

PAPER DETAILS

TITLE: MADENCİLİKTE ATIKSU YÖNETİMİ VE KATI/SIVI AYRIMI

AUTHORS: Savas ÖZÜN

PAGES: 1278-1289

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1404561>



MADENCİLİKTE ATIKSU YÖNETİMİ VE KATI/SIVI AYRIMI

Savaş ÖZÜN*

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Atıksu Yönetimi,
Katı/Sıvı Ayrımı,
Koagülasyon-Flokülasyon,
Merkezkaç Kuvveti,
Filtrasyon.

Öz

Üçte ikisi sularla çevrili olan Dünya'nın su rezervlerinin %3'ünden daha az miktarını tatlı su kaynaklarının oluşturduğu bilinmektedir. Tatlı su kaynakların her geçen gün azalması, su kullanan endüstrileri, oluşturdukları atıksulardan elde edilen temiz suyu tekrar kullanarak faaliyetlerini sürdürmeye yöneltmektedir. Ülkemizdeki en büyük sanayi kollarından birisi olan madencilik sektörünün de hemen hemen her aşamasında su kullanılmaktadır. Çoğunlukla katı mineral taneleri ve sudan oluşan atıksuyun tesislerde tekrar kullanılabilmesi için içermiş olduğu katı mineral tanelerinden hızlı ve etkin bir şekilde kısmen/tamamen arındırılması gerekmektedir. Gerçekleştirilen katı/sıvı ayrımı ile sağlanan temiz suyun tesise tekrar beslenebilmesi ile madencilik faaliyetlerinin sektöre uğramadan devam etmesi sağlanmaktadır. Ayrıca; çeşitli yöntemler uygulanarak atıksudan temiz su kazanımı ile gerek tesisler için gerekli ilave su ihtiyacı azalmakta, gerekse doğada atıksu kaynaklı muhtemel kirliliğin önüne geçilebilmektedir. Bu bağlamda bu çalışma kapsamında; madencilik faaliyetlerinde yaygın olarak kullanılan atık su yönetimi ve katı/sıvı ayırma yöntemlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlanması amaçlanmıştır.

WASTEWATER MANAGEMENT AND SOLID/LIQUID SEPARATION IN MINING

Keywords

Wastewater Management,
Solid/Liquid Separation,
Coagulation-Flocculation,
Centrifugal Force,
Filtration.

Abstract

It is known that only less than 3% of the water reserves of the world, two thirds of which are surrounded by water, are composed of fresh water resources. Fresh water resources are decreasing day by day, this directs the industries that use water to continue their activities by reusing the treated clean water effectively obtained from the wastewater they generate. Water is used in almost every stage of the mining sector, which is one of the largest industrial branches in Turkey. In order to be reused in the processes, the wastewater, which is mostly composed of solid mineral particles and water, must be partially/completely purified from the solid mineral particles it contains in a fast and effective manner. Thus, mining operations continue without interruption by feeding the clean water provided by the solid/liquid separation back into the facility. Also, with the treatment of wastewater through applying various methods and then reusing the cleaned water, the need for additional water required for facilities is reduced and the possible pollution caused by wastewater in nature can be prevented. In this context, within the scope of this study; it is aimed to contribute to better understanding of the wastewater management and solid/liquid separation methods commonly used in mining applications.

Alıntı / Cite

Özün, S., (2020). Madencilikte Atıksu Yönetimi ve Katı/Sıvı Ayrımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1278-1289.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Özün, 0000-0001-9475-1822

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	19.11.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	02.12.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	03.12.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

* İlgili yazar / Corresponding author: savasozun@sdu.edu.tr, +90-246-211-1318

1. Giriş (Introduction)

Madencilik enerji/ham madde ihtiyacının karşılanması, ulusal ekonomiye olan katkısı, istihdam değerleri vb. birçok nedene bağlı olarak ülkemizin dördüncü büyük sanayi kolunu oluşturmaktadır (AB Türkiye Delegasyonu, 2018). Bulunduğu yerde gerçekleştirilmesi zorunlu ve yer seçme alternatifi olmayan madencilik faaliyetleri; dünya nüfusundaki artış ve buna bağlı olarak mineral kaynaklarına olan taleple birlikte önemli oranlarda artış göstermektedir. Ancak bu artış çevresel duyarlılık ve kaygıları da beraberinde getirmektedir (Aznar-Sánchez vd. 2018).

Maden arama, çıkarma, taşınma ve cevher hazırlama/zenginleştirme vb. işlemler neticesinde yönetilmesi gerekli katı, sıvı ve bunların karışımından oluşan çok miktarda atık üretilir. Bu atıkların türü ve toplam atık içindeki payı büyük ölçüde ülkelerin doğal kaynak rezervlerine, mineralin ekonomik değerine ve piyasa talebine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle madencilik kaynaklı atık miktarları ihmal edilebilir değerlerden baskın oranlara kadar değişebilmektedir (Szczeńska ve Twardowska, 2004).

Sektörel büyüklük ve su kullanım miktarları dikkate alındığında madencilik, atıksu oluşumu bakımından da önemli bir paydaya sahiptir. Su, madencilik faaliyetlerinin hemen hemen her aşamasında kullanılmaktadır. Üretim öncesi rezerv belirleme amaçlı gerçekleştirilen sondaj işlemlerinde kırıntıların uzaklaştırılması, matkap uçlarının soğutulması ve tozumanın önlenmesi vb. amaçlarla kullanılan su, madencilik faaliyetlerinin başlaması ile açık ocak madenciliği, yeraltı madenciliği ve doğaltaş işleme tesislerinde (mermer, granit, traverten vb. blokların ebatlanması) ise kullanılan ekipmanların kazıcı/kesici uçlarının soğutulması, kazı/kesme işlemi gerçekleştirilmiş cevher kütlelerinin yüzeyden uzaklaştırılması, tozumanın önlenmesi gibi amaçlarla kullanılmaktadır (Ediz vd. 2001; Mavis, 2003; Ağırtaş, 2017).

Madencilik faaliyetleri sonrasında ise değerli mineralce zengin metalürjik işlemlerde kullanılabilir/satılabilir bir konsantre elde edilmesi amacıyla; kırma/öğütme, zenginleştirme ve susuzlandırma olarak isimlendirilen bir dizi cevher hazırlama/zenginleştirme yöntemleri uygulanır. Gerçekleştirilen bu cevher hazırlama/zenginleştirme ve kömür yıkama işlemleri istisnai durumlar hariç (kırma, havalı sınıflandırma/zenginleştirme işlemleri, cevherde çözünebilir metal tuzlarının bulunması vb.) sulu ortamlarda yapılmaktadır. Su kullanım miktarları uygulanan yöntemlere göre değişkenlik göstermekte olup ortalama değerler Tablo 1'de verilmiştir. Belirtilen işlemlerin herhangi bir aşamasında elde edilen atıksu çoğunlukla su ve katı mineral tanelerinden oluşmaktadır. Tesisin bir kesintiye uğramadan üretimini sürdürebilmesi için gerekli olan su çoğunlukla atıksuya uygulanan katı/sıvı ayrımı (susuzlandırma) işlemleri ile sağlanmaktadır (İpekoğlu, 1997; Özün, 2018).

Tablo 1. Madencilik faaliyetlerinde su tüketim miktarları (Water consumption amount in mining)
(Torun, 1961; Mavis, 2003; Kızıman, 2009; Mutlutürk, 2018)

Uygulanan yöntem	Su tüketimi (yaklaşık brüt değer)
Sondaj ¹	2-5 gpm delik
Kırma (toz kontrolü amaçlı) ²	1-6 gpt
Yaş eleme	3-250 gpt
Öğütme (çubuklu/bilyalı değirmen)	500-700 gpt
Yarı otojen öğütme	475-700 gpt
Sallantılı masa ile zenginleştirme	370 gpt (+100 gpt yıkama suyu)
Jig ile zenginleştirme	160-475 gpt
Elmas tel ile doğaltaş blok üretimi ³	380-630 l/m ³ blok kesim
Katrak ile doğaltaş ebatlama	2.650 l/m ² kesim
S/T ile doğaltaş ebatlama	875 l/m ² kesim

¹galon= 3.78 litre, ¹gpm: galon/metre, ²gpt: galon/ton cevher, ³l/m³: litre/m³

Atıksuyun katı partiküllerden arındırılmadan tesiste kullanılması durumunda atıksuda bulunan ufalanmış mineral taneleri nedeniyle kazıcı/kesici uçların kesme performansları azalmakta, kesici üniteler daha çabuk aşınmakta ve su aktarma pompalarında tıkanma vb. sorunlar ortaya çıkmaktadır (Acar, 2001; Celik ve Sabah, 2008). Cevher hazırlama/zenginleştirme ve kömür yıkama işlemlerinde ise atıksuyun içermiş olduğu katı partiküllerden yeterince arındırılmaması durumunda artan pülp vizkozitesi, ortam yoğunluğu vb. nedenlerle öğütme, sınıflandırma ve zenginleştirme işlemlerinin verimi azalmaktadır (Özün, 2018).

