

## Yüzeysel Su Kaynağından İçme Suyu Eldesinde Alkali Koagülasyon Metodunun Uygulanması ve Kalsiyum Sertliğinden İleri Gelen Kireç Taşı Oluşumu

Hasan Kıvanç YEŞİLTAS<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-3331-3209  
Turan YILMAZ<sup>\*1</sup> ORCID 0000-0003-1265-7117

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 11.01.2021

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: YEŞİLTAS, H.K., YILMAZ, T., (2022). Yüzeysel Su Kaynağından İçme Suyu Eldesinde Alkali Koagülasyon Metodunun Uygulanması ve Kalsiyum Sertliğinden İleri Gelen Kireç Taşı Oluşumu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 249-260.

### Öz

Bu çalışmada, Türkmenistan Cumhuriyeti'nde bulunan yüzeysel bir su kaynağından temin edilen doğal suda bulanıklık ve kalsiyum parametrelerinin alkali koagülasyon metodu ile giderimi çalışılmıştır. Araştırma neticesinde %99 değerinde bulanıklık ve %33,50 değerinde kalsiyum giderimi elde edilmiştir. Ayrıca soda ilavesi ile kalsiyum giderim değeri %81'e çıkarılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İçme suyu arıtma, Sertlik giderimi, Alkali koagülasyon, Membran kirlenmesi

### Application of Alkaline Coagulation Method in Obtaining Drinking Water from Surface Water Source and Limestone Formation Caused by Calcium Hardness

#### Abstract

In this study, the removal of turbidity and calcium parameters in natural water obtained from a surface water source in the Republic of Turkmenistan by alkaline coagulation method was studied. As a result of the research, 99% turbidity and 33.50% calcium removal were obtained. In addition, the calcium removal value was increased to 81% with the addition of soda.

**Keywords:** Drinking water treatment, Hardness removal, Alkaline coagulation, Membran fouling

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Turan YILMAZ, tyilmaz@cu.edu.tr

## 1. GİRİŞ

İçme suyu temin edilen su kaynakları, buldukları çevreleri ile sürekli olarak etkileşim içerisinde olan doğal sistemlerdir. Bünyelerinde barındırdıkları safsızlıklardan kaynaklı olarak tüketilmeleri öncesinde yasal mevzuatlarca belirlenmiş analizlerin yapılması ve su sisteminin tanınması önemli bir husus olmaktadır.

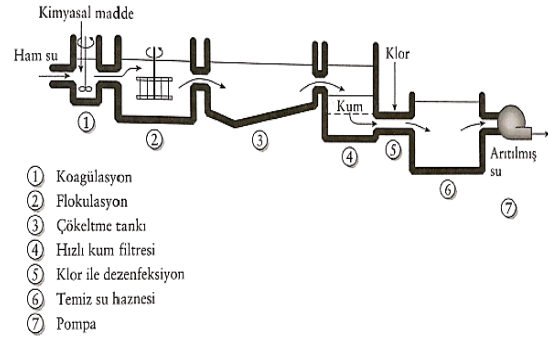
Su sistemlerinde doğal ya da insani faaliyetlerden kaynaklı olarak çeşitli kirleticiler yaygın olarak bulunmaktadır. Bu kirleticiler belirli konsantrasyonların altında canlılar açısından herhangi bir olumsuz etmene sebebiyet vermezken konsantrasyonlarının artması neticesinde ise istenmeyen olumsuz etkiler meydana getirmektedir.

Su sistemlerinde görülmekte olan yaygın iyonlardan ikisi ise su sertliğinin kaynaklarından olan kalsiyum ve magnezyum katyonlardır. Bu çok değerlikli katyonları içeren sular özellikle ısıtıldıklarında kalsiyum karbonat oluşumu sebebiyle çaydanlık ve ısıtma kazanlarının dibini kaplamakta, su iletim borularında ise tıkanmalara sebebiyet vermektedir. Toplam sertlik (TS) parametresinin canlılar üzerinde olumsuz etkisi olmamakta olup suyun TS konsantrasyonunun 250 mg CaCO<sub>3</sub>/L'yi geçmesi durumunda evsel kullanım açısından uygun olmamaktadır [1,2].

Ayrıca içme sularında alüminyum, krom, bakır, kadmiyum, bakır, nikel, demir, mangan ve kurşun vb. canlılık için zararlı elementler de su bünyesinde bulunabilmektedir. Bu elementlerin canlı bünyesinde bulunması durumunda ise çeşitli sağlık problemlerine meydana gelebilmektedir [3-6]. Dolayısıyla partiküler ve çözülmüş maddelerin yanı sıra mikrobiyal açıdan da çeşitli kirleticileri yapısında barındıran doğal suların ilgili yasal mevzuatlara uygun şekilde arıtma işlemine tabi tutulmadan içme suyu olarak kullanılmaları mümkün olmamaktadır [7,8].

Akarsu ve göl gibi doğal sulardan içme suyu hazırlanmasında dezenfeksiyon işlemi önem taşımakta olup geleneksel arıtma metodu olarak koagülasyon, flokülasyon ve çöktürme (KFC)

prosesi kullanılmaktadır [1]. Ülkemizde de doğal sulardan içme suyu eldesinde yerel yönetimler tarafından tercih edilmekte olan KFC prosesine ait akım şeması Şekil 1'de yer almaktadır.



Şekil 1. Klasik su arıtma akım şemasının KFC bölümü [3]

Koagülasyon, flokülasyon ve çöktürme prosesi, görevi birbirinden farklı üç adet reaktörün sıralı bir şekilde (Şekil 1) işletilmesi ile gerçekleştirilen kimyasal bir arıtma metodudur. KFC prosesinde, karışımli bir ortamda, arıtılacak suya kimyasal madde (koagülant) eklenerek suda mevcut partiküler maddelerinin stabiliteilerinin bozulması sağlanarak, kendi ağırlıkları ile çökelmeye hazır flokların oluşturulması gerçekleştirilmektedir [9]. Sıralı sistem KFC reaktörlerinden ilkinde yüksek karıştırma hızında çalışılmakta olup koagülant eklenmesi neticesinde koloidal maddelerin stabiliteilerinin bozulması hedeflenmektedir. İkinci ünite ise daha yavaş karıştırma hızında çökelmeye hazır flokların çökmemesi sağlanarak daha büyük flokların elde edilmesi amaçlanır. Son ünite ise karıştırma işlemi sonlandırılmakta olup su içerisinde mevcut başta askıda katı madde (AKM) ve bulanıklık olmak üzere çeşitli organik ve inorganik kirleticilerin çöktürülerek giderilmesi gerçekleştirilmektedir [2,7].

