve çelik yüzeylerin kaplanması, alaşımlarda, süperiletken müknaatıslar, ileri güneş pilleri ve sıvı kristal ekranlar gibi yüksek teknoloji uygulamalarında yangınla mücadele ve mücevherat,

dekoratif ürünlerin yapımında değerlendirilmektedir (Muderawa ve ark, 2024; Ratnasih ve Rebuin, 2024).

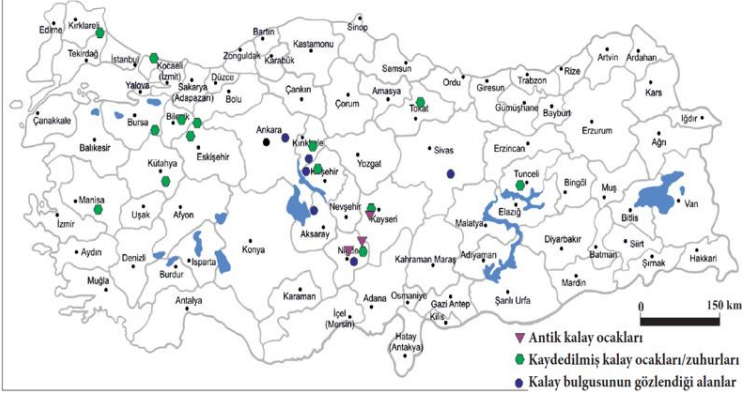
Kalay, düşük karbonlu ekonomiye geçişte kritik bir metal olarak kabul edilmekte ve karbonsuzlaşma teknolojileriyle ilişkili en önemli metaller arasında yer almaktadır (Li ve ark., 2025).

3. DÜNYA VE TÜRKİYE DE REZERV DURUMU

Küresel ölçekte kalay üretiminin %99'undan fazlası, doğrudan veya dolaylı olarak granitik kayalarla ilişkilidir. Günümüzde bilinen kümülatif kalay üretimi yaklaşık 27 milyon ton Sn seviyesindedir. Güneydoğu Asya kalay kuşağı (Myanmar, Tayland, Malezya, Endonezya), Güney Çin, Orta Andesler (Bolivya, Peru) ve Cornwall (İngiltere). Bu bölgeler, aynı zamanda güncel küresel üretimin %85'ini ve rezervlerin üçte ikisini oluşturmaktadır (USGS, 2020; Moss et al., 2013).

Türkiye'de kalay cevherleşmeleri üzerine yapılan çalışmalar sınırlı olmakla birlikte, intrüzif kayaların yayılımı ve tektonik konumları, ülkemizin bu metal açısından potansiyel barındırdığını göstermektedir. Kalayın oluşumunda etkili olan akışkan–ergiyik etkileşimleri, tektojenetik konum ve magmatik farklılaşma süreçleri, Türkiye'nin özellikle Orta Anadolu'daki intrüzif zonlarında yeni kalay mineralizasyonlarının ortaya çıkarılabileceğine işaret etmektedir. Özellikle Niğde-Bolkardağ, Çamardı-Celaller ve Kestel (Kayseri) çevresinde kalay mineralleri (stannit, kasiterit) saptanmıştır. Ayrıca Kırklareli, İstanbul, Uşak, Eskişehir, Bilecik ve Tunceli gibi farklı bölgelerde de kalay içerikli mineralizasyon izlerine rastlanmıştır. Bu bulgular, Türkiye'de kalay potansiyelinin özellikle Orta Anadolu'daki granitoidlerle ilişkili olabileceğini göstermektedir (Şekil 1). Henüz işletmeye alınmış bir yatak bulunmamakla birlikte, S tipi, peralüminalı granitoidlerin

yayılım gösterdiği Orta Anadolu bölgesi, gelecekte kalay cevherleşmeleri açısından öncelikli arama alanı olarak değerlendirilmektedir (Powell ve ark., 2021).



Şekil 1. Ülkemizde kalayın antik ocaklar, zuhur ve bulgu olarak gözlemlendiği lokalitelerin dağılımı (Fidan 2016; Ulusoy, 2021).

