



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YERALTI SULARINDAN SERTLİK GİDERİMİNDE
ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMİN UYGULANABİLİRLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve ULUSOY

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞİMŞEK

AKSARAY, 2023

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 202301404 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Merve ULUSOY tarafından hazırlanan **“YERALTI SULARINDAN SERTLİK GİDERİMİNDE ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMİN UYGULANABİLİRLİĞİ”** adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞİMŞEK

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Doç. Dr. Emine BAŞTÜRK

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Sinan KUL

Bayburt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Tez Savunma Tarihi: 22/06/2023

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Mehmet Ali HİNİS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Merve ULUSOY

TEŞEKKÜR

Yoğun bir gayretle hazırlamış olduğum yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen, bilimsel birikimleri ile her zaman yardımcı olan çok değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞİMŞEK'e,

Tez çalışmamda desteğini hiç esirmeyen değerli kardeşim Furkan KIRDÖK'e,

Hayatım boyunca yanımda olan, elde ettiğim başarılarda en büyük paya sahip, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam Yüksel DÜZGÜN'e, annem Şükran DÜZGÜN'e,

Hayatıma kattıkları bütün güzel şeyler için sevgili eşim Rahmet Safa ULUSOY'a ve güzel kızım Gökçe Selenge'ye sonsuz teşekkür ederim.

Merve ULUSOY
AKSARAY, 2023

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1 Su Sertliği.....	3
2.1.1 Sertlik çeşitleri	3
2.1.2 Sertlik dereceleri	4
2.1.3 Sertlik tayin yöntemi	4
2.1.4 Sertlik giderim yöntemi	6
2.1.4.1 Kireç – soda yöntemi	6
2.1.4.2 Sodyum hidroksit ile yumuşatma.....	8
2.1.4.3 Ters osmoz	9
2.1.4.4 Nanofiltrasyon.....	11
2.1.4.5 İyon değiştirme.....	11
2.2 Elektrokimyasal Prosesler.....	14
2.2.1 Elektrooksidasyon yöntemi	14
2.2.2 Elektrokoagülasyon yöntemi.....	17
2.2.3 Elektroflotasyon yöntemi	22
2.2.4 Elektrodializ yöntemi	24
2.2.5 Elektroroforez yöntemi	26
2.2.6 Elektrokimyasal arıtım prosesini etkileyen faktörler	26
2.2.7 Literatürde yapılmış çalışmalar	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM	32
3.1 Kampüs İçi Yeraltı Suyu	32
3.2 Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtılabilirlik Çalışmaları.....	32
3.3 Deneysel Kurgulama	34
3.4 Hesaplamalarda Kullanılan Eşitlikler	35
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	37
4.1 Akımın Etkisi	37
4.2 pH Etkisi	40
4.3 HCO ₃ ⁻ Konsantrasyonunun Etkisi	42
4.4 İletkenliğin Etkisi	44
4.5 Arıtım Süresinin Etkisi.....	47
4.6 Enerji Tüketimi	49
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ.....	61

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YERALTI SULARINDAN SERTLİK GİDERİMİNDE ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMİN UYGULANABİLİRLİĞİ

Merve ULUSOY

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞİMŞEK

ÖZET

Tüm canlıların yaşam kaynağı olan su, evsel kullanım, tarımsal sulama ve soğutma başta olmak üzere birçok endüstriyel proseste büyük öneme sahiptir. Zamanla nüfusun artması, teknolojinin gelişmesi, sanayileşmenin artması ve iklim değişikliği ile suyun önemi daha da artmaktadır. Su kalitesinin belirlenmesinde etkili olan parametrelerden birisi sertliktir. Sertlik su içerisinde çözünen +2 değerlikli Ca^{+2} , Mg^{+2} , Sr^{+2} , Fe^{+2} , Mn^{+2} gibi iyonların konsantrasyonlarına bağlıdır. Söz konusu bu iyonların HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , SiO_3^- gibi anyonlar ile oluşturdukları bileşikler sertliği meydana getirir. Sert sular temas ettiği yüzeylerde tahribata, kazan taşı oluşumuna, arıtma sistemlerinin membranlarının kirlenmesine, boruların tıkanmasına ve işlevlerini kaybetmesine sebep olmaktadır. Bu tür istenmeyen problemlerin azaltılması ve giderilmesi için suların yumuşatılması yani sertliğin giderilmesi gerekmektedir.

Elektrokimyasal arıtım, birçok kirleticinin gideriminde etkin bir şekilde kullanılmasına rağmen, sulardan sertlik giderimindeki çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu durum çalışmanın özgünlüğünü ortaya koymaktadır. Daha az kimyasal kullanımı, ekonomik olması ve yüksek verim elde edilmesi gibi avantajlara sahip olan bu prosesle yapılan çalışma literatüre katkı sunacak ve diğer sertlik giderim yöntemleriyle kıyaslama imkanı sağlayacaktır. Elektrokimyasal arıtımla sertlik giderimi, katodik reaksiyonlar sonucunda ve OH^- iyonlarının varlığında, sertliğe sebep olan Ca ve Mg iyonlarının CaCO_3 ve Mg(OH)_2 şeklinde katot yüzeyine çökmesi prensibine dayanmaktadır. Giderim verimini etkileyen parametrelerden biri olan elektrot tipi olarak günümüzde kullanılan iki boyutlu levhalar yerine üç boyutlu paslanmaz çelik yün tercih edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, başlangıç pH'ı 7,24, akım yoğunluğu 3A, 0,462 g NaHCO_3 ilavesi ve 20 dk. arıtım süresi optimum çalışma koşulları olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında toplam sertlik giderimi verimi %90 olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrokimyasal arıtım, Sertlik giderimi, Yumuşatma, Paslanmaz çelik yün.

Haziran, 2023; 61 sayfa

M.Sc. THESIS

THE FEASIBILITY OF THE ELECTROCHEMICAL METHOD IN REMOVING THE HARDNESS OF THE UNDERGROUND WATERS

Merve ULUSOY

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. İsmail ŞİMŞEK

ABSTRACT

Water, which is the source of life for all living things, has great importance in domestic uses, agricultural irrigation and many industrial processes, especially cooling. Over time, the importance of water increases with the increase in population, the development of technology, the increase in industrialization, and climate change. One of the parameters that are effective in determining the water quality is hardness. Water hardness depends on the concentration of divalent ions such as Ca^{+2} , Mg^{+2} , Sr^{+2} , Fe^{+2} , Mn^{+2} dissolved in water. The compounds formed by these ions with anions such as HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , SiO_3^- create hardness. Hard water causes destruction on the surfaces it comes into contact with, the formation of scale, the contamination of the membranes of the treatment systems, the clogging of the pipes and the loss of their functions. In order to reduce and eliminate such undesirable problems, the water must be softened, that is, the hardness must be removed.

Although electrochemical treatment is used effectively in the removal of many pollutants, studies on hardness removal from water are limited. This situation reveals the originality of the study. The study conducted with this process, which has the advantages of using less chemicals, being economical, and obtaining high efficiency, will contribute to the literature and provide the opportunity to compare with other hardness removal methods. Hardness removal by electrochemical treatment; It is based on the principle that as a result of cathodic reactions in the presence of OH^- ions, Ca and Mg ions that cause hardness precipitate on the cathode surface in the form of CaCO_3 and Mg(OH)_2 . Three-dimensional stainless steel wool was preferred as the electrode type which is one of the parameters affecting the removal efficiency, instead of the currently used two-dimensional plates. As a result of the experiments, initial pH of 7.24, current density of 3A, addition of 0.462 g of NaHCO_3 , and treatment time 20 min. were determined as optimum conditions. The total hardness removal efficiency was obtained as 90% under these conditions.

Keywords: Electrochemical treatment, Hardness removal, Softening, Stainless steel wool.

June, 2023; Page Number 61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Osmoz işlemi.	9
Şekil 2.2. Ters osmoz işlemi.	10
Şekil 2.3. İyon değişim sürecinin mekanizması.	12
Şekil 2.4. İyon değiştirmede katyon ve anyon hareketleri.	13
Şekil 2.5. Elektrokimyasal hücrenin şematik görünüşü.	14
Şekil 2.6. Elektrokoksidasyon prosesinde kirleticilerin dolaylı parçalanması.	16
Şekil 2.7. Elektrokoksidasyon prosesinde kirleticilerin doğrudan parçalanması.	17
Şekil 2.8. Basit elektrokimyasal reaktörü.	18
Şekil 2.9. Elektrokoagülasyon prosesinin ilerleyişi.	19
Şekil 2.10. Elektroflotasyon proses mekanizması.	23
Şekil 2.11. Elektrodializ proses mekanizması.	24
Şekil 2.12. Elektroflorez proses mekanizması.	26
Şekil 3.1. Yeraltı suyunun sertlik giderimi için deney düzeneği.	33
Şekil 3.2. Sertlik gideriminde elektrokimyasal arıtım yöntemi.	34
Şekil 4.1. Farklı akım değerlerinin toplam sertlik ve toplam alkaliniteye etkisi.	38
Şekil 4.2. Farklı pH'ların toplam sertlik ve toplam alkalinite giderim verimine etkisi.	40
Şekil 4.3. Farklı HCO ₃ ⁻ konsantrasyonlarının toplam sertlik ve toplam alkalinite giderim verimine etkisi.	43
Şekil 4.4. İletkenliğin toplam sertlik ve toplam alkalinite giderim verimine etkisi.	45
Şekil 4.5. Sürenin toplam sertlik ve toplam alkalinite giderim verimine etkisi.	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Suların sertlik dereceleri.	4
Çizelge 2.2. Sertlik derecelerinin mg CaCO ₃ /L cinsinden değerleri	4
Çizelge 3.1. Kuyu suyunun karakteristiği.	32
Çizelge 3.2. Elektrokimyasal arıtım çalışma koşulları.	33
Çizelge 4.1. Farklı akım değerlerinde elde edilen arıtım parametreleri.....	39
Çizelge 4.2. Farklı pH değerlerinden elde edilen arıtım parametreleri.....	41
Çizelge 4.3. Farklı HCO ₃ ⁻ konsantrasyonu değerlerinden elde edilen arıtım parametreleri.....	44
Çizelge 4.4. Farklı iletkenlik değerlerinden elde edilen arıtım parametreleri.....	46
Çizelge 4.5. Farklı sürelerdeki arıtmılardan elde edilen arıtım parametreleri.	48
Çizelge 4.6. Enerji tüketimi ve elektrik enerji maliyeti.	49

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Aktif Anot Yüzey Alanı
Aq	Sulu ortam (Aqua)
°C	Santigrad
C0	Başlangıç Konsantrasyonu
Ce	Çıkış Konsantrasyonu
DC	Doğru Akım
E	Elektrik Enerjisi
ED	Elektrodiyaliz
EK	Elektrokoagülasyon
EO	Elektrokimyasal oksidasyon
g	Gram
h	Saat
I	Akım Şiddeti
J	Akım Yoğunluğu
kWh	Kilo Watt Saat
L	Litre
mA	Miliamper
mg	Miligram
SEC	Enerji Tüketimi
t	Süre
TA	Toplam Alkalinite
TS	Toplam Sertlik
U	Hücre voltajı
v	Arıtılan suyun Hacmi
V	Volt
\$	Dolar

1. GİRİŞ

Evrendeki canlıların yaşamı için ikamesi olmayan suyun; yaşanan iklim değişikliği, hızlı nüfus artışı, sanayinin ve teknolojinin gelişmesi ile evsel, endüstriyel, tarımsal alanlardaki kullanımı büyük önem taşımaktadır. Yeraltı ve yeryüzündeki suların kullanım alanlarındaki uygunluğunu suyun kalitesi belirlemektedir. Suyun kalitesinin belirlenmesinde etken olan parametrelerden birisi de sertliktir. Sularda sertliğe sebep olan iki değerlikli katyonlar istenmeyen problemlere yol açmaktadır. Temizlik malzemelerinde kullanılan kimyasalların köpürmemesine ve aşırı sarfiyatına, ıslak zeminlerde lekelenmelere, endüstride uygulanan proseslerdeki ekipman ve techizatların korozyona uğmasına, ısı iletimini gerçekleştiren borularda tıkanmalara, verimin düşmesine ve maliyetli çalışmasına, kazan taşı oluşumuna, arıtma sistemlerinde boruların tıkanmasına ve verimin düşmesine, suyun tadının bozulmasına ve kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Sert suyun insanlar tarafından kullanması sonucu böbreklerinde taş oluşumu, kalp rahatsızlıkları ve temas ettiği yüzeylerde deride tahribata yol açması vb. olumsuz etkiler ortaya çıkmaktadır. Evsel, endüstriyel, tarımsal alanlarda bu tür problemin azaltılması veya yok edilmesi için sertlik giderim işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu işlem suyun içerisinde çözünen sertliğe sebebiyet veren iki değerlikli katyonların sudan uzaklaştırılması işlemidir. Sertlik gideriminde en çok kireç-soda yöntemi, sodyum hidroksit ile yumuşatma, nanofiltrasyon, ters osmoz, iyon değiştirme yöntemleri uygulanmaktadır.

Arıtma yöntemlerinden biri olan elektrokimyasal arıtım çevreye uyumlu ve çok yönlü bir arıtım süreci olmasından dolayı son zamanlarda popüler bir giderim yöntemi olmuştur. Elektrokimyasal arıtımın genel mekanizmasında koagülasyon, adsorpsiyon, absorpsiyon, çöktürme ve flotasyon süreçleri bulunmaktadır. Elektrokimyasal arıtımın birçok alanda kullanılmasına rağmen sulardaki sertliğin gideriminde kullanımı son zamanlarda gündeme gelmiş ve literatürde daha önce bu konuda yapılmış çalışmaların sınırlı olması konunun özgünlüğünü ortaya koymuştur. Bu çalışmada diğer giderim yöntemlerine göre avantajlarıyla öne çıkan elektrokimyasal arıtımın yeraltı sularından sertlik gideriminde uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada elektrokimyasal arıtıma etki eden ve verimi etkileyen pH,

akım yoğunluğu, arıtım süresi, iletkenlik, HCO_3^- konsantrasyonu gibi işletme parametrelerinin etkileri incelenmiştir.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Su Sertliği

Sertlik su içinde çözünen Ca^{+2} , Mg^{+2} , Sr^{+2} , Fe^{+2} , Mn^{+2} gibi iki değerlikli iyonların konsantrasyonlarına bağlıdır. Söz konusu bu iyonların HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , SiO_3^- gibi anyonlar ile oluşturdukları bileşikler sertliği meydana getirir (Tekbaş ve Mahir, 2014). (+2) değerlikten daha yüksek değerlilik taşıyan Al^{+3} ve Fe^{+3} katyonları da bazen sertliğe neden olabilmektedir. Ancak bu katyonlar, normal yüzeysel sularının sahip olduğu pH= 7 civarında suda çok düşük çözünürlük çarpımına sahip olmaları nedeniyle suda kolayca çökerler (Samsunlu, 2011). Sular temas halinde bulunduğu kayaç veya toprak ile etkileşimi sonucunda sertliğe sebep olan maddeleri çözerek bünyesine alır ve böylelikle sertlik oluşur. Özellikle yağışlar sırasında yağmur suları atmosfer gazları ile birleşerek asidik karaktere sahip olmaktadır. Bununla birlikte toprakta meydana gelen biyolojik faaliyetler sonucunda açığa çıkan CO_2 çözünerek suya asidik bir karakter kazandırabilir (Tekbaş ve Mahir, 2014). Kullanım ve içme sularında kalitenin belirlenmesinde önemli bir parametre olan sertlik, suyun tadının bozulmasına, ısı iletim borularının korozyona uğrayıp tıkanmasına verimliliğin düşmesine, temas ettiği yüzeyde tahribata, musluk ve armatürlerde kireçlenmeye, deterjan, el sabunu ve şampuan kullanımında daha az köpük oluşmasına, ciltte kuruluğa vb. olumsuz etkilere neden olmaktadır.

2.1.1 Sertlik çeşitleri

Sulardaki sertlik türünün belirlenmesini sağlayan sertlik çeşiti üçe ayrılmaktadır. Kalsiyum ve magnezyum bikarbonatlarının oluşturduğu sertliğe karbonat sertliği adı verilir. Kalsiyum bikarbonat, ısıtılınca karbonat olarak çökeldiği için karbonat sertliğine geçici sertlik de denilmektedir. Kalsiyum ve magnezyumun bikarbonat dışındaki bileşikler karbonat olmayan sertliği oluşturur. Suyu kaynatınca da giderilmeyen bu sertliğe kalıcı sertlik denir. Geçici sertlik ve kalıcı sertliğin toplamı toplam sertliği verir (Biçer ve Yalçın, 2007). İçeriğinde Na^+ iyonları bulunan tuzlu sular, sabunun iyonlaşmasını engellediğinden dolayı köpürmemektedir. Bu durum Na^+ iyonunun ortak iyon oluşturmalarının bir etkisidir. Na^+ iyonu sertlik oluşturan bir

iyon olmamasına rağmen özellikle tuz konsantrasyonu yüksek olan sularda meydana gelen bu sertliğe yalancı (pseudo) sertlik denir (Samsunlu, 2011).

2.1.2 Sertlik dereceleri

Hidrosferde suların sertliği yerel olarak farklılık gösterir. Genel olarak yüzeysel sular, yer altı sularından daha yumuşaktır. Suyun sertlik derecesi yağmur suyundan başlayarak izlediği yol boyunca temasta bulunduğu jeolojik yapıyla yakından ilgilidir. Suların sertlik derecesine göre sınıflandırılması Çizelge 2.1’de gösterilmiştir (Samsunlu, 2011).

Çizelge 2.1. Suların sertlik dereceleri.

mg CaCO ₃ /L	Sertlik derecesi
0-75	Yumuşak
75-150	Orta sert
150-300	Sert
300 ve üstü	Çok sert

Suların sertlik derecelerinin ifadesinde Alman, Fransız ve İngiliz sertliği kullanılmaktadır. Ülkemizde en sık kullanılan sertlik derecelerinin mg CaCO₃/L cinsinden değerleri Çizelge 2.2’de verilmiştir (Samsunlu, 2011).

Çizelge 2.2. Sertlik derecelerinin mg CaCO₃/L cinsinden değerleri

Fransız sertliği	10 mg/L
Alman sertliği	17,8 mg/L
İngiliz(clark) sertliği	14,3 mg/L

2.1.3 Sertlik tayin yöntemi

Su sertliğini tayini için sabun eriği yöntemi, hesap yöntemi ve EDTA titrimetrik yöntemleri en çok kullanılan yöntemlerdir.

Suya sertlik veren Ca ve Mg iyonları sudaki Na ve K iyonlarının yerine geçerek suda çözünmeyen bileşikler oluşturur. Bu bileşikler tarafından oluşan sert sularda sabun geç köpürmektedir. Bu metot ile sabun çözeltisi kullanılarak sürekli bir köpük elde

edilmeye çalışılır ve işlemde harcanan sabun çözeltisi su sertliği hakkında fikir verir. Kantitatif ölçümler için hesap yöntemi ve EDTA titrimetrik yöntemleri kullanılır. (Boysan ve Şengörür, 2009). Ayarlı sabun çözeltisi yöntemi kesin sonuç vermemesi ile birlikte pratik ve kolay olmasından dolayı sanayi ve arazide uygulanmaktadır.

Sertliğe neden olan iki değerlikli tüm katyonların konsantrasyonlarının ölçülmesiyle bulunan hesap yöntemi sertlik ölçümünde kullanılan en hassas metottur. Tek tek konsantrasyonların ölçülmesi sebebiyle detaylı ve uzun süren bir yöntemdir. Hesaplama metodunda kullanılan formül Denklem 2.1’de verilmiştir.

$$\text{Sertlik (mg CaCO}_3\text{/L)} = M^{+2}(\text{mg/L}) \cdot \frac{50}{M^{+2}\text{nin eşdeğer ağırlığı}} \quad (2.1)$$

Formüldeki M^{2+} , iki değerlikli metalik iyon konsantrasyonuna karşılık gelmektedir (Sawyer vd., 2013). Hızlı, daha kolay ve daha doğru yöntemlerden biri olan, sürekli olarak sertlik tayinini belirlemeye yarayan, analizlerinde en çok tercih edilen yöntem EDTA titrimetrik yöntemidir. EDTA (etilendiamin tetra asetik asit) veya bunun sodyum tuzu çözeltisinin titrasyonda kullanılmasına esasına dayanır. Sertliğe sebep olan iki değerlikli metal iyonlarının kompleks teşkili ile bağlanıp şelatlaşma adı verilen Denklem 2.2’de görüldüğü gibi reaksiyonlar meydana getirmesidir. (Samsunlu, 2011).



EDTA yönteminde kullanılan Eriochrome Black T pH değeri 10 civarındaki bir suya ilave edilince, sertliğe sebep olan iyonların bir kısmı zayıf kompleks oluşturup şarap kırmızısı rengini alır. Titrasyon devam ederken EDTA sertlik iyonlarıyla daha kompleks ve kararlı bileşikler oluşur ve şarap kırmızısı rengi Eriochrome Black T indikatörünün serbest kalıp, maviye dönüşümlerle titrasyon tamamlanır. Denklem 2.3’te titrasyonun gerçekleştiği görülmektedir.