Dünya tatlı su rezervlerinin nüfus, endüstriyel üretim ve tarım faaliyetlerinin artışı gibi nedenlere bağlı olarak

azalması, ve tatlı su kaynaklarına olan talebin her geçen gün artması; su kullanımı kaçınılmaz olan birçok endüstriyel uygulamada olduğu gibi madencilik sektöründe de atıksuyun hızlı bir şekilde geri dönüştürülmesi işlemlerinin önemini artırmaktadır. Birden çok yöntemin bir arada kullanımı ile gerçekleştirilebilen katı/sıvı ayırım işlemlerinde suyun yaklaşık %50-60'ı çöktürme, yaklaşık %20-30'u da filtrasyon işlemleriyle geri kazanılabilmektedir. Singh vd. (1996) tarafından gerçekleştirilen araştırmada atıksuyun etkin bir şekilde geri dönüşümü ve tesiste tekrar kullanımı ile tesisin üretime devam edebilmesi için gerekli olan ilave su ihtiyacının %50 oranında azalttığı bildirilmiştir. Böylece, tesisin coğrafi konumundaki su geliri (yağmur, dere, yer altı suları vb.) de dikkate alınarak, oluşan atıksuyun içermiş olduğu katı partiküllerden kısmen/tamamen arındırılarak tesiste tekrar kullanılması ve tesis için gerekli ilave su ihtiyacı azaltılabilmektedir. Ayrıca geri dönüştürülen suda bulunan kalıntı reaktifler flotasyonla zenginleştirme işlemi gerçekleştiren tesislerde reaktif kullanım miktarının da azalmasını sağlayabilmektedir (Coleman ve Wallace, 1978). Bunlara ek olarak atıksuyun doğaya deşarj edilmesi durumunda su niteliklerinin yönetmeliklere (Resmi Gazete, 2004) uygun olması gerekmektedir. Böylece çevresel kirliliğin önüne geçilirken doğal yaşamın zarar görmesi de engellenebilmektedir (Sayılğan ve Karacan, 2019). Bu bağlamda bu çalışma kapsamında madencilik sektöründe yaygın olarak uygulanan atıksu yönetimi ve katı/sıvı ayırım yöntemleri hakkında genel bilgiler verilmesi hedeflenmiştir.

2. Atıksu İçerisindeki Mineral Tanelerinin Çökelme Davranışları (Settling Behavior of Mineral Particles in Wastewater)

Madencilik faaliyetlerinde atıksular uygulanan yönteme bağlı olarak iri boyutlardan çok ince boyutlara kadar geniş bir tane boyutu dağılımına sahip mineral taneleri (çoğunlukla gang; değersiz mineraller) ve sudan oluşmaktadır. Patlatma, kazı işlemleri ve kırma/öğütme vb. işlemler esnasında oluşan zenginleştirme boyut altı (şlam; çok ince boyutlu mineral taneleri) değerli mineraller ve bunlara ek olarak tesisin öğütme/zenginleştirme verimine bağlı olarak değerli mineral ve/veya bağlı taneler (serbestleşmemiş değerli mineral taneleri) de atıksu içerisine karışabilmektedir.

Mineral taneleri ve su arasındaki yoğunluk farkının çok fazla olması nedeniyle en verimli katı/sıvı ayırım yöntemi olarak çöktürme işlemleri uygulanmaktadır (İpekoğlu, 1997). Çöktürme yönteminde mineral tanelerinin akışkan içerisindeki çökelme hızları yoğunlukları, tane şekilleri, yüzey pürüzlülük özellikleri ve tane boyutları gibi birçok kuvvetin etkisine bağlı olarak değişmektedir. Küresel taneler yassı ve yapraklı tanelere göre, yoğunluğu yüksek olanlar da düşük yoğunluklu mineral tanelerine göre daha hızlı çökelmektedir (de Haan, 2015).

Mineral tanelerinin çökelme hızlarını etkileyen bir diğer önemli değişken ise mineral tane boyutudur. Tablo 2'de 2.65 g/cm³ yoğunluklu mineral için verilen değerler incelendiğinde, benzer koşullar için iri boyutlu mineral tanesi için saniyeler içinde çökelme işlemi gerçekleşirken, aynı yoğunluklu mineral tanesinin çökelme hızı küçülen tane boyutu ile azalmakta; mikron boyutlu taneler için saatleri bulabilmektedir (Bratby, 1993). Kendiliğinden çökemedikleri için klasik fiziksel arıtma yöntemleriyle ayrılamayan (Öztürk vd. 2005) kolloidal boyutlu (1 nm-0.1 nm) taneler için ise bu süre yılları bulabilmektedir (Bratby, 1993).

Tablo 2. Partikül tane boyutlarının sınıflandırılması (Classification of particle sizes) (Bratby, 1993)

Tane Boyutu (mm)	Sınıflandırma	Örnekler	100 mm çökelme için gerekli süre*
10			0.1 saniye
1	Kaba dağılım (Gözle görülebilir)	Çakıl, kalın taneli kum, mineral maddeler, çöktürülmüş ve topaklanmış partiküller, alüvyon	1 saniye
10 ⁻¹			13 saniye
10 ⁻²			11 dakika
10 ⁻³	İnce tane dağılımı (gözle görülebilir)	Mineral taneler, çöktürülmüş ve topaklanmış taneler, alüvyon, bakteriler, plankton ve diğer organizmalar	20 saat
10 ⁻⁴			80 gün
10 ⁻⁵			1 yıl
10 ⁻⁶	Kolloidal dağılım	Mineral taneler, hidroliz ve çöktürülmüş ürünler, makro moleküller	20 yıl

*Yoğunluk: 2.65 g/cm³

Atıksuyun iri boyutta mineral taneleri içermesi durumunda eleme (hareketli; titreşimli elekler ve sabit; kavisli elek kullanımı) ile suyun mineral tanelerinden süzülerek ayrılması sağlanabilmektedir. Ancak mineral tane boyutlarının küçülmesi ile katı/sıvı ayırım verimi de hızla azalmaktadır. Bu durumda gravite, merkezkaç vb.

kuvvetlerin kullanıldığı tikinerler (koyulaştırıcılar), susuzlaştırma elekleri, santrifüjler, vakum filtreler ve basınç filtrelerin kullanımı ile katı/sıvı ayırma verimi artırılmaktadır. Böylece büyük oranda katı partiküllerden arındırılmış su ve daha düşük nem seviyesine sahip konsantre ürünler elde edilebilmektedir. Gerçekleştirilen katı/sıvı ayırma işlemleri ile ayrıca konsantrelerin kullanım özelliklerini iyileştirmek ve nakliye maliyetlerinin azaltılması amacıyla uygulanan termal kurutma için gerekli enerjiden de tasarruf edilmektedir (Wu vd. 2010).

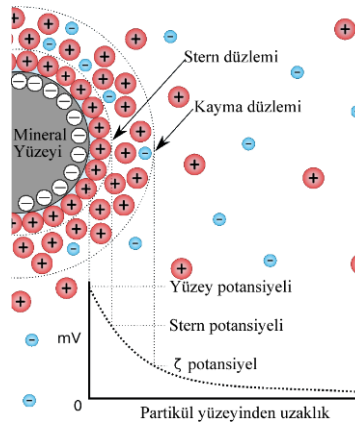
3. Mineral Yüzey Özelliklerinin Çökeltme Davranışlarına Etkisi (Effect of Mineral Surface Properties on Their Settling Rates)

Su veya sulu çözelti ile temas halinde iken minerallerin çoğunun yüzeyinde; iyonizasyon, iyonik adsorpsiyon, belirli kristal yapıdan kaynaklanan yükler ve iyonik çözünme vb. işlemlerin bir ya da birkaçının etkisi ile yükler oluşur. Mikron ve mikron altı boyutların etkin olduğu durumlarda küçük bir yüzey yükünün varlığı, yokluğu ve büyüklüğü; kararlılık, çevreye duyarlılık, elektrokinetik özellikler vb. faktörler açısından önemli sonuçlar doğurabilir (Myers, 1999).