4. KALAY MİNERALLERİ VE ÖZELLİKLERİ

Kalayın en önemli cevher minerali, yaklaşık %78 Sn içeriğine sahip olan kasiterit (SnO_2)'tir. Kasiterit, 6–7 Mohs sertliğe, 6,8–7,1 g/cm³ yoğunluğa sahip olup kahverengi veya kahverengimsi siyah renkte, yarı metalik parlaklığa sahip bir mineraldir (Şekil 2). “Kalay taşı” olarak da bilinen bu mineralin adı, Yunanca “Kass ülkesi madeni” anlamına gelen *kassiteros* sözcüğünden türemiştir (Kaptan, 1992).



Şekil 2. Kasiterit (Wu ve ark., 2021).

Dünya kalay üretiminin yaklaşık %55'i birincil cevherlerden yeraltı madenciliğiyle, %5'i açık ocak işletmeleriyle ve %40'ı plaser yataklarından sağlanmaktadır. Kasiterit genellikle topaz ve beril gibi minerallerle ilişkilidir. Sülfürlü yataklarda ise arsenopirit, pirit ve kalkopirit ile bulunur (Voute ve ark., 2019).

Kalay, az miktarda stannit (Cu_2FeSnS_4), frankit ($Pb_5Sn_3Sb_2S_{14}$), confieldit (Ag_8SnS_6) ve teallit (Pb_2SnS_2) gibi kompleks sülfür minerallerinden de elde edilebilmektedir. Bunlar arasında en önemli sülfürlü kalay minerali stannit olup, yaklaşık %28 Sn ve %29 Cu içeriğiyle doğal bronz (tunç) bileşimine benzer bir yapıya sahiptir. Tetragonal kristal sisteminde kristalleşen stannit, 4 Mohs sertliğe, 4,3-4,5 g/cm³ yoğunluğa, gri-siyah renge ve metalik parlaklığa sahip kırılğan bir mineraldir (Yıldız, 2014).

5. KALAY ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Kalay (Sn) minerali, özellikle kasiterit (SnO_2) formunda, cevherlerden ekonomik olarak kazanılması için çeşitli zenginleştirme yöntemlerine ihtiyaç duyar. Modern teknolojiler, cevherin mineralojik özelliklerine ve tane boyutuna göre farklı fiziksel ve kimyasal ayırma tekniklerini bir arada kullanmaktadır.

5.1. Yerçekimi ile Ayırma

Kasiteritin yüksek yoğunluğu nedeniyle, sallantılı masa, spiraller, MGS, jigler gibi yerçekimi ayırıcılarında iri ve orta boyutlu tanelerin zenginleştirilmesinde yaygın olarak kullanılır (Falcon, 1982, Jeon et al., 2013; Angadi ve ark., 2016). Jigler, ağır ortam siklonları, spiraller ve sallama masaları gibi yerçekimi ayırma üniteleri genellikle birincil zenginleştirme aşamasında kullanılır. Nihai konsantreler ise, bu aşamadan sonra

uygulanan geliştirilmiş yerçekimi ayırma veya flotasyon işlemleriyle elde edilir. Tipik bir yerçekimi konsantrasyon devresinde, kalay değerlerinin yaklaşık %50–60'ının geri kazanılabildiği bildirilmektedir (Lepetic, 1986). Kasiterit öğütülmesinde % 50 sinin ince taneler halinde atık havuzuna atılmaktadır. İnce tanecikleri ayırma FA santrifüj gibi ek kuvvetler uygulanarak 3 mikron tane boyutuna kadar kazanım sağlanmaktadır (Angadi ve ark., 2016).

Yerçekimi yöntemiyle zenginleştirilen ön konsantre, manyetik mineraller içeriyorsa zenginleştirmenin son aşamasında kurutularak manyetik ayırıcıdan geçirilir ve böylece manyetik özellik gösteren mineraller uzaklaştırılır. Yerçekimi yöntemiyle elde edilen ön konsantre, ikinci aşamada flotasyonla zenginleştirilerek %70–75 tenörlü kalay konsantresi elde edilir (Yıldız, 2014).

Birincil yatakların zenginleştirilmesinde, maliyeti diğer yöntemlere göre daha düşük olan yerçekimi ve flotasyon yöntemleri birlikte uygulanmaktadır. Birincil yataklardan yerçekimi yöntemiyle üretilen konsantreler, içerdikleri sülfürlü ve ağır mineraller nedeniyle plaser yataklardan elde edilenlere göre daha düşük tenörlüdür; bu konsantrelerin Sn tenörü genellikle %40–60 arasında değişir. Ancak iyi bir flotasyon süreciyle bu oran %75'e kadar yükseltilebilmektedir (Yıldız, 2014).