2.1.4 Sertlik giderim yöntemi

Evsel, endüstriyel, tarımsal alanlarda sertliğin sebep olduğu olumsuz durumlar neticesinde sertlik giderimine ihtiyaç duyulmuştur. Bu alanlarda kullanılacak suyun ne amaçla kullanılması gerektiği hem giderim yöntemini hem maliyeti etkilemektedir. Sertlik giderim uygulamalarında kireç-soda yöntemi, sodyum hidroksit ile yumuşatma, nanofiltrasyon, ters osmoz, iyon değiştirme gibi yöntemler uygulanmaktadır (Uzun ve Debik, 2019). Giderim uygulamalarında az kimyasal madde kullanılması, ekonomik olması ve yüksek verim elde edilebilmesi için farklı giderim yöntemleri ile çalışmalarda yapılmaktadır.

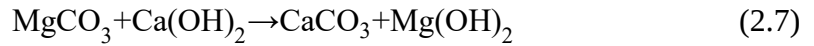
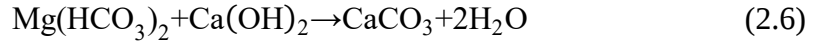
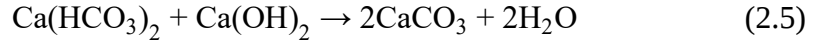
2.1.4.1 Kireç – soda yöntemi

Kireç soda yöntemi sertlik giderim yöntemleri arasında en çok tercih edilen özellikle büyük miktarlarındaki suların gideriminde kullanılan bir yöntemdir.

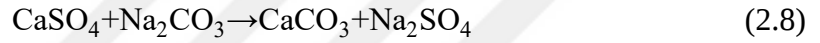
Kireç, karbonat sertliğine neden olan kimyasalları uzaklaştırmak için kullanılır. Soda külü, karbonat dışı sertliğe neden olan kimyasalları uzaklaştırmak için kullanılır. Kireç ve soda külü eklendiğinde, sertliğe neden olan mineraller neredeyse çözünmez çökeltiler oluşturur. Kalsiyum sertliği kalsiyum karbonat (CaCO_3) olarak çöker. Magnezyum sertliği, magnezyum hidroksit (Mg(OH)_2) olarak çöktürülür. Bu çökeltiler daha sonra geleneksel koagülasyon/flokülasyon, sedimantasyon ve filtrasyon işlemleriyle giderilir. Çökeltiler çok az çözünür olduğundan, suda bir miktar sertlik (yaklaşık 50 ila 85 mg/l CaCO_3) kalır. Bu sertlik seviyesi, suyun çok yumuşak olması ve çok az sertliğe sahip olması veya hiç sert olmamasıyla bağlantılı korozyon problemlerini önlemek için arzu edilir (URL-1). Bu yöntemin uygulanması ile birlikte, sudaki bulanıklık ve renk giderilmiş olur (Davis, 2014). Kireç ilk olarak sertliğe neden olmasa da karbondioksit ile tepkimeye girer. Bu sebeple kireç dozunu hesaplarken karbondioksit miktarı da göz önüne alınmalıdır. CO_2 'yi CaCO_3 'a dönüştürmek için yeterli miktarda kireç ilave etmektedir. Bu reaksiyon pH 8,3'e ulaştığı zaman tamamlanmaktadır (Sengupta, A., K., 2017). Kireç soda yöntemi ile giderim sürecindeki kimyasal reaksiyonlar Denklem 2.4 - 2.16'da verilmiştir.



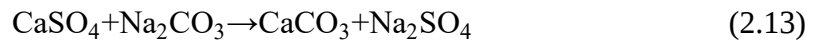
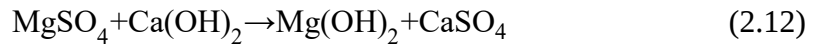
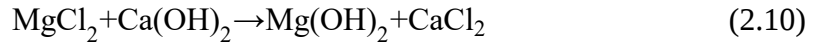
Kalsiyum ve magnezyum iyonları CaCO_3 ve Mg(OH)_2 şeklinde çökerler. Kalsiyumu tam olarak çöktürebilmek için pH 9,4 değerine çıkana kadar kireç ilave etmek gerekir. Magnezyumun çöktürülebilmesi için pH'ın 10,6'nın üzerine çıkarılması gerekmektedir.



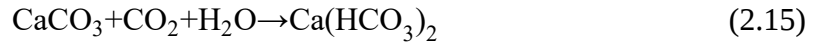
Karbonat olmayan kalsiyum sertliği de kireç-soda ilavesiyle çöker.



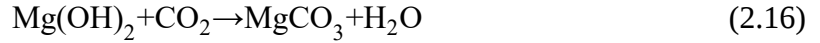
Kireç ilavesi karbonat olmayan magnezyum sertliğini çökertir. Fakat eklenen kireç ile karbonat olmayan kalsiyum sertliği ortaya çıkar. Bunun sonucunda suya daha fazla soda katılması gerekir.



Kireç- soda ilavesiyle sertliği giderilmiş suyun pH'ı 11 civarında olduğundan, suda kalsiyum karbonat konsantrasyonu yüksektir. Bu yüzden, sertlik gideriminden sonra suyun stabilize edilmesi gerekir. Stabilize edilmeyen suların, filtre yatağında, filtre tabanında ve dağıtım borularında kireç çökeltisi meydana gelir. Bu işleme rekarbonasyon denir. Rekarbonasyon, yumuşatılmış sudan karbondioksit geçirmekle yapılır. Suya CO_2 eklendiğinde çözülebilir CaCO_3 az miktarda sertliğe neden olur ve pH 8,6 seviyesine düşürülür.



Magnezyum hidroksit de çözünebilen magnezyum karbonata dönüşür.

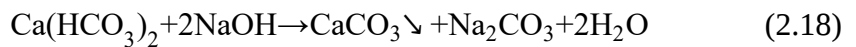


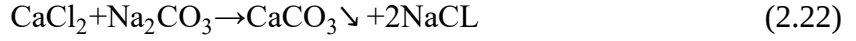
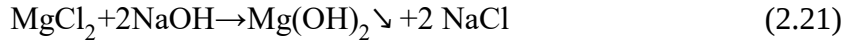
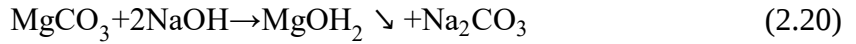
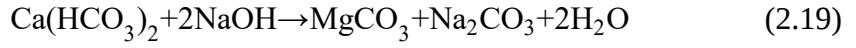
Kireç-soda yöntemi reaksiyonlarda da görüldüğü gibi farklı şekillerde uygulanabilmektedir. En doğru uygulama için sudaki sertliğin türü, miktarı ve yumuşatılmış suda istenen sertliğin derecesinin bilinmesi gerekmektedir. Örneğin, suda sadece karbonat sertliği varsa, sadece kireçle sertlik giderimi yapılabilir. Fakat hem karbonat ve hem de karbonat olmayan sertlik varsa, o zaman hem kireç hem de soda kullanmak gereklidir (Harland, 1994).

Sertlik gideriminde kullanılan bu yöntem ekonomik olması, işletme maliyetinin diğer giderim yöntemlerine göre daha uygun olması, askıda katı madde ve bulanıklığın giderilmesi, öncesinde bir arıtmaya gerek duyulmaması, giderimden sonra pH'nın artması sebebiyle borularda korozyonun azalması, arıtılmış suyun alkali yapısından dolayı su içerisinde bulunan patojenik bakterileri azaltması avantajları içerisinde yer alır. Avantajlarının yanı sıra yatırım maliyetinin yüksek olması, sertliği tamamen yok etmemesi, büyük miktarda çamur oluşumu ve bertarafının zorluğu gibi durumlarda dezavantajları arasında yer almaktadır.

2.1.4.2 Sodyum hidroksit ile yumuşatma

Sodyum hidroksit (kostik soda) ile yumuşatma işleminde, kostik sodanın suya tatbik edilmesi kolay olup bu yöntemde NaOH ile kalıcı ve geçici her iki sertlik türünde giderilebilir. NaOH yöntemi ile giderim sürecindeki kimyasal reaksiyonlar Denklem 2.17-2.22'de verildiği gibidir (Samsunlu, 2011).

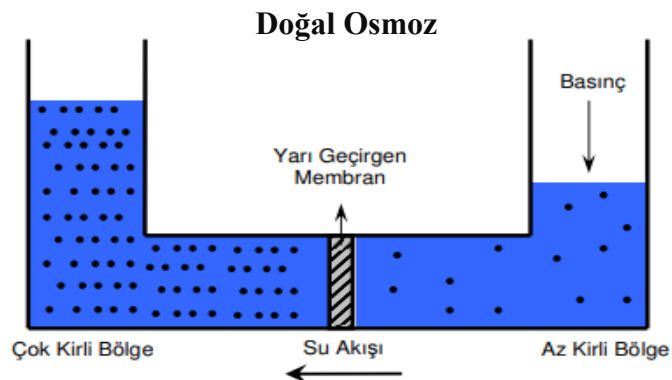




NaOH'ın kullanılması ile oluşan çamur kireç kullanılmasına göre daha az miktardadır. Su sıcaklığının 1-22 °C arasındaki değerleri için NaOH ile olan reaksiyonlara sıcaklığın bir etkisi yoktur. Fakat sıcaklık derecesi 6 °C'den düşük olduğu durumlarda kireç kullanılması halinde reaksiyon hızlarında ciddi miktarda azalma olmaktadır (URL- 2).

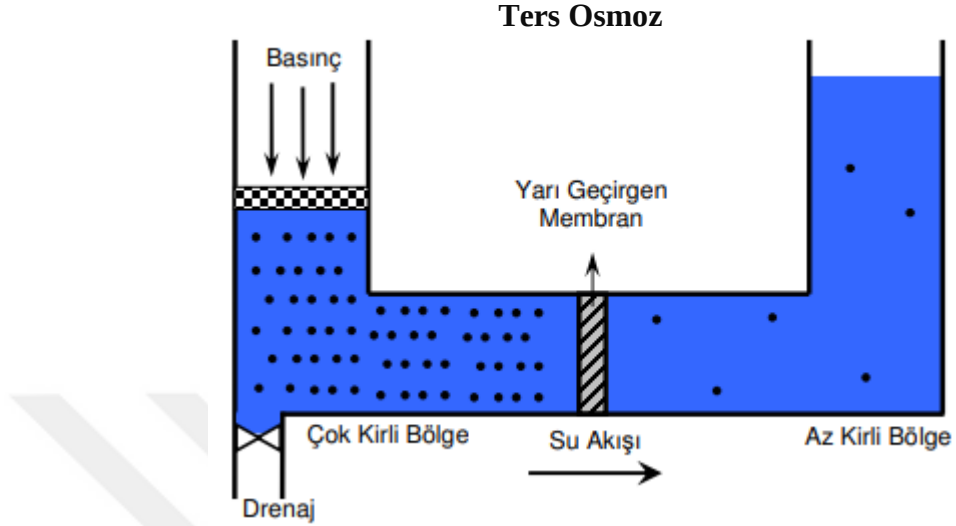
2.1.4.3 Ters osmoz

Su içerisinde bulunan farklı miktarlardaki çözücü maddelerin iki farklı konsantrasyondan yarı geçirgen bir membranla ayrılması olayına osmoz denir. Yarı geçirgen membran içerisinden bazı maddelerin geçişine izin verilirken bazılarının geçişi reddedilir. Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi suda çözünmüş halde bulunan maddelerin ozmotik basıncı, seyreltik bölgeden yoğun bölgeye suyu geçirerek suyun seyrelmesine neden olur. Yarı geçirgen membranın çok yoğun ve az yoğun olan iki tarafında çözeltilerin konsantrasyonu eşit olunca geçiş durur (Öztürk, 2005).



Şekil 2.1. Osmoz işlemi.

Ters osmoz işleminde ise konsantre bölgeye basınç uygulanarak osmoz işlemi tersine çevrilir. Şekil 2.2’ de gösterildiği gibi yeterli basınç altında su daha yoğun ortamdan seyreltik ortama yarı geçirgen membran arasından geçer (Öztürk, 2005).



Şekil 2.2. Ters osmoz işlemi.

Ters osmoz membranlar ön tanımlı bir por yapısına sahip olmayan membran türleridir. Ters osmoz, porsuz bir yapıda olduğu için geçiş yavaştır. Giderim porlar üzerinden değil difüzyon mekanizması yolu ile gerçekleşmektedir (Scott, 1995).

Ters osmoz, osmotik basıncın üstesinden gelmek ve su moleküllerini sertlik iyonlarıyla çözültiden çıkarmak için yarı geçirgen bir zar boyunca uygulanan bir basınç gradyanından yararlanmaktadır. Membranın büyük gözenekli yapısından su molekülleri geçerken sertliğe sebep olan Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonları gözeneklerde kalır. Ortaya çıkan yumuşak su kaynağı, başka herhangi bir iyon eklenmeden sertlik iyonlarından arındırılmış olur (URL-3). Sertlik gideriminde kullanılan bu yöntem yarı geçirgen özelliğinden dolayı tüm iyon parçacıklarını yok etmesi, bakımının kolay olması, az yer kaplaması, otomasyon sistemleri üzerine kurulu olmasından dolayı müdahale edilmeden başlayıp duracak şekilde tasarlanması, harcanan enerjinin az olması, sertlik giderimindeki başarısı avantajları arasında yer almaktadır. Avantajlarının yanı sıra uygulanan basıncın osmotik basınçtan fazla olmaması durumunda sistemin çalışmaması, filtrelerin sıklıkla değişmesinin gerekmesi, işlem

sonrası dezenfeksiyon işlemi için ayrı bir arıtıma ihtiyaç duyulması gibi durumlar da dezavantajları arasında yer almaktadır.

2.1.4.4 Nanofiltrasyon

Membran giderim yöntemleri çevre dostu olması, yüksek verimliliği, düşük enerji tüketimi ve kimyasal içermemesi nedeniyle sertlik gideriminde umut verici yöntemler arasındadır (Sarkar vd., 2021a). Membranlar arasında nanofiltrasyon (NF), yüksek su akışına sahip çok değerlikli iyonları ayırabildiğinden su yumuşatma için en uygun adaydır (Wen vd., 2022). NF membran prosesi, ters osmoz ile ultrafiltrasyon prosesi arasında basınçla çalışan bir prosestir. (Rahimpour vd., 2010) NF membranların su yumuşatma performansı temel olarak seçici bariyer tabakasının yüküne ve yapısına bağlıdır (Sarkar vd., 2021b; Shen vd., 2022). NF membran prosesleri ters osmoz membran prosesleri ile karşılaştırıldığında etkin giderim yapamaz. Fakat, enerji açısından ters osmoz prosesine göre tasarruflu bir sistemdir. Bundan dolayı, daha düşük basınçlarda çalışarak daha düşük kaliteli su vermektedirler (Koyuncu ve Topacık, 2002; Kaleli, 2006) .

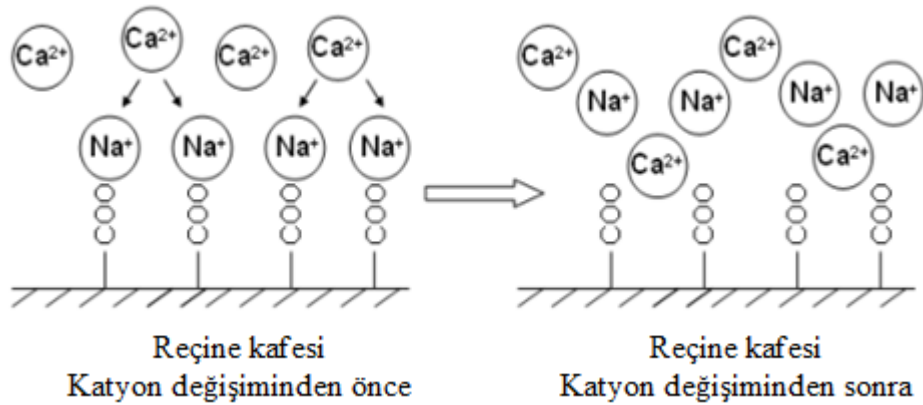
Sertlik gideriminde kullanılan bu yöntem sistemin işleyişi ile birlikte birden fazla kirleticinin yok edilmesi bulanıklık ve renk gideriminin sağlanması, oda sıcaklığında çalışması ve enerji maliyetini etkilememesi, kimyasal içermemesi avantajları arasında yer almaktadır. Avantajlarının yanı sıra sertlik giderim yöntemlerinden biri olan ters osmoz yöntemi membranlarından daha pahalı olması, bakımlarının pahalı olması, membran gözenek boyutlarının sınırlı nanometre ölçülerinde olması, ön arıtıma ihtiyaç duyulabilmesi gibi durumlar da dezavantajları arasında yer almaktadır.

2.1.4.5 İyon değiştirme

Sertliğe sebep olan +2 değerlikli iyonların sudan uzaklaştırılıp sertliğin giderilmesi için kullanılan yöntemlerden birisi de iyon değişimidir. İyon, pozitif veya negatif elektrik yüküne sahip bir atom veya moleküldür. Genellikle konutlarda sert suyu yumuşatmak için en sık kullanılan teknik iyon değiştirme yöntemidir. Evlerde

kullanılan su yumuşatma cihazları iyon değiştirme tekniği ile çalışan ekipmanlardır (Skipton ve Dvorak, 2014).

İyon değişimi, sıvı haldeki hareketli iyonların, bir katı matris içinde bulunan fonksiyonel gruplara elektrostatik olarak bağlanan iyonların çift yönlü iyon alışverişi işlemidir. İyon değiştirmenin en fazla kalsiyum, magnezyum ve diğer çok değerlikli katyonlarla sodyumun yer değiştirdiği sertlik giderimi olup beraberinde arsenik, baryum, nitrat ve radyum gibi spesifik kirleticilerin gideriminde de kullanılmaktadır (Davis, 2014). Katı yüzeyindeki iyonlar çözeltiye geçerken, çözeltideki iyonlar elektrostatik kuvvetler vasıtasıyla katının yüzeyine bağlanır. Bu değişim prosesi, yüzeydeki ve çözeltideki iki tip iyonun konsantrasyonları bir dengeye varıncaya kadar devam eder. şekil 2.3' te iyon değişimi mekanizmasını gösterilmektedir (URL-4).

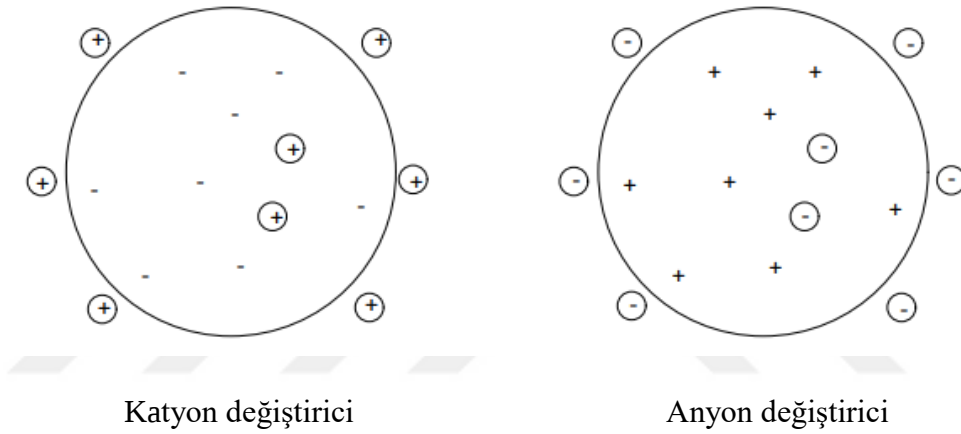


şekil 2.3. İyon değişim sürecinin mekanizması.

İyon değiştirici olarak en yaygın kullanılan malzeme reçine, en çok kullanılan doğal malzeme ise zeolittir. Toprak, humus, selüloz, yn, protein, aktif karbon, kömür, lignin, metalik oksitler ve algler ve bakteriler gibi canlı hücreler iyon değiştirme yeteneğine sahip bir dizi doğal malzemeler olarak tanımlanabilir (Aton, 1973). Zeolit, genellikle yeşil kum olarak adlandırılan doğal nehir kumudur. Tüm zeolitler, sodyum döngüsü yzerinde çalışır ve tuz çözeltisi ile yenilenir (Fair vd., 1968). Zeolitler yüzyıllar öncesindeki volkanik patlamalar neticesinde ortaya çıkmış ısıya maruz kaldıklarında patlama zelliliğine sahip, küçük boyutlardaki gözeneklere sahip kristalimsi alüminosilikatlar olarak tanımlanabilirler. Küçük gözeneklere sahip

olmasından ve adsorbsiyon verimini etkilemesinden, kararlılığından ve iyon değişim sürecindeki potansiyelinden dolayı sertlik gideriminde tercih edilen bir malzeme olmuştur.

İyon değiştirme amacıyla kullanılan malzemeler genel olarak katyon ve anyon değiştirici malzemeler olarak ikiye ayrılmaktadır. Katyon değiştirici malzemeler sertlik gideriminde yalnızca Ca^{+2} ve Mg^{+2} gibi pozitif yüklü iyonlarla reaksiyona girerken, anyon değiştirici malzemeler karbonat (CO_3^-) ve sülfat (SO_4^-) gibi negatif yüklü iyonlarla reaksiyona girmektedir. Şekil 2.4'te iyon değiştirmede katyon ve anyon hareketleri gösterilmiştir (URL-4).