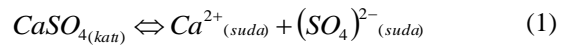
KFC metodu ile içme sularının arıtılmasında çoğunlukla, bünyesinde alüminyum ve demir bulunan (alüminyum sülfat, demir-III-klorür ve demir sülfat gibi) çeşitli inorganik koagülantlar kullanılmaktadır [10,11]. Ayrıca ham suyun bileşimine göre arıtmada hangi koagülantın kullanılmasının uygun olacağı ve uygun koagülant dozunun belirlenmesi için jar test adı verilen

artılabilirlik çalışması yapılarak uygun arıtma şartları belirlenmektedir [12]. Alüm (alüminyum sülfat) ve demir-III-klorür gibi bünyesinde anyon ve katyon bulunduran kimyasallar suda iyonlaşarak suyun iletkenlik değerini arttırmakta olup koagülant katyonları ( $Al^{3+}$  ve  $Fe^{3+}$  vb.) su içerisinde mevcut negatif yüklü kolloidler ile floklar oluşturarak kirleticilerin gideriminde kullanılmaktadır [13]. Su ortamında, koagülantların iyonlaşmasının arıtma açısından önemli faydaları bulunurken kalıntı miktarlarının canlı sağlığı açısından istenmeyen sağlık sorunlarına sebep olacağı bilinmektedir. Örneğin içme sularında  $Al^{3+}$  katyonlarının bulunması durumunda zaman içerisinde istenmeyen bir hastalık olan alzaymır hastalığı canlı bünyesinde meydana gelebilmektedir [14]. Koagülant kalıntıları sadece çıkış suyunda tespit edilmemekte olup meydana gelen atık çamurda da bulunmaktadır. Bu çamurların bertarafı ise ayrı bir işletme kalemi olmaktadır [15]. İstenir ise yasal zorunluluk [16].

Klasik KFC metoduna kıyasla daha kaliteli çıkış suyu değerlerine ulaşılabilen membran filtrasyon sistemleri de içme sularının arıtılmasında yaygın olarak kullanılan diğer bir arıtma prosesidir [17]. Membran filtrasyon, membran olarak adlandırılan seçici ve geçirgen materyalden, basınçlı bir ortamda arıtılacak suyun geçirilmesi ile bünyesinde bulunan safsızlıkların uzaklaştırılması olarak kısaca tanımlanmaktadır. Arıtılacak kirleticinin türüne ve atıksuyun yapısına göre özel olarak üretilen membranlar gözenek çapları ve işletme basınçlarına göre ultra filtrasyon (UF), mikrofiltrasyon (MF), nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (TO) olmak üzere dört sınıfa ayrılmaktadır [18]. İçme suyu arıtımında ise mikrobiyal kirliliğin yanında AKM ve kolloidal madde gideriminde de yüksek oranlarda verim alınan NF sistemleri yaygın olarak tercih edilmektedir [19,20]. Ayrıca araştırmacılar tarafından membran proseslerinin, zaman içerisinde klasik KFC metodunun yerini alabileceği bildirilmektedir [17,21]. Fakat membran sistemleri, hassas reaktörler olup bünyelerinde yer alan seçici geçirgen yapının korunması ve periyodik bakımlarının düzenli olarak yapılması sistemin sürdürülebilirliği açısından önem taşımaktadır [22]. Ayrıca arıtılacak

suyun çözünmüş ve kolloidal madde içeriği fazla olması durumunda ön arıtma yapılması ve işletme esnasında düzenli olarak periyodik bakımlarının yapılması gerekmektedir [11,18]. Aksi halde suda mevcut safsızlıklardan kaynaklı olarak membranın gözeneklerinde tıkanmalar meydana gelebilmekte ya da membranın yüzeyi tamamen kapanabilmektedir. Membran kirlenmesi olarak nitelendirilen bu olumsuz durumun meydana gelmesi ile birlikte sistemin arıtma verimi düşmekte ve zaman içerisinde membran malzemesi geri dönülmez deformasyonlar ile karşı karşıya kalmaktadır [17,22].

Sülfat iyonu, doğal sularda yaygın olarak bulunan temel elementlerden biridir. Nehir sistemlerinde sülfat konsantrasyonu 0-630 mg/L konsantrasyonunda değişirken göl ve yeraltı sularında sırası ile 0-250 mg/L ve 0-230 mg/L arasında değişmektedir. Sülfat konsantrasyonu deniz suyunda ise genel olarak 2,7 g/L seviyesinde olmaktadır [23]. Yüksek sülfat içeriğine sahip doğal sularda ise su içerisinde bulunan kalsiyum ve baryum gibi çözünmüş mineral tuzları gene su içerisinde bulunan sülfatlar ile reaksiyona girerek kalsiyum sülfat (Eşitlik 1) ve baryum sülfat bileşiklerini oluşturmaktadır. Bu tip sulardan içme suyu eldesinde, membran filtrasyon proseslerinin kullanılması durumunda seçici ve geçirgen membranın yüzeyi sülfatlı bileşikler ile kaplanmakta ve arıtma verimi olumsuz olarak etkilenmektedir [22,24,37]. Ayrıca sülfat iyonu için içme suyu temininde istenilen sınır değer 250 mg/L'dir. Sınır değerini aşılması durumunda suyun tadında bozulmalar meydana gelmekte olup suyun iletilmesi esnasında korozyona sebebiyet vermektedir. 500-750 mg/L arasındaki sülfat konsantrasyonlarında ise insanların sindirim sisteminde tahrişe neden olmakta ve ishale sebebiyet vermektedir [5,23].