5.2. Manyetik Ayırma

Kalay cevherlerinde başlıca ekonomik mineral kasiterit (SnO_2) olup, paramanyetik olmayan karakteri nedeniyle doğrudan manyetik ayırma yöntemleriyle kazanılması mümkün değildir. Ancak, kasiteritin genellikle manyetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), ilmenit (FeTiO_3), turmalin, zirkon, monazit gibi manyetik veya zayıf manyetik minerallerle birlikte bulunması,

manyetik ayırmanın önemini arttırmaktadır (Das, 2012, Ye ve ark., 2024).

Manyetik ayırma yöntemi kalay cevherlerinde doğrudan kazanım yöntemi olmamakla birlikte, ön zenginleştirme sonrası konsantre kalitesinin artırılmasında ve safsızlıkların giderilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Yerçekimi yöntemleriyle (örneğin, jig, sarsıntı masası, spiral ayırıcı vb.) elde edilen ön konsantre, çoğu zaman manyetik özellik taşıyan demirli mineralleri içermektedir. Bu nedenle, söz konusu ön konsantreler kurutulduktan sonra yüksek alan şiddetli kuru veya yaş manyetik ayırıcılar kullanılarak işlemde geçirilir. Manyetik ayırma istenmeyen minerallerin uzaklaştırılması, sonraki flotasyon veya kimyasal liç işlemlerinin verimini artırır.

Son yıllarda, özellikle düşük tenörlü ve refrakter özellikteki kalay atıklarında manyetik kavurma–manyetik ayırma (MR–LMS) süreçlerinin birlikte kullanımıyla hem kasiterit hem de demir minerallerinin geri kazanımı mümkün hale gelmiştir.

Zhou ve ark. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, manyetik kavurma ve düşük şiddetli manyetik ayırma yöntemleriyle kalay atıklarının zenginleştirilmesi araştırılmıştır. Çalışmada, %0,20 Sn ve %14,56 Fe içeren kalay atığından, %64,68 Fe tenörlü ve %87,47 geri kazanımlı demir konsantresi ile %4,10 Sn tenörlü ve %63,55 Sn geri kazanımlı kalay açısından zengin bir ara ürün elde edilmiştir. Sürecin en kritik aşamasının manyetik kavurma olduğu belirlenmiş; bu aşamada hematit ve limonit mineralleri manyetite dönüştürülerek, düşük şiddetli manyetik ayırma ile etkin bir ayırım sağlanmıştır.

Nijerya'daki Kudedu kalay yatağının tenörü, hava ile yüzdürmeli gravitasyon ve üç diskli manyetik ayırma teknikleriyle artırılmıştır. Cevher örnekleri alınmış, kırma ve

öğütme işlemlerinden geçirilmiş, serbestleşme boyutu -500+355 µm olarak belirlenmiştir. Ham cevherin %15,75 SnO₂ içeriği, zenginleştirme sonrası %65,86 SnO₂'ye yükselmiştir. Sonuçlar, Kudedu kasiterit cevherinin kalay üretimi için uygun fırın besleme standardına ulaştığını göstermektedir (Abere ve ark., 2018).

5.3. Flotasyon

İnce kasiterit tanelerinin geri kazanımında en yaygın kullanılan yöntem flotasyondur. Flotasyonun verimliliği, uygun toplayıcıların seçimi ve yüzey özelliklerinin değiştirilmesiyle artırılabilir. Özellikle <10 µm boyutundaki tanelerin geri kazanımı için çözünmüş hava flotasyonu ve elektroflotasyon gibi özel yöntemler geliştirilmiştir. Elektroflotasyonda baloncukların boyutu, yükselme hızı ve taneciklerin aglomerasyonu, geri kazanım veriminin artmasında önemli rol oynamaktadır (Ren ve ark, 2019).

