

**ELEKTROKİMYASAL SU
DEZENFEKSİYONU**

Oğuzhan TÜZEL
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Ocak 2002

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Oğuzhan Tüzel' in Elektrokimyasal Su Dezenfeksiyonu başlıklı Çevre Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek lisans tezi..19.02.2002..tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı) : Yrd. Doç.Dr. A. Savaş KOPARAL

Üye : Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Arzu ÇİÇEK

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun..20.02.2002...tarih ve.....6/4.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Orhan ÖZER
Fen Bilimleri Enstitüsü
MÜDÜRÜ

ÖNSÖZ

“Elektrokimyasal Su Dezenfeksiyonu” başlıklı bu çalışma, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmamın her aşamasına bilgi, hoşgörü ve anlayışla katkıda bulunan, bu çalışmanın oluşmasında en büyük paya sahip olan ve kendisinden çok şey öğrendiğim değerli danışman hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. A. Savaş KOPARAL’a

Görüş ve önerileri ile çalışmama katkıda bulunan hocalarım Sn. Prof.Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN’e ve Yrd.Doç.Dr. Arzu ÇİÇEK’e,

Deneysel çalışmalarım sırasında yardımını ve desteğini gördüğüm Sn. Araş.Gör. Semra MALKOÇ’a,

İlgi ve destekleriyle her zaman yanımda olan ve çalışmama katkıda bulunan dostlarım Araş.Gör. Serdar GÖNCÜ’ye, Araş.Gör. Ebru ÖNDER’e ve Okt. Yusuf YAVUZ’a,

Beni bugüne kadar maddi ve manevi yönden destekleyen, başarılarımda en büyük paya sahip ve her zaman yanımda olacaklarına inandığım sevgili aileme,

en içten teşekkürlerimi sunarım.

Oğuzhan TÜZEL

Ocak 2002

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTROKİMYASAL SU DEZENFEKSİYONU

OĞUZHAN TÜZEL

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. A. Savaş KOPARAL
2002, 85 sayfa

Bu çalışmada, rutenyum metal oksit elektrotların kullanıldığı paralel plakalı ve damlatmalı reaktörlerde elektrokimyasal yükseltgeme ile su dezenfeksiyonu gerçekleştirilmiştir. Paralel plakalı reaktör ile yapılan çalışmalarda kesikli ve sürekli sistemde çalışılmış, arıtım süresinin ve uygulanan akım yoğunluğunun *E. coli* bakterilerinin hayatta kalma oranına ve enerji tüketimine olan etkileri araştırılmıştır. Sürekli sistemde yapılan çalışmalarda, belli bir başlangıç *E. coli* derişimine sahip çözeltiye değişik akış hızlarında, farklı akım yoğunlukları uygulanmış ve hayatta kalma oranı ve enerji tüketimine olan etkileri incelenmiştir. Damlatmalı reaktörde yapılan çalışmalarda ise belli bir başlangıç *E. coli* derişimine sahip çalışma çözeltisi farklı akış hızlarında reaktöre gerilim uygulanarak elektrokimyasal yükseltgeme ile dezenfekte edilmiş ve hayatta kalma oranı ve enerji tüketiminin değişimi incelenmiştir. Ayrıca, Porsuk çayından alınan su örneği, hem paralel plakalı hem de damlatmalı reaktörlerde elektrokimyasal dezenfeksiyona tabi tutulmuştur. Paralel plakalı reaktörde % 95,5 oranında giderim sağlanırken damlatmalı reaktörde giderim oranı % 98 olmuştur. Sonuç olarak, elektrokimyasal su dezenfeksiyonu hem hazırlanan çalışma çözeltisinde hem de gerçek kirlilik koşullarına sahip su örneğinde başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrokimyasal dezenfeksiyon, *Escherichia coli*, rutenyum oksit elektrot, paralel plakalı reaktör, damlatmalı reaktör

ABSTRACT**Master of Science Thesis****ELECTROCHEMICAL DISINFECTION OF WATER****OĞUZHAN TÜZEL****Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Environmental Engineering Program****Supervisor: Assist.Prof. A. Savaş KOPARAL
2002, 85 pages**