Bu çalışmada Türkmenistan Cumhuriyeti'nde bulunan bir yüzeysel su kaynağından temin edilen su numunesi ile alkali koagülasyon metodu kullanılarak bulanıklık ve kalsiyum giderimi çalışılmıştır. Bu çalışmanın önemi ise çalışılmış

olan su numunesinin yüksek miktarda sülfat iyonu muhteva etmesidir. Bu sayede alkali koagülasyon metodunun laboratuvar ortamında uygulanması ile ilgili temel bir giderim çalışması literatüre sunulurken ayrıca kireç taşı oluşumu ve KFC metodu ile kontrolü hakkında birlikte çalışılmış bir araştırma hazırlanmıştır.

## **2. MATERYAL VE METOT**

### **2.1. Materyal**

#### **2.1.1. Çalışmada Kullanılan Yüzeysel Su**

Bu çalışmada kullanılan ham su, Türkmenistan Cumhuriyeti'nde bulunan yüzeysel bir doğal su kaynağından temin edilmiştir. Ham su numunesinde; pH, alkalinite, bulanıklık, AKM, toplam sertlik, sülfat çamur hacim indeksi, kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum, alüminyum, krom, demir, mangan, nikel ve kurşun olmak üzere 16 adet parametrenin analizleri yapılmıştır.

#### **2.1.2. Kullanılan Cihazlar ve Reaktifler**

Bu çalışmada gerçekleştirilmiş olan pH, bulanıklık ve sülfat ölçümleri sırası ile WTW marka 3110 model pH metre, Nanocolor marka 100 D model spektrofotometre ve Perkin Elmer marka TU-188 model UV-VIS spektrofotometre cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. AKM analizlerinde Whatman GF/C filtre kağıdı kullanılmış olup kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum, alüminyum, krom, demir, mangan, nikel ve kurşun analizleri ise Perkin Elmer marka Optima 2100 DV model ICP-OES cihazı ile ölçülmüştür. Alkali koagülasyon çalışmasında koagülant olarak sodyum hidroksit (NaOH, Merck) ve soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , Merck) kimyasalları kullanılmıştır.

### **2.2. Metot**

#### **2.2.1. Arıtılabilirlik Çalışması ve Alkali Koagülasyon**

Doğal sulara bulunan AKM ve bulanıklık parametreleri çöktürme havuzu kullanılarak

düşürülebilmektedir. Bulanıklık ve AKM miktarının azaltılması neticesinde ise arıtma ünitesinde yer alan mekanik aksamlar korunmakta ve çöktürme ünitesinden sonra yer alan arıtma ünitesinin de yükü azaltılmaktadır [7,9]. Bu çalışmada kullanılan ham suda çamur hacim indeksi (ÇHİ) deneyi (imhoff hunisi, 1 saat bekleme süresi) gerçekleştirilerek arıtma alkali koagülasyon prosesi öncesinde çöktürme havuzu gereksinimi incelenmiştir. ÇHİ deneyini takiben ham atıksuyun KFC prosesi ile arıtılabilirliği çalışmıştır.

Jar test cihazı ile pH 10,5'de sürdürülen alkali koagülasyon uygulamasında 0,5 L numune hacmi seçilerek sodyum hidroksit (NaOH) koagülantı kullanılmıştır. Hızlı karıştırma (koagülasyon), yavaş karıştırma (flokülasyon) ve çöktürme aşamalarına ait reaksiyon süreleri (ve karıştırma hızları) üç aşama için sırası ile 3 dakika (120 dev/dk.), 20 dakika (30 dev/dk.) ve 30 dakika olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada ayrıca ham suyun alkalinite değeri soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) eklenmesi ile artırılarak alkali koagülasyon uygulaması tekrarlanmıştır. Suda mevcut olan kalsiyum ve magnezyum iyonlarının miktarına göre soda miktarı hesaplanmış olup 250 mg/L soda eklenmiştir. Alkali koagülasyon uygulaması bir önceki aşama ile aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir.

#### **2.2.2. Analitik Metotlar**

Bu çalışmada pH, alkalinite, toplam sertlik (TS), AKM, sülfat ve çamur hacim indeksi analizleri Çizelge 1'de yer alan metotlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir [25]. Kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum, alüminyum, krom, demir, mangan, nikel ve kurşun analizleri ise Perkin Elmer marka ICP OES (Optima 2100 DV) cihazı ile EPA Method 200.7'e uygun olarak ölçülmüştür [26]. Bulanıklık ölçümleri ise DIN 38 404-C2-4'e uygun olarak tamamlanmıştır [27].

**Çizelge 1.** Analizleri gerçekleştirilen deneyler ve metotları [20]

Deney Adı	Metot
pH	4500 H <sup>+</sup> B
Alkalinite	SM-2320 B
Toplam Sertlik	SM-2340 C
Askıda Katı Madde	SM-2540 D
Sülfat	SM-4500 E
Çamur Hacim İndeksi	SM-2710 D

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Doğal (Ham) Su Karakterizasyonu

Aritılabilirlik çalışmasında kullanılan ham su numunesinde, bu çalışmanın materyal ve metot bölümünde belirtilmiş olan 16 adet analiz yapılarak su karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Aritılacak ham su numunesine ait analiz sonuçları ve TS-266'da yer alan sınır değerleri Çizelge 2'de yer almaktadır.