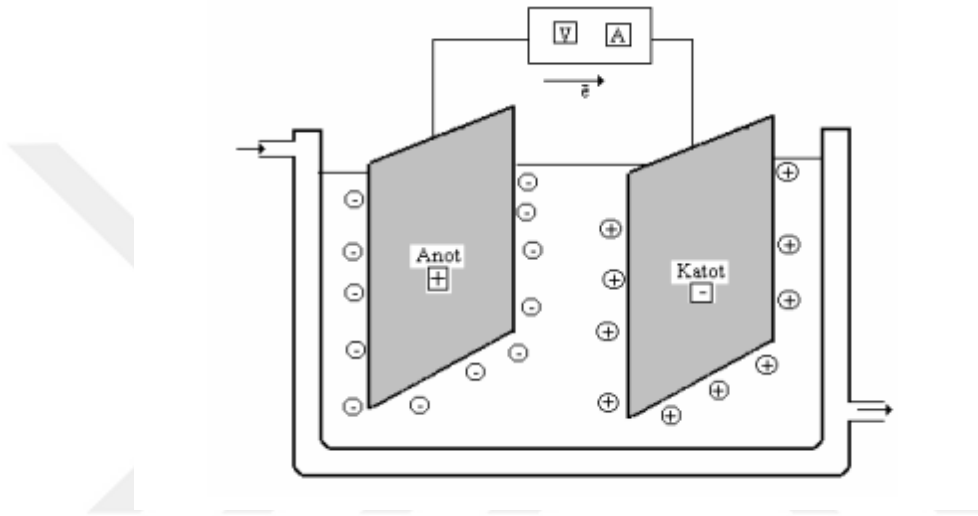


Şekil 2.4. İyon değiştirmede katyon ve anyon hareketleri.

Katyon değiştiricilerin etrafında katyonları çekmek için negatif yüklü iyonlar, anyon değiştiricilerin etrafında anyonları çekmek için pozitif yüklü iyonlar vardır. Sertlik gideriminde kullanılan bu yöntem düşük yatırım ve bakım maliyeti, kontrol kolaylığı, az enerji sarfiyatına sahip olması, boyutları sebebiyle az yer kaplaması, zararlı kimyasal içermemesi, çevreye duyarlı olması gibi avantajları bulunmaktadır. Avantajlarının yanı sıra iyon değiştirme işlemleri sırasında reçineden kaynaklı organik kirlilik, iyon değişikliğinden dolayı demir, sülfat, klor vb. kirliliği, rejenerasyon için kullanılan kimyasalların maliyeti gibi durumlarda dezavantajları arasında yer almaktadır.

2.2 Elektrokimyasal Prosesler

Elektrokimyasal tepkimeler, elektrolitten hareket eden iyonik bileşiklerin anotta ve katotta yükseltgendiği veya indirgendiği heterojen iyon transferi tepkimeleridir (Scott, 1995). Elektroliz işleminin oluşabilmesi için; anot ve katot arasında bir bağlantı ve çözeltisinde belli bir iletkenlik yani anyon ve katyonların olması gerekir. Bir elektrokimyasal hücrenin şematik olarak görünüşü Şekil 2.5’de verilmiştir (Delipınar, 2007).



Şekil 2.5. Elektrokimyasal hücrenin şematik görünüşü.

Elektrokimyasal giderim yöntemlerinin diğer giderim yöntemleriyle kıyaslandığında bazı önemli avantajları vardır. Bu avantajlar şu şekilde sıralanabilir: Basit araç gereç gerekmektedir ve basit işletme parametreleri ile iyi bir verim elde edilebilmektedir. Birden fazla kirleticinin tek proseste giderilmesi yani alternatif proseslerde belli kirleticileri gidermede birkaç yöntem ard arda kullanılabilir. Düşük bakım maliyeti ve iş gücü gerektirir, az kimyasal madde kullanılmaktadır ve sıcaklığın yüksek olması proseste olumsuz bir etki oluşturmamaktadır. Genel olarak elektrokimyasal arıtım yöntemi basit işleyiş yapısı ve elde edilen verimin yüksek olması su ve atıksu arıtımında arıtımında kullanılmaktadır (URL-5).

Elektrokimyasal prosesleri çevre kirlilik problemlerini önlemede ve çözmede ön plana çıkaran esas kriterleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Rajeshwar vd., 1994).

Çok Yönlülük: Elektrokimyasal prosesler birçok çevre sorunlarının çözümünde doğrudan veya dolaylı olarak kullanılabilir. Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme sonucu, çözeltilerin derişiklendirilmesi veya seyreltilmesi yani faz ayırmaları gerçekleştirilir. Bu durum birçok kirleticinin ve maddenin çok düşük konsantrasyonlara kadar ayrıldığını gösterir.

Enerji verimliliği: Elektrokimyasal prosesler, diğer klasik proseslere göre daha düşük sıcaklıklara ihtiyaç duymaktadırlar. Düşük elektriksel akım dağılımları, düşük voltaj ve yan reaksiyonlardan dolayı oluşan güç kayıplarını azaltmak için uygun elektrot kullanımı ve hücre dizaynları ile enerji tüketim verimleri artırılabilir. Böylece enerji, diğer klasik yöntemlere göre daha az tüketilmiş olacaktır.

Otomasyona uyma kabiliyeti: Elektrokimyasal proseslerde voltaj akım gibi elektriksel değişkenler genel olarak veri elde etmeyi kolaylaştırma, proses kontrolü ve otomasyonu için uygun özelliktedir.

Çevre uyumu: Elektrokimyasal proseslerde ana reaktif elektrot olup, temiz bir reaktiftir. Proseste genellikle birden fazla ekstra reaktifler gerekmemektedir. Ek olarak bu proseslerin genelinde yüksek seçicilik özelliğinden dolayı ikincil ürünlerin oluşumu beklenmemektedir.

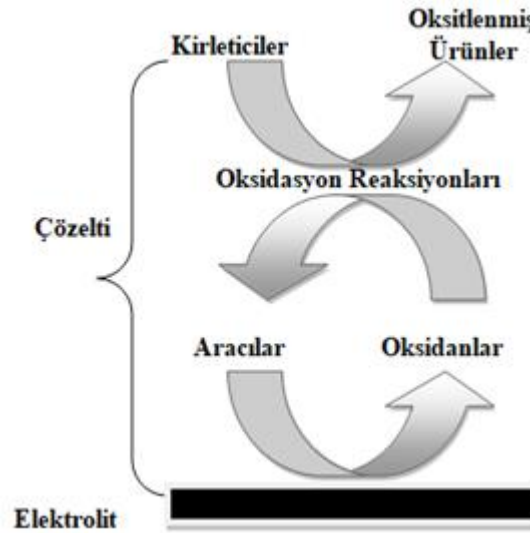
Maliyet tesirliliği: Elektrokimyasal ekipmanların az yer kaplamasının yanında üretimi, işletimi, kontrolünün tasarlanması basit ve genellikle ucuzdur.

Elektrokimyasal işlem sırasında elektrokimyasal reaktörlerde veya elektrolizörlerde meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylar çok aşamalı ve biraz karmaşıktır. En iyi reaktör tasarımını ve çalışma koşullarını seçmek için, çeşitli reaksiyon işlemlerinin gerçekleştiği mekanizmaları ve kinetiği belirlemek gerekir (Zamani, 2022).

2.2.1 Elektrooksidasyon yöntemi

En dirençli organik molekülleri bile çözmek için elektrokimyasal oksidasyonun (EO) özellikle etkili bir yöntem olduğu kabul edilmektedir. Organik kirleticileri anodize etmek için doğrudan ve dolaylı oksidasyon gibi farklı yöntemler kullanılabilir (Feng vd., 2016)

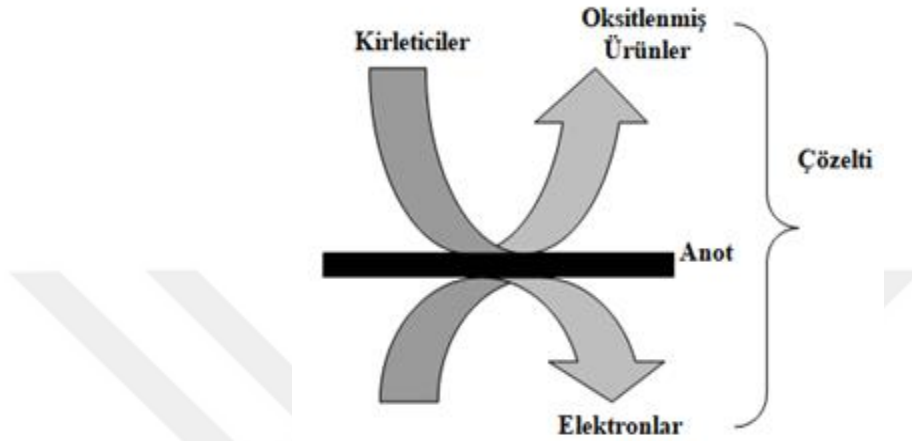
Kirleticiler, EO işleminde doğrudan elektrot yüzeyinde veya dolaylı olarak çözeltide oksidanlar oluşturarak giderilir. Ayrıca, kimyasal olarak adsorbe edilmiş oksidanların veya fiziksel olarak adsorbe edilmiş oksidanların (hidroksil radikalleri, $\bullet\text{OH}$) üretimi doğrudan elektrooksidasyona yol açar (Asfaha vd., 2021). $\bullet\text{OH}$ 'in elektrokimyasal üretimi ve reaktivitesi doğrudan elektrot malzemesinin doğasına bağlıdır (Panizza ve Cerisola, 2004). Bu nedenle, oksijen oluşum reaksiyonu için, aktif olmayan bir anot gereklidir. Çünkü bu tür bir elektrot $\bullet\text{OH}$ ile zayıf bir şekilde etkileşime girerek organiklerin radikal ile doğrudan reaksiyona girmesine izin verir (Othman, 2018). Elektrooksidasyon prosesleri çalışmaları en fazla Ti/Pt-Ir, Ti/RhO_x-TiO₂, Ti/PdO-CO₃O₄, TiO₂/TiRuO₂, Ti/Pt, PbO₂/SnO₂, PbO₂/Ti, SnO₂, PbO₂, BDD vb. anot elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Kahraman, 2019). Elektrooksidasyon yöntemi ile yeterli giderim sağlanması ve oluşan çamur miktarının az olması sebebiyle diğer giderim yöntemleri arasında daha fazla tercih edilen bir yöntem olmaktadır. Yüksek potansiyele sahip anotta atıksu içerisinde bulunan klorür iyonları kloro dönüşebilmekte ya da organik bileşiklerin doğrudan oksidasyonu gibi ikincil reaksiyonlar da meydana gelebilmektedir (İlhan vd., 2007). Şekil 2.6'da elektrooksidasyon prosesinde kirleticilerin dolaylı parçalanması şematik olarak verilmektedir (Fil vd., 2012).



Şekil 2.6. Elektrooksidasyon prosesinde kirleticilerin dolaylı parçalanması.

Dolaylı oksidasyon ile elektrokimyasal reaksiyonlar okside olmasından sonra tepkimeye hipoklorit, hidrojen peroksit gibi güçlü oksitleyicileri oluşturabilmektedir

(Fil vd., 2012). Doğrudan oksidasyonda, organik maddenin mineralize olması daha kolaydır. Yüksek miktarda kimyasal madde eklenmesi yapılmadığı ve katota oksijen eklemesine gerek olmadığı için diğer oksidasyon işlemlerinden daha avantajlı olmaktadır (Sivri, 2020). Şekil 2.7’de elektrooksidasyon prosesinde kirleticilerin doğrudan parçalanması şematik olarak verilmektedir (Fil vd., 2012).



Şekil 2.7. Elektrooksidasyon prosesinde kirleticilerin doğrudan parçalanması.

Destekleyici elektrolit, bazı kimyasal oksitleyicileri oluşturmakta ve oksidasyonun gelişmesinde büyük bir rol oynayabilmektedir. Örneğin, Na_2SO_4 elektroliti ilavesi sülfat radikali ($\text{SO}_4^\bullet$) oluşumuna sebep olmaktadır (Kim vd., 2010).

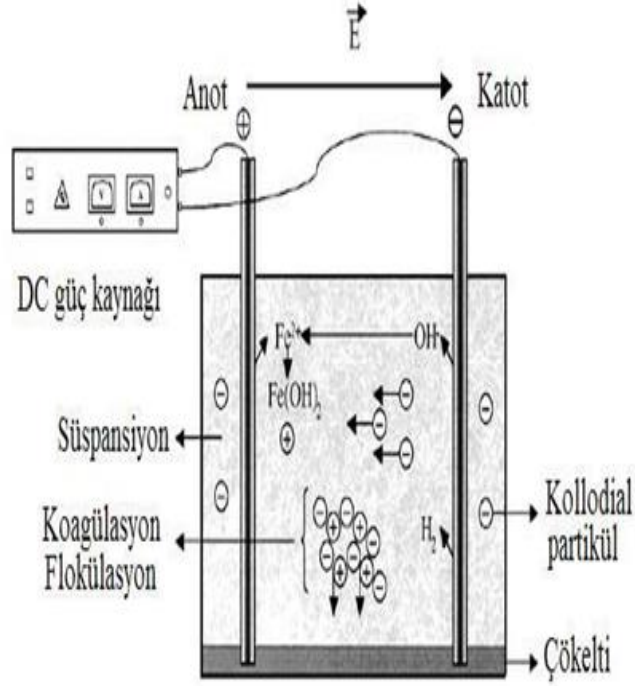
Elektrooksidasyon yönteminde arıtıma etki eden anotun katolitik aktivitesi, süre, partikül boyutu, elektrot yüzey alanı, organik bileşiklerin difüzyon hızı, pH, iletkenlik, akım yoğunluğu gibi işletme parametreleri verimi etkilemektedir.

2.2.2 Elektrokoagülasyon (EK) yöntemi

Elektrokoagülasyon, sularda yer çekimi etkisiyle çökemeyen farklı boyutlara sahip kolloid partiküllerin elektrik akımı kullanarak anot elektrotundan koagülantların üretilip, katot elektrotundan elektroliz yapılarak kirliliğe sebep olan maddelerin flotasyon yoluyla giderilmesi uzaklaştırılması işlemidir (URL-5).

Elektrokoagülasyon yönteminde genel olarak kullanılan reaktörde tipinde gerekli enerji için akım sağlayan DC güç kaynağı, anot ve katot iletkenler ve elektrik

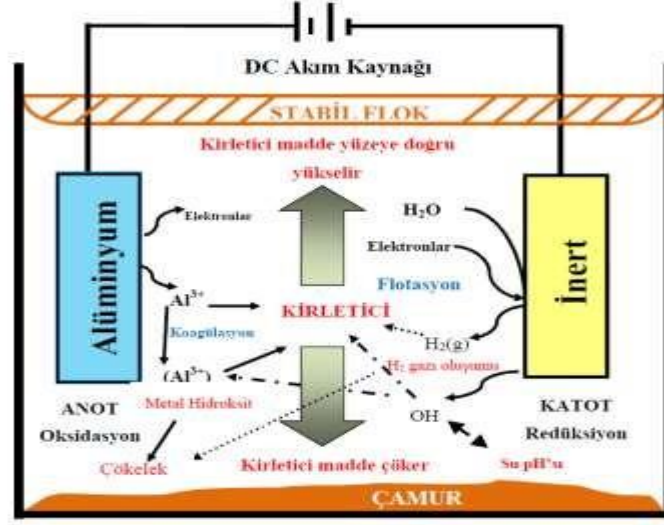
hücrelerinden oluşmaktadır. Şekil 2.8’de basit elektrokoagülasyon reaktörü gösterilmiştir (Malkoç, 2008).



Şekil 2.8. Basit elektrokimyasal reaktörü.

Elektrokoagülasyon, demir ve alüminyum gibi bazı çözünen metallerin anot olarak kullanıldığı ve bu anot malzemesinin elektrik akımı ile suda çözüldüğü bir işlemdir. Çözülmüş anot malzemesi, suda çözünmeyen metal hidroksitler oluşturarak işlemi gerçekleştirir. Elektrokoagülasyonu kimyasal koagülasyondan ayıran en önemli fark pıhtılaştırıcının suya verilme şeklidir (Barrera Díaz vd., 2011). Elektrokoagülasyonda floklar sisteme kimyasallar eklenmesiyle değil, alüminyum ve demir elektrotların reaktörde çözülmesiyle oluşmaktadır (Koparal ve Ögütveren, 2002). Elektrokoagülasyon, suda çözünmemiş askıda katı maddelerin ve emülsiyonların elektrik yüklerini değiştirerek kararsız olmaları prensibine dayanır. Bu şekilde parçacıkların yüzey yükü nötralize edilir ve kolloidler bir araya gelerek çökebilir toprakları oluşturur (Kabdaşlı vd., 2012). Metal iyonlarının oluşumu anotta gerçekleşir ve hidrojen gazı katottan serbest bırakılır (Henze vd., 2001). Prosesin çalışma aşamasında elektrotlar su ile reaksiyona girerek $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ve $\text{Fe}(\text{OH})_3$ gibi metal hidroksitleri oluşturur. Sistemde arıtma, metal hidroksitlerin

oluşumu ile başlar. Şekil 2.9'da elektrokoagülasyon prosesinin ilerleyişi verilmektedir (Bayar vd., 2012; Özyonar ve Karagözoğlu, 2012).



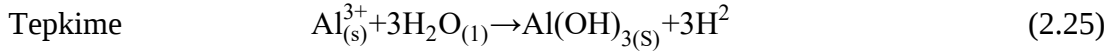
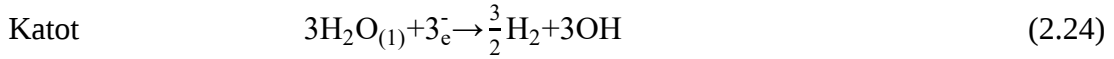
Şekil 2.9. Elektrokoagülasyon prosesinin ilerleyişi.

Elektrokoagülasyon yöntemi üç temel prosedür ile kirlenicilerin giderimini sağlamaktadır. Bunlar adsorpsiyon, kompleks oluşturma ve birlikte çöktürme olarak tanımlanmaktadır (Zamani, 2022). Buna göre, koagülant olan iyonlar reaksiyonun gerçekleştiği reaktör içerisinde üretilir. Bunlar; elektrotların yüzeyinde meydana gelen reaksiyonlarla metal hidroksitlerin oluşumu, sıvı fazda kirlenici maddelerle metal hidroksitlerle koagülasyonun oluşturulması, kirlenicilerin adsorpsiyon, pıhtılaşma çöktürmesi veya yüzdürme mekanizmaları ile uzaklaştırılma işlemidir (Moreno-Casillas vd., 2007).

Elektrokoagülasyon yönteminde verimi etkileyen en önemli parametrelerden biri de doğru malzeme kullanılarak seçilen elektrottur. En yaygın kullanılan elektrot tipleri ise demir ve alüminyumdur. Suda az çözünmeleri, ucuz ve diğer elektrot tiplerine göre kolay bulunabilmeleri, adsorbsiyon kapasitesinin yüksek olması, alüminyum ve demir hidroksitlerinin tercih edilme nedenleri arasında yer almaktadır.

Alüminyum elektrot kullanarak suda meydana gelen reaksiyonlar Denklem 2.23-2.25'de gösterilmiştir.



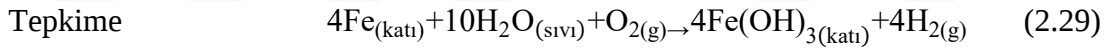
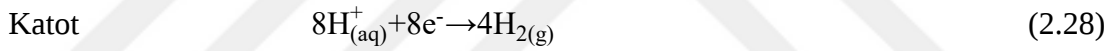
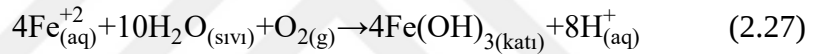
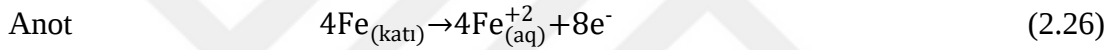


Alüminyum elektrotlar için Al^{3+} iyonları, karşılık gelen hidroksitleri ve polihidroksitleri oluşturmak için hemen kendiliğinden reaksiyona girer. Al^{3+} hidrolizi nedeniyle $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5\text{OH}^{2+}$, $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})(\text{OH})^{2+}$ oluşur (Benefield vd., 1982).

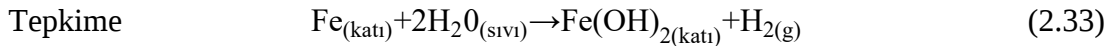
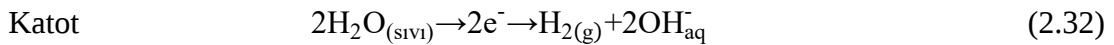
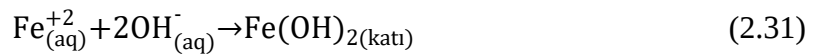
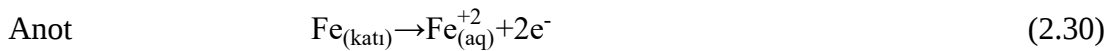
Alüminyum hidroksitin geniş spesifik alanı daha sonra bileşik adsorpsiyonunu kolaylaştırır ve kolloidleri hapseder (Kobya vd., 2003).