Süspansiyonun dengesini belirleyen önemli değişkenlerden birisi olan mineral yüzeyinde oluşan yük, çevresindeki suyun yapısını ve ortamda bulunan iyonların dağılımıdır. Çözeltide bulunan yüzey yükü ile zıt yüklü iyonların mineral tane yüzeylerine doğru hareketi ile mineral yüzeyinde derişimleri artarken, benzer yüklü iyonlar ise yüzeyden itilmekte ve mineral yüzeyindeki derişimleri azalmaktadır. Bu durumda sıvı içinde hareketi esnasında katı mineral tanesini çevreleyen ve yüzeyiyle zıt iyonlarla yüklü olan bir tabaka da partikülle birlikte hareket etmektedir (Hunter, 1981; Shaw, 1970; Fuerstenau vd. 1985). Bu tabakanın dış yüzeyi ile bir bütün olarak sıvı arasındaki potansiyel fark, elektrokinetik potansiyel veya zeta potansiyel (ζ) olarak adlandırılmakta ve $\pm mV$ cinsinden ifade edilmektedir.

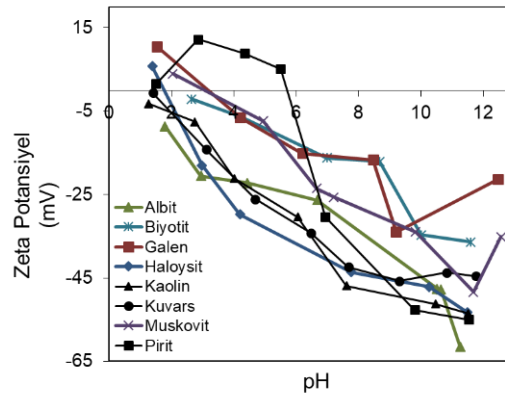
Zeta potansiyel değeri (Şekil 1); bir mineral tanesinin elektriksel çift tabakasından (EÇT) birini oluşturan difüze tabakada bulunan kayma düzlemi üzerindeki ölçülebilen yüzey potansiyelidir. Mineral-su arayüz özelliklerinin önem teşkil ettiği birçok cevher hazırlama/zenginleştirme sürecinde olduğu gibi katı/sıvı ayırma işlemlerinde de büyük bir öneme sahiptir (Ocepek, 1989; Salopek vd., 1992).

Mineral tanelerinin özellikleri, ortam pH değeri vb. değişkenlere bağlı olarak değişen zeta potansiyel (Şekil 2) şiddetinin artması ile birlikte kolloidal mineral taneleri arasındaki itme kuvveti artmaktadır (dispersiyon, yayılma). Mineral tanelerinin net bir pozitif ya da negatif yük taşımadığı pH değeri olan izoelektrik noktada (pH_{iep}) ise elektriksel çift tabaka ortadan kalkmaktadır. Böylece mineral taneleri arasındaki itme kuvveti kaybolmakta ve topaklanma meydana gelmektedir. Kolloidal sistemlerde zeta potansiyel değerleri ayrıca, flokülasyon ve koagülasyonda kullanılan reaktifler ile mineral taneleri arasında gerçekleşen adsorbsiyon mekanizmaları hakkında da bilgiler vermektedir.



Şekil 1. Elektriksel çift tabaka şematik gösterimi (Schematical representation of electrical double layer)

Bunlara ek olarak atıksudaki mineral tanelerinin hidrofobik (su sevmez) yüzey özelliklerine sahip olması durumunda, mineral taneleri sıvı ortama bir yakınlık göstermezler ve elektrolit ortamda kararsız davranırlar. Bu durum mineral tanelerinin kolayca koagüle olmalarına olanak tanımaktadır (Öztürk vd. 2005, Eckenfelder 1989).



Şekil 2. Minerallerin pH'a bağlı zeta potansiyel değerleri (pH vs zeta potential values of minerals) (Özün ve Atalay, 2016; Özün vd. 2019; Özün vd. 2019)

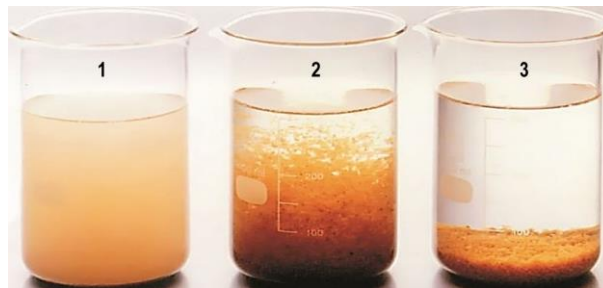
4. Atıksudaki Mineral Tanelerinin Çökelme Hızlarının Artırılması (Increasing the Settling Rate of Mineral Particles in Wastewater)

Katı tanelerin sudaki çökelme hızları başlıca; tane boyutu, tane şekli, yüzey özellikleri ve yoğunluğu, süspansiyonun ya da pülpün % katı oranı, sıvının viskozitesi ve yoğunluğu gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir (Svarovsky, 1981; Mpofu, 2005).

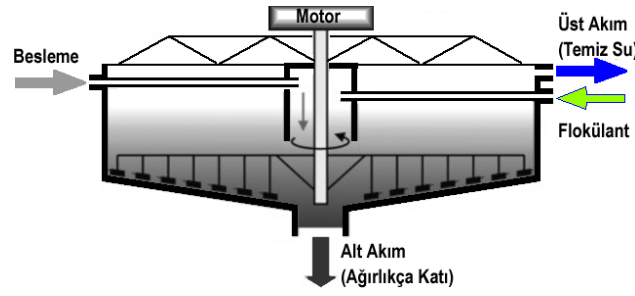
Kolloidal sistemlerde benzer yüzey yüklerine sahip katı mineral taneleri akışkan içerisinde elektrostatik kuvvetlerin etkisi ile birbirlerini her yönde itmekte ve gelişigüzel (Brownian hareket) hareket etmektedirler. Bu sebeple özellikle -50 mikron boyutlu taneler için normal çökeltme işlemleri uygulanan katı/sıvı ayırım işlemlerinde yüksek çökeltme hızı ve yüksek katı oranı elde edilememektedir. Mineral tanelerinin çökeltmelerini zorlaştıran bu durumun ortadan kaldırılması (kararsızlaştırma) için katı/sıvı ayırım işlemlerinde etkili yüzey yükünün azaltılması, yüzey yükünün etki alanının azaltılması ve yüzeye adsorbe edilen su moleküllerinin sayısının azaltılması gerekmektedir. Böylece akışkan içerisinde birbirlerinden ayrı kalan mineral taneleri birbirlerine yeterince yaklaşmakta, London-Van der Waals çekim kuvvetlerinin etkisi ile bir araya gelebilmekte ve sonuç olarak kütleleri büyümektedir (Şekil 3). Artan kütlelerin etkisi ile mineral tanelerinin su içerisinde çökelme hızları da artmaktadır (Eckenfelder 1989; Bratby, 1993; Gülsün Kılıç ve Hoşten, 2009). Mineral tanelerinin çökelme hızları atıksuyu oluşturan katı partiküllerin yüzey özelliklerine bağlı olarak çeşitli koagülant ve doğal/sentetik flokülantların kullanımı ile gerçekleştirilmektedir.

Tesis atıksuyunda mineral tanelerinin bir araya getirilmesi ve katı/sıvı ayırım işlemlerinin hızlandırılması; kesikli ya da sürekli olarak çalışabilen, ağırlıkça katı içeren yüksek alt akış yoğunlukları sağlayan, üst kısmından temiz suyun taşarak alındığı, sıg, konik şekilli taban ve büyük çaplı silindirik gövdeden oluşan tikinerler ile sağlanmaktadır (Şekil 4). Sürekli çalışan tikinerlerin çapları 2-200 metre ve derinlikleri de 1-7 metre olabilmektedir. Özellikle son yıllardaki gelişmelere bağlı olarak susuzlaştırılması zor cevherlerin işlenmesinde de daha yüksek alt akış yoğunlukları sağlayan tikinerlerin kullanımı yaygınlaşmaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006).