In this study, water disinfection by electrochemical oxidation was carried out in parallel-plate and trickling tower reactors with ruthenium metal oxide electrodes. In studies with the parallel-plate reactor, batch and continuous systems were set up and the effects of treatment time and applied current density on the survival ratio of *E. coli* bacteria and on energy consumption were investigated. In continuous system studies, various current densities were applied at different flow rates on a solution with known initial *E. coli* concentration and their effects on survival ratio and energy consumption were investigated. In trickling tower reactor studies a solution with known initial *E. coli* concentration was disinfected by electrochemical oxidation by applying potential at various flow rates and the changes in the survival ratio, and energy consumption were investigated. Also, water sample from Porsuk Stream was subjected to electrochemical disinfection in both parallel-plate and trickling tower reactors. Achieved removal rates were 95,5 % and 98 % for the parallel-plate reactor and the trickling tower reactor, respectively. As a result, electrochemical disinfection of water was successfully carried out on both laboratory-prepared sample and water sample with actual pollution characteristics.

Keywords: Electrochemical disinfection, *Escherichia coli*, ruthenium oxide electrode, parallel-plate reactor, trickling tower reactor

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ	1
2. SU KİRLİLİĞİ.....	5
2.1. Su Kirliliğinin Kaynakları ve Tanımı	5
2.2. Su Ortamlarında Kirleticileri Sınıflandırma Gereği	6
2.3. Su Kirliliği ile İlgili Yasal Düzenlemeler	8
3. MİKROBİYAL KİRLENME	10
3.1. Atık Suda Bulunan Patojenler	11
3.1.1. Bakteriyel patojenler	12
3.1.2. Viral patojenler	13
3.1.3. Protozoa ve helmintler	14
3.2 Arıtım Süreçleri ile Patojen Giderimi	15
3.3. İndikatör Organizmalar	17
3.4. <i>Escherichia Coli</i>	18
3.4.1. <i>E. coli</i> 'nin bağırsakta oluşturduğu hastalıklar	20
3.4.2. <i>E. coli</i> 'nin bağırsak dışında oluşturduğu hastalıklar	20
4. DEZENFEKSİYON	22
4.1. Dezenfeksiyon Mekanizması ve Hızı	22
4.1.1. Dezenfeksiyon hızını etkileyen faktörler	23
4.2. Dezenfeksiyon Yöntemleri.....	24
4.2.1. Klor ile dezenfeksiyon	24
4.2.1.1. Klorlama ile trihalometan oluşumu	28
4.2.2. Klor dioksit ile dezenfeksiyon	29
4.2.3. İyot ve brom ile dezenfeksiyon	31
4.2.4. Potasyum permanganat ile dezenfeksiyon	32