Demir elektrot kullanarak suda meydana gelen reaksiyonlar Denklem 2.26-2.33'te gösterilmiştir.

Mekanizma 1



Mekanizma 2



Oluşan $\text{Fe}(\text{OH})_{n(katı)}$ çözeltisi içerisinde jelatinimsi yumak olarak kalır ve atıksudan kirletici kompleksleşme ya da elektrostatik çekim ile giderilir. Redoks tepkimeleri sonucu üretilen H_2 , çözünmüş organikleri ya da askıda katıları yüzdürme ile giderebilir (Yavuz, 2004). Akım yoğunluğu, elektroliz süresi, pH, elektrot tipi, kolloid partiküllerin boyutu, suyun iletkenliği, ortamın kimyasal bileşimi

elektrokoagülasyon mekanizmasına etki eden ve verimi etkileyen parametreler olarak sıralayabiliriz. Elektrokoagülasyon prosesi alternatif arıtım yöntemlerine göre yapılan bilimsel çalışmalar doğrultusunda avantaj ve dezavantajlar aşağıda sıralanmıştır (Mollah vd., 2001).

EK'nın avantajları;

- EK basit ekipman gerektirir ve çalışma sırasında meydana gelen sorunları tolere edebilir.
- EK ile arıtılmış atıksular berrak, renksiz ve kokusuzdur.
- EK'nın oluşturduğu çamur üretimi düşüktür. Sebebi çamurun oluşumu temel olarak metal oksitler / hidroksitlerden oluştuğu için kolayca sudan ayrılmasıdır.
- EK tarafından oluşturulan floklar, kimyasal floklara benzer, ancak flokların daha büyük, daha az bağlanmış su içeriği, aside dayanıklı ve daha durağan olmaları nedeniyle filtrasyon işlemi ile daha kolay ayrılır.
- EK, kimyasal işlemlerle göre daha az toplam çözünmüş katı madde içeriğine sahiptir. Su tekrar kullanılmak istendiğinde geri kazanım maliyetine katkısı olacaktır.
- EK işleminde uygulanan elektriksel alan küçük kolloidal partikülleri sudan ayırma işleminin hızlandırır ve pıhtılaşmayı kolaylaştırır.
- EK sürecinde fazla kimyasal kullanımına gerek yoktur. Bu nedenle kalıntı kimyasalları nötralize etme sorunu yoktur ve fazla kimyasal kullanılmadığından az kimyasal kullanımı ikinci bir kirliliğe sebep olmaz.
- Elektroliz sırasında üretilen gaz kabarcıkları kirletici maddeyi daha kolay konsantre edebilecek, toplanabilecek ve ayırabilecek yer olan çözeltinin yüzeyine taşıyabilecektir.
- EK hücresindeki elektrolitik işlemler, hareketli parçaları olmadan elektrikle kontrol edilebildiğinden daha az bakım gerektirir.

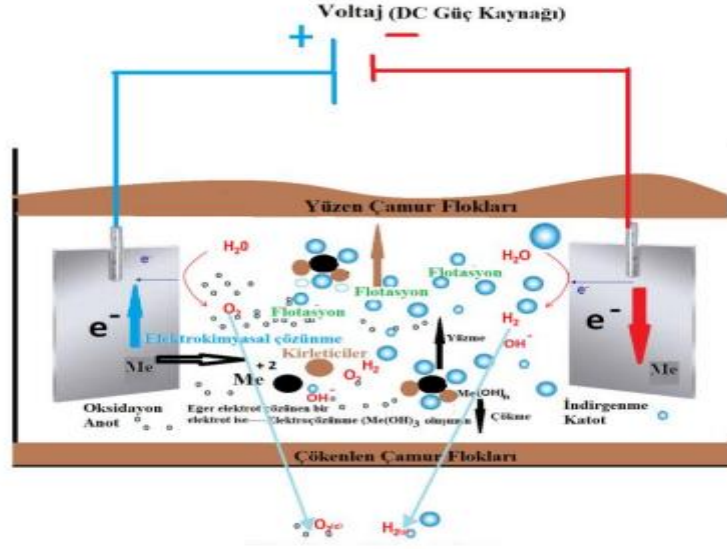
EK'nın dezavantajları;

- Anot elektrotlar oksidasyon sonucu atıksu içerisinde çözünüp tükendiğinden düzenli olarak değiştirilmeleri gerekir.
- Elektrik kullanımı genellikle pahalı olabilir.
- EK'da verim kaybına neden olan katot üzerinde geçirimsiz bir oksit film tabakası oluşabilir.
- Atıksuyun yüksek iletkenlik değerlerine sahip olması istenir.
- Bazen çözünebilir maddeler hidroksit şeklinde çökebilir.

2.2.3 Elektroflotasyon yöntemi

Elektroflotasyon yöntemi, reaktör içerisinde anotta veya katotta oluşan oksijen ve hidrojen gaz kabarcıklarının etkileşimleriyle adsorbe ederek uzaklaştırılmak istenen kirleticileri yüzeye taşınmasını sağlayan yöntem olarak tanımlanmaktadır. Elektroflotasyon prosesi ilk maden endüstrisinde uygulanmış daha sonra su ve atıksuların arıtılmasında uygulanmıştır.

Elektroflotasyon yöntemindeki süreç, elektrik akımı elektrokimyasal hücreden geçerken çözelti elektrolizine bağlı olarak hem katottan hem de anottan çıkan oksijen ve hidrojen gibi küçük gaz kabarcıkları olarak gerçekleşir. Daha sonra kümeler su yüzeyine çıkarak mekanik sıyırma ile toplanmaktadır (Mohtashami ve Shang, 2019). Şekil 2.10'da Elektroflotasyon prosesinin mekanizması şematik olarak gösterilmiştir (Özyonar, 2020).



Şekil 2.10. Elektroflotasyon proses mekanizması.

Daha büyük kabarcıklar oluşturan geleneksel flotasyon ünitelerinin aksine, nötr ortamdaki hidrojen kabarcıkları, aynı metal elektrotlu oksijen kabarcıklarından daha küçüktür. Küçük baloncukların daha yüksek yüzey alanı sayesinde, üretilen büyük miktarda hidrojen, hafif kirletici parçacıkların yüzer fazında daha verimlidir ve bu da daha yüksek bir giderme performansı sağlar. Bununla birlikte, kabarcıkların boyutu ve miktarı büyük ölçüde akım yoğunluğu, elektrot olarak kullanılan metal türleri ve bunların konfigürasyonu, çözeltinin pH'sı ve elektrolit dahil olmak üzere çeşitli faktörler tarafından belirlenir (Peng vd., 2020; Chang vd., 2020). Çözeltinin pH'ı, akım yoğunluğu, mesafe, iletkenlik, elektrot türü ve bağlantı yapısı elektroflotasyon prosesine etki eden ve verimi etkileyen parametlerdir. Elektroflotasyon, avantajlarından dolayı kimyasal arıtım yöntemlerine göre alternatif bir yöntem olmuştur. Kimyasal arıtmalarda suya koagülant eklenmesi hem maliyet hem çamur oluşumuna neden olmaktadır. Elektroflotasyon prosesi ile karşılaştırıldığında kimyasallar eklenmeden giderim sağlayan çevreye uyumlu bir giderim yöntemi olmuştur.

Elektroflotasyon prosesinin avantaj ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır. (Çolak, 2017).

Elektroflotasyon avantajları;

- Farklı akım yoğunluğu değerlerinde kabarcık sayısı ve boyutu kontrol edilebilir.
- Yüklü olan kabarcıklar bir bütün halini almazlar,
- Meydana gelen yüksek flok yapısını bozmaz,
- Yüksek sıcaklıklarda da uygulanabilir,
- Kimyasal kullanımı azdır,
- Anodik klor dezenfektan özelliği gösterir.

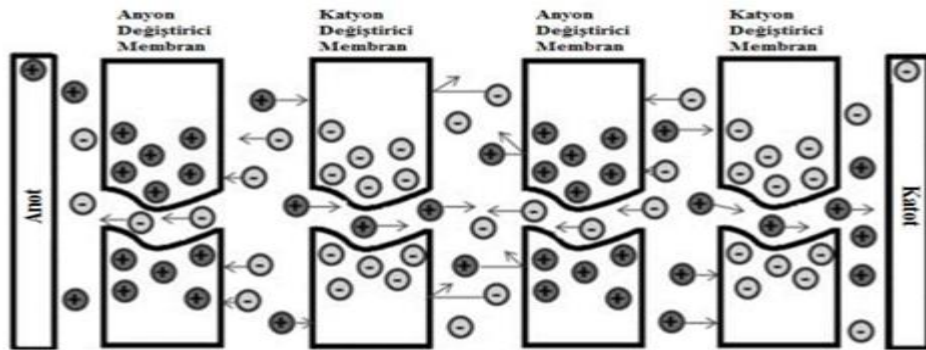
Elektroflotasyon dezavantajları;

- Tank yüksekliği 1m'den azdır,
- Elektrotlarda korozyon meydana gelir,
- Elektrot pasivizasyonu meydana gelir,
- DC (Doğru akım) gücü gereklidir,
- Yüksek spesifik yoğunluklu materyallere göre daha düşük performansa sahiptir.

2.2.4 Elektrodializ yöntemi

Elektrodializ (ED) sistemi elektrik potansiyel farkı uygulayarak anot ve katot arasına yerleştiren iyon değiştiricilerin seçiciliği geçirgenlik özelliği ile çözeltideki iyonları ayırması işlemi olarak tanımlanabilir. Diyaliz ve elektrolizin birleşimi olan bu yöntem membran ayırma yöntemi olarak ta tanımlanmaktadır.

Kasyon değişim membranları, anyon değişim membranları, ayırıcılarla ayrılmış seyreltik ve konsantre elektrolit bölmelerini içeren, ED yöntemi proses mekanizması Şekil 2.11'de gösterilmiştir (Öztekin, 2018).



Şekil 2.11. Elektrodializ proses mekanizması.

Bir ED prosesi tipik olarak elektrotlarla temas eden uç taraftaki iki elektrot bölmesinden, bir dizi anyon ve katyon değişim membranından oluşur bu da alternatif konsantre ve seyreltik çözelti bölmeleri oluşturur. Bir güç kaynağı elektrotları şarj eder ve ED yığından bir elektrik akımı geçer. Besleme çözeltisinin elektrik yüklü anyonları anoda yani pozitif yüklü elektrotta doğru hareket ederken, katyonlar katoda yani negatif yüklü elektrotta doğru hareket eder. Katyon değişim membranından geçen katyonlar anyon değişim membranı tarafından, anyon değişim membranından geçen anyonlar katyon değişim membranından tarafında engellenir. Bu durum da seyreltik bölmelerdeki tuz içeriğinin azalmasına ve konsantre bölmesinin zenginleşmesine yol açar (Mohammadi, 2021).

ED yöntemi, iyonik ayrımı desteklemek için bir elektriksel alan içerisinde dinamik bir kuvvet olarak iyon değişim membranlarını kullanan elektromekanik bir ayırma yöntemidir. Esas olarak iyonik türlerin ekstraksiyonunun yanı sıra elektrolitlerden sertlik ve organiklerin çıkarılması için kabul edilmektedir (Lee vd., 2013). Elektrodializ yönteminin başlıca avantaj ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır. (Stricker, 2001.)

Avantajları:

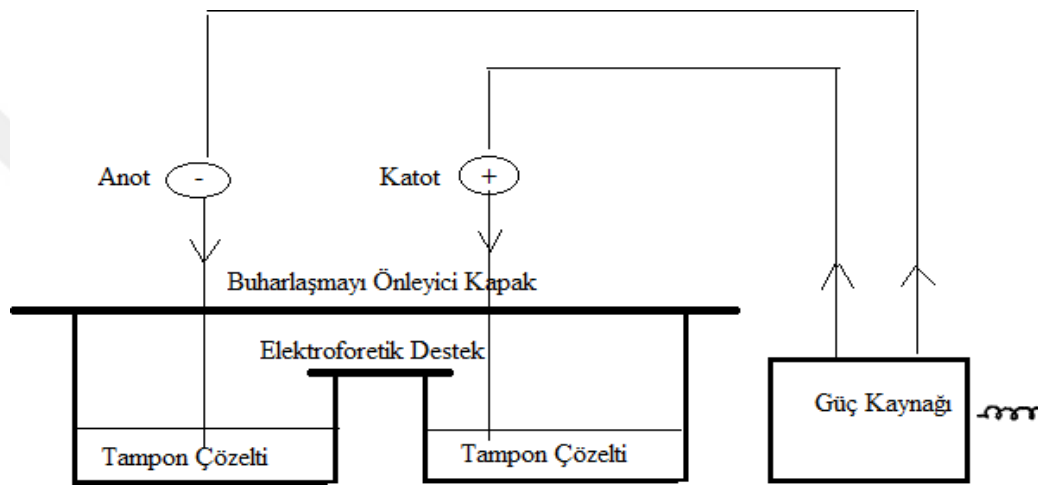
- Basit dizayna sahiptir.
- Düşük enerji ihtiyacına gereksinim vardır.
- Hızlı çalışır.
- İtici kuvvet elektriksel potansiyeldir.
- İyon seçiciliği ile ayırma işlemi gerçekleşir.

Dezavantajları:

- Uygulama alanlarına göre yüksek enerji gereksinimi olabilir.
- Yüksek seçicilikteki ayırma düşük çözelti akısına sebep olur.
- Membran malzemesi çok hassastır.
- Membran tıkanmaları meydana gelebilir.
- Membranların hassasiyeti nedeni ile proses öncesinde ve sonrasında ön arıtma gerektirir.

2.2.5 Elektroferez yöntemi

Fiziksel analiz yöntemi de olan elektroforez elektrolit çözeltisi içerisinde elektrik akımı geçtiğinde elektrot kutubuna zıt yönde çözünmüş ya da dağılmış, elektrik yükü ile yüklenen protein, kolloid, molekül ve diğer parçacıkların hareketi olarak tanımlanmaktadır. Elektrik alan etkisi ile yüklenen moleküllerin hareketleri zıt yüklü elektrotlara doğrudur. Bu durum elektroforetik hareketlilik olarak adlandırılır. Elektroferez yöntemi proses mekanizması Şekil 2.12’de gösterilmiştir (Dipa ve Surati, 2016).



Şekil 2.12. Elektroferez proses mekanizması.

Elektroferez yönteminin proses mekanizmasındaki gösterilen gerekli enerji için akım sağlayan güç kaynağı tarafından tek yönlü akım sağlayarak elektriksel alan oluşturulmaktadır. Elektroforetik destek alanında reaktörde bulunan tampon çözeltileri elektriksel alan içerisinde oluşan akımı iletme, pH değerini sabitlemek ve çözelti içerisindeki moleküllerin tek yönte transferini sağlamaktadır (Dipa ve Surati, 2016).

2.2.6 Elektrokimyasal arıtım prosesini etkileyen faktörler

Elektrokimyasal arıtım proses uygulamalarında arıtıma etki eden ve verimi etkileyen parametreler pH, akım yoğunluğu, elektrolit ilavesi, arıtım süresi, elektrot türü ile elektrotlar arası mesafe ve sıcaklık olarak sıralanmaktadır. Bu işletme parametrelerinin etkileri aşağıda açıklanmıştır.

pH: Elektrokimyasal proses uygulamalarında pH parametresi elektrokoagülasyon sürecindeki metal hidroksitlerin oluşumunda ve elektroksidasyon sürecindeki hidroksil iyonlarının oluşmasında önemli bir yere sahiptir. Elektrokimyasal arıtım prosesi boyunca ortam pH değerleri sürekli değişkenlik göstermektedir.

Elektrokimyasal arıtım süresi sonundaki çıkış suyunun asidik olma durumunda pH'da artış, alkali olma durumunda pH'da azalma meydana gelmektedir. Suyun asidik olduğu şartlarda pH'taki artış katot elektrotundaki hidrojenden kaynaklanmaktadır (Kahraman, 2019).

Akım yoğunluğu: Elektrokimyasal proses uygulamalarında akım yoğunluğu deneysel parametrelerde reaksiyon hızını kontrol etmesi sebebiyle çok önemli bir yere sahiptir. Proses çalışırken ilgili elektrotatlardan çözünen Al^{3+} veya Fe^{2+} iyonlarının miktarı reaktörün büyüklüğünü belirler. Yine aynı şekilde akım yoğunluğunun değerinin fazla ya da az uygulanması hem giderim verimini hem maliyeti etkilemektedir. 20–25 A/m² değerindeki akım yoğunluğunda sistem bakım gerektirmeden uzun ömürlü kullanılabilir (Kahraman, 2019).

Çalışmalarda belirlenen akım yoğunluğunun çözeltinin pH'sı, sıcaklık ve akış hızı gibi diğer çalışma parametrelerine göre sabitlenmesi gerektiğine dikkat edilmelidir. Araştırmacılar akım verimliliğinin akım yoğunluğu ve akış hızının birbirine bağlı olduğunu, yüksek giderme verimliliği elde etmek için, akış hızı artırıldığında akım yoğunluğunun daha yüksek olması gerektiğini ifade etmişlerdir (Zodi vd., 2013).

Zhang vd. (2020) soğutma suyundaki sertliğe neden olan iyonların giderilmesi için yapılan deneysel çalışmalarında akım yoğunluğunun artması ile birlikte düşük bir bikarbonat alkalinite konsantrasyonunda sertlik gideriminde bir azalma olduğunu görmüşlerdir. Bunun nedeni akım yoğunluğunun artmasından kaynaklanan güçlü elektromigrasyonun meydana gelmesinin HCO_3^- 'ün anoda doğru göçünü hızlandırması ve ardından kimyasal reaksiyon veriminin azalmasına neden olması ile açıklanabilmektedir (Yu vd., 2018a,b).

Elektrolit ilavesi: Elektrokimyasal proses uygulamalarında verimi ve iletkenliği artırmak için suya destek elektrolit ilavesi yapılmaktadır. En yaygın kullanılan destek

elektrolitler NaCl, KCl, Na₂SO₄ ve K₂SO₄ gibi inert tuzlar ve halojenli tuzlardır. Klor içerikli elektrolitlerin seçiminde kolay iyonlaşması, oksitleyici türlere dönüşme potansiyelinin yüksek olması, daha az maliyetli olması tercih sebebi olmuştur (Akbaş, 2014).

Klorür iyonları ortamda elektrik yükünü taşımadaki iyonik katkısının yanı sıra, HCO³⁻, SO₄²⁻ gibi anyonların olumsuz etkilerini büyük ölçüde azaltmaktadır. Karbonat veya sülfat iyonlarının varlığı elektrotların yüzeyinde yalıtkan bir tabaka oluşturan Ca⁺² veya Mg⁺² iyonlarının çökmesine neden olmaktadır. Bu yalıtım katmanı, elektrotlar arasındaki potansiyelin keskin bir şekilde artmasına ve akım verimliliğinde önemli bir düşüşe neden olmaktadır (Wong vd., 2002).

Arıtım süresi: Elektrokimyasal giderim uygulamalarında giderimin etkinliği belli elektrotlar tarafından üretilen hidroksit ve metal iyonlarının konsantrasyonu ile doğru orantılıdır ve zaman geçtikçe iyon konsantrasyonu ve hidroksit topakları artmaktadır (Patel vd., 2022).

Sanjuán vd. (2019) yaptıkları elektrokimyasal su yumuşatma çalışmasında uzun süreli deneyler yapmışlardır. Deneylerde kullanılan iki farklı elektrotlardaki giderim karşılaştırılmıştır. Buna göre üç boyutlu paslanmaz çelik yün katotun iki boyutlu titanyum katoda göre giderimin daha yüksek verime ulaştığı ancak belirli bir süre sonunda verimliliğin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi ise üç boyutlu paslanmaz çelik katotun iç kanallarının uzun süreli çalışmalarda zamanla tıkanması olarak açıklanabilir. Bu yüzden optimal sürenin belirlenip çalışılması gerekmektedir.

Elektrot türü: Elektrokimyasal yöntemle giderim uygulamalarında farklı elektrot tipleri kullanılması farklı kirlilik parametreleri için farklı giderim verim oranlarını ortaya koyması sebebiyle tercih edilmektedir. Aşınmaz malzemelerden olan paslanmaz çelik ve titanyum elektrotlar en çok kullanılan malzemelerdir.

Sertliğe sebep olan +2 değerlikli Ca⁺² veya Mg⁺² iyonlarının giderimi için katot malzemesi olarak paslanmaz çelik elektrot kullanılması tavsiye edilmektedir (Chen, 2004).

Sanjuán vd. (2019) elektrokimyasal arıtım ile sertlik giderim çalışmalarında verimliliğini artırmak ve enerji tüketimini azaltmak için katot olarak üç boyutlu paslanmaz çelik yün elektrotu kullanılmıştır. Tel yünü veya tel sünger olarak da bilinen paslanmaz çelik yün, ince paslanmaz çelik filament demetlerinden oluşmaktadır. Ahşap ve metal nesnelerin parlatılması, ev pişirme gereçlerinin temizlenmesi, pencerelerin temizlenmesi ve yüzeylerin zımparalanması işlerinde aşındırıcı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Sanjuán vd., 2019). Paslanmaz çelik katotlar, katot deaktivasyonunu geciktirerek daha yüksek tufal giderme hızına sahip olması ve pürüzsüz yüzeyin tufal yapışmasını azaltıp ve kendiliğinden tufal ayrılmasına neden olmaktadır (Yu vd., 2018a,b).