Mineral tanelerinin çökelme hızları ayrıca; merkezkaç kuvveti etkisi ile çöktürme işlemi gerçekleştiren ekipmanların kullanımıyla da artırılmakta ve katı/sıvı ayırım işlemi gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3. Askıda (1) mineral tanelerinin bir araya getirilerek çökeltilmesi (2-3) (Flocculation (2-3) of suspended mineral particles (1)) (SNF, 2020)



Şekil 4. Silindirik tikiner kesit görünümü (Cross-sectional view of cylindrical thickener)

4.1. Koagülasyon Yöntemi ile Mineral Tanelerinin Çökeltme Hızlarının Artırılması (Increasing the Settling Rate of Mineral Particles by Coagulation)

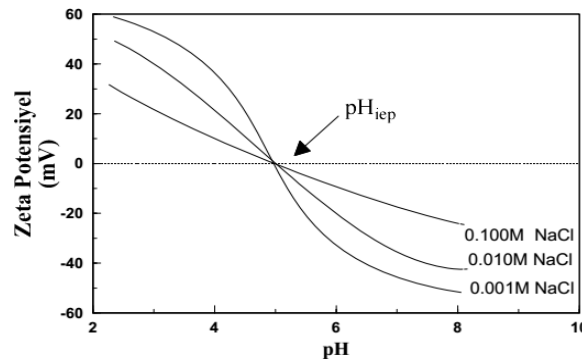
Koagülasyon ve flokülasyon; bir sıvı içerisinde çökmeden askıda duran kolloidal boyutlu katı tanelerin bir araya getirilmesi (topaklanma, kümeleşme, salkımlaşma vb.) anlamına gelmektedir (Tatsi vd., 2003). Suda ve sanayi atıksularında katı/sıvı ayrımının gerçekleştirilmesi çoğunlukla bu iki yöntem ile sağlanmakta ve gerçekleştirilen işlemler sonucunda katı/sıvı süspansiyonunda aşağıda belirtilen iki sonuç elde edilmektedir (Ersoy vd., 2005);

- Süspansiyon karışımında çökmeden askıda duran ya da kendi kendilerine çökmesi çok yavaş olan partiküllerin çökmesini sağlamak,
- Suyun/atıksuyun daha temiz ve berrak olmasını sağlamak.

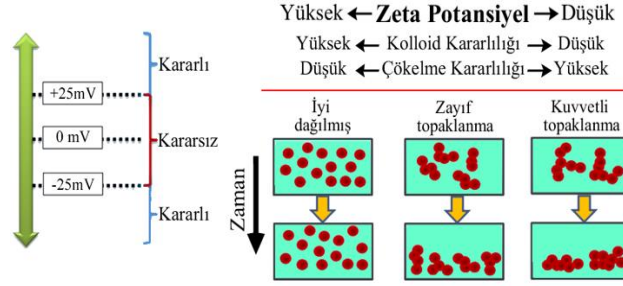
Her iki işlemde de boyutlarını büyütürken mineral tanelerinin daha hızlı çökelmelerini sağlamak amaç olsa da, flokülasyon ve koagülasyon farklı yöntemlerdir. Koagülasyon işleminde çok değerlikli (Fe^{3+} , Al^{3+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- vb.) inorganik elektrolitler (koagülantlar: alum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), ferrik klorür (FeCl_3), ferrik sülfat ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), sönmüş kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) vb.) yardımı ile süspansiyon kararsız hale getirilmektedir. Mineral tanelerinin zeta potansiyel değerleri önemli bir parametredir. Topaklanma; ortama mineral tanelerinin zeta potansiyel değerleri ile zıt yük yüklü iyon/iyonların ilavesiyle, ve koagülantların mineral tanelerinin yüzey yüklerini nötrleştirmesi, EÇT'yi daraltması, mineral taneleri ile hidrojen bağı ya da karmaşık bağlar kurması sonucunda meydana gelmektedir (Svarovsky, 2000; Öztürk vd., 2005). Koagülasyon ile 1 mm boyutuna kadar topaklar elde edilebilmektedir (Svarovsky, 2000).

Bilindiği gibi EÇT'nin kalınlığı minerallerin akışkan içindeki davranışlarını da etkilemektedir. Süspansiyon içerisindeki mineral taneleri pH_{iep}'den daha asidik veya daha bazik pH değerlerinde pozitif ya da negatif yönde artan zeta potansiyel şiddetinin de etkisiyle daha kararlı davranmaktadırlar (Şekil 5-6).

Süspansiyon içindeki mineral taneciklerinin yükü ile zıt yüklü iyonların varlığı, miktarı ve değerlikleri EÇT'yi etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Schulze-Hardy yasasına göre ($1/z^6$; z: iyon değerliği) yüksek değerlikli iyonlar düşük değerlikli iyonlarla karşılaştırıldığında EÇT'yi daha etkin bir şekilde daraltmakta ve artan iyon değerliğine bağlı olarak kritik koagülasyon derişimi (KKD) de azalmaktadır (Bratby, 1993; Szilagyi vd. 2012; Özün ve Ağırtmış Ulus, 2019). Bunun yanı sıra, gerçekleştirilecek işlemin amacına bağlı olarak kullanılan koagülant miktarı ve uygun ortam pH değerleri de değişiklik göstermektedir (Amirtharajah, 1982). Belirlenen ideal koşullarda uygulanan koagülasyon işlemi ile mineral taneleri etrafındaki EÇT daraltmakta (Şekil 5-6), mineral tanelerinin süspansiyon içerisindeki hareketleri kararsızlaşmakta (yaklaşık ± 25 mV zeta potansiyel değerlerinde) ve mineral taneleri salkımlaşmaktadır (Eckenfelder, 1989; Şengül ve Küçükgül, 1997; Öztürk vd., 2005; Özün ve Ağırtmış Ulus, 2019).



Şekil 5. Çözeltilerdeki elektrolit derişimi ve pH'a bağlı zeta potansiyel değişim grafiği (Graph of electrolyte concentration vs pH dependent zeta potential) (Drzymala, 2007)

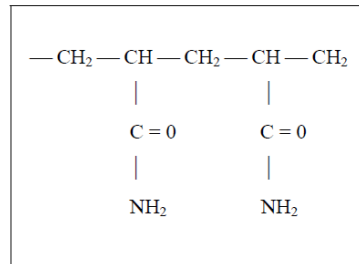


Şekil 6. Zeta potansiyelin süspansiyon özelliklerine etkisi (Effect of zeta potential on suspension properties)

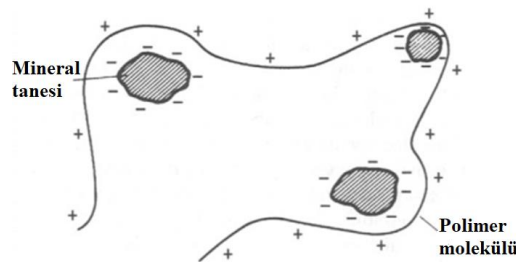
4.2. Flokülasyon Yöntemi ile Mineral Tanelerinin Çökeltme Hızlarının Artırılması (Increasing the Settling Rate of Mineral Particles by Flocculation)

Flokülasyon yönteminde katı partikülleri salkımlaştırma işlemi ortama katılan yüksek molekül ağırlıklı organik elektrolitler (sodyum poliakrilat, polinivil alkol, polidialidimetilamonyum vb.), diğer adıyla polimerler veya flokülantlar ile gerçekleştirilmektedir (Bratby, 1993). Genel olarak sentetik ve doğal olarak ikiye ayrılan flokülantların en önemli özellikleri 20.000.000 g/mol'a kadar çıkabilen çok yüksek molekül ağırlıklarına sahip olmalarıdır (Tablo 3) (Yılmaztürk, 2011). Sentetik flokülantlara göre çok düşük molekül ağırlığına ve flokülasyon etkinliğine sahip olan doğal flokülantlar çeşitli bitki ve sebze tohumlarından elde edilen doğal organik maddeler olup, nişasta, reçine, aljinat (deniz yosunu) sık kullanılan doğal flokülantlar olarak karşımıza çıkmaktadır (Gregory, 1989; İpekoğlu, 1997).

Üç farklı fiziksel yapıda (sıvı, emülsiyon veya katı) üretilmekte olan sentetik flokülantlara örnek olarak en yaygın flokülant türü olan poliakrilamid (PAA) (Şekil 7) ve onun türevleri verilebilmektedir. Uygun miktarda ve pH ortamında kullanımının etkinlik ve ekonomiklik açısından önemli olduğu flokülasyon işlemleri ile 10 mm boyutlarında salkımlar elde edilebilmektedir (Svarovsky, 2000) (Şekil 8).