**Çizelge 2.** Ham atıksu karakterizasyonu ve TS-266 sınır değerleri

Parametre	Değer	TS-266 Sınır Değer [5]
pH	8	6,5-9,5
Alkalinite, mg CaCO <sub>3</sub> /L	108	-
Bulanıklık, NTU	<b>1185</b>	<b>5</b>
AKM, mg/L	1520	-
Sülfat, mg/L	<b>2532</b>	<b>250</b>
TS, mg CaCO <sub>3</sub> /L	269	-
Kalsiyum, mg/L	76,35	200
Magnezyum, mg/L	18,77	50
Sodyum, mg/L	86,49	175
Potasyum, mg/L	4,55	12
Alüminyum, mg/L	0,0395	0,200
Kadmiyum, mg/L	Ölçülemedi	0,005
Krom, mg/L	<b>0,056</b>	<b>0,050</b>
Bakır, mg/L	Ölçülemedi	2
Demir, mg/L	0,071	0,200
Mangan, mg/L	0,003	0,050
Nikel, mg/L	Ölçülemedi	0,020
Kurşun, mg/L	0,005	0,010

Aritılacak olan ham suyun kalitesinin bilinmesi, arıtma yönteminin seçilmesinde ve proses dizaynında önemli bir husus olmaktadır [3]. Bu

çalışmada kullanılacak olan doğal su numunesinin bir behere alınarak karıştırılmasını takiben aşırı bulanık olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla öncelikli olarak bulanıklık ve askıda katı madde gideriminin gerekliliği anlaşılmıştır. Laboratuvarındaki gözlemleri takiben ham suyun bulanıklık değerinin 1185 NTU ve AKM değerinin 1520 mg/L olduğu tespit edilmiştir. Bulanıklık suda mevcut ince parçacıklar ile partiküler maddelerden kaynaklanmakta olup 5 NTU değerinin üstündeki bulanıklık değerleri kolaylıkla fark edilebilmektedir [3].

pH parametresi, su arıtımında, tesislerinin tasarımı ve işletilmesi açısından dikkat edilmesi gereken önemli bir kontrol parametresidir [9]. İçme sularında arzu edilen pH değerinin 6 ile 9 arasında olması istenirken daha yüksek pH değerlerinde suyun tadında istenmeyen tatsızlıklar meydana gelmektedir [3,4]. Düşük pH değerlerinde ise suyun iletildiği isale hatlarında korozyona sebebiyet verirken aynı zamanda da ortamın asidik olması neticesinde suda mevcut kadmiyum, krom, bakır vb. metallerin çözünürlüğünü artmaktadır [3,24]. pH parametresi ayrıca doğal ekosistemlerin su kalitesi hakkında fikir veren önemli bir kalite parametresi olup bu çalışmada kullanılan ham suyun pH değeri 8 olup su kalitesi ve kullanılabilirliği açısından uygun olmaktadır [28]. Suyun tampon kapasitesinin bir ölçüsü olan alkalinite, pH parametresi ile ilişkili olup su içerisinde mevcut karbonat ve bikarbonat iyonlarının matematiksel eşitliği olarak ifade edilmektedir [24]. Bu çalışmada kullanılan ham suyun alkalinite değeri 108 mg CaCO<sub>3</sub>/L'dir. KFC prosesinde sudaki alkalitenin artırılması neticesinde arıtma veriminin yükseldiği bilinmekte olup ham suyun alkalinite değerinin artırılması ile daha yüksek giderim verimleri elde edilebilmektedir [2].

Temin edilen ham suyun sülfat ve toplam sertlik konsantrasyonları sırası ile 2532 mg/L ve 269 mg/L olmaktadır. TS-266'da yer alan sınır değerlerin üstünde değerler olması sebebiyle sülfat ve TS giderimi gerçekleştirilmeden ham suyun içme suyu olarak kullanılması mümkün

olmamaktadır. Ayrıca iletim hattında oluşacak tabakalaşma problemlerinin de önlenmesi amacıyla TS parametresinin kontrol edilmesi önemli olmaktadır.

Kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum mineralleri insan fizyolojisi için önemli elementler olup düzenli olarak canlı bünyesine düzenli olarak alınması gerekmektedir. Kalsiyum ve magnezyum elementleri birlikte kemik oluşumuna katılmakta olup kalp ve dolaşım sisteminde kullanılmaktadır. Sodyum ve potasyum elementleri ise sinir hücrelerinde kullanılmaktadır. Kalsiyum ayrıca kanın pıhtılaşması ve sinir uyarılarının iletilmesi açısından da önemli bir elementtir [29]. Kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum elementleri için TS-266'da yer alan sınır değerler sırası ile 200 mg/L, 50 mg/L, 175 mg/L ve 12 mg/L olmaktadır [5]. İçme sularında kalsiyum fazlalığında taş oluşma potansiyeli artmaktadır. Magnezyum fazlalığı ishale sebep olurken sodyum ve potasyum fazlalığında ise suda tuzluluk hissi yaratır, tat problemlerine sebep olmaktadır [30]. Ham suyun kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum değerlerinin (Çizelge 1) TS-266'da yer alan sınır değerlerinden düşük olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 1 incelendiği zaman ham suyun alüminyum, mangan ve krom değerlerinin TS-266'da yer alan sınır değerlerinin altında olduğu görülmektedir. Fakat krom değerinin TS 266'ya göre yüksek çıkması sebebiyle uygun arıtımının gerçekleştirilmesi gerekmektedir [5].

Ham suda mevcut kadmiyum, bakır ve nikel elementleri için ise analizin gerçekleştirildiği cihazın ölçüm limitinin altında kalması sebebiyle ölçümler gerçekleştirilememiştir. Analizin yapıldığı cihazın ölçüm yapabileceği en alt limit ölçüm değerleri kadmiyum, bakır ve nikel elementleri için sırası ile 0,0012 mg/L, 0,0012 mg/L ve 0,0038 mg/L olmaktadır. İlgili üç element için ICP-OES cihazının ölçüm limitleri üzerinden yapılan değerlendirmede, ham suyun kadmiyum, bakır ve nikel konsantrasyonlarının TS-266'da yer alan sınır değerlerden düşük olduğu anlaşılmıştır.

### **3.2. Ham Suda Çökebilir Katı Madde Hacminin Belirlenmesi**

Doğal sular, çevresel etmenlerinde (yağış, rüzgar ve yüzeysel akış gibi.) etkisi ile katı madde muhtevası açısından zengin ortamlardır. Ham suda yer alan katı maddelerin arıtma tesisine ulaşmasını takiben giderilmesi ya da azaltılması tesisin mekanik aksamının zarar görmesini engellemektedir [7]. Bu amaçlar ile çöktürme havuzu inşa edilerek ham sudan katı madde muhtevasının giderimi gerçekleştirilmektedir.