Elektrotlar arası mesafe: Elektrokimyasal yöntemle giderim uygulamalarında elektrotlar arası mesafenin elektrokimyasal hücredeki potansiyel ohmik azalma elektrotlar arası mesafe ile orantılıdır. Elektrotlar arası mesafe, özellikle numuneler düşük elektriksel iletkenliğe sahip olduğunda, elektrolizin enerji tüketimini etkiler (Atashzaban vd., 2016). Elektrotlar arası mesafenin çok yakın veya çok uzak olması giderim verimini etkilemektedir. Optimum koşulların sağlanması ile uygun enerji maliyeti ile birlikte yüksek giderim verimleri de elde edilir.

Sıcaklık: Sıcaklığın etkisi elektrokimyasal arıtım teknolojileri üzerinde çok fazla araştırma yapılan bir parametre olmamıştır. Su arıtım prosesi boyunca kullanılan alüminyum elektrot ile akım veriminin sıcaklık ile arttığı, en yüksek akım verimine 60°C’de ulaşılması ile de verim artışının durduğu gözlenmiştir. Sıcaklığın 60°C’den sonraki artışları akım veriminde düşüşe sebep olmaktadır. Sıcaklık ile akım veriminin artması elektrot yüzeyi üzerindeki alüminyum oksit tabakasının parçalanması sonucu aktivitenin artması sebebiyle gerçekleşmektedir. Sıcaklık derecesinin çok yüksek olması halinde elektrot yüzeyinde birikme eğilimi fazla olan flokların meydana gelmesi ile sonuçlanan gözenekli $Al(OH)_3$ oluşumu gerçekleşmektedir. Akım verimine benzer şekilde yağlı atıksuların gideriminde güç tüketimi de 35°C’nin altında maksimum olmaktadır. Akım verimi ve atıksuyun iletkenliği üzerinde sıcaklığın zıt etkileri ile açıklanmaktadır. Çok yüksek sıcaklık dereceleri iletkenlik değerini yükseltmekte ve dolayısıyla enerji tüketimi daha düşük olmaktadır (Chen, 2004).

2.2.7 Literatürde yapılmış çalışmalar

Birçok kirleticinin arıtımında kullanılan elektrokimyasal arıtım son zamanlarda sertlik gideriminde de tercih edilmeye başlayan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Elektrokimyasal su yumuşatma teknolojisi, katot yüzeyinde meydana gelen heterojen bir reaksiyona dayanmaktadır. Reaksiyon prosesleri, temel olarak alkalinite üretimi ve tufal birikimi olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Katot çalışırken iki işlem birbiriyle rekabet eder. Katot yüzeyi tamamen çökelti tarafından kaplandığında, katot deaktivasyonu meydana gelir (Yu vd., 2018a,b)

Elektrokimyasal arıtım yöntemleri birçok alanda kullanılmasına rağmen sulardaki sertliğin gideriminde kullanımı son zamanlarda gündeme gelmiştir. Literatürde bu konuda yapılan bazı çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Sanjuán vd. (2019) yaptıkları çalışmalarda geleneksel elektrokimyasal su yumuşatma teknolojisindeki yüksek katot alanı gereksinimi sınırlamasının üstesinden gelmek için bir üç boyutlu paslanmaz çelik yün katot önermiştir. Deneysel sonuçlara göre üç boyutlu paslanmaz çelik yün katodun iyi bir verim oranı sergilediği ve düşük enerji tüketimi sağladığını gözlemlemişlerdir.

Luan vd. (2019) yaptıkları çalışmalarda çoklu ağ bağlantılı katotlara sahip bir elektrokimyasal yöntemle su yumuşatma sistemi tanıtmışlardır. Katot alanının artmasının açık bir şekilde kireç çözme oranını iyileştirebileceği gösterilmiştir. Bu çalışma ile elektrokimyasal arıtım ile sertlik giderim çalışmalarının geliştirilmesi ve endüstriyel uygulamaları için kolay bir strateji sunması gerektiği önerilmiştir.

Escalera vd. (2022) yaptıkları çalışmalarda nitratla kirlenmiş yeraltı suyunun elektro biyoremediasyonu için bir ön adım olarak elektrokimyasal arıtım ile su yumuşatma yaklaşımı değerlendirilmiştir. Sürekli akış modunda çalışarak yaklaşık %60'lık bir sertlik giderme verimliliği sağlanmıştır. Yumuşatma aktif süresini arttırmak için reaktörde ters polarite periyotları uygulanarak yumuşatma verimliliğini arttırmışlardır.

Zhang vd. (2020) yaptıkları çalışmalarda endüstride kullanılan soğutma suyundaki sertliği gidermek için, otomatik kireç giderme reaktörü tasarlayıp elektrokimyasal yumuşatma cihazı üreterek deneyler yapmışlardır. Yapılan deneyler ile optimum koşullar sağlanmıştır. Sertlik giderme verimliliği ve enerji tüketimine göre sistemin performansı değerlendirilmiştir.

Hasson vd. (2010) yaptıkları çalışmalarda su yumuşatma reaksiyon alanını büyük ölçüde artıran yeni elektrokimyasal çekirdek sistemini geliştirmiştir. Çökeltinin gerekli elektrot alanında ciddi bir azalma sağlayarak çekirdek yüzeyinde meydana gelmesini sağlamışlardır.

Zhi vd. (2014) yaptıkları çalışmalarda geleneksel elektrokoagülasyon ve elektrokimyasal çökeltme işlemlerini birleştirerek yeni bir elektrokimyasal sistem önermiştir. Elektrokoagülasyon hücresinde üretilen az miktarda metalik flok, katot inaktivasyonunu geciktiren elektrokimyasal çökeltme hücresinde sertliğin giderilmesi için bir çökeltme yüzeyi sağladığını gözlemlemişlerdir.

Zaslavski vd. (2013) yaptıkları çalışmalarda bipolar membranlı daha yüksek bir kireç çözme oranı sistemi önermiştir. Sistem asidik bir su odasına ve bir alkaline bölünmüştür. Alkaline odasındaki yüksek alkali ortam, tortu birikimini hızlandırmıştır. Bipolar membranların entegrasyonunun mevcut verimliliklerde ve enerji tüketimlerinde önemli bir iyileşme sağladığını göstermektedir. Ayrıca çalışılan bu sistemde anotta istenmeyen klor üretim sürecinin tamamen önlenmesini sağlanmıştır.

Yang vd. (2018) yaptıkları çalışmada hava ile temizlenmiş yıkama kullanarak ayna paslanmaz çelik katotların en uygun katot malzemesi olduğunu ve daha yüksek kireç çözme hızına sahip olduğunu göstermiştir. Elektrokimyasal arıtım ile yüksek sertlik giderme verimliliği ve düşük enerji tüketiminin istikrarlı bir şekilde çalışabildiğini göstermişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Kampüs İçi Yeraltı Suyu

Çalışmada Aksaray Üniversitesi kampüsü içerisinde bulunan yüksek sertlik seviyesine sahip kuyu suyunun elektrokimyasal yöntem ile sertlik giderim verimi incelenmiştir. Deneylerde; toplam sertlik, Ca ve Mg tayini, alkalinite ve pH tayinleri Standart Metotlara uygun olarak yapılmıştır. Elektrokimyasal arıtıma verimini etkileyen akım yoğunluğu, pH, arıtım süresi, iletkenlik ve HCO_3^- konsantrasyonu parametreleri çalışılmıştır. Çalışma süresince kullanılan kuyu suyunun karakteristiği Çizelge 3.1’de verilmiştir.

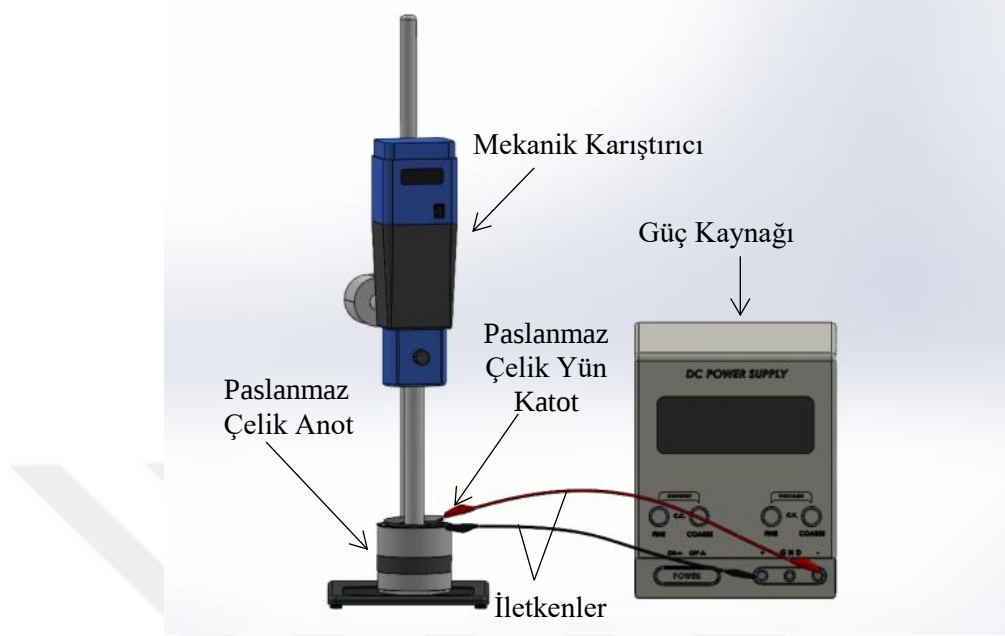
Çizelge 3.1. Kuyu suyunun karakteristiği.

Parametreler	Sonuçlar
İletkenlik ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1854
pH	7,24
TOC (mg/L)	4,15
TC (mg/L)	173,45
IC (mg/L)	169,3
TN (mg/L)	3,82
Ca (mg/L)	178,76
Mg (mg/L)	68,42
Toplam sertlik (mg CaCO_3/L)	727,05
Toplam alkalinite (mg CaCO_3/L)	440

3.2 Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtılabilirlik Çalışmaları

Yeraltı sularından elektrokimyasal metotla sertlik giderim çalışması paslanmaz çelikten üretilmiş aynı zamanda doğrudan anot olarakta kullanılan 500 mL hacminde, 9,5 cm yüksekliğinde ve 8 cm taban çapına sahip silindirik reaktör içerisinde gerçekleştirilmiştir. Katot elektrot olarak 3 boyutlu paslanmaz çelik yün kullanılmıştır. Katot elektrodunun toplam ağırlığı 21,7678 g, aktif yüzey alanı ise $0,18 \text{ m}^2$ ’dir. Gerekli enerji Zhaoxin RXN-305D marka güç kaynağı ile sağlanmıştır. Reaktör içerisindeki homojenite 8x13 mm boyutlarına sahip, 4 bıçaklı, 45 rpm hızındaki mekanik karıştırıcı ile gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.1’de deney düzeneği, Çizelge 3.2’de elektrokimyasal arıtım çalışma koşulları verilmiştir.



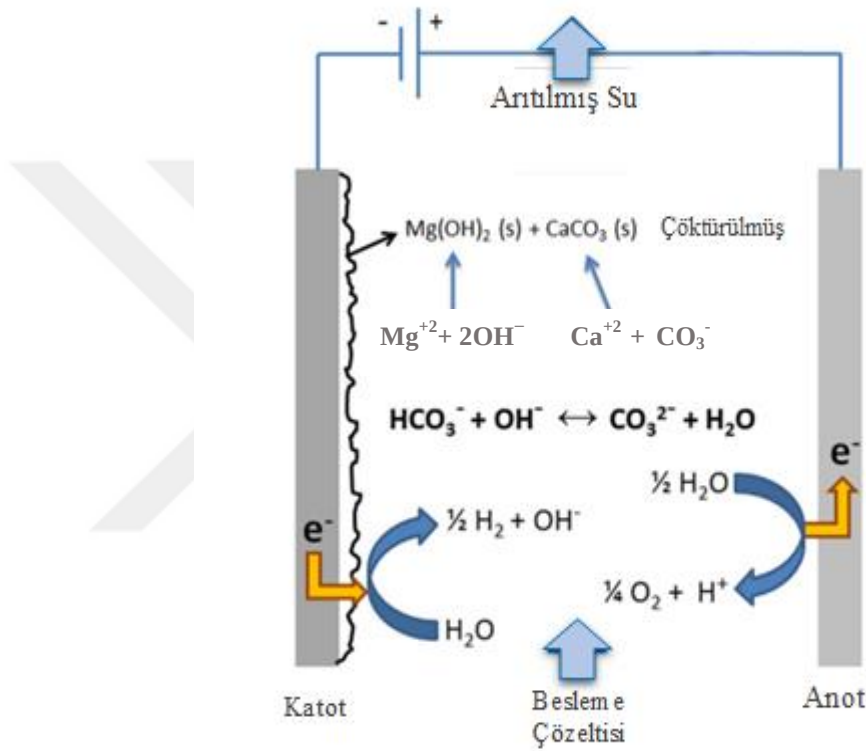
Şekil 3.1. Yeraltı suyunun sertlik giderimi için deney düzeneği.

Çizelge 3.2. Elektrokimyasal arıtım çalışma koşulları.

Elektrokimyasal Arıtım Prosesi	Özellikleri
Reaktör hacmi (mL)	500
Reaktörde kullanılan yeraltı suyu hacmi (mL)	400
Reaktör boyutları (cm)	8 x 9,5
Katot Aktif Elektrot Yüzey Alanı (cm ²)	0,18 m ²
Kullanılan Anot Elektrot Materyali	Paslanmaz çelik
Kullanılan Katot Elektrot Materyali	3 boyutlu paslanmaz çelik yün
DC Akım Aralığı (A)	0-4
DC Voltaj Ölçüm Aralığı (V)	0-20

3.3 Deneysel Kurgulama

Yeraltı sularında sertlik gideriminde elektrokimyasal yöntemin uygulanabilirliği çalışması katodik reaksiyonlar sonucunda ve OH^- iyonlarının varlığında, sertliğe sebep olan Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonlarının CaCO_3 ve $\text{Mg}(\text{OH})_2$ şeklinde katot yüzeyine çökmesi prensibine dayanmaktadır. Sertlik gideriminde kullanılan elektrokimyasal arıtımın şematik gösterimi Şekil 3.2’de verilmiştir (Sanjuán vd., 2019).



Şekil 3.2. Sertlik gideriminde elektrokimyasal arıtım yöntemi.

Katotta, hidrojen gazı (H_2) ve hidroksil iyonları (OH^-) üretmek için suyun elektroindirgenmesi gerçekleşir. Buna göre, katot civarındaki lokal pH artar ve yüzeyinde Ca^{+2} ve Mg^{+2} çözünmeyen bileşiklerin birikmesine neden olur. Öte yandan, anot üzerindeki reaksiyon, oksijen gazı (O_2) ve hidrojen iyonları (proton, H^+) üretimi ile su elektrokoksidasyonu meydana gelir (Sanjuán vd., 2019).

Çalışmada paslanmaz çelik anot ve katot elektrotlar kullanarak arıtım verimini etkileyen akım yoğunluğu, pH, HCO_3^- konsantrasyonu, iletkenlik, arıtma süresi

parametreleri incelenerek optimum koşullar belirlenmiş, enerji tüketimi hesaplanmıştır.

Çalışmada kullanılan anot ve katot elektrotlar her deney sonrası 0,25 M H₂SO₄ asit çözeltisinde 5 dk bekletilerek yüzeylerinin temizlenmesi sağlanmış ve saf su ile yıkanmıştır.

Deneylerin yapılışında, pH ile iletkenlik ölçümlerinde HACH HQ440D marka multimetre, reaktörde homojen karışımın sağlanmasında VELP SCIENTIFICAL FC6S marka mekanik karıştırıcı, arıtım sonrası numuneleri analizler için hazır hale getirmek üzere Allegra X-12 marka santrifüj cihazı kullanılmıştır.

3.4 Hesaplamalarda Kullanılan Eşitlikler

Akım Yoğunluğu: Elektrodun yüzeyinden geçen birim akıma denir (Göç, 2018).

Akım yoğunluğunu hesaplamada Eşitlik 3.1 kullanılmıştır (Zoroğlu, 2019).

$$J = \frac{I}{A} \quad (3.1)$$

J: Akım yoğunluğu (mA/cm²), I: Akım şiddeti (mA), A: Aktif anot yüzey alanı (cm²)

Arıtma Verimi: Arıtma verimi hesaplamasında Eşitlik 3.2 kullanılmıştır (Simşek, 2023).

$$C(\%) = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

C: Giderim verimi (%), Co: Başlangıç konsantrasyonu (mg/L CaCO₃), Ce: Çıkış konsantrasyonu (mg/L CaCO₃)

Enerji Tüketimi: Elektrokimyasal arıtmada harcanan toplam enerji tüketim miktarıdır. kWh/kg CaCO₃ ile ifade edilir. Enerji tüketiminde Eşitlik 3.3 ve 3.4 kullanılmaktadır (Turan vd., 2020).

$$SEC(kWh/kg CaCO_3) = U.I.t/10^3.V \quad (3.3)$$

$$\text{SEC (kW h/kg CaCO}_3\text{)} = U \cdot I \cdot t / 10^3 \cdot V \cdot (C_0 - C_e) \quad (3.4)$$

U: Hücre voltajı (V), I: Akım (A), t: Süre (h), V: Arıtılan suyun hacmi (m³)

Elektrik Enerjisi Maliyeti: Elektrik kWh'i 0,151\$ olarak alınmıştır (URL-6).

$$\text{Elektrik maliyeti: } \frac{0,151\$}{1 \text{ kWh}}$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

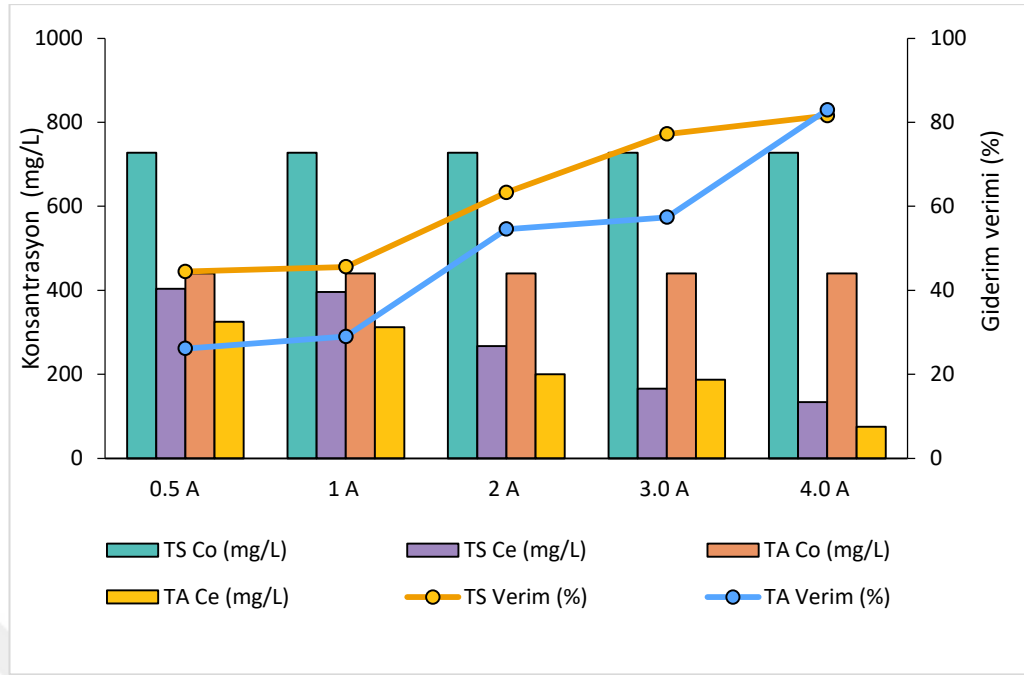
4.1 Akımın Etkisi

Akım yoğunluğu elektrokimyasal prosesler ile sertlik giderme sistemlerinde verimi etkileyen çok önemli faktörlerden biridir (Luan vd., 2019). Akım yoğunluğunun artması ile birlikte hidrojen üretim hızı artar ve flock halindeki maddelerin yüzmesini sağlar (Şengil ve Özacar, 2009). Akım yoğunluğunun, verimlilikle birlikte ekonomik maliyet üzerinde de yüksek bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir (Sanjuán vd., 2019).

Zhi vd. (2016) da yaptığı çalışmada akım yoğunluğunun artmasını katot yüzeyinde daha fazla OH^- üretimi ile sonuçlandığını bu da kaçınılmaz olarak katot yüzeyinde daha fazla sertlik türünün çökmesine yol açtığını gözlemlemişlerdir.

Sanjuán vd. (2019) yaptıkları çalışmada akım yoğunluğunun artması ile birlikte elektrot olarak seçilen üç boyutlu paslanmaz çelik yün katotun yüksek elektrot yüzeyi, OH^- iyonlarının artmasına sebep olmuştur. Bu bağlamda toplam sertlik giderimi üzerinde iyi bir proses verimliliğine yol açtığını gözlemlemişlerdir.