Şekil 7. Poliakrilamid'in açık formülü (Formula of polyacrylamide) (İpekoğlu, 1997)



Şekil 8. Poliakrilamid-mineral taneleri arası etkileşim (Interaction between polyacrylamide-mineral particles) (Wills ve Napier-Munn)

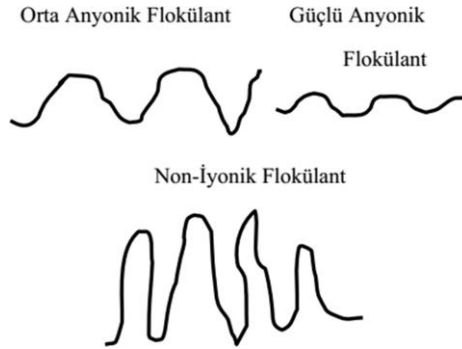
Sentetik flokülantlar iyonizasyon durumlarına göre anyonik, katyonik ve iyonik olmayanlar olmak üzere üç'e ayrılmaktadır. Temel olarak iyonik olmayan bir yapıya sahip olan PAA'nın bazı amid gruplarının (-NH₂) bazik pH koşullarında hidrolize uğramasıyla veya akrilikasit (CH₂=CHOOH) ile bir arada polimerleşmesi sonucu anyonik tip flokülantlar elde edilirken (Ersoy, 2003), PAA'nın dimetil-aminoetil akrilat veya metil akrilat gibi akrilamidin amin türevleri gibi uygun bir katyonik monomer ile bir arada polimerleşmesi sonucunda katyonik tür flokülantlar da elde edilebilmektedir (Demiral, 2013). İyonik olmayan flokülantların ise iyon olmayan grubunda çoğunlukla çok sayıda oksijen, azot veya kükürt atomları bulunmaktadır. Anyonik ve katyonik flokülantlarda olduğu gibi en yaygın iyonik olmayan flokülantlar da PAA esaslı flokülantlardır (Gregory, 1989). İyonik olmayan flokülantlar kıvrımlı ve

yumaklaşmış bir yapıya sahip iken, artan iyoniklik derecesi ile birlikte polimer, taneler arasında köprü oluşumunu kolaylaştıran daha düz ve uzun bir yapı sergilemektedir (Şekil 9) (Stutzmann ve Siffert 1997; Ersoy, 2003).

Flokülanların molekül ağırlıkları ve anyoniklik/katyoniklik dereceleri (düşük, orta ve yüksek) polimerizasyon reaksiyonları kontrol edilerek ayarlanabilmekte olup (Ersoy, 2003), flokülasyon verimleri molekül ağırlığı, kullanım miktarı, karıştırma süresi/hızı, pH ve süspansiyonun sıcaklığı gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir (Ethem, 1975; Işık, 2015; Ağırtmış, 2017; Özün ve Ağırtmış Ulus, 2019). Flokülant olarak kullanılan polimerler süspansiyondaki katı tanelerin yüzeyine elektrostatik (iyon köprüsü ile), kovalent ve hidrojen bağ mekanizmalarından, şartlara bağlı olarak biri ya da birkaçının bir arada etkileşimi ile adsorplanmaktadır (Gregory, 1989; Stutzmann ve Siffert, 1997; Somasundaran ve Das, 1998).

Tablo 3. Molekül ağırlıklarına göre flokülantların sınıflandırılması (Classification of flocculants according to molecular weights) (Demiral, 2013; Işık, 2015)

Molekül Ağırlığı (g/mol)	Genel Tanımlama
10.000.000 ve üstü	Çok yüksek
1.000.000 – 10.000.000	Yüksek
200.000 – 1.000.000	Orta
100.000 – 200.000	Düşük
50.000 – 100.000	Çok düşük
50.000'den az	Çok çok düşük



Şekil 9. İyoniklik derecesinin flokülant yapısına etkisi (Effect of the ionic strength on flocculant structure) (Demiral, 2013)

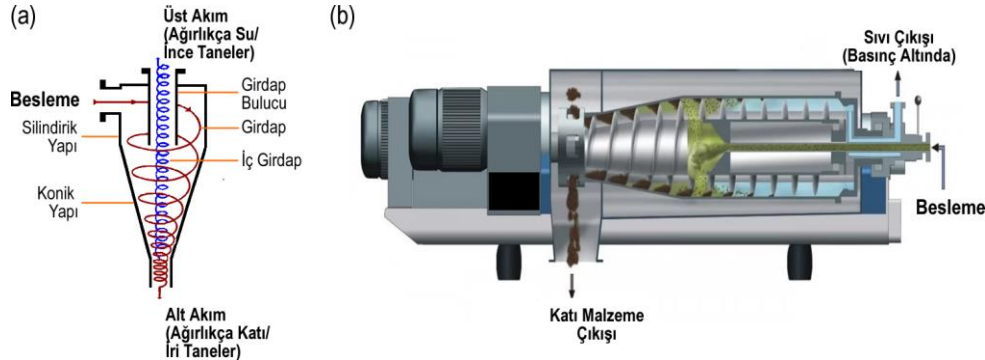
4.3. Merkezkaç Kuvvetinin Etkisi ile Mineral Tanelerinin Çökme Hızlarının Artırılması (Increasing the Settling Rate of Mineral Particles by Centrifugal Force)

Atıksuda çok yavaş çökme hızlarına sahip olan ince boyutlu mineral tanelerinin çökme hızları merkezkaç kuvvetinin etkisiyle artırılabilir. Bu yöntem ile gravite alanında hareketsiz olan koloidal tanelerin dahi çökeltmesi sağlanabilmektedir (İpekoğlu, 1997). Hidrosiklonlar ve santrifüjler yaygın olarak kullanılan, merkezkaç kuvveti etkisi ile mineral tanelerinin çökme hızlarını artıran ekipmanlardır.

Silindirik, konik ve silindir-konik olarak sınıflandırılan hidrosiklonlar hareketli parçalara sahip değildir (Şekil 10 (a)). Çoğunlukla cevher hazırlama tesislerinde minerallerin boyutlarına göre sınıflandırılması amacıyla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, basit yapısal özellikleri ve düşük yatırım/işletme maliyetlerinden dolayı katı/sıvı ayırımı ve susuzlandırma işlemleri için de tercih edilmektedirler. Ancak merkezkaç kuvveti kullanarak katı/sıvı ayırma işlemlerini başarı ile gerçekleştirirler de, ayırma performansları ince boyutlu malzemeler için yeterli olmamaktadır. Özellikle düşük yoğunluklu <10 mikron boyutlu malzeme üst akıma kaçabilmekte, flokülant ile birlikte kullanımlarında da hidrosiklon içindeki yüksek kesme kuvvetleri, oluşturulan salkımların dağılmasına neden olmaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006). Bu sebeple madencilik alanında hidrosiklonlarla karşılaştırıldığında daha karmaşık ve pahalı olan santrifüjler tercih edilmektedir.

Santrifüjler; aralarında yüksek yoğunluk farkı bulunan katı/sıvı ayırma işlemini merkezkaç kuvveti kullanılarak oluşturulan yerçekiminin birkaç katı ivmeler yardımıyla gerçekleştirirler (Hacıfazlıoğlu, 2016). Sürekli boşaltım imkanı sağlaması ve oldukça yüksek katı konsantrasyonları oluşturması nedeniyle madencilik uygulamalarında ve cevher hazırlama işlemlerinde en yaygın kullanım alanı bulan santrifüjler ise spiral boşaltmalı çanaklı santrifüjlerdir. Spiral çanaklı sınıflandırıcılar esasen silindirik konik biçimli, yatay bir döner kabuk veya çanaktan oluşur (Şekil 10(b)). Çanağın içinde ise çanakla aynı yönde ve daha yüksek/daha düşük hızda dönmekte olan bir vidalı konveyör bulunmaktadır. 1600-8500 devir/dakika yüksek hızla dönerek oluşturulan merkezkaç kuvvetinin etkisiyle mineral tanelerinin hızla ekipmanın çeperine çökmesi sağlanmakta ve çökelen mineral taneleri spiraller

vasıtasıyla uzaklaştırılmaktadır (İpekoğlu, 1997). Çökeltme sonrası % 5-20 nem içerikli katı ürün elde edilmesini sağlayan spiral boşaltmalı çanaklı santrifüjler, genel olarak 10 mikrondan daha ince taneleri yeterince tutamamaları ve 1 mikron tane boyutlarına kadar etkin susuzlandırma işlemi gerçekleştiren filtreler kadar etkili olmadıklarından dolayı şlam susuzlandırma işlemlerinde tercih edilirler (Ateşok, 2009; Hacıfazlıoğlu, 2016).