Kasiterit flotasyonunda başarılı bir ayırım elde edilmesinde toplayıcılar büyük önem taşır. Zamanla, toplayıcı türleri yağ asitlerinden alkil sülfosüksinat, arsenik asidi, fosforik asit ve hidroksamik asit gibi daha gelişmiş bileşiklere doğru evrilmiştir (Leistner ve ark., 2016; Peng ve ark., 2017; Ren ve ark., 2014). Oleik asit ve alkil sülfosüksinat, güçlü toplama yetenekleriyle bilinseler de uzun alkil zincirleri nedeniyle düşük seçicilik göstermektedir (Chen ve ark., 2018; Abaka-wood ve ark., 2017). Yaygın olarak kullanılan bir yağ asidi toplayıcısı olan sodyum oleat, kalsit ve Ca²⁺ iyonu ile aktive edilmiş kuvars üzerinde iyi toplama performansı sergiler. Ancak bu mineraller genellikle kasiterit ile bulunduğundan, sodyum oleatın kasiterite karşı seçiciliği sınırlıdır (Ding ve ark., 2023; Pei ve ark., 2024).

Arsenik ve fosforik asit bazlı toplayıcılar kasiterit geri kazanımında yüksek etkinlik göstermelerine rağmen, çevreye

olan olumsuz etkileri nedeniyle günümüzde kullanımları büyük ölçüde sınırlandırılmıştır (Liu ve ark., 2021; Li ve ark., 2015).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, kasiterit flotasyonunun verimliliğini belirgin şekilde artıran yeni nesil toplayıcıların geliştirildiğini göstermektedir. Sodyum oleat/salisilaldoksim ve kendiliğinden düzenlenen yüzey aktif maddeler (SHA/DBIA) gibi karışık toplayıcı sistemleri, kasiterit yüzeyinde hidrofobikliği güçlendirip sinerjik adsorpsiyon oluşturarak sırasıyla %90 ve %84'ün üzerinde geri kazanım elde edilmesini sağlamıştır (Huang ve ark., 2024; Miao ve ark., 2024). DHX, HDDPA ve 5-dodesilsalisilaldoksim (DSA) gibi yeni reaktifler ise, benzohidroksamik asit (BHA) gibi geleneksel toplayıcılara kıyasla daha geniş pH aralıklarında çalışabilmekte, daha yüksek seçicilik ve gelişmiş flotasyon performansı sunmaktadır. Ayrıca Ag^+ ve Pb^{2+} gibi metal iyonlarının aktivasyon etkisi, özellikle ince kasiterit tanelerinde toplayıcı adsorpsiyonunu ve flotasyon etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Sun ve ark., 2024).

5.4. Kavurma ve Asit Liçi

Kalay içeren mineraller (örneğin kasiterit, SnO_2), yüksek sıcaklıklarda ve genellikle indirgen ya da oksitleyici atmosfer koşullarında işlenerek, metal fazlarının ya da yüksek çözünürlüklü bileşiklerin oluşumu sağlanır. Bu işlem, özellikle kalayın demir, arsenik veya titanyum gibi diğer elementlerle kompleks fazlar oluşturduğu durumlarda, metalin serbest hale geçmesini kolaylaştırır (Prasetyo ve ark., 2020; Yang ve ark., 2024).

Kavurma işlemi sonrasında elde edilen ürünler, genellikle sülfürik asit veya hidroklorik asit gibi asitlerle liç edilerek kalay ve diğer değerli metallerin çözelti fazına geçmesi sağlanır. Redüktif liç uygulamaları veya oksalik asit ilavesi gibi yöntemler, $Sn(IV)$ 'ün $Sn(II)$ 'ye indirgenmesini teşvik ederek kalayın çözünürlüğünü artırır (Wang ve ark., 2022).

Wang ve ark (2022) çalışmasında Çinko liç artığı (ZLR) gibi kalay ve kurşun içeren artıkların değerlendirilmesinde, Sn(IV)'ün Sn(II)'ye indirgenmesi kalay çözünürlüğü açısından kritik bir adımdır. Yapılan çalışmalarda, oksalik asit ve sülfürik asit ile gerçekleştirilen redüktif liç işleminin kalay ekstraksiyonunda oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Uygun koşullarda (ör. 24 g/L oksalik asit, 0,5 mol/L H₂SO₄, 60 °C, 30 dk), kalayın büyük kısmı çözeltiye geçerken, kurşun kalıntı fazda yoğunlaşmaktadır. Hidroliz işlemiyle yüksek tenörlü kalay çökeltisi elde edilmekte, bu ürün doğrudan ergitme için uygun hale gelmektedir. Bu yaklaşım, kavurma ve asit liçi süreçlerinde kalayın geri kazanımını artırmak için etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