Yeraltı suyunda bulunan sertlik iyonlarının elektrokimyasal arıtımında akımın toplam sertlik ve toplam alkalinite üzerine etkisini belirlemek için hamsu pH 7,24 değerinde, 10 dk arıtım süresinde, 0,5, 1, 2, 3 ve 4 A akım değerleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda uygulanan akımın toplam sertlik ve toplam alkalinite giderim verimlerine etkisi Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Farklı akım değerlerinin toplam sertlik ve toplam alkaliniteye etkisi.

Şekil 4.1 incelendiğinde toplam sertlik ve toplam alkalinite gideriminde düşük akım değerlerinde arıtım veriminin düşük, akım değerinin artmasıyla giderim veriminin arttığı görülmüştür. 0,5 A değerinde % 44 olan toplam sertlik giderimi, 1 A akım değerinde %45, 2 A değerinde % 63, akımın artmasıyla 3 A değerinde %77, 4 A değerinde %81 toplam sertlik giderim verimi gerçekleşmiştir.

Toplam alkalinite giderim verimi incelendiğinde 0,5 A değerinde % 26, 1 A akım değerinde %28, 2 A değerinde %54 olan giderim verimi, akım değerinin artmasıyla 3 A değerinde %57, 4 A değerinde %82 giderim verimi gerçekleşmiştir. Yeraltısuyuna elektrokimyasal arıtım proseslerinde uygulanan farklı akım değerlerinin arıtım parametrelerine olan etkileri Çizelge 4.1' de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı akım değerlerinde elde edilen arıtım parametreleri.

Giriş parametreleri pH: 7,24, İletkenlik: 1854 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Süre: 10 dk, TS: 727,05 mgCaCO_3/L , Ca: 178,76 mg/L , Mg: 68,42 mg/L , TA: 440 mgCaCO_3/L , s:son					
Parametreler	Akım (A)				
	0,5	1	2	3	4
pH	6,95	6,88	6,80	6,54	6,31
Çıkış Toplam Sertlik (mgCaCO_3/L)	404	404	267	166	134
Toplam Sertlik Giderim Verimi (%)	44,47	45,57	63,30	77,18	81,58
Çıkış Ca (mg/L)	78,16	59,12	51,1	42,08	29,06
Ca Giderim Verimi (%)	56,16	66,93	71,41	76,46	83,74
Çıkış Mg (mg/L)	61,37	62,83	33,91	14,83	14,95
Mg Giderim Verimi (%)	10,30	8,17	53,36	78,33	78,15
Çıkış Alkalinite (mgCaCO_3/L)	325	312,5	200	187,5	75
Alkalinite Giderim Verimi (%)	26,14	28,98	54,55	57,39	82,95
Voltaaj (V)	3,9	6,4	11,6	15,5	17,9
Çıkış İletkenlik ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1717	1683	1442	1440	1387
Sıcaklık $^{\circ}\text{C}$	21	21,2	22	21	22,3
Sıcaklık(s) $^{\circ}\text{C}$	21,2	22,5	22,6	23	24
Akım Yoğunluğu, (A/cm^2)	1,89	3,78	7,57	11,36	15,15
Enerji Tüketimi (kWh/m^3)	0,78	2,56	9,28	18,60	28,64
Enerji Tüketimi ($\text{kWh}/\text{kg CaCO}_3$)	2,411	2,772	20,152	33,126	48,256
Elektrik Enerji Maliyeti ($\$/\text{m}^3$)	0,118	0,387	1,401	2,809	4,325
Elektrik Enerji Maliyeti ($\$/\text{kg CaCO}_3$)	0,364	1,166	3,043	5,002	7,287

Akımın ve akım yoğunluğunun artmasıyla birlikte elektroliz sonucu artan OH^- iyonları ortamda bulunan HCO_3^- ile reaksiyona girerek CO_3^{2-} konsantrasyonlarını artırmaktadır. Sertliğe sebep olan Ca^{+2} iyonu CO_3^{2-} ile Mg^{+2} iyonu OH^- ile birleşerek CaCO_3 şeklinde ve $\text{Mg}(\text{OH})_2$ şekline çökmüştür. Akım yoğunluğunun artması ile birlikte toplam sertlik giderim verimi ve toplam alkalinite giderim verimlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Artan akım yoğunlukları beraberinde enerji tüketimi de artırdığı ve elektrik enerji maliyetinde de artışına neden olduğu gözlemlenmiştir.

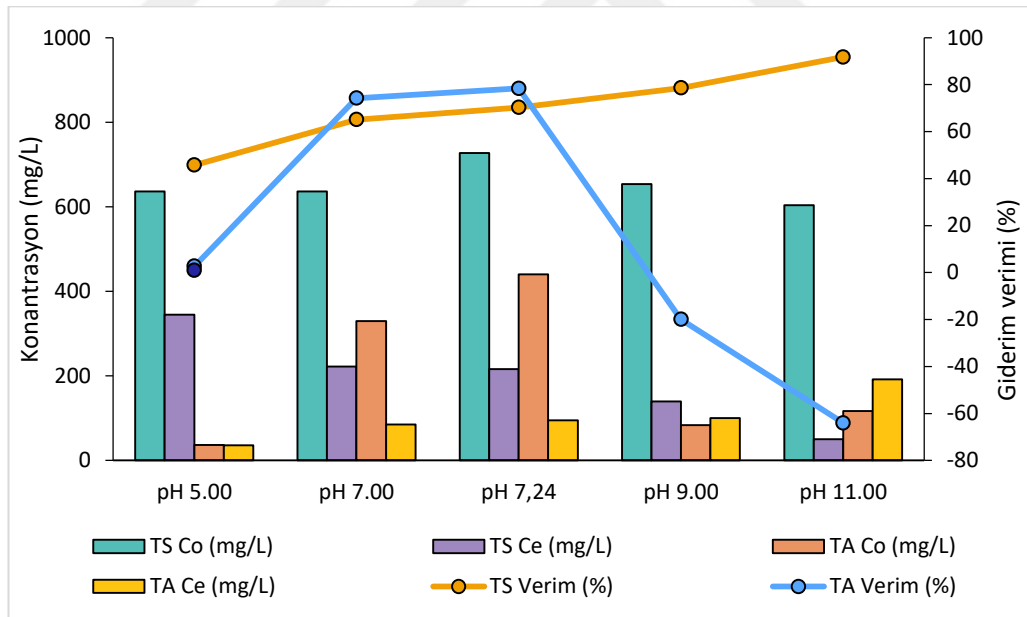
Jin vd. (2019) yaptığı çalışmada elektrokimyasal arıtım ile sertlik gideriminde akım yoğunluğunun artması ile birlikte artan OH^- iyonları beraberinde elektromigrasyonun arttığını belirtmiştir. Bu durum katot yüzeyinde daha fazla sertlik iyonlarının çökmesine neden olmuştur. Akım yoğunluğunun belirli bir noktadan sonra artış hızı yavaşlamıştır. Bunun nedeni Ca^{+2} 'nin çökme reaksiyonlarının, Ca^{+2} , HCO_3^- ve OH^- 'in kütle transferi sınırlaması ile kademeli olarak sınırlandırılması olarak açıklanmaktadır (Jin vd., 2019).

Yu vd. (2018a), Sanjuán vd.(2019), Jin vd. (2019) yaptıkları çalışmalarda akım ve akım yoğunluğunun artması ile birlikte giderim verimlerinin arttığını artan akım ve akım yoğunlukları enerji maliyetinde etkilediğini gözlemlemişlerdir.

En yüksek verim 4 A şiddetinde gerçekleşmesine rağmen, akım yoğunluğunun artması ile artış gösteren enerji tüketimi ve elektrik maliyeti sebebiyle optimum akım şiddeti 3 A (akım yoğunluğu 11,36 A/cm²) olarak belirlenmiştir.

4.2 pH Etkisi

Elektrokimyasal arıtımın proseslerinde arıtım verimi etkileyen parametrelerden biri olan pH'ın etkisini gözlemlemek için 10 dk arıtım süresinde, 3 A akım değerinde sırasıyla pH 5, 7, 7,24 (ham su pH'ı), 9, 11 ayarlanarak deneyler yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda pH'ı ayarlamak için 0,1 N HCl ve 0,1 N NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Deneyler sonucunda pH'ın yeraltı sularında sertlik giderim verimlerine etkisi Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Farklı pH'ların toplam sertlik ve toplam alkalinite giderim verimine etkisi.

Şekil 4.2 incelendiğinde 10 dk arıtım süresinde, 3 A akım değerinde düşük pH değerlerinde sertlik giderim verimlerinin düşük olduğu, pH artırıldıkça sertlik giderim veriminde artış olduğu gözlemlenmiştir. pH 5 değerinde toplam sertlik veriminin %45, pH 7 değerinde %65, yeraltı suyunun kendi pH 7,24 değerinde %70,

pH 9 değerinde %78, pH 11 değerinde toplam sertlik giderim veriminin %91 ulaştığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.2 incelediğinde farklı dozda ayarlanan pH değerlerinin toplam alkalinite giderim verimlerinde pH değerinin artması ile birlikte arttığı görülmüştür. pH 5 değerinde toplam alkalinite veriminin %2, pH 7 değerinde %74, yeraltı suyunun kendi pH 7,24 değerinde %78 olarak belirlenmiştir. pH 9 ve üzerindeki değerlerde pH yükseltmek için ortama ilave edilen çözeltiye bağlı olarak alkalinite katkısı yapılmış ve verim değerleri negatif çıkmıştır. Yeraltı suyunun farklı pH değerlerinin arıtım parametrelerine olan etkileri Çizelge 4.2’ de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Farklı pH değerlerinden elde edilen arıtım parametreleri.

Giriş parametreleri					
Süre:10 dk, Giriş TS (pH 5) 636 mgCaCO ₃ /L, Giriş TS (pH 7) 636 mgCaCO ₃ /L, Giriş TS (ham pH 7,24) 727,05 mgCaCO ₃ /L, Giriş TS (pH 9) 654 mgCaCO ₃ /L, Giriş TS (pH 11) 604 mgCaCO ₃ /L, Giriş Ca (pH 5) 345 mg/L, Giriş Ca (pH 7) 118,24 mg/L, Giriş Ca (pH 7,24) 178,76 mg/L, Giriş Ca (pH 9) 132,26 mg/L, Giriş Ca (pH 11) 78,16 mg/L, Giriş Mg (pH 5) 70,73 mg/L, Giriş Mg (pH 7) 82,88 mg/L, Giriş Mg (pH 7,24) 67,93 mg/L, Giriş Mg (pH 9) 78,75 mg/L, Giriş Mg (pH 11) 99,41 mg/L, Giriş TA (pH 5) 37 mgCaCO ₃ /L, Giriş TA (pH 7) 330 mgCaCO ₃ /L, Giriş TA (pH 7,24) 440 mgCaCO ₃ /L, Giriş TA (pH 9) 83,36 mgCaCO ₃ /L, Giriş TA (pH 11) 117,08 mgCaCO ₃ /L, s: son					
Parametreler	pH				
	5	7	7,24	9	11
pH(s)	6,67	6,89	7,03	7,06	11,60
Çıkış Toplam Sertlik (mgCaCO ₃ /L)	345	222,2	216	140	50
Toplam Sertlik Giderim Verimi (%)	45,75	65,09	70,31	78,59	91,72
Çıkış Ca (mg/L)	76,15	60,12	42,8	48,1	0
Ca Giderim Verimi (%)	77,93	49,15	76,06	63,63	100
Çıkış Mg (mg/L)	1,46	37,67	17,5	4,86	12,5
Mg Giderim Verimi (%)	97,85	46,74	78,89	93,83	87,43
Çıkış Alkalinite (mgCaCO ₃ /L)	36	85	95	100	192,04
Alkalinite Giderim Verimi (%)	2,70	74,24	78,41	- 19,96	- 64,02
Voltaj (V)	9,4	13,2	14,4	14,6	13,1
Voltaj(s) (V)	10,2	16,7	16,1	16,6	12,1
İletkenlik (µs/cm)	2290	2002	1854	1989	2430
İletkenlik(s) (µs/cm)	2270	1108	1506	1509	2350
Sıcaklık °C	22	22	21	21,8	22,8
Sıcaklık(s) °C	23,8	24,7	23,1	23,5	24,3
Akım Yoğunluğu (A/cm ²)	11,36	11,36	11,36	11,36	11,36
Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	12,24	20,04	19,32	19,92	14,52
Enerji Tüketimi (kWh/kg CaCO ₃)	42,062	48,406	37,771	38,755	26,209
Elektrik Enerji Maliyeti (\$/m ³)	1,848	3,026	2,917	3,008	2,193
Elektrik Enerji Maliyeti (\$/kg CaCO ₃)	6,351	7,309	5,703	5,852	3,958

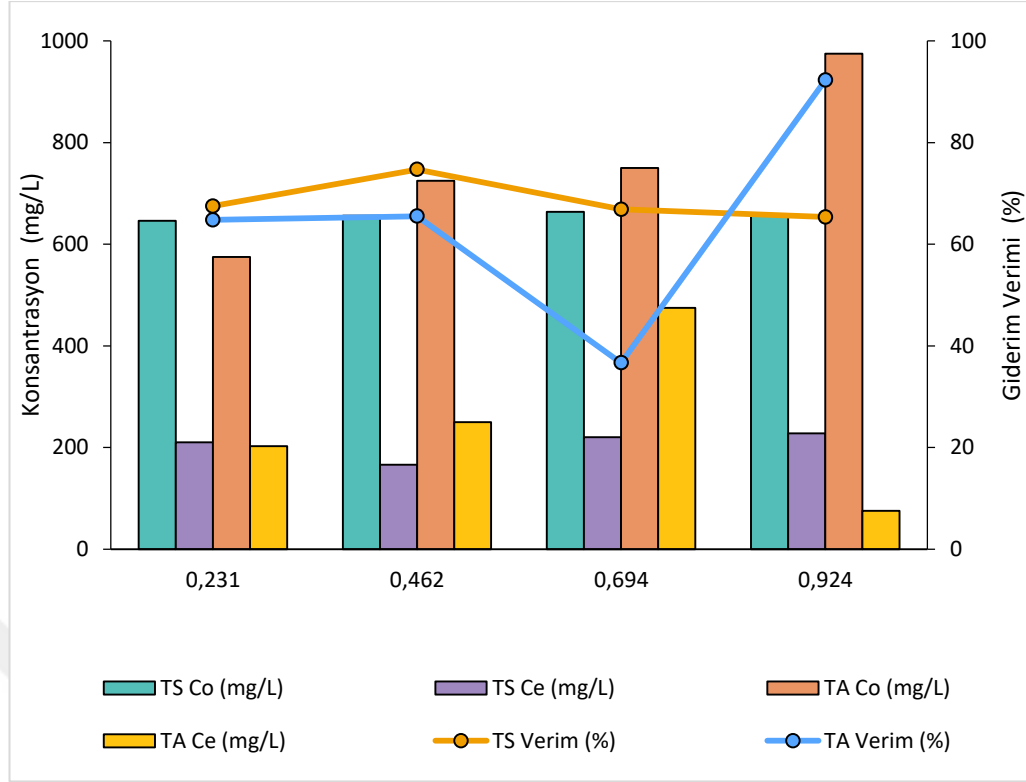
Yüksek pH değerleri için ilave edilen NaOH bileşiği aynı zamanda Denklem (2.17) – (2.22) de gösterildiği gibi sertlik gideriminde kullanılan bir kimyasal olduğundan elektrokimyasal arıtımın sertlik giderimi üzerindeki etkisinin gözlemlenmesini engellemektedir. Bu sebeple herhangi bir kimyasal ilavesi olmadan yer altı suyunun kendi pH değeri 7,24 optimum pH olarak belirlenmiştir.

4.3 HCO₃⁻ Konsantrasyonunun Etkisi

Sertlik gideriminde uygulanan elektrokimyasal arıtım proseslerinde HCO₃⁻ konsantrasyonu Şekil 3.2’de görüldüğü gibi giderim verimini etkileyen parametlerden birisidir.

CaCO₃ elektroçökeltme işleminde, katotta üretilen OH⁻, karbonat artışına (CO₃²⁻) ve dolayısıyla faz aşırı doyma etkisine yol açmak için HCO₃⁻ ile reaksiyona girmektedir. HCO₃⁻ konsantrasyonu, CaCO₃ olarak sertlik seviyesine göre eşmolariteye yakın olduğunda, giderme verimliliğinin en yüksek seviyede olduğu gözlemlenmiştir. HCO₃⁻ pH tampon kapasitesi sunan amfoterik bir iyondur. Buna göre, HCO₃⁻ konsantrasyonu dikkate alınması gereken ilgili bir parametredir. Çok yüksek ve çok düşük HCO₃⁻/sertlik oranları, daha kötü verimlere yol açmaktadır. HCO₃⁻ fazlalığı, Mg(OH)₂ çökmesini önleyerek pH ortamını tamponlar ve yüksek Ca⁺²’nın reaksiyon bölgesine doğru difüzyon kinetiğindeki bir sınırlama nedeniyle sertlik gidermeyi iyileştirmeyebilir. Düşük HCO₃⁻ değerleri de reaksiyon için yeterince reaktan olmadığı anlamına gelmektedir (Sanjuán vd., 2019).

Elektrokimyasal arıtımın proseslerinde arıtım verimini etkileyen parametrelerden biri olan HCO₃⁻ konsantrasyonu etkisini gözlemlmek için pH 7,24 değerinde 3 A akım şiddetinde, 10 dk arıtım süresinde ham su da bulunan 550 mg HCO₃⁻ değerinin CaCO₃ olarak sertlik seviyesine göre eşmolariteye en yakın değeri hesaplanmıştır. Bu hesaplama göre suya 1 L ham numuneye 0,462 g NaHCO₃ ve 0,5, 1,5 ve 2 katı olan 0,231, 0,694, 0,924 g NaHCO₃ eklenerek HCO₃⁻ konsantrasyon etkisi incelenmiştir. Giderim verimlerine etkisi Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Farklı HCO₃⁻ konsantrasyonlarının toplam sertlik ve toplam alkalinite giderim verimine etkisi.

Şekil 4.3 incelendiğinde pH 7,24 değerinde, 3 A akım şiddetinde, 10 dk arıtım süresinde eklenen 0,231 g NaHCO₃ ilavesi ile toplam sertlik giderim verimi %67, 0,462 g NaHCO₃ ilavesi ile %74, 0,694 NaHCO₃ ilavesi ile %66, 0,924 g NaHCO₃ ilavesi ile %65 verime ulaşıldığı görülmüştür.

Toplam alkalinite giderim verimi incelendiğinde 0,231 g NaHCO₃ ilavesi ile %64, 0,462 g NaHCO₃ ilavesi ile %65, 0,694 NaHCO₃ ilavesi ile %36, 0,924 g NaHCO₃ ilavesi ile %92 verime ulaşıldığı görülmüştür.

Yapılan çalışmalar sonucunda farklı HCO₃⁻ konsantrasyonu değerlerinden elde edilen sonuçların arıtım parametrelerine etkileri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı HCO_3^- konsantrasyonu değerlerinden elde edilen arıtım parametreleri.