Biyolojik arıtma tesislerinde, aktif çamurun çökelme davranışının tespiti ve arıtma tesisinde çöktürme havuzlarının verimliliğinin kontrol edilmesi amacıyla çamur hacim indeksi (ÇHİ) deneyi periyodik olarak gerçekleştirilmektedir. Ayrıca hâlihazırda ÇHİ deneyi çökelme tanklarının performansının da değerlendirilmesinde kullanılan en uygun metot olmaktadır [3,6].

Bu çalışmanın materyal ve metot bölümünde belirlenmiş olan yöntem uygun olarak ham suda ÇHİ analizi yapılmıştır. ÇHİ analizini takiben ham suyun çökebilir katı hacmi 11 mL/L olarak tespit edilmiştir. Şekil 1'de ÇHİ deneyinin başlangıcına ve ÇHİ deneyi sonrasında ait görüntüler sırası ile yer almaktadır.



**Şekil 1.** Ham suyun ÇHİ analizine başlanmadan önceki (sol) ve ÇHİ analizi sonrası (sağ) görüntüleri

ÇHI deneyi sonrasında ham suyun bulanıklığının azaldığı tespit edilmiş olup (Şekil 1) bekleme süresinin arttırılması ile tespit edilen ÇHI değerinin yükseleceği düşünülmektedir. İçme suyu temininde ham suyun kaynağına uygun olarak arıtma tesisinin girişinde dezenfeksiyon işlemi yapılmakta olup katı madde muhtevasının giderilmesi ile dezenfeksiyon işleminin de verimi arttırılabilmektedir [1,7]. Ayrıca kurulacak olan çöktürme ünitesini takiben KFÇ prosesinde de koagülant kullanımında azalma meydana gelirken giderilen madde miktarının azalması ile birlikte KFÇ prosesinin bir çıktısı olan atık çamur miktarı da azalacaktır.

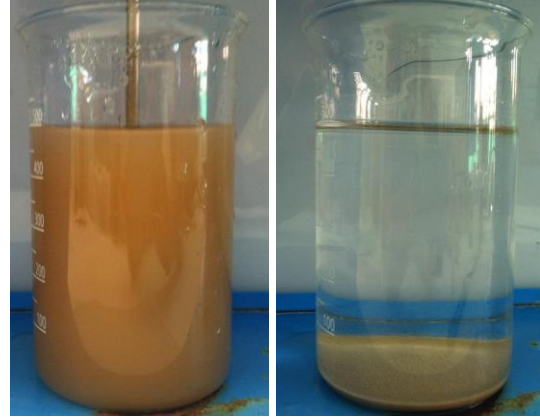
### 3.3. Alkali Koagülasyon ve Arıtılabilirlik Çalışması

Yüzeysel su sistemlerinde yaygın olarak bulunmakta olan kil ve silt içeriğinden kaynaklı olarak önemli ölçüde bulanıklık bulunmaktadır. Sürekli hareket halinde olan bu partiküller bünyelerinde bulunan elektrostatik yükten kaynaklı olarak bir araya gelmeleri engellenmektedir [1]. Su ortamında kendi halinde çökelemeyen bu tanecikler taşıdıkları yük (+ ya da -) durumuna göre zıt bir yük ile yüklenmekte ve zıt iyonlardan oluşan ikinci bir tabaka oluşturmaktadır. Oluşan bu tabaka çift tabaka olarak adlandırılmakta ve su ortamına eklenen koagülant vasıtasıyla bu çift tabaka sıkıştırılmaktadır. Sıkışan partiküller ise su ortamında yer alan diğer partiküller ile birbirlerine yaklaşmakta ve koloidal taneciklerin birleşmesi neticesinde pıhtılar oluşmaktadır [31]. Karıştırma işleminin etkisinde oluşan bu pıhtılar neticesinde ise su ortamında bulunan süspansiyon katı, renk, virüs, bakteri ve alglerin uzaklaştırılması da sağlanılmaktadır [32].

Bu çalışmada koagülant olarak seçilen NaOH kimyasalı su ortamında iyonlaşarak  $Na^+$  ve  $OH^-$  iyonları olarak su sisteminde çözünmektedir.  $OH^-$  iyonu varlığında sistemin pH değeri yükselmekte ve su içerisinde mevcut metaller, metal oksitler şeklinde çöktürülerek uzaklaştırılmaktadır. Ayrıca su ortamının pH'ı artması neticesinde su içerisinde mevcut  $Ca^{+2}$  ve  $Mg^{+2}$  iyonları sırası ile kalsiyum

karbonat ( $CaCO_2$ ) ve magnezyum hidroksit [ $Mg(OH)_2$ ] olarak çökecek ve sistemde oluşan flokların artmasına sebep olmaktadır [3,31,32].

Doğal suyun giderim veriminin izlenmesinde Çizelge 2.'de limit değerin üzerinde görülen bulanıklık parametresi ile birlikte kireç taşı oluşumunun ve koagülantın etkisinin gözlenmesi amacıyla toplam sertlik, kalsiyum ve magnezyum parametreleri takip edilmiştir. Arıtılabilirlik çalışması öncesi ve sonrasına ait fotoğraflar Şekil 2'de yer almaktadır.



Şekil 2. Alkali koagülasyon öncesi (sol) ve sonrasına (sağ) ait fotoğraflar görüntüleri

Ham suda gerçekleştirilen arıtılabilirlik çalışması sonrasında bulanıklığının gözle görülebilir bir şekilde azaldığı gözlenmiştir (Şekil 2). Arıtılmış suyun berrak üst fazından alınan numunelerde suyun görsel durumunun tespiti için bulanıklık, sertlik değişiminin izlenmesi amacıyla TS, kalsiyum ve magnezyum ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca canlı bünyesinde bulunması gereken önemli temel elementlerden sodyum ve potasyum konsantrasyonları tespit edilmiştir. Sodyum parametresine ayrıca alkali koagülasyonda kullanılan koagülantın bileşiminde bulunması sebebiyle kontrol edilmesi gerekmektedir. İlgili analizlere ait sonuç çizelgesi, ilgili parametrelerin TS-266'ya göre limit değerleri ve analiz sonuçlarının TS-266 ile karşılaştırılması Çizelge 3'de yer almaktadır [5].