Şekil 10. (a) Hidrosiklon ve (b) spiral boşaltmalı çanaklı santrifüj ((a) Hydrocyclone and (b) spiral discharge bowl centrifuge) (Flottwet, 2018)

5. Filtrasyon (Filtration)

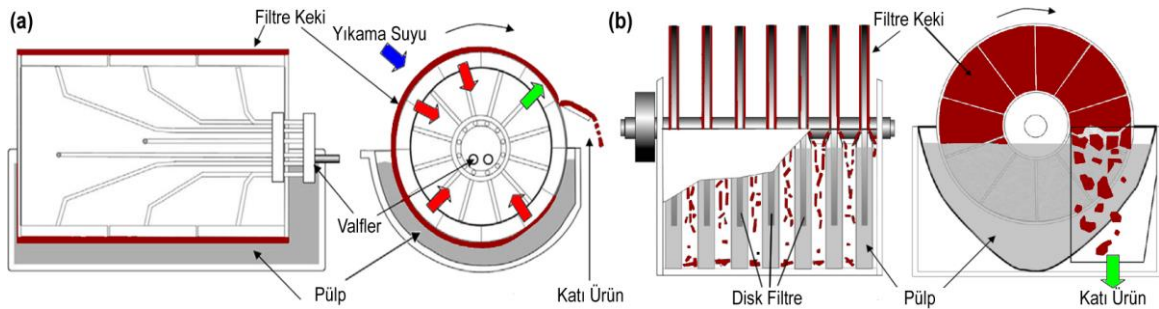
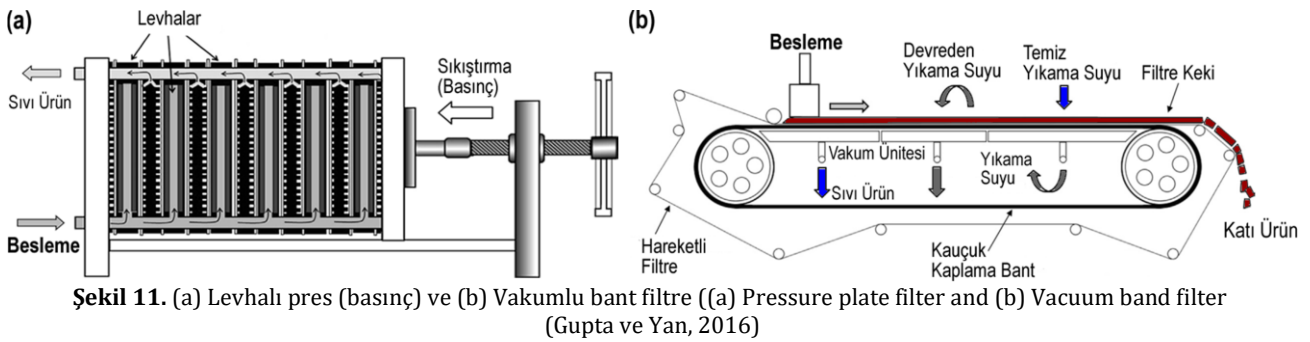
Filtrasyon, katı mineral tanelerinin geçmesini engelleyen, ancak sıvının geçmesine izin veren gözenekli bir ortam aracılığıyla katıları sıvıdan ayırma işlemidir. Filtrelemenin gerçekleştirildiği koşullar çok çeşitli olmakla birlikte en uygun ekipman türünün seçimi çok sayıda faktöre bağlıdır. Endüstriyel ölçekte genellikle <300 mikron boyutlu malzemelerin susuzlandırılması amacıyla uygulanan filtrasyon işleminde iki ortam arasındaki basınç farkından faydalanılır. Filtreleme oranı; filtre yüzey alanı, filtre edilecek süspansiyon ya da atıksuyun viskozitesi, filtre kekinin (katı ürün) direnci vb. faktörlere bağlı olarak değişmektedir (Wills ve Napier-Munn, 2006; Hacıfazlıoğlu, 2016).

Filtrasyon çoğunlukla tikinlerde gerçekleştirilen koyulaştırma işlemleri sonrası uygulanır. Şlam boyutlu malzemelerin filtre yüzeylerini tıkamasını önlemek için genelde filtreleme öncesi karıştırıcılara ilave edilen flokülantlar ile taneler arası boşluğun artırılması ve dolayısıyla filtrasyon işleminin kolaylaştırması sağlanır. Yüksek molekül ağırlıklı flokülant kullanımında oluşan salkımların boyutlarının büyük olması ve çok su içermesi filtre kekinin su içeriğini artırmaktadır. Bu sebeple filtrasyon işlemleri öncesinde düşük molekül ağırlıklı flokülantlar tercih edilmektedir (Moss, 1978; Wills ve Napier-Munn, 2006). Ayrıca suyun filtrelerden geçişini kolaylaştırmak amacıyla yüzey gerilimini azaltıcı kimyasallar da kullanılmaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006).

Filtrasyon işlemlerinde maliyetlerinin düşüklüğü ve çok çeşitli şekillerde dokunmuş yüzeylere sahip olmaları sebebiyle en yaygın kullanılan filtre malzemesi pamuklu kumaşlardır. Mekanik olarak güçlü, korozyona dirençli ve filtratın akışına mümkün olduğunca az direnç göstermesi gereken filtre malzemeleri yün, keten, naylon, ipek, cam elyafı, gözenekli karbon, metaller, suni ipek ve diğer sentetik/gözenekli kauçuk vb. malzemelerden oluşabilmektedir (Concha, 2014).

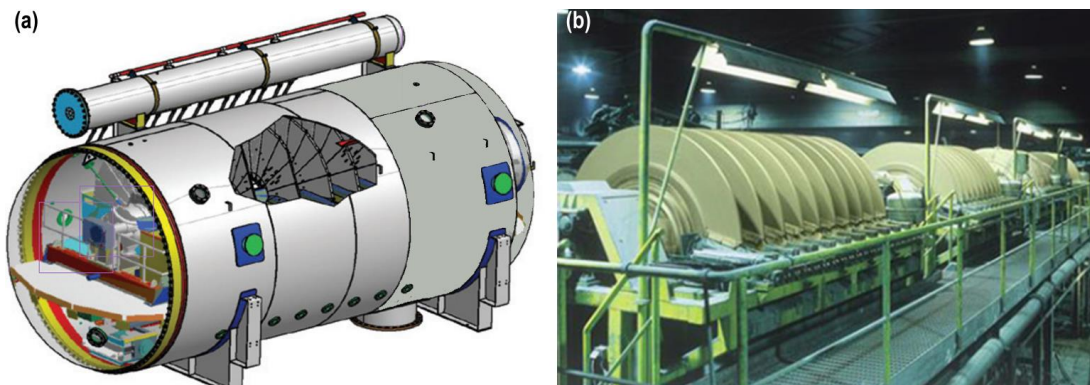
Madencilik ve cevher hazırlama/zenginleştirme tesislerinde filtrasyon işlemi kesikli ya da sürekli olarak uygulanabilmektedir. Vakum ve basınç uygulayarak çalışan filtre ekipmanlarında besleme ortalama tane boyutu <10 mikron olduğu durumlarda basınçlı filtreler tercih edilirken (Şekil 11(a)), yüksek kapasitede besleme olması durumunda ise sürekli çalışan vakumlu (tambur, bant veya disk) filtreler (Şekil 11(b) - 12(a-b)) kullanım alanı bulmaktadır. Filtrasyon işlemine tabi tutulan pülp özelliklerine bağlı olarak filtrasyon sonucunda elde edilen katı ürünün nem içeriği vakumlu filtrelerin kullanımı ile ortalama %25-30'a, basınçlı filtrelerin kullanımı ile ise %7.5-12.5'e (ortalama %15-20) kadar düşürülebilmektedir. Kullanılan yüksek basınçlardan dolayı filtrasyonda daha yüksek akış hızları ve, daha iyi yıkama/kurutma sonuçlarının sağlanması nedeni ile basınç altında filtreleme vakuma kıyasla daha avantajlı görülmektedir. Ancak filtrasyon sonrası katıların basınçlı filtre bölmesinden sürekli olarak uzaklaştırılması son derece zor olabilmekte ve sonuç olarak, sürekli çalışan basınçlı filtreler mevcut olmasına rağmen, büyük çoğunluğu kesikli olarak çalışmaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006).