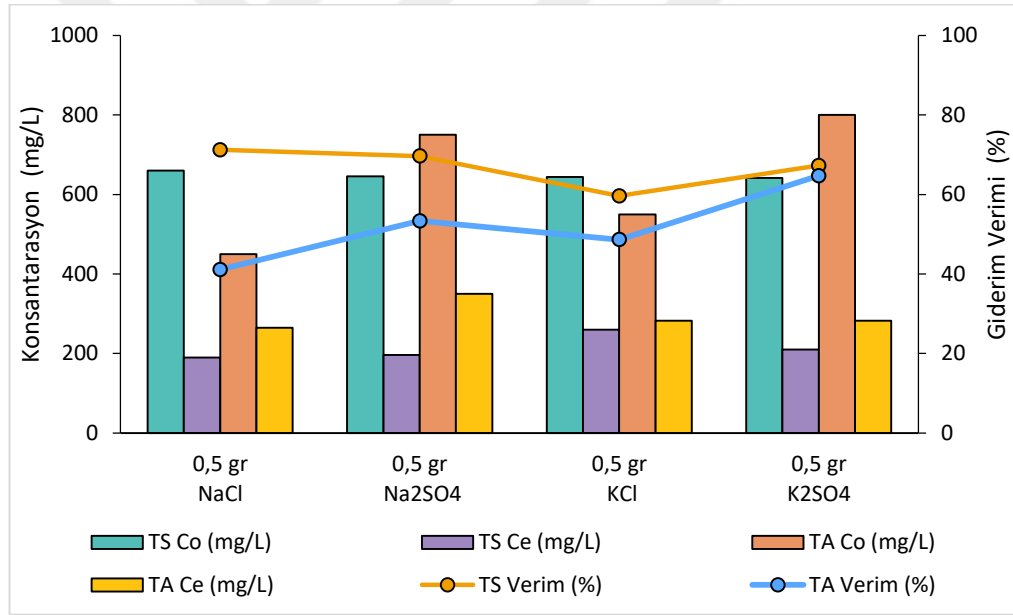
Giriş Parametreleri				
TA 440 mgCaCO ₃ /L, Giriş HCO ₃ ⁻ 550 mg/L, Giriş TS (0,231 NaHCO ₃) 646 mgCaCO ₃ /L, Giriş TS 656 (0,0462 NaHCO ₃) mgCaCO ₃ /L, Giriş TS 664 (0,694 NaHCO ₃) mgCaCO ₃ /L, Giriş TS 658 (0,924 NaHCO ₃) mgCaCO ₃ /L, Giriş Ca 126,25 (0,231 NaHCO ₃) mg/L, Giriş Ca 134,27 (0,0462 NaHCO ₃) mg/L, Giriş Ca 120,24 (0,694 NaHCO ₃) mg/L, Giriş Ca 146,28 (0,924 NaHCO ₃) mg/L, Giriş Mg 80,45 (0,231 NaHCO ₃) mg/L, Giriş Mg 78,02 (0,0462 NaHCO ₃) mg/L, Giriş Mg 88,47 (0,694 NaHCO ₃) mg/L, Giriş Mg 71,21 (0,924 NaHCO ₃) mg/L, Giriş TA (0,231 NaHCO ₃) 575 mgCaCO ₃ /L, Giriş TA (0,462 NaHCO ₃) 725 mgCaCO ₃ /L, Giriş TA (0,694 NaHCO ₃) 750 mgCaCO ₃ /L, Giriş TA (0,924 NaHCO ₃) 975 mgCaCO ₃ /L, s: son				
Parametreler	HCO₃⁻ konsantrasyonu			
	0,231 g NaHCO₃	0,462 g NaHCO₃	0,694 g NaHCO₃	0,924 g NaHCO₃
pH	7,05	7,64	7,40	8,71
Çıkış Toplam Sertlik (mgCaCO ₃ /L)	210	166	220	228
Toplam Sertlik Giderim Verimi (%)	67,49	74,70	66,87	65,35
Çıkış Ca (mg/L)	44,09	60,12	42,08	48,1
Ca Giderim Verimi (%)	65,08	55,22	64,40	67,12
Çıkış Mg (mg/L)	24,31	3,89	27,95	26,25
Mg Giderim Verimi (%)	69,78	95,01	68,41	63,14
Çıkış Alkalinite (mgCaCO ₃ /L)	202,5	250	475	75,2
Alkalinite Giderim Verimi (%)	64,78	65,52	36,67	92,29
Voltaj (V)	12,3	14,7	13,1	10,8
Voltaj(s) (V)	14,10	15,11	14,8	12,5
İletkenlik (μs/cm)	2126	2290	2530	2710
İletkenlik(s) (μs/cm)	1662	1359	1747	1792
Sıcaklık °C	22,5	20,9	21,6	21,6
Sıcaklık(s) °C	25,9	24	24,3	23,7
Akım Yoğunluğu (A/cm ²)	11,36	11,36	11,36	11,36
Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	16,92	18,13	17,76	15
Enerji Tüketimi (kWh/kg CaCO ₃)	38,8	37	40	34,8
Elektrik Enerji Maliyeti (\$/m ³)	2,555	2,738	2,682	2,265
Elektrik Enerji Maliyeti (\$/kg CaCO ₃)	5,860	5,588	6,040	5,267

4.4 İletkenliğin Etkisi

Elektrokimyasal arıtım verimi, büyük ölçüde su ortamının kimyasına özellikle de iletkenliğine bağlıdır. İletkenliğin artmasına bağlı olarak elektrik akımının iletme kapasiteside artmaktadır. Fakat suyun kendi iletkenlik değeri yeterli olmadığı zamanlarda, elektrolit olarak suya destekleyici elektrolit (NaCl, KCl vb.) ilave edilir ve elektrik akımını iletme kapasitesi artırılır (Doğu vd., 2017).

Sulu bir çözeltinin iletkenliği, çözeltinin elektrik akımını iletme yeteneğini gösterir. İyon konsantrasyonunu artırarak elektrotlar arasındaki iletkenlik artacak ve dolayısıyla çözeltideki direnç azalacaktır. Bu nedenle, destekleyici elektrolitlerin eklenmesi, çözelti iletkenliğini arttırmak, elektrot üzerindeki difüzyon tabakasını azaltmak ve hücre potansiyelini azaltmak için kullanılır (Alrehaili vd., 2023).

Yeraltı suyunda bulunan toplam sertlik ve toplam alkalinite gideriminde elektrolit kaynağındaki farklılığının arıtım verimi üzerindeki etkisini gözlemlemek için farklı konsantrasyonlarda ilave bileşikler eklenmiştir. pH 7,24 değeriinde 3A akım şiddetinde, 10 dk arıtım süresinde, eklenen 0,462 g NaOH ilavesi ile çalışmada 0,5 g NaCl, 0,5 g Na₂SO₄, 0,5 g KCl, 0,5 g K₂SO₄ bileşikleri suya eklenerek inceleme yapılmıştır. İnceleme sonucunda eklenen ilave bileşiklerinin toplam sertlik ve toplam alkalinite giderim verimlerine etkisi Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. İletkenliğin toplam sertlik ve toplam alkalinite giderim verimine etkisi.

Şekil 4.4 incelendiğinde toplam sertlik tayininde 0,5 g NaCl ilavesi ile %71, 0,5 g Na₂SO₄ ilavesi ile % 69, 0,5 g KCl ilavesi ile %65, 0,5 g K₂SO₄ ilavesi ile %67 verim gerçekleşmiştir.

Toplam alkalinite giderim verimi incelendiğinde 0,5 g NaCl ilavesi ile %41, 0,5 g Na₂SO₄ ilavesi ile %53, 0,5 g KCl ilavesi ile %48, 0,5 g K₂SO₄ ilavesi %64 verim gerçekleşmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda iletkenliği artıran ilave bileşiklerden elde edilen sonuçların arıtım parametrelerine etkileri tablo olarak Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Farklı iletkenlik değerlerinden elde edilen arıtım parametreleri.

Giriş parametreleri				
Giriş TS (NaCl) 660 mgCaCO ₃ /L, Giriş TS (Na ₂ SO ₄) 646 mgCaCO ₃ /L, Giriş TS (KCl) 644 mgCaCO ₃ /L, Giriş TS (K ₂ SO ₄) 642 mgCaCO ₃ /L, Giriş Ca (NaCl) 130,26 mg/L, Giriş Ca (Na ₂ SO ₄) 132,26 mg/L, Giriş Ca (KCl) 130,26 mg/L, Giriş Ca (K ₂ SO ₄) 136,27mg/L, Giriş Mg (NaCl) 81,42 mg/L, Giriş (Na ₂ SO ₄) Mg 76,8 mg/L, Giriş Mg (KCl) 77,53 mg/L, Giriş Mg(K ₂ SO ₄) 73,04 mg/L, Giriş TA (NaCl) 450 mgCaCO ₃ /L, Giriş TA (Na ₂ SO ₄) 750 mgCaCO ₃ /L, Giriş TA (KCl) 550 mgCaCO ₃ /L, Giriş TA (K ₂ SO ₄) 800 mgCaCO ₃ /L s:son				
Parametreler	İletkenlik			
	0,5g NaCl	0,5g Na₂SO₄	0,5 g KCl	0,5 g K₂SO₄
pH	7,68	7,7	7,57	7,71
Çıkış Toplam Sertlik (mgCaCO ₃ /L)	190	196	220	210
Toplam Sertlik Giderim Verimi (%)	71,21	69,66	65,84	67,29
Çıkış Ca (mg/L)	30,06	44,09	44,09	46,09
Ca Giderim Verimi (%)	76,92	66,66	66,15	66,18
Çıkış Mg (mg/L)	27,95	24,55	36,45	23,09
Mg Giderim Verimi (%)	65,67	68,03	52,97	68,54
Çıkış Alkalinite (mgCaCO ₃ /L)	265	350	282,5	282,5
Alkalinite Giderim Verimi (%)	41,11	53,33	48,64	64,69
Voltaj (V)	10,1	13,3	10,4	11,8
Voltaj(s) (V)	9,7	10,7	9,8	10,7
İletkenlik, (µs/cm)	3170	2830	3080	2830
İletkenlik(s) (µs/cm)	2600	2260	2620	2240
Sıcaklık °C	22,6	20,7	21,9	22,6
Sıcaklık(s) °C	24,7	24,4	23,2	26,5
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	11,36	11,36	11,36	11,36
Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	11,64	12,84	11,76	12,84
Enerji Tüketimi (kWh/kg CaCO ₃)	24,76	28,53	30,62	29,72
Elektrik Enerji Maliyeti (\$/m ³)	1,758	1,939	1,776	1,939
Elektrik Enerji Maliyeti (\$/kg CaCO ₃)	3,700	4,309	4,624	4,488

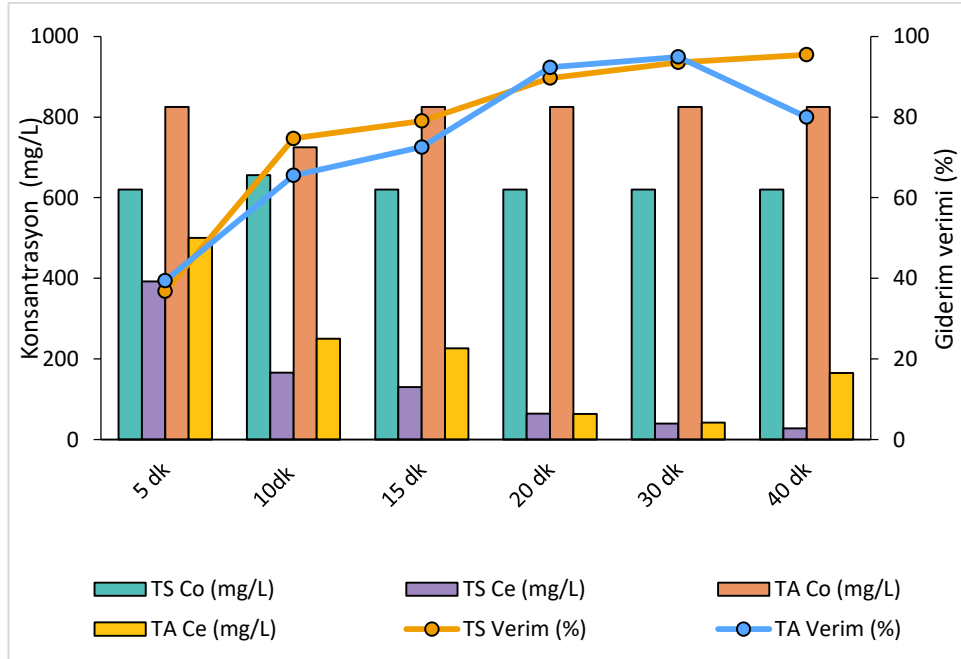
İletkenliği artıran destekleyici bileşiklerin eklenmesi birlikte elde edilen toplam sertlik ve toplam alkalinite giderim verimlerinin, suya herhangi bir kimyasal eklenmesi söz konusu olmadan ham hali ile gerçekleşen toplam sertlik ve toplam alkalinite verimlerinden daha düşük verim elde edilmiştir. Bunun sebebi ortama ilave edilen tuz miktarlarının yalancı sertliğe (pseudo) sebep olmasıdır. Ayrıca bu çalışmada kullanılan yeraltı sularında olduğu gibi yüksek iletkenliğe sahip sularda yapılan çalışmalarda ilave destek elektrolite ihtiyaç olmadığı birkez daha ortaya

konulmuştur ve kullanılan ham yeraltı suyunun kendi iletkenliği optimum olarak belirlenmiştir.

4.5 Arıtım Süresinin Etkisi

Elektrokimyasal arıtım ile katotik reaksiyonlar negatif elektrotta, anodik reaksiyonlar pozitif elektrotta meydana gelmektedir. Arıtım süresince koagülasyonun meydana gelmesi anodik çözünmenin başlaması ile oluşmaktadır. Elektrotlar tarafından üretilen iyon konsantrasyonu su içerisinde bulunan kirleticilerin giderimin de büyük bir öneme sahiptir. Elektrokimyasal arıtım boyunca sürenin artması ile iyonların konsantrasyonu ve onların sebep olduğu hidroksit flokların oluşumu artar. Arıtım süresine bağlı olarak yeterli miktarda ve uygun flokların oluşmaktadır (Özyonar ve Karagözoğlu, 2012).

Yapılan deneysel çalışmada verimi etkileyen parametrelerden biri olan sürenin etkisini gözlemlemek için pH 7,24 değerinde, 3 A akım şiddetinde, 0,462 g NaOH ilavesinde, 5, 15, 20, 30, 40 dk arıtım sürelerinde toplam sertlik ve toplam alkalinite giderim verimleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda farklı arıtım sürelerinin sertlik giderim verimlerine etkisi Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Sürenin toplam sertlik ve toplam alkalinite giderim verimine etkisi.

Şekil 4.5 incelendiğinde pH 7,24 değerinde, 3 A akım şiddetinde, 0,462 g NaOH ilavesinde, 5, 15, 20, 30, 40 dk arıtım sürelerinin yeraltı suyu toplam sertlik ve toplam alkalinite giderim veriminde zamana bağlı etkisi gözlemlenmiştir. 5. dk'da %36 toplam sertlik giderim verimi, 10.dk'da %74, 15. dk'da %79, 20. dk'da %89, 30. dk'da %93, 40. dk'da %95'e ulaşmıştır. Toplam alkalinite giderim verimi incelendiğinde 5. dk'da %39, 10. dk'da %65, 15. dk'da %72, 20. dk'da %92, 30. dk'da %94'e çıktığı 30.dk'dan sonra süre artmaya devam ettiğinde 40. dk'da %79 düştüğü gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda farklı sürelerdeki arıtmalardan elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Farklı sürelerdeki arıtmalardan elde edilen arıtım parametreleri.

Giriş parametreleri						
Giriş TS (5,15,20,30,40 dk) 620 mgCaCO ₃ /L, Giriş TS (10dk) 656 mgCaCO ₃ /L , Giriş Ca (5,15,20,30,40 dk) 112,2 mg/L, Giriş Ca (10 dk) 134,27 mg/L, Giriş Mg (5,15,20,30,40 dk) 82,64 mg/L, Mg (10 dk) 78,02 mg/L, Giriş TA (5,15,20,30,40 dk) 725 mgCaCO ₃ /L, Giriş TA (10 dk) 535,9 mgCaCO ₃ /L, s:son						
Parametreler	Süre (dk)					
	5	10	15	20	30	40
pH	8,34	7,03	7,92	9,92	10,47	11,56
Çıkış Toplam Sertlik (mgCaCO ₃ /L)	392	166	130	64	40	28
Toplam Sertlik Giderim Verimi (%)	36,77	74,70	79,03	89,68	93,55	95,48
Çıkış Ca (mg/L)	28,06	60,12	4,81	12,02	8,02	7,01
Ca Giderim Verimi (%)	74,99	55,22	95,71	89,29	92,85	93,75
Çıkış Mg (mg/L)	78,26	3,89	28,68	8,26	4,86	2,55
Mg Giderim Verimi (%)	5,30	95,01	65,30	90	94,12	96,91
Çıkış Alkalinite (mgCaCO ₃ /L)	500	250	226,25	63,32	41,8	165,23
Alkalinite Giderim Verimi (%)	39,39	65,52	72,58	92,32	94,93	79,97
Voltaj (V)	13,7	14,7	14,1	14,6	14,6	15,5
Voltaj(s) (V)	13,2	13,5	13,9	15,8	16,1	16,9
İletkenlik (µs/cm)	2280	2290	2280	2280	2280	2280
İletkenlik(s) (µs/cm)	1948	1359	1553	1279	1500	1962
Sıcaklık °C	23,4	20,9	21,8	22,9	22,9	23,5
Sıcaklık(s) °C	24,6	24	26,6	27,5	30,2	40
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	11,36	11,36	11,36	11,36	11,36	11,36
Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	15,84	16,20	16,68	18,96	19,32	20,28
Enerji Tüketimi (kWh/kg CaCO ₃)	69,47	33,06	34,04	34,04	33,31	34,25
Elektrik Enerji Maliyeti (\$/m ³)	2,392	2,738	2,519	2,845	3,062	2,935
Elektrik Enerji Maliyeti (\$/kg CaCO ₃)	10,491	5,588	5,140	5,117	5,280	4,959

Arıtım süresindeki artış denklem (3.3)' te görüldüğü gibi enerji maliyetiyle doğrudan ilişkili olmasından dolayı yüksek verim elde edilen en düşük süre olan 20. dk optimum olarak seçilmiştir.

4.6 Enerji Tüketimi

Çalışmada ekonomik değerlendirme yapılabilmesi için elektrokimyasal arıtım verimine etki eden parametrelerin arıtılan suyun m³ başına enerji tüketimi ve giderilen CaCO₃ başına düşen enerji tüketimi ve elektrik enerji maliyet hesabı Çizelge 4.6 da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Enerji tüketimi ve elektrik enerji maliyeti.

	Enerji Tüketimi		Elektrik Enerji Maliyeti	
	(kWh/m ³)	(kWh/kg CaCO ₃)	(\$/m ³)	(\$/kg CaCO ₃)
Akım Yoğunluğu(A/cm²)				
0,5A	0,78	2,411	0,118	0,364
1A	2,56	2,772	0,387	1,166
2A	9,28	20,152	1,401	3,043
3A	18,60	33,126	2,809	5,002
4A	28,64	48,256	4,325	7,287
pH				
5	12,24	42,062	1,848	6,351
7	20,04	48,406	3,026	7,309
7,24	19,32	37,771	2,917	5,703
9	19,92	38,755	3,008	5,852
11	14,52	26,209	2,193	3,958
HCO₃⁻ konsantrasyonu				
0,231 g NaHCO ₃	16,92	38,8	2,555	5,860
0,462 g NaHCO ₃	18,13	37	2,738	5,588
0,694 g NaHCO ₃	17,76	40	2,682	6,040
0,924 g NaHCO ₃	15	34,8	2,265	5,267
İletkenlik				
0,5g NaCl	11,64	24,76	1,758	3,740
0,5g Na ₂ SO ₄	12,84	28,53	1,939	4,309
0,5g KCl	11,76	30,62	1,776	4,624
0,5g K ₂ SO ₄	12,84	29,72	1,939	4,488
Süre				
5	15,84	69,47	2,392	10,491
10	16,20	33,06	2,738	5,588
15	16,68	34,04	2,519	5,140
20	18,96	34,04	2,845	5,117
30	19,32	33,31	3,062	5,280
40	20,28	34,25	2,935	4,959
Optimum Koşullar (pH 7,24, akım 3A, NaHCO₃ 0,462 g, süre 20 dk)				
	37,87	56,90	5,718	8,591

Deneyisel çalışmalardan elde edilen veriler ile enerji tüketimi ve elektrik enerji maliyeti hesabı yapılmıştır. Veriler sonucunda belirlenen optimum koşullardaki (pH: 7,24, akım: 3 A, NaHCO₃: 0,462 g, süre: 20 dk) hesaplamalara göre 1 m³ suyun elektrokimyasal arıtımı için enerji tüketimi 37,87 kWh/m³, CaCO₃ başına düşen enerji tüketimi 56,90 kWh/kgCaCO₃ olarak belirlenmiştir. Türkiye’de Mayıs 2023 elektrik enerjisi birim fiyatı 0,151 \$/kWh olarak kabul edildiğinde optimum koşullarda elektrik maliyeti 5,718 \$/m³, ve 8,591 \$/kg CaCO₃ hesaplanmıştır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yeraltı sularından sertlik gideriminde elektrokimyasal yöntem kullanılarak toplam sertlik giderim verimleri araştırılmıştır.

Çalışmada verimliliğini artırmak ve enerji tüketimini azaltmak için katot olarak üç boyutlu paslanmaz çelik yün elektrotu, anot olarak paslanmaz çelik reaktör kullanılarak akım yoğunluğu, pH, süre, HCO_3^- konsantrasyonu, iletkenlik ve süre parametlerinin arıtım verimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen verilere göre enerji tüketim miktarları ve elektrik enerji maliyeti hesaplanmıştır.

Yapılan çalışmada akım yoğunluğunun etkisi toplam sertlik arıtım verimi açısından oldukça önemli bir parametre olduğu açıkça gözlemlenmiştir. Akım yoğunluğunun artması ile 0,5 A değerinde %44 olan toplam sertlik giderimi, 1 A akım değerinde %45, 2 A değerinde % 63, akımın artmasıyla 3 A değerinde %77, 4 A değerinde %81 olarak gerçekleşmiştir. Akım yoğunluğunun artması ile artan toplam sertlik giderim verimi, elektroliz sırasında OH^- iyonunun artması ile flokleşmasının oluşması ve sertliğe neden olan iyonların reaksiyona girerek çöktürülmesinden kaynaklanmaktadır. Akım yoğunluğunun artması beraberinde elektrik enerjisi tüketimini ve işletme maliyetinide artırması sebebiyle istenmeyen bir durum olabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı en yüksek giderim verimi 4A akım yoğunluğunda gerçekleşmesine rağmen 3A optimum olarak belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada pH parametresinin arıtma verimi üzerine etkisi incelenmiştir. 10 dk arıtım süresinde, 3 A akım şiddeti değerinde sırasıyla pH 5 değerinde toplam sertlik veriminin %45, pH 7 değerinde %65, yeraltı suyunun kendi pH 7,24 değerinde %70, pH 9 değerinde %78, pH 11 değerinde toplam sertlik giderim veriminin %91 ulaştığı gözlemlenmiştir. Artan pH değerleri ile birlikte sertlik giderim veriminin arttığı görülmüştür, fakat yüksek pH değerlerinin sağlanması için ilave edilen NaOH bileşiğinin sertlik gideriminde kullanılan kimyasal olması elektrokimyasal olarak yapılan giderim üzerindeki etkiyi baskılamıştır. Bu etkiyi gözlemlemek için yapılan çalışmada yeraltı suyunun kendi pH değeri (7,24) optimum olarak belirlenmiştir.