Yang ve ark (2024) çalışmasında antrasit kullanılarak vakumlu indirgeme kavurma yöntemiyle arsenik uzaklaştırılması ve kalayın geri kazanımı araştırılmıştır. Yaklaşık %8 arsenik içeren bu malzemelerde, kavurma sırasında arsenatların uçucu As₂O₃'e, SnO₂'nin ise SnO ve Sn'a dönüştüğü belirlenmiştir. Optimum koşullarda (750 °C, %10 antrasit, 3 saat), arsenik uzaklaştırma verimi %96,97'ye, kalay geri kazanım oranı ise %84,48'e ulaşmıştır. Bu işlem sonucunda arsenik içeriği %0,53'e düşerken, kavrulmuş ürünlerdeki kalay oranı %17,7'den %31,41'e yükselmiştir.

6. SONUÇ

Kalay (Sn), tarih boyunca stratejik öneme sahip olmuş, günümüzde ise düşük karbonlu ekonomiye geçişte kritik metaller arasında yer alan bir elementtir. Jeolojik olarak kalay cevherleşmeleri büyük oranda granitik sokulumlarla ilişkili magmatik-hidrotermal sistemlerde gelişmekte olup, greisen, damar, skarn ve plaser tipleri başlıca cevherleşme türlerini oluşturmaktadır. Türkiye'de henüz işletmeye alınmış bir kalay

yatağı bulunmamakla birlikte, özellikle Orta Anadolu'daki S tipi granitoidlerin yayılımı, yeni potansiyel alanların varlığına işaret etmektedir.

Kalay cevherlerinin ve türevlerinin zenginleştirilmesinde, yerçekimi, flotasyon ve manyetik ayırma yöntemleri yaygın olarak kullanılmakta, ancak kompleks veya düşük tenörlü cevherlerde bu yöntemler tek başına yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, son yıllarda kavurma ve asit liçi temelli kimyasal zenginleştirme yöntemleri öne çıkmaktadır. Özellikle redüktif kavurma işlemleri, kasiterit gibi zor çözünebilir minerallerde kalayı serbestleştirerek liç verimini artırmaktadır.

Literatürde yapılan güncel çalışmalar, kalay kazanımında önemli gelişmeler ortaya koymaktadır. Wang ve ark. (2022), oksalik asit/sülfürik asit ortamında redüktif liç yöntemiyle Sn(IV)'ün Sn(II)'ye indirgenmesini sağlayarak %90'ın üzerinde kalay çözünürlüğü elde etmişlerdir. Yang ve ark. (2024) ise vakumlu indirgeme kavurma yöntemiyle arsenik içeren çok bileşenli malzemelerden kalay geri kazanımını %84,48 verimle gerçekleştirmiştir. Bu yöntemler hem kalay geri kazanımını artırmakta hem de çevresel açıdan zararlı bileşenlerin etkili biçimde uzaklaştırılmasını sağlamaktadır.