**Çizelge 3.** KFC sonrası çıkış suyu değerlerinin TS-266 standart değerleri ile karşılaştırılması

Parametre	Değer	TS-266	Kontrol
Bulanıklık, TE/F	<2	5	Uygun
TS, mg CaCO <sub>3</sub> /L	184	-	-
Kalsiyum, mg/L	50,77	200	Uygun
Magnezyum, mg/L	13,77	50	Uygun
Sodyum, mg/L	82,52	175	Uygun
Potasyum, mg/L	4,95	12	Uygun

Özyonar ve ark., Sivas içme suyu arıtma tesisi girişinden temin ettikleri ham su numunesinde alümin ve demir tuzlarını kullanarak KFC metodu ile bulanıklık giderimi çalışmışlardır. Araştırmacılar giderim çalışması neticesinde alümin, demir sülfat ve demir klorür koagülantları ile sırası ile %94,5; %93,9 ve %95,3 bulanıklık giderimi elde etmişlerdir [33]. Berktaş ve ark., Konya iline içme suyu temin edilmesinde kullanılan içme suyu arıtma tesisinde kullanılmakta olan kimyasal madde miktarının optimizasyonunu çalışmışlardır. Çalışma neticesinde araştırmacılar içme suyundaki bulanıklık değerinin 5 NTU değerinin altına düşürülmesi için 35 mg/L dozunda alüminyum sülfat dozlamasının yeterli olacağını ve 0,01 mg/L dozunda koagülant yardımcısı olarak polielektrolit ilave edilmesi gerektiğini bildirmişlerdir [34].

Alkali koagülasyonu takiben Çizelge 3'te ölçülmüş olan tüm parametrelerin başlangıç değerlerinden daha az olduğu (Çizelge 1) tespit edilmiştir. Kireç taşı oluşumunun kontrol edilmesi amacıyla toplam sertlik parametresi dolayısıyla kalsiyum sertliğinin giderilmesi amaçlanmış olup ham suyun kalsiyum miktarında %33,50 giderim elde edilmiştir. Ayrıca analizi gerçekleştirilmiş olan altı adet parametrenin TS-266'ya uygun olduğu fakat arıtılmış suyun içilebilir nitelikte olması için yapılmış analizlerin yeterli olmadığı TS-266'da da belirtilmiştir. Özellikle ham suda bulunan krom elementinin

standartlarda yer alan sınır değeri aşması sebebiyle alkali koagülasyonu takiben membran filtrasyon tekniğinin tercih edilmesi ile içme suyu standartlarına uygun içilebilir su elde edilebilecektir.

KFC ünitesini takiben NF sisteminin kurulacak olması durumunda içme suyu olarak kullanılacak suda kalsiyum, magnezyum gibi besleyici elementler bulunacaktır. Fakat TO sistemi kullanılır ise saf su niteliğinde çıkış suyu elde edileceğinden canlılar için besleyici elementler ve minerallerin isteğe bağlı olarak sonradan arıtılmış suya eklenebilmektedir. Eğer ki KFC prosesinden elde edilen arıtılmış su ile TO çıkışında elde edilen arıtılmış su belirli oranlarda karıştırılır ise içme suyunun mineral içeriği artırılarak daha besleyici bir su elde edilmesi mümkündür.

Bu durumun daha iyi gözlenmesi amacıyla TO prosesini temsilen saf su ve KFC prosesine ait çıkış suyu sırası ile %25 ve %75 oranında karıştırılarak yeni bir su bileşimi hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan karışıma ait analiz sonuçları ve TS-266'da yer alan standartlar ile karşılaştırılması Çizelge 4'de yer almaktadır.

**Çizelge 4.** Hazırlanan karışıma ait değerlerin TS-266 standart değerleri ile karşılaştırılması

Parametre	Değer	TS-266	Kontrol
Bulanıklık, TE/F	<2	5	Uygun
TS, mg CaCO <sub>3</sub> /L	135,90	-	Uygun
Kalsiyum, mg/L	37,40	200	Uygun
Magnezyum, mg/L	10,19	50	Uygun
Sodyum, mg/L	61,16	175	Uygun
Potasyum, mg/L	3,67	12	Uygun

Bu çalışmada belirlenen karışım oranları (%75-25 oranı) arazi ölçeğinde yapılacak olan tasarımlar için bir alternatif olarak seçilmiş olup ham suyun



kalitesine ve arıtma sisteminin işletme şartlarına göre değişiklik gösterecektir. Ayrıca KFÇ çıkışı ile TO çıkışının karışımından sonra KFÇ çıkışında hazırlanan arıtılmış su seyreltilmekte olup TS-266'da yer alan tüm kalite parametrelerin kontrol edilmesi gerekmektedir.

Kalsiyumdan ileri gelen sertlik karbonat ve karbonat olmayan sertlik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Karbonat sertliği giderilmesi ekonomik ve pratik olup karbonat olmayan sertliğin giderilmesi kompleks ve maliyetli olmaktadır. Kireç taşı, yapısında bulunan sülfat anyonundan (Eşitlik 1) kaynaklı olarak karbonat olmayan sertlik sınıfına girmekte ve suya eklenecek olan karbonat tuzları ile oluşumu kontrol edilmektedir [1,2]. Bu amaç ile çalışmanın bir sonraki aşaması olan ham suya soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) eklenmesi ile ham suyun alkalitesi yükseltilmiş ve bir önceki aşamada gerçekleştirilen alkali koagülasyon çalışması tekrarlanmıştır. Alkali koagülasyonu takiben berrak üst sudan alınan numunede yapılan analizlere ait sonuçlar Çizelge 5'de yer almaktadır.