HCO_3^- konsantrasyonunun toplam sertlik ve toplam alkalinite giderim verimine etkisinde ise pH 7,24 değerinde 3 A akım şiddetinde, 10 dk arıtım süresinde ham su da bulunan 550 mg HCO_3^- değerinin CaCO_3 olarak sertlik seviyesine göre eşmolariteye en yakın değeri hesaplanmıştır. Bu hesaplama göre suya 1 L ham numuneye 0,462 g NaHCO_3 ve 0,5, 1,5 ve 2 katı olan 0,231, 0,694, 0,924 g NaHCO_3 eklenerek HCO_3^- konsantrasyon etkisi incelenmiştir. İnceleme sonucunda ham suda bulunan HCO_3^- konsantrasyonunun CaCO_3 olarak sertlik seviyesine göre eşmolariteye yakın olan 0,462 g NaHCO_3 ilavesinde toplam sertlik giderimi en yüksek %74 olarak gözlemlenmiş ve optimum olarakta seçilmiştir.

pH 7,24 değerinde 3 A akım şiddetinde, 10 dk arıtım süresinde, 0,462 g NaHCO_3 ilavesinde 0,5 g NaCl, 0,5 g Na_2SO_4 , 0,5 g KCl, 0,5 g K_2SO_4 bileşikler suya eklenerek artırılan iletkenlik değerlerinin toplam sertlik giderim verimine etkisi incelenmiştir. Toplam sertlik giderim verimi, 0,5g NaCl ilavesi ile %71, 0,5 g Na_2SO_4 ilavesi ile % 69, 0,5 g KCl ilavesi ile %65, 0,5 g K_2SO_4 ilavesi ile %67 olarak gerçekleşmiştir. İlave edilen tuz miktarlarının yüksekliği yalancı sertliğe sebep olması ham iletkenlik değerindeki giderim verimine göre verimini düşürmüştür. Ayrıca bu çalışmada kullanılan yeraltı sularında olduğu gibi yüksek iletkenliğe sahip sularda yapılan çalışmalarda ilave destek elektrolite ihtiyaç olmadığı birkez daha ortaya konulmuş ve kimyasal ilavesi olmadan yeraltı suyunun ham iletkenlik değeri optimum olarak seçilmiştir.

Sürenin giderim verimine etkisinin incelendiği ve 5 ile 40 dk arasında yapılan çalışmalarda, toplam sertlik giderimde verim en düşük 5. dk sonunda % 36, 20. dk sonunda % 89 ve devam eden sürelerde artış hızı yavaşlayarak 30. dk sonunda % 93 ve 40. dk sonunda % 95 ulaşmıştır. Arıtım süresinin artması enerji tüketim miktarlarına ve elektrik enerji maliyetinin artmasına sebep olmasından dolayı artış hızının yavaşladığı 20 dk optimum süre olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın tüm sonuçları göz önünde bulundurulduğunda optimum koşullar, başlangıç pH'ı 7,24, akım yoğunluğu 3 A, 0,462 g NaHCO_3 ilavesi, arıtım süresi 20 dk olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında yapılan toplam sertlik giderim verimi %90 olarak elde edilmiştir.

Elektrokimyasal arıtım yöntemleri birçok alanda kullanılmasına rağmen sulardaki sertliğin gideriminde kullanımı son zamanlarda gündeme gelmiş ve literatürde daha önce bu konuda yapılmış çalışmaların sınırlı olması çalışmanın özgünlüğünü ortaya koyuştur. Ayrıca bu çalışmadan elde edilen sonuçlar hali hazırda kullanılan sertlik giderim metotlarında elde edilen verimlerle de kıyaslanabilecek ve endüstriyel gelişimi için kolay strateji ve uygulama rehberliği sağlayacaktır.

Çalışmada elde edilen deneysel verilerin değerlendirilmesi ile yeraltı suyunda elektrokimyasal arıtım yöntemleri kullanılarak yapılan sertlik gideriminin başarılı sonuçlar verdiği ve tercih edilebilir bir yöntem olduğu görülmektedir. Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda yüzey alanı daha geniş ve farklı elektrotlar kullanılarak daha yüksek giderim verimi ve daha kısa arıtım süreleri elde edilebilir. Enerji tüketimi ve elektrik enerji maliyeti düşürme açısından çevreye uyumlu ucuz ve yenilenebilir enerjilerin kullanımı değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- Akbaş, H., 2014. Elektrokoagülasyon yöntemi ile renk gideriminin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Alrehaili, O., Fajardo, A., Garcia-Segura, S. ve Westerhoff, P., 2023. Microfluidic Flow-By reactors minimize energy requirements of electrochemical water treatment without adding supporting electrolytes, *Separation and Purification Technology*, 310, 123123.
- Asfaha, Y., Tekile, A. ve Zewge, F., 2021. Hybrid process of electrocoagulation and electrooxidation system for wastewater treatment: A review" *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100261.
- Atashzaban, Z., Seidmohammadi, A., Nematollahi, D., Azarian, G., Shayesteh, O. H. ve Rahmani, A. R., 2016. The efficiency of electrocoagulation and electroflotation processes for removal of polyvinyl acetate from synthetic effluent, *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 3(2),74-69.
- Aton, J. B., 1973. An Evaluation of Water Softening, *Retrospective Theses and Dissertations*, 42.
- Barrera-Díaz, C., Bilyeu, B., Roa, G.ve Bernal-Martinez, L., 2011. Physicochemical Aspects of Electrocoagulation, *Separation & Purification Reviews*, 40(1),1-24.
- Bayar, S., Boncukçuoğlu, R., Fil, B. ve Yılmaz, A., 2012. Elektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak direct red 23 boyarmaddesinin gideriminin incelenmesi, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2, 21-28.
- Benefield, L. D., Judkins, J. F. ve Weand, B. L., 1982. *Process chemistry for water and wastewater treatment*, Prentice Hall Inc., 212.
- Biçer, A. ve Yalçın, H., 2007. İnorganik kimyasal teknoloji, Bölüm 3.
- Boysan, F. ve Şengörür, B., 2009. Su sertliğinin insan sağlığı için önemi, *Sakarya University Journal of Science*, 13(1), 7-10 .
- Chang, H., Hu, R., Zou, Y., Quan, X., Zhong, N., Zhao, S. ve Sun, Y., 2020. Highly efficient reverse osmosis concentrate remediation by microalgae for biolipid production assisted with electrooxidation, *Water Research*, 174 Article 115642.
- Chen, G., 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment, *Separation and Purification Technology*, 38, 11-41.
- Çolak, Z., 2017. Adıyaman Kâhta yüzüncü yıl göleti'ne deşarj edilen ilçe atıksuyunun elektroflotasyon yöntemiyle arıtılabilirliğinin araştırılması,

Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adıyaman.

Davis M. L., 2014. Su ve atıksu mühendisliği tasarım esasları ve uygulamaları, Toröz, İ., (Çeviri Editörü), Nobel Yayıncılık, Ankara.

Delipınar, Ş., 2007. Maya endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon ile arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

Dipa, S. ve Surati, J., 2016. Review On: Electrophoresis: Method For Protein Separation, Pharma Science Monitor 7(2), 192-203.

Doğu, İ., Yalçın, M., İleri, B. ve Ayyıldız, Ö., 2017. Deri Atıksuyunun Sono-Elektrokimyasal Arıtımı Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 3,1, 1-23.

Escalera, A., Pous, N., Dolors Balaguer, M. ve Sebastià, P., 2022. Electrochemical water softening as pretreatment for nitrate electro bioremediation. Science of the Total Environment, 806,150433.

Fair, G. M., Geyer, J. C. ve Okun, D. A., 1968. Water and Wastewater Engineering, Vol 2, Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal, Wiley, New York.

Feng, Y., Yang, L. ve Logan, B., 2016. Electrochemical technologies for wastewater treatment and resource reclamation, Environmental Science: Water Research Technology, 2, 5, 800-831.

Fil, B., Boncukoğlu, R., Yılmaz, A. ve Bayar, S., 2012. Antep fıstığı işleme atıksularının elektrooksidasyon yöntemiyle ön arıtım çalışmaları, Iğdır Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2, 29-36.

Göç, S., 2018. Yağlı atıksuların üç boyutlu çelik tel elektrot kullanımı ile elektrokimyasal arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.

Harland, C. E., 1994. Ion exchange: theory and practice, Royal society of Chemistry, 6, Cambridge.

Hasson, D., Sidorenko, G. ve Semiat, R., 2010. Calcium carbonate hardness removal by a novel electrochemical seeds system, Desalination 263, 285–289.

Henze, M., Harremoes, P., La Cour Jansen, J. ve Arvin, E., 2001. Wastewater treatment: biological and chemical processes, Springer Science and Business Media, 3rd Edition.

İlhan, F., Kurt, U., Apaydın, Ö., Arslankaya, E. ve Gönüllü, T., 2007. Elektrokimyasal arıtım ve uygulamaları: katı atık sızıntı suyu çalışması, AB

sürecinde Türkiye’de katı atık yönetimi ve çevre sorunları sempozyumu, 1-9, İstanbul.

Jin, H., Yu, Y., Zhang, L., Yan, R. ve Chen, X., 2019. Polarity reversal electrochemical process for water softening, *Separation and Purification*, 943–949.

Kabdaşlı, I., Arslan-Alaton, I., Ölmez-Hancı, T. ve Tünay, O., 2012. Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review, *Environmental Technology Reviews*, 1(1):2- 45.

Kahraman, Ö., 2019. Kot kumaşı üretim tesisi atıksularının elektrokimyasal yöntemlerle arıtılabilirliği, yüksek lisans tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.

Kaleli, B., 2006. Atıksuların ileri arıtımında membran proseslerinin kullanımının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Koparal, A. S. ve Ögütveren, Ü. B., 2002. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*, B89:83-94.

Kobya, M., Can, O. T. ve Bayramoglu, M., 2003. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes, *Journal of hazardous materials*, 100(1-3), 163-178.

Koyuncu, İ. ve Topacık, D., 2002. Zeytinyağı endüstrisi atıksularının arıtılmasında membran teknolojisi uygulamalarının değerlendirilmesi, 1. Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları ve Çözümleri Uluslararası Çalıştayı, 07-09 Haziran, Zeytinli, Edremit Balıkesir.

Kim, S., Choi, S. K., Yoon, B. Y., Lim, S. K. ve Park, H., 2010. Effects of electrolyte on the electrocatalytic activities of RuO₂/Ti and Sb–SnO₂/Ti anodes for water treatment, *Applied Catalysis B: Environ* 97(1–2): 135-141.

Lee, H. J., Song, J. H. ve Moon, S. H., 2013. Comparison of electrodialysis reversal (EDR) and electrodeionization reversal (EDIR) for water softening, *Desalination* 314, 43-49.

Luan, J., Wang, L., Suna, W., Li, X., Zhu, T., Zhou, Y., Deng, H., Chen, S., He, S. ve Liu, G., 2019. Multi-meshes coupled cathodes enhanced performance of electrochemical water softening system, *Separation and Purification Technology*, 128-136.

Malkoç, R., 2008. Reaktif tekstil boya çözeltilerinin elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Mohammadi, R., Tang, W. ve Sillanpää, M., 2021. A systematic review and statistical analysis of nutrient recovery from municipal wastewater by electrodialysis, *Desalination* 498, 15, 114626.
- Mohtashami, R. ve Shang, J. Q., 2019. Electroflotation for treatment of industrial wastewaters: A focused review, *Environmental Processes*, 6, Springer Nature, Switzerland, 2019, 325-353.
- Mollah, M., Schennach, R., Parga, J. ve Cocke, D., 2001. Electrocoagulation (EC) science and applications, *Journal of Hazardous Materials*, B84, 29-41.
- Moreno-Casillas, H. A., Cocke, D. L., Gomes, J. A. G., Morkovsky, P., Parga, J. R. ve Peterson, E., 2007. Electrocoagulation mechanism for COD removal, *Separation and Purification Technology*, 56, 2, 204-211.
- Othman, M. A., 2018. Removal of pesticides from aqueous solution by electrochemical methods, *Doktora Tezi*, Eskişehir Anadolu university Graduate School of Sciences, Eskişehir.
- Öztekin, E., 2018. Atıksulardan ağır metal gideriminde elektrodializ, ters elektrodializ, elektrodionizasyon ve ters elektrodionizasyon sistemlerinin karşılaştırılması, *Doktora Tezi*, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Öztürk, M., 2005. Ters osmoz sistemlerle suların arıtımı, *Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Ders Notları*.
- Özyonar, F., 2020. Su ve atıksu arıtımında elektroflotasyon prosesi, *Niğde Halis Demir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 730 – 745.
- Özyonar, F. ve Karagözoğlu, B., 2012. Elektrokoagülasyon prosesi ile tekstil sanayi atıksuyunun arıtımı, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28, 29-37.
- Panizza, M. ve Cerisola, G., 2004. Influence of anode material on the electrochemical oxidation of 2-naphthol: Part 2. Bulk electrolysis experiments, *Electrochimica acta*, 49(19), 3221-3226.
- Patel, P., Gupta, S. ve Mondal, P., 2022. Electrocoagulation process for greywater treatment: Statistical modeling, optimization, cost analysis and sludge management, *Separation and Purification Technology*, 296, 121327.
- Peng, L., Liu, H., Wang, W., Xu, Z., Ni, X., Wu, Y., Wu, Q. ve Hu, H. Y., 2020. Degradation of methylisothiazolinone biocide using a carbon fiber felt-based flow-through electrode system (FES) via anodic oxidation, *Chemical Engineering Journal*, 384 , Article 123239.
- Rahimpour, A., Jahanshahi, M., Mortazavian, N., Madaeni, S. S. ve Mansourpanah, Y., 2010. Preparation and characterization of asymmetric polyethersulfone and

- thin-film composite polyamide nanofiltration membranes for water softening, *Applied Surface Science*, 256, 1657-1663.
- Rajeshwar, K., Ibanez, J. G. ve Swai, G. M., 1994. Electrochemistry and the environment, *Journal of Applied Electrochemistry*, 24:1077-91.
- Samsunlu, A., 2011. Çevre Mühendisliği Kimyası, 7. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Sanjuán, I., Benavente, D., García-García, V., Expósito, E. ve Montiel, V., 2019. Electrochemical softening of concentrates from an electrodialysis brackish water desalination plant: Efficiency enhancement using a three-dimensional cathode, *Separation and Purification Technology*, 208, 217–226,
- Sarkar, P., Modak, S. ve Karan, S., 2021a. Ultrasensitive and highly permeable polyamide nanofilms for ionic and molecular nanofiltration, *Advanced Functional Materials* , 31 (3), 2007054.
- Sarkar, P., Modak, S., Ray, S., Adupa, V., Reddy, K. A. ve Karan, S., 2021b. Fast water transport through sub-5 nm polyamide nanofilms: the new upper-bound of the permeance-selectivity trade-off in nanofiltration, *Journal of Materials Chemistry A*, 9 (36), 20714–20724.
- Sawyer, C., McCarty, P. ve Parkin, G., 2013. Çevre Mühendisliği ve Bilimi için Kimya, Toröz, İ.,(Çeviri Editörü), Nobel Yayıncılık, Ankara.
- Scott, K., 1995. Handbook of industrial membranes, Elsevier Science Publishers, Oxford,UK. 1st edition, 945.
- SenGupta, A. K., 2017. Ion Exchange in environmental processes: Fundamentals, applications and sustainable technology, John Wiley&Sons, Incorporated.
- Shen, L., Cheng, R., Yi, M., Hung, W. S., Japip, S., Tian, L., Zhang, X., Jiang, S., Li, S. ve Wang, Y., 2022. Polyamide-based membranes with structural homogeneity for ultrafast molecular sieving, *Nature Communications*, 13 (1), 1–11.
- Sivri, S., 2020. Elektrooksidasyon yöntemi ile nonilfenoletoksilat-10 (np10e) arıtımı ve yüzey yanıt metodu ile optimizasyonu, yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Skipton, O. ve Dvorak, B. I., 2014. Drinking water treatment: water softening (ion exchange), *NebGuide*, University of Nebraska–Lincoln Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, G08-1491.
- Stricker, N. E. G., 2001. Removal of salts from urine by electrodialysis using batch recirculation: fouling effect, Master Thesis, University of Puerto Rico, Chemical Engineering, Puerto Rico, 105.

- Şengil, İ. A., ve Özacar, M., 2009. The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes, *Journal of Hazardous Materials*, 161, 1369–1376.
- Şimşek, İ., 2023. Usability of brass and stainless steel electrodes in electrochemical treatment of 4-nitrophenol, *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 100249.
- Tekbaş, Ö. F. ve Mahir, G., 2004. Suların sertlik dereceleri ve sağlık etkileri, *TSK Koruyucu Hekim Bülteni*, 3.7, 156–161.
- Turan, A., Keyikoglu, R., Kobya, M. ve Khataee, A., 2020. Degradation of thiocyanate by electrochemical oxidation process in coke oven wastewater: role of operative parameters and mechanistic study, *Chemosphere*, 255, 127014.
- Uzun, H. İ. ve Debik, E., 2019. Membran Kapasitif Deiyonizasyon Prosesi ile Sertlik Giderimi, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7-3, 341-346.
- Yavuz, Y., 2004. Fenolün elektrokimyasal yöntemlerle sudan giderimi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.
- Yu, Y., Jin, H., Jin, X., Yan, R., Zhang, L. ve Chen, X., 2018a. Current Pulsated Electrochemical Precipitation for Water Softening, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 15, 28.
- Yu, Y., Jin, H., Meng, P., Guan, Y., Shao, S. ve Chen, X., 2018b. Electrochemical water softening using air-scoured washing for scale detachment, *Separation and Purification Technology*, 191 216–224.
- Zamani, A., 2022. Electrochemical Treatment Of Petroleum Wastewater, School of Science Department Of Chemistry MSc in Oil and Gas Technology, International Hellenic University, Kavala.
- Zaslavski, I., Shemer, H., Hasson, D. ve Semiat, R., 2013. Electrochemical CaCO₃ scale removal with a bipolar membrane system, *Journal of Membrane Science*, 445, 88–95.
- Zhang, C., Tang, J., Zhao, G., Tang, Y., Li, J., Li, F., Zhuang, H., Chen, J., Lin, H. ve Zhang, Y., 2020. Investigation on an electrochemical pilot equipment for water softening with an automatic descaling system: Parameter optimization and energy consumption analysis, *Journal of Cleaner Production* 276,13178.
- Zhi, S. ve Zhang, K. Q., 2016. Hardness removal by a novel electrochemical method, *Desalination* 381, 8–14.
- Zhi, S. ve Zhang, S., 2014. A novel combined electrochemical system for hardness removal, *Desalination*, 349 , 68–72.

- Zodi, S., Merzouk, B., Potier, O., Lapique, F. ve Leclerc, J. P., 2013. Direct red 81 dye removal by a continuous flow electrocoagulation/flotation reactor, Separation and Purification Technology, 108, 215-222.
- Zoroğlu, D. 2019. Hastane atıksularından elektrokoagülasyon yöntemi ile kimyasal oksijen ihtiyacı gideriminin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Wen, Y., Dai, R., Li, X., Zhang, X., Cao, X., Wu, Z., Lin, S., Tang, C.Y. ve Wang, Z., 2022. Metal-organic framework enables ultraselective polyamide membrane for desalination and water reuse, Science Advances, 8, 10.
- Wong, H. M., Shang, C., Cheung, Y. K. ve Chen, G., 2002. Chloride assisted electrochemical disinfection, in proceedings of the Eighth Mainland-Taiwan Environmental Protection Conference, Tsin Chu, Taiwan.
- URL-1 <https://water.mecc.edu/exam_prep/limesodaash.html>, Erişim Tarihi: 23.03.2023.
- URL-2 <<https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=34337&mevzuatTur=Tebliğ&mevzuatTertip=5>>, Erişim Tarihi, 18.05.2023.
- URL-3 <https://tr.wikipedia.org/wiki/Su_yumu%C5%9Fatma>, Erişim Tarihi: 25.03.2023.
- URL-4 <<https://gazi.edu.tr/posts/download?id=246941>> Erişim Tarihi: 11.05.2023.
- URL-5 <<https://avys.omu.edu.tr/public>>, 2021 >, Erişim Tarihi: 10.03.2023.
- URL-6<<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>> Erişim Tarihi: 30.05.2023.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Merve ULUSOY

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü,
2012-2017

Yüksek Lisans (Tezsiz) : Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı, 2017-2018

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim
Dalı, 2020-

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Sempozyumda Sunulan Bildiriler

Ulusoy, M. ve Şimşek, İ., 2023. Sertlik Gideriminde Yenilikçi Bir Yaklaşım: Elektrokimyasal Arıtım, 3. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve Yenilikçi Çalışmalar Sempozyumu, Bandırma Onyedİ Eylül Üniversitesi, Bandırma, 579.