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
4.2.5. Ozon ile dezenfeksiyon.....	33
4.2.6. UV ile dezenfeksiyon.....	36
5. ELEKTROKİMYASAL SU DEZENFEKSİYONU	39
5.1. Direkt Yükseltgeme ile Elektrokimyasal Su Dezenfeksiyonu	40
5.2. İndirekt Yükseltgeme ile Elektrokimyasal Su Dezenfeksiyonu.....	41
5.3. Elektrokimyasal Su Dezenfeksiyonu ile İlgili Yapılan Çalışmalar	43
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	51
6.1. Paralel Plakalı Reaktörde Elektrokimyasal Su Dezenfeksiyonunun Gerçekleştirildiği Deneysel Çalışmalar	51
6.1.1. Kesikli sistemde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar.....	51
6.1.1.1. Kullanılan malzemeler	52
6.1.1.2. Kullanılan yardımcı malzemeler	52
6.1.1.3. Tayin.....	53
6.1.1.4. Deney sonuçlarının hesaplanmasında kullanılan eşitlikler....	53
6.1.2. Sürekli sistemde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar	53
6.2. Damlatmalı Reaktörde Elektrokimyasal Su Dezenfeksiyonunun Gerçekleştirildiği Deneysel Çalışmalar	54
6.2.1. Kullanılan yardımcı araçlar	54
7. DENEYSEL ÇALIŞMALARDAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR	56
7.1. Paralel Plakalı Reaktörde Elde Edilen Deney Sonuçları.....	56
7.1.1. Kesikli sistemde elde edilen deney sonuçları.....	56
7.1.2. Sürekli sistemde elde edilen deney sonuçları.....	67
7.2. Damlatmalı Reaktörde Elde Edilen Deney Sonuçları	73
8. BULGULARIN TARTIŞILMASI.....	76
8.1. Paralel Plakalı Reaktörde Elektrokimyasal Su Dezenfeksiyonundan Elde Edilen Deneysel Bulguların Tartışılması	76
8.2. Damlatmalı Reaktörde Elektrokimyasal Su Dezenfeksiyonundan Elde Edilen Deneysel Bulguların Tartışılması	77
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	78
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	79
EKLER.....	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
4.1. HOCl ve OCl ⁻ nin pH ile değişimi	26
4.2. Basit Klor Dioksit Sistemi (klor/klorit çözeltisi)	30
4.3. Sıvı Brom Klorür Besleme Sistemi	32
4.4. Ozon ile dezenfeksiyon süreci gaz ve sıvı akış şeması	35
5.1. Hücre ve elektrot arasındaki direkt elektron transferine dayanan elektrokimyasal su dezenfeksiyonu	40
6.1. Elektrokimyasal su dezenfeksiyonu deney düzeneği	52
6.2. Damlatmalı Reaktör Düzeneği	55
7.1. Paralel plakalı reaktöre 0,5 mA/cm ² ' lik akım yoğunluğu uygulandığında farklı <i>E. coli</i> derişimine sahip çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranının zamanla değişimi	58
7.2. Paralel plakalı reaktöre 1 mA/cm ² ' lik akım yoğunluğu uygulandığında farklı <i>E. coli</i> derişimine sahip çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranının zamanla değişimi	58
7.3. Paralel plakalı reaktöre 1,5 mA/cm ² ' lik akım yoğunluğu uygulandığında farklı <i>E. coli</i> derişimine sahip çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranının zamanla değişimi	59
7.4. Paralel plakalı reaktöre 3 mA/cm ² ' lik akım yoğunluğu uygulandığında farklı <i>E. coli</i> derişimine sahip çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranının zamanla değişimi	59
7.5. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığında 10 ⁵ hücre/ml başlangıç <i>E. coli</i> derişimine sahip çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranının zamanla değişimi	60
7.6. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığında 10 ⁴ hücre/ml başlangıç <i>E. coli</i> derişimine sahip çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranının zamanla değişimi	60

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

	<u>Sayfa</u>
7.7. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığında 10^3 hücre/ml başlangıç <i>E. coli</i> derişimine sahip çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranının zamanla değişimi	61
7.8. Paralel plakalı reaktörde, farklı başlangıç <i>E. coli</i> derişimine sahip çözeltideki bakterilerin 30. dakikada hayatta kalma oranlarının akım yoğunluğu ile değişimi	61
7.9. Paralel plakalı reaktörde, farklı başlangıç <i>E. coli</i> derişimine sahip çözeltideki bakterilerin 60. dakikada hayatta kalma oranlarının akım yoğunluğu ile değişimi	62
7.10. Paralel plakalı reaktörde, farklı başlangıç <i>E. coli</i> derişimine sahip çözeltideki bakterilerin 90. dakikada hayatta kalma oranlarının akım yoğunluğu ile değişimi	62
7.11. Paralel plakalı reaktörde, farklı başlangıç <i>E. coli</i> derişimine sahip çözeltideki bakterilerin 120. dakikada hayatta kalma oranlarının akım yoğunluğu ile değişimi	63
7.12. Paralel plakalı reaktöre $0,5 \text{ mA/cm}^2$ lik akım yoğunluğu uygulandığında enerji tüketiminin zamanla değişimi	63
7.13. Paralel plakalı reaktöre 1 mA/cm^2 lik akım yoğunluğu uygulandığında enerji tüketiminin zamanla değişimi	64
7.14. Paralel plakalı reaktöre $1,5 \text{ mA/cm}^2$ lik akım yoğunluğu uygulandığında enerji tüketiminin zamanla değişimi	64
7.15. Paralel plakalı reaktöre 3 mA/cm^2 lik akım yoğunluğu uygulandığında enerji tüketiminin zamanla değişimi	65
7.16. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığında enerji tüketiminin zamanla değişimi (Başlangıç <i>E. coli</i> derişimi 10^5 hücre/ml)	65
7.17. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığında enerji tüketiminin zamanla değişimi (Başlangıç <i>E. coli</i> derişimi 10^4 hücre/ml)	66
7.18. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığında enerji tüketiminin zamanla değişimi (Başlangıç <i>E. coli</i> derişimi 10^3 hücre/ml)	66