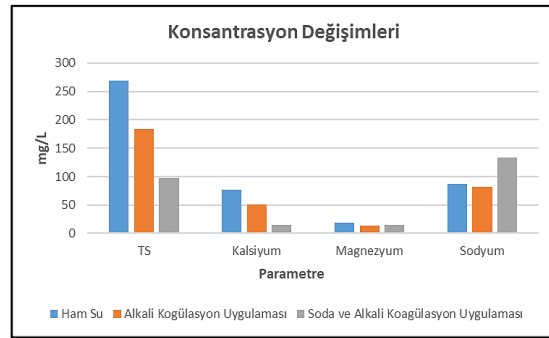
**Çizelge 5.** Alkali koagülasyon ile birlikte soda kullanılması durumunda çıkış suyu değerleri

Parametre	Değer
Bulanıklık, TE/F	<2
TS, mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$	98
Kalsiyum, mg/L	14,40
Magnezyum, mg/L	14,89
Sodyum, mg/L	133

Alkali koagülasyon çalışmasında soda kullanılarak ham suyun toplam sertlik, kalsiyum ve magnezyum miktarları düşürülmüş, kalsiyum miktarında ham suya göre %81 oranında azalma gerçekleştirilmiştir. Soda kullanılmadan yapılmış olan alkali koagülasyon çalışmasında kalsiyum giderimi %33,50 olmaktadır. Soda eklenerek gerçekleştirilen alkali koagülasyon uygulamasında ise %71 kalsiyum giderimi elde edilmiştir. Bu durum ise suda mevcut kalsiyum iyonlarının soda ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat çökeltilmesi (Eşitlik 2) oluşturmasından kaynaklıdır [2].



Çizelge 1 ve 5'de yer alan sodyum değerleri karşılaştırılması durumunda ham suyun sodyum konsantrasyonunun 86,49 mg/L (Çizelge 1) değerinden 133 mg/L (Çizelge 6) değerine yükseldiği arıtılabilirlik çalışmasına ait sonuçlar incelenirken tespit edilmiştir. Bu durum ise araştırmada kullanılmış olan sodyum karbonat (soda) kimyasalından kaynaklanmaktadır. Sodayın su ortamında iyonlaşması ile bileşiminde bulunan sodyum iyonları su ortamına geçerek çıkış suyunda sodyum miktarını arttırmaktadır (Eşitlik 2). TS, kalsiyum, magnezyum ve sodyum parametrelerinin bu çalışma boyunca tespit edilen değişimleri Şekil 3'de yer almaktadır



**Şekil 3.** TS, kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum parametrelerinin değişimleri

Alkali koagülasyon çalışmaları sonucunda ham suyun TS ve kalsiyum konsantrasyonlarının ham sudaki başlangıç değerlerine göre azaldığı Şekil 3'de görülmektedir. Magnezyum parametresinin ise çalışma boyunca fazla bir değişim göstermediği tespit edilmiş olup sodyum parametresinin soda ilavesi ile arttığı tespit edilmiştir. TS-266'ya göre içme suları için sodyum parametresinin sınır değeri ise 175 mg/L'dir. Temel arıtma olarak KFÇ prosesinin kullanılması durumunda çıkış suyunda sodyum miktarının kontrol edilerek kontrollü olarak soda kullanılması önemli bir husustur.

Ham suya eklenmiş olan soda miktarının artırılması ile kalsiyum giderimi

arttırılabilmektedir. Fakat ham sudan kalsiyumun tamamen giderilmesi KFC metodu ile mümkün olmamaktadır [24]. Ayrıca sertlik giderimi içinde çözünürlük kısıtlamaları geçerli olup suda mevcut sertliğin çöktürme metodu ile tamamen giderilmesi mümkün değildir [1]. Dolayısıyla arıtma tesisinde kullanılacak olan soda dozunun belirlenmesinde işletme maliyeti ile birlikte oluşan atık çamur miktarı birlikte değerlendirilerek laboratuvar çalışmalarını takiben belirlenmelidir.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada %99 değerinde bulanıklık ve soda ilavesi ile %81 değerinde kalsiyum giderimi elde edilmiştir. Çalışmada kullanılmış olan sodyum hidroksit koagülantı (NaOH) pahalı bir kimyasal olarak nitelendirilmekte olduğundan yerine kalsiyum hidroksit  $[Ca(OH)_2]$  kimyasalının kullanılması ile işletme masrafının azaltılabileceği ve daha yüksek giderim verimi elde edilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca içme suyu eldesinde özellikle kireç taşı oluşumunun kontrol edilmesi amacıyla bir ön arıtma prosesi olarak koagülasyon-flokülasyon ve çöktürme metodunun kullanılması neticesinde membran üzerinde meydana gelen kireç taşı tabakalaşmasının kontrol edilebileceği anlaşılmaktadır.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Vesilind, P.A., Morgan, S.M., Heine, L.G., 2011. Çevre Mühendisliğine Giriş, Çeviri Editörü: Prof. Dr. İsmail Toröz. Nobel Akademik Yayınları, Ankara.
2. Reynolds, T.D., Richards, P.A., 2011. Çevre Mühendisliğinde Temel İşlemler ve Süreçler. Çeviri Editörü: Ülker Bakır Öğütveren. Efil Yayınevi, Ankara.
3. Davis, M.L., 2015. Su ve Atıksu Mühendisliği Tasarım Esasları ve Uygulamaları. Çeviri Editörü: Prof. Dr. İsmail Toröz. Nobel Akademik Yayınları, Ankara.
4. Selek, Z., Karaaslan, Y., 2019. Ekosistem Esaslı Su Kalitesi Yönetimi. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Ankara.
5. <https://dobisu.marmara.edu.tr/orta-menu/yararli-bilgiler/icme-suyu-kabul-edilebilir-degerler>, Erişim Tarihi: 01.01.2021.
6. Leal, C., del Río, A.V., Mesquita, D.P., Amaral, A.L., Castro, P.M.L., Ferreira, E.C., 2020. Sludge Volume Index and Suspended Solids Estimation of Mature Aerobic Granular Sludge by Quantitative Image Analysis and Chemometric Tools. Separation and Purification Technology, 234, 116049.
7. Eroğlu, V., 2008. Su Tasfiyesi. Çevre ve Orman Bakanlığı, Ağustos 2008, Ankara.
8. 6 Temmuz 2019 tarihli ve 30823 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan İçme Suyu Temin Edilen Suların Kalitesi ve Arıtılması Hakkında Yönetmelik.
9. Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K.J., Tchobanoglous, G., 2005. MWH’s Water Treatment: Principles and Design. John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey, Amerika Birleşik Devletleri.
10. Brusseau, M.L., Pepper, I.L., Gerba, C.P., 2019. Environmental and Pollution Science, Third Edition. Academic Press, Elsevier.
11. Sillanpää, M., Ncibi, M.C., Matilainen, A., Vepsäläinen, M., 2018. Removal of Natural Organic Matter in Drinking Water Treatment by Coagulation: A Comprehensive Review. Chemosphere, 190, 54-71.
12. Berkay, A., Aydın, M.E., Pektaş, M., 1997. İçme Suyu Arıtımında Kimyasal Madde Kullanımı ve Optimizasyonu. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3(1), 255-260.
13. Duan, J., Gregory, J., 2003. Coagulation by Hydrolysing Metal Salts. Advances in Colloid and Interface Science, 100-102, 475-502.
14. Martyn, C.N., Barker, D.J.P., Osmond, C., Harris, E.C., Edwardson, J.A., Lacey, R.F., 1989. Geographical Relation Between Alzheimer’s Disease and Aluminium in Drinking Water. The Lancet, 333(8629), 59-62.
15. Muthuraman, G., Sasikala, S., 2014. Removal of Turbidity from Drinking Water Using Natural Coagulants. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 20, 1727-1731.