Sonuç olarak, kalay cevherlerinin ve endüstriyel artıklarının değerlendirilmesinde fiziksel ve kimyasal zenginleştirme yöntemlerinin entegrasyonu hem ekonomik verimliliğin hem de çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Gelecekte, yerli potansiyel kaynakların belirlenmesi ve mevcut atıkların yeniden işlenmesi yönünde yapılacak çalışmalar, Türkiye'nin kalay üretiminde dışa bağımlılığını azaltarak stratejik kaynak yönetimine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Abaka-Wood, G.B., Addai-Mensah, J. & Skinner, W (2017). Selective flotation of rare earth oxides from hematite and quartz mixtures using oleic acid as a collector. *Int. J. Miner. Process*, 169, 60–69.
- Abere, D., Oyatogun, G., Ayodele, T., Ogar, M., Ohwoekevw, J. & Adejo, O. (2018). Upgrading of Tin in Kudedu Cassiterite (Tin Ore) Deposit Using Air Floating and 3 D-Magnetic Beneficiations Techniques, 3, 28.
- Angadi, S. I., Eswaraiah, C., Jeon, H. S., Mishra, B. K. & Miller, J. D. (2016). Selection of Gravity Separators for the Beneficiation of the Uljin Tin Ore. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 38(1), 54–61. <https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1262856>
- Bargawa, W., Sidiq, H., Doven, A., & Supandi, S. (2023). Skarn and Greisen Model for Tin Deposit in Batubesi Area, East Belitung, Indonesia. *Iraqi Geological Journal*. <https://doi.org/10.46717/igj.56.2f.5ms-2023-12-11>.
- Chen, Y., Tong, X., Feng, D. & Xie, X. (2018) Effect of Al (III) Ions on the Separation of Cassiterite and Clinocllore Through Reverse Flotation. *Minerals*, 8, 347.
- Das, A., & Roy, S. (2012). Magnetic Separation-Principles and Application In Beneficiation of Iron Ores.
- Ding, Z., Li, J., Yuan, J., Yu, A., Wen, S. & Bai, S (2023). Insights into the influence of calcium ions on the adsorption behavior of sodium oleate and its response to flotation of quartz: FT-IR, XPS and AMF studies. *Miner. Eng.*, 204, 108437.
- Falcon, L. M. & April (1982), “The gravity recovery of cassiterite,” *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 112-117.

- Fidan, E. (2016). Tarih öncesi dönemlerde Anadolu'da kullanılmış olan maden yatakları. MT Bilimsel, (9), 49-59.
- Handoko, A., Sapiie, B. S. & Rudyawan, A. (2023). Geochemical and geological properties of tin related to ore deposits: A Review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1245. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1245/1/012023>.
- Huang, S., Huang, L., Li, Q., Zhou, J., Xu, Y., Lv, J. & Xie, X. (2024). Study on the synergistic effect of sodium oleate/salicylaldehyde mixed collector co-adsorption on cassiterite flotation. Advanced Powder Technology. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2024.104634>.
- Jeon, H. S., Baek, S. H., Angadi, S. I. & Mishra, B. K., (2013), "Optimisation of operating variables in cassiterite flotation," In Proceedings XIII International Seminar on Mineral Processing Technology (MPT-2013), Bhubaneswar, India, December 10-12, 2013, pp. 183-187.
- Kamil, A., Yılmaz, H. & Doğan, R. (2017). *Critical and rare metals: Definition, classification and industrial importance*. Journal of Mineral Processing Research, 24(3), 145–156.
- Kamilli, R.J., Kimball, B.E. & Carlin, J.F., Jr. (2017). Tin chap. S of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. S1– S53, <https://doi.org/10.3133/pp1802S>
- Kaptan, E. (1992). Anadolu'da kalay ve eski yeraltı kalay madenciliği, Jeoloji Mühendisliği 40: 15-19.

- Lehmann, B. (2020). Formation of tin ore deposits: A reassessment. *Lithos*, 105756. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105756>.
- Leistner, T., Embrechts, M., Leißner, T., Chehreh Chelgani, S., Osbahr, I., Möckel, R., Peuker, U.A. & Rudolph, M, (2016). A study of the reprocessing of fine and ultrafine cassiterite from gravity tailing residues by using various flotation techniques. *Miner. Eng.* 2016, 96–97, 94–98.
- Lepetic, V. M., (1986), “Cassiterite flotation: A review,” In *Advances in Mineral Processing*, P. Somasundaran (ed.), Chapter 19, pp. 343-350, Littleton, Colorado: SME Inc.
- Li, L., Peng, R., Lu, X., Yang, T., Li, H. & Chi, Y. (2025). Sustainable Supply of Critical Metal Resources During Power Sector's Low-Carbon Transition: A Systematic Literature Review. *WIREs Energy and Environment*. <https://doi.org/10.1002/wene.70005>.
- Li, F.; Zhong, H., Zhao, G., Wang, S. & Liu, G, (2015). Flotation performances and adsorption mechanism of α -hydroxyoctyl phosphinic acid to cassiterite. *Appl. Surf. Sci.* 2015, 353, 856–864.
- Liu, J., Kong, D., Xie, R., Li, Y., Zhu, Y. & Liu, C, (2021). Flotation behavior and mechanism of hydroxycitric acid as a depressant on the flotation separation of cassiterite from calcite. *Miner. Eng.* 2021, 170, 107046
- Miao, Y., Feng, Q., Wen, S. & Song, Z. (2024). A self-assembled surfactant for efficient flotation of cassiterite: Experimental study and DFT calculation. *Separation and Purification Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128439>.