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

	<u>Sayfa</u>
7.19. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığı zaman hayatta kalma oranının akış hızıyla değişimi.(Çalışma çözeltisi başlangıç <i>E. coli</i> derişimi 10700 hücre/ml)	68
7.20. Paralel plakalı reaktörde hayatta kalma oranının akım yoğunluğuyla değişimi. (Çalışma çözeltisi başlangıç <i>E. coli</i> derişimi 10700 hücre/ml)	69
7.21. Paralel plakalı reaktörde hayatta kalma oranının akım yoğunluğuyla değişimi.(Porsuk suyu başlangıç bakteri derişimi 3200 hücre/ml)	69
7.22. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığı zaman hayatta kalma oranının akış hızıyla değişimi. (Porsuk suyu başlangıç bakteri derişimi 3200 hücre/ml)	70
7.23. Paralel plakalı reaktörde farklı akım yoğunluklarında enerji tüketiminin akış hızıyla değişimi (Çalışma çözeltisi başlangıç <i>E. coli</i> derişimi 10700 hücre/ml)	70
7.24. Paralel plakalı reaktörde farklı akış hızlarında enerji tüketiminin akım yoğunluğuyla değişimi (Çalışma çözeltisi başlangıç <i>E. coli</i> derişimi 10700 hücre/ml)	71
7.25. Paralel plakalı reaktörde farklı akım yoğunluklarında enerji tüketiminin akış hızıyla değişimi (Porsuk suyu başlangıç bakteri derişimi 3200 hücre/ml)	71
7.26. Paralel plakalı reaktörde farklı akış hızlarında enerji tüketiminin akım yoğunluğuyla değişimi (Porsuk suyu başlangıç bakteri derişimi 3200 hücre/ml)	72
7.27. Damlatmalı reaktörde 175 V' ta bakterilerin hayatta kalma oranının akış hızıyla değişimi (Çalışma çözeltisi başlangıç <i>E. coli</i> derişimi 9800 hücre/ml)	74
7.28. Damlatmalı reaktörde 175 V' ta bakterilerin hayatta kalma oranının akış hızıyla değişimi (Porsuk suyu başlangıç bakteri derişimi 8600 hücre/ml)	74
7.29. Damlatmalı reaktörde enerji tüketiminin akış hızıyla değişimi (Çalışma çözeltisi)	75
7.30. Damlatmalı reaktörde enerji tüketiminin akış hızıyla değişimi (Porsuk suyu)	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
3.1. Mikroorganizma grupları	10
3.2. Atık suda bulunan bakteriyel patojenler	12
3.3. Atık suda bulunan viral patojenler	13
3.4. Atık sudaki protozoa ve helmintler	14
3.5. Atık su arıtımında patojen giderimi	16
4.1. Dezenfeksiyon için kullanılan klor bileşikleri	25
4.2. Bazı organizmaların %99' unu 10 dk içinde inaktive etmek için gerekli dezenfektan derişimleri	35
5.1. Bir flow-through hücresinde klorür derişimine bağlı olarak aktif klor oluşumu	41
7.1. Paralel plakalı reaktörde 10^5 hücre/ml başlangıç <i>E. coli</i> derişimine sahip çalışma çözeltilisinde elde edilen deney sonuçları	56
7.2. Paralel plakalı reaktörde 10^4 hücre/ml başlangıç <i>E. coli</i> derişimine sahip çalışma çözeltilisinde elde edilen deney sonuçları	57
7.3. Paralel plakalı reaktörde 10^3 hücre/ml başlangıç <i>E. coli</i> derişimine sahip çalışma çözeltilisinde elde edilen deney sonuçları	57
7.4. Paralel plakalı reaktörde 10700 hücre/ml <i>E. coli</i> derişimine sahip çalışma çözeltilisinin farklı akış hızlarında arıtımından elde edilen