Kapasitelerinin yüksekliği nedeniyle yaygın olarak kullanılan tambur, disk ve yatay vakumlu filtrelerin yerini ise, günümüz teknolojik gelişmelerine bağlı olarak üretilen daha yüksek basınçlar yardımıyla katı ürün nemini %8'e kadar indirebilen hiperbarik (basınç odalı) filtreler (Şekil 13(b)) (disk, tambur, bant vb.) almaya başlamıştır (Hand, 2000; Yoon 2006; Drummond vd. 2015). Ayrıca son yıllarda filtre bezi ile kaplanmış çelik filtrelerin kullanımı yerine, filtre malzemesi gerektirmeyen 1.5-2.0 mikron boyutlu gözeneklere sahip seramik filtrelerin kullanımı da yaygınlaşmaktadır (Concha, 2014).



Şekil 12. Vakumlu (a) Tambur ve (b) Disk filtre (Vacuum (a) Drum and (b) Disc filter) (Gupta ve Yan, 2016)

Filtrasyon verimini artıran bir diğer unsur ise filtrasyon ortam sıcaklığıdır. Sıcaklığın 250°C'ye kadar çıkarılabilmesi de filtrasyon verimi artırılabilir (Andritz, 2020). Ayrıca plaka paketinin açıldığı, pompa ve yardımcı ekipmanların başlatıldığı ve valf çalışmasının yanı sıra kek boşaltımının otomatik olarak kontrol edildiği otomasyon sistemiyle çalıştırılan filtrelerin kullanımı da yaygınlaşmaktadır (Townsend, 2003).



Şekil 13. (a) Hiperbarik disk filtre ve (b) Seramik disk filtre ((a) Hyperbaric disc filter and (b) Ceramic disc filter) (Concha, 2014; Andriz, 2020)

6. Sonuçlar (Conclusion)

Su madencilik faaliyetlerinin hemen hemen her aşamasında kullanılmakta olup, uygulanan yöntemle ilgili olarak çoğunlukla katı partiküller (mineral taneleri) ve sudan oluşan atıksu ortaya çıkmaktadır. Tesis işleyişinin aksamaması ve verim kayıplarının yaşanmaması amacıyla oluşan atıksu içermiş olduğu katı partiküllerden arıtılarak tesiste tekrar kullanılmaktadır.

Dünya su kaynaklarının %3'den daha az miktarının tatlı su kaynağı olduğu ve bu değerin büyük bir bölümünün de buzulları oluşturduğu bilinmektedir. Dünya nüfusundaki hızlı artış ve buna bağlı olarak artan tarımsal faaliyet, tüketim, endüstriyel uygulamalar vb. tatlı suya olan talebin de her geçen gün daha da artmasına neden olmaktadır. Ülkemizin de içinde bulunduğu; tatlı su kaynaklarının yetersizliği dikkate alındığında, madencilik vb. su kullanımının yüksek olduğu endüstriyel uygulamalarda atıksudan tesisler için gerekli temiz suyun hızlı ve etkin bir şekilde geri kazanımının önemi de her geçen gün artırmaktadır. Halihazırda tesislerde kullanılan suyun bir kısmı elde edilen katı konsantre ve atıklarda nem şeklinde, bir kısmı da atık havuzlarından buharlaşarak kayıp olmaktadır. Sonuç olarak suyun ortalama %60-70'i geri kazanılabilmektedir.

Bu bağlamda gerek satılabilir konsantre nem miktarının ideal değerlere getirilmesi, gerek tesis işleyişinin aksamaması için gerekli suyun temin edilmesi, gerekse su ve doğanın kirlenmesinin önüne geçilmesi amacıyla çoğunlukla çöktürme esasına dayalı olarak gerçekleştirilen katı/sıvı ayırım işlemlerinde hız ve etkinlik önemli değişkenlerin başında gelmektedir. Katı/sıvı ayırımının etkin bir şekilde uygulanması ile atıksuyun büyük bir bölümünün tekrar temiz suya dönüştürülerek tesiste kullanılabilmesi sağlanmakta, dolayısıyla tesis için gerekli olan suyun ilave kaynaklardan kısmen/tamamen karşılanmasının önüne geçilebilmektedir. Bu nedenle katı/sıvı ayırım amaçlı uygulanan yöntemlerin etkinliğinin; teknik bilgi birikimi ve bilimsel doğrular dikkate alınarak gerçekleştirilecek araştırma-geliştirme (ar-ge) çalışmaları ile desteklenerek artırılması teşvik edilmeli ve sağlanmalıdır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Acar, H., 2001. Attention Must Be Paid to Matters During the Establishment and the Running of a Wastewater Clarity Unit for a Marble Processing Plant. The Third Marble Symposium, 3-5 May, Afyon, 289-296.
- Ağırtmış, D., 2017. Fonolit İşleme Tesisi Atıksuyunun Koagülasyon ve Flokülasyon Yöntemleriyle Arıtımı. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 83 s.
- Amirtharajah, A., Mills, K.M., 1982. Rapid-Mix Design for Mechanisms of Alum Coagulation, Journal American Water Works Association (AWWA) 74(4), 210-216.
- Andritz, 2020. Hyperbaric disc filter - HBF Andritz Separation, Austria, <http://www.andritz.com/>
- Ateşok, G. 2009. Kömür Hazırlama ve Teknolojisi, YMGV Yayını, İstanbul.
- Avrupa Birliği Türkiye Delegasyonu, 2018. Madencilik Atıklarının Yönetimi, <https://www.avrupa.info.tr/tr/madencilik-atiklarinin-yonetimi-144>, Erişim Tarihi: 14.10.2020.
- Aznar-Sánchez, J.A.; García-Gómez, J.J.; Velasco-Muñoz, J.F.; Carretero-Gómez, A. Mining Waste and Its Sustainable Management: Advances in Worldwide Research. Minerals 2018, 8, 284.
- Bratby, J., 1993. Coagulation and Flocculation with an Emphasis on Water and Wastewater Treatment, Uplands Press Ltd, Croydon, England, 349 s.
- Celik, M.Y., Sabah E., 2008. Geological and Technical Characterization of Iscehisar (Afyon-Turkey) Marble Deposits and the Impact of Marble Waste on Environmental Pollution. Journal of Environmental Management, 87 (1), 106-116.
- Coleman, R.L., Wallace, B.P., 1978. Tailings disposal in Canada, milling practice in Canada. CIMM, 16, 13-20.
- Concha A.F., 2014. Solid-Liquid Separation in the Mining Industry, Fluid Mechanics and Its Applications Volume 105, Springer International Publishing Switzerland.
- de Haan, A.B., 2015. Solid-Liquid Separation, In Process Technology: An Introduction, Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 197-228.
- Demiral, A., 2013. Killerin Elektrokinetik Özellikleri ve Flokülasyonu. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 65 s.
- Drummond, B., Mackinnon, W., Sorensen, C., 2015. Application of the Hyperbaric Disc Filter for Fine Coal Product Dewatering, <http://www.acps.com.au>. Erişim Tarihi: 10.10.2020.
- Drzymala, J., 2007. Mineral Processing: Foundations of Theory and Practice of Minerallurgy, 1st English edition, Wroclaw University of Technology Yayınları, Wroclaw, Polonya, 502 s.
- Eckenfelder, W.W.Jr., 1989. Industrial Water Pollution Control (Second Edition). McGraw-Hill Internal Editions, Civil Engineering Series, Singapur, 600 s.
- Ediz, İ, Beyhan, S., Yuvka, Ş., 2001. Madencilikte Toz Kaynakları ve Kontrolü. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2, 121-132.
- Ersoy, B., 2003. Mermer İşleme Tesisi Su Arıtımında Kullanılan Flokülantların Tanıtımı. Türkiye IV. Mermer Sempozyumu, 18-19 Aralık, Afyon, 449-462.
- Ersoy, B., Alptekin, A.M., Sarıışık, A., Gürcan, S., Erkan, Z.E., Yıldız, A., 2005. Doğal Taş İşleme Tesisi Atık Sularından Bulanıklığın Giderilmesine Farklı Yöntemlerin ve Farklı Koagülantların Etkisi. Madencilik ve Çevre Sempozyumu, 5-6 Mayıs, Ankara, 117-125.
- Ethem, M.Y., 1975. Flokülasyon Tekniği ve Günümüzdeki Önemi, Madencilik Dergisi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 14 (3), 21-28.
- Flotwett Separation Technologies, 2018. <https://www.flottweg.com/product-lines/decanter/>, Erişim Tarihi: 10.10.2020.
- Fuerstenau, M.C., Miller, J.D., Kuhn, M.C., 1985. Chemistry of Flotation. Society of Mining Engineers of AIME, New York, 177 s.
- Gregory, J., 1973. Rates of Flocculation of Latex Particles by Cationic Polymer. Journal of Colloid and Interface Science, 42, 448-459.
- Gupta, A., Yan, D., 2016. Mineral Processing Design and Operations: An Introduction Second Edition, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Gülsün Kılıç, M., Hoşten, Ç., 2009. A comparative study of electrocoagulation and coagulation of aqueous suspensions of kaolinite powders. Journal of Hazardous Materials 176(1-3), 735-740.
- Hacıfazlıoğlu, H., 2016. Kömür Yıkama Tesis Atıklarının Susuzlandırılmasında Eski ve Yeni Teknolojiler, Bilimsel Madencilik Dergisi Cilt 55, Sayı 3, 17-25.
- Hand, P.E., 2000. Dewatering and Drying of Fine Coal to A Saleable Product. COALTECH 2020.