16. 02 Nisan 2015 tarihli ve 29314 sayılı Resmi Gazete'de Yayımlanan Atık Yönetimi Yönetmeliği, Ankara.
17. Chang, H., Liang, H., Qu, F., Liu, B., Yu, H., Du, X., Li, G., Snyder, S.A., 2017. Hydraulic Backwashing for Low-pressure Membranes in Drinking Water Treatment: A Review. *Journal of Membrane Science*, 540, 362-380.
18. Aslan, M., 2016. *Membran Teknolojileri*. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye Çevre Koruma Vakfı, Ankara.
19. Bu, F., Gao, B., Shen, X., Wang, W., Yue, Q., 2019. The Combination of Coagulation and Ozonation as a Pre-treatment of ultrafiltration in Water Treatment. *Chemosphere*, 231, 349-356.
20. Leiknes, T., Ødegaard, H., Myklebust, H., 2004. Removal of Natural Organic Matter (NOM) in Drinking Water Treatment by Coagulation-microfiltration Using Metal Membranes. *Journal of Membrane Science*, 242, 47-55.
21. Zularisam, A.W., Ismail, A.F., Salim, M.R., Sakinah, M., Matsuura, T., 2009. Application of Coagulation-ultrafiltration Hybrid Process for Drinking Water Treatment: Optimization of Operating Conditions Using Experimental Design. *Separation and Purification Technology*, 65, 193-210.
22. Al-Amoudi, A.S., 2010. Factors Affecting Natural Organic Matter (NOM) and Scaling Fouling in NF membranes: A review. *Desalination*, 259, 1-10.
23. Zak, D., Hupfer, M., Cabezas, A., Jurasinski, G., Audet, J., Kleeberg, A., McInnes, R., Kristiansen, S.M., Petersen, J., Liu, H., Goldammer, T., 2020. Sulphate in Freshwater Ecosystems: A Review of Sources, Biogeochemical Cycles, Ecotoxicological Effects and Bioremediation. *Earth-science Reviews*, 212, 103446.
24. Petrucci, R.H., Herring, F.G., Madura, J.D., Bissonnette, C., 2012. *Genel Kimya İlkeler ve Modern Uygulamalar*. Onuncu Baskında Çeviri, Palme Yayınevi, Ankara.
25. APPA, AWWA, WEF, 2012. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, New York.
26. U.S. EPA., 1994. Method 200.7: Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry, Revision 4.4. Cincinnati, OH.
27. DIN 38 404-C2-4. German Standard Methods for The Examination of Water, Waste Water and Sludge.
28. 30 Kasım 2012 tarihli ve 28483 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği, Ankara.
29. Jing, M.L.W., Anua, S.M., Mazlan, N., 2019. Concentration of Magnesium, Calcium and Potassium in Drinking Water; A Comparison between Tap Water and Bore Water. *Journal of Energy and Safety Technology*, 02:01, 01-08.
30. <https://dobisu.marmara.edu.tr/ortamenu/yararli-bilgiler/icme-kullanma-suyu-parametrelerinde-bulunan-iyonlarin-fazlaliginin-insan-sagligi-uzerindeki-etkileri>, Erişim Tarihi: 01.01.2021.
31. Tchobanoglus, G., Burton, F., Stensel, H.D., 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. American Water Works Association. *Journal*, 95(5), 201.
32. Eroğlu, V., 2008. *Su Tasfiyesi*. Çevre ve Orman Bakanlığı.
33. Özyonar, F., Karagözoğlu, B., 2012. İçme Sularından Elektrokoagülasyon ve Kimyasal Koagülasyon ile Bulanıklığın Giderimi. *Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(1).
34. Berktaş, A., Aydın, M.E., Pektaş, M., 2011. İçme Suyu Arıtımında Kimyasal Madde Kullanımı ve Optimizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(1), 255-260.
35. Khan, M.R., Wabaidur, S.M., Busquets, R., AlAmmari, A.M., Azam, M., Alsubhi, A., 2020. Trace Identification of Sulfate Anion in Bottled and Metropolitan Water Samples Collected from Various Provinces of Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Science*, 32, 1986-1992.

- 36.** Sadeghalvad, B., Khorshidi, N., Azadmehr, A., Sillanpää, M., 2020. Sorption, Mechanism, and Behavior of Sulfate on Various Adsorbents: A Critical Review. *Chemosphere*, 263, 128064.
- 37.** Uchymiak, M., Lyster, E., Glater, J., Cohen, Y, 2008. Kinetics of Gypsum Crystal Growth on a Reverse Osmosis Membrane. *Journal of Membrane Science*, 314, 163-172.