- Muderawan, W., Karyasa, W., Young, D., & Info, A. (2024). Tin - The Occurrences, Properties, and Applications: A Literature Review. *Indonesian Journal of Chemistry and Environment*. <https://doi.org/10.21831/ijoce.v7i2.77581>.
- Moss, R., Tzimas, E., Willis, P., Arendorf, J., Tercero Espinoza, L. (2013). Critical metals in the path towards the decarbonisation of the EU energy sector. Assessing rare metals as supply-chain bottlenecks in low-carbon energy technologies. Scientific and Policy report, Joint Research Centre, European Commission. Publications Office, Luxemburg, p. 242.
- Ni, P., Pan, J., Han, L., Cui, J., Gao, Y., Fan, M., Li, W., Chi, Z., Zhang, K., Cheng, Z. & Liu, Y. (2023). Tungsten and tin deposits in South China: temporal and spatial distribution, metallogenic models and prospecting directions. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105453>.
- Parbrear, M. (2015). Processing Plant Design Of Tin Ores At Sikhara Mining Co., Ltd Thailand. . <https://doi.org/10.58837/chula.the.2015.1488>.
- Pehlivan, N.A. & Alpan, T. (1986). Niğde masifi altın kalay cevherleşmesi ve ağır mineral çalışmaları ön raporu: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Maden Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Pei, B., Li, J., Liu, Z, Ning, S., Cai, Z. & Liu, R. (2024). Reverse flotation separation of calcite/dolomite from hemimorphite based on their surface sulphophile and oxyphile affinity differences. *Colloids Surf. A* 2024, 682, 132932

- Peng, H., Luo, W., Wu, D., Bie, X., Shao, H., Jiao, W. & Liu, Y.(2017). Study on the Effect of Fe³⁺ on Zircon Flotation Separation from Cassiterite Using Sodium Oleate as Collector. *Minerals*, 7, 108
- Powell, W., Yazgan, E., Johnson, M., Yener, K., & Mathur, R.(2021). Mineralogical Analysis of the Kestel Mine: An Early Bronze Age Source of Tin Ore in the Taurus Mountains, Turkey. *Minerals*.
<https://doi.org/10.3390/MIN11010091>.
- Prasetyo, E., Supriyatna, Y., Bahfie, F. & Trinopiawan, K. (2020). Extraction of thorium from tin slag using acidic roasting and leaching method. .
<https://doi.org/10.1063/5.0002176>.
- Ratnasih, C., & Rebuin, E. (2024). Revitalization of Tin Towards Control (Domination) of Tin as a Strategic Commodity. *International Journal of Engineering Business and Social Science*.
<https://doi.org/10.58451/ijebss.v2i03.120>.
- Ren, L., Zeng, W., Nguyen, A., & , X. (2019). Effects of bubble size, velocity, and particle agglomeration on the electro-flotation kinetics of fine cassiterite. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*.
<https://doi.org/10.1002/APJ.2333>.
- Ren, L., Zhang, Z., Zeng, W.& Zhang, Y, (2023). Adhesion between nanobubbles and fine cassiterite particles. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 2023, 33, 503–50.
- Sun, L., Qiao, Y., Cao, Y., Wang, Q., Wang, X., Sun, W. & Liu, G. (2024). 5-Dodecylsalicylaldoxime as a Novel Collector in Cassiterite Flotation: Performance and Mechanism. *Minerals*.
<https://doi.org/10.3390/min14020190>.

an anionic flotation collector. ACS Omega 2021, 6, 4212–4226.

Zhou, Y., Tong, X., Song, S., Deng, Z., Wang, X., Xie, X., & Xie, F. (2013). Beneficiation of Cassiterite and Iron Minerals From a Tin Tailing with Magnetizing Roasting-Magnetic Separation Process. Separation Science and Technology, 48(9), 1426–1432. <https://doi.org/10.1080/01496395.2012.726310>

MADEN MÜHENDİSLİĞİ DEĞERLENDİRMELERİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com