- Hunter, R.S., 1981. Zeta Potential in Colloid Science: Principles and Applications, London Academic Press, Londra, İngiltere, 398 s.
- Işık, S., 2015. İnce Boyutlu Lavvar Tesisi Atığının Susuzlandırılmasında Optimum Flokülasyon Şartlarının Belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 72 s.
- İpekoğlu, Ü., 1997. Susuzlandırma ve Yöntemleri. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi, İzmir, 113 s.
- Kıdım, F.B., 2009. Düşük Tenörlü Krom Cevherlerinin Zenginleştirilmesinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81 s.
- Mavis, J., 2003. Water Use in Industries of the Future: Mining Industry, Center for Waste Reduction Technologies for U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, Washington, D.C., 47-53.
- Moss, N., 1978. Theory of Flocculation, Mine and Quarry, 7 (May), 57.
- Mpofu, P., Mensah, J.A., Ralston, J., 2003. Investigation of the Effect of the Polymer Structure Type On Flocculation. Rheology and Dewatering Behaviour of Kaolinite Dispersions. International Journal of Mineral Processing 71, 247-268.
- Mutlutürk, M., 2018. Doğaltaş Üretimi ve Su İlişkisi, Bilimsel Madencilik Dergisi, Özel Sayı, 135-142.
- Myers, D., 1999. Surfaces, Interfaces, and Colloids; Principles and Applications, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 493 s.
- Ocepek, D., 1989. Bogatenje Mineralnih in Energetskih Surovin, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, FNT VTOZD, Montanistika, Ljubljana, 350 s.
- Öztürk, İ., Timur, H., Koşkan, U., 2005. Atık Su Arıtımının Esasları. T.C Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara.
- Özün, S., Atalay, M.U., 2016. A Comparative Study on Interactions of Ionic Collectors with Orthoclase, Physicochemical Problems of Mineral Processing 52(2), 955-972.
- Özün, S., 2018. Maden İşletme ve Cevher Zenginleştirme Tesislerinde Atıksu Yönetimi. 1. Uluslararası İçmesuyu ve Atıksu Sempozyumu (Afyonkarahisar, Turkey), 73-84.
- Özün, S., Ulus, D.A., 2019. Coagulation and Flocculation Behavior of Fines in Foid-Bearing Rock Processing Plant (FRPP) Wastewater at Alkaline Environment. Powder Technology 344, 335-342.
- Özün, S., Ergen, G., 2019. Determination of Optimum Parameters for Flotation of Galena: Effect of Chain Length and Chain Structure of Xanthates on Flotation Recovery. ACS Omega 4(1), 1516-1524.
- Özün, S., Atalay, M.U., Demirci, S., 2019. Study of Adsorption Characteristics of Long Chain Alkyl Amine and Petroleum Sulfonate on Silicates by Electrokinetic Potential Microflotation FTIR and AFM Analyses. Particulate Science and Technology 37(4), 492-503.
- Özün, S., Vaziri Hassas, B., Miller, J.D., 2019. Collectorless Flotation of Oxidized Pyrite, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 561, 349-356.
- Resmi Gazete, 2004. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Çevre ve Orman Bakanlığı Yönetmelikler, 25687 (31/12/2004). <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=7221&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>, Erişim Tarihi: 25.10.2020
- Salopek, B., Krasic, D., Filipovic, S., 1992. Measurement and Application of Zeta-Potential, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 4, Zagreb, 157-151.
- Sayılgan, E., Karacan, G., 2019. Characterization and Evaluation of Removal Conditions of Lead-Zinc-Copper Flotation Plant Waste, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(1), 175-181.
- Shaw, D.J., 1970. Introduction to Colloid and Surface Chemistry, Butterworths, London, 236 s.
- Singh, R. N., Hagare, D., Sivakumar, M., 1996. Wastewater Quality Management in Coal Mines in the Illawarra Region. International Conference on Mining and the Environment, 1-16.
- SNF, <https://www.snf.co.uk/chemical-coagulants-used-water-treatment>, Erişim Tarihi: 10.10.2020.
- Somasundaran, P., Das, K.K., 1998. Flocculation and Selective Flocculation-An Overview. In: Atak S, Önal G., Çelik M.S.(eds), Innovation in Mineral and Coal Processing, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, 81-91.
- Stutzmann, Th., Siffert, B., 1997. Contribution to the Adsorption Mechanism of Acetamide and Polacrylamide on to Clays. Clays and Clay Minerals, 25, 392- 406.
- Svarovsky, L., 1981. Characterization of Particles Suspended in Liquids, Solid-Liquid Separation Second edition, Ed. Ladislav Svarovsky, Butterworths-Heinemann Ltd, Oxford, United Kingdom, 8-32.
- Svarovsky, L., 2000. Solid-Liquid Separation (Fourth Edition), Butterworth-Heinemann, 568 s.
- Szczepańska, J., Twardowska, I., 2004. Solid Waste: Assessment, Monitoring and Remediation, in Waste Management Series 4 (Eds. I. Twardowska, H.E. Allen, A.F. Kettrup, W.J. Lacy), 319-385.
- Szilagyı, I., Sadeghpour, A., Borkovec, M., 2012. Destabilization of Colloidal Suspensions by Multivalent Ions and Polyelectrolytes: From Screening to Overcharging, Langmuir 28 (15), 6211-6215. DOI: 10.1021/la300542y
- Şengül, F., Küçükgül, E.Y., 1995. Çevre Mühendisliğinde Fiziksel-Kimyasal Temel İşlemler ve Süreçler, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, Yayın No: 153.
- Tatsi, A.A., Zouboulis, A.I., Matis, K.A., Samaras, P., 2003. Coagulation-Flocculation Pretreatment of Sanitary Landfill Leachates, Chemosphere, 53, 737-744.
- Torun, R., 1961. Cevher Zenginleştirme-Minerallerin Ayrılma Prensipleri ve Maden Sanayindeki Tatbikatı, Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 56(56), 115-131.
- Townsend, I., 2003. Automatic Pressure Filtration in Mining and Metallurgy, Minerals Engineering 16, 165-173.
- Wills, B.A., Napier-Munn, T., 2006. Mineral Processing Technology, 7th Edition, Elsevier Science & Technology Books, 444 s.
- Wu, Z.H., Hu, Y.J., Lee, D.J. Mujumdar, A.S., Li, Z.Y., 2010. Dewatering and Drying in Mineral Processing Industry: Potential for Innovation, Drying Technology, 28:7, 834-842, DOI: 10.1080/07373937.2010.490485
- Yılmaztürk, D., 2011. Andezit İşleme Atıksuyunun Fizikokimyasal Arıtımı. Selçuk Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Yoon, R.H., 2006. Advanced Coal Cleaning and Recovery, US-India Coal Working Group Meeting, April 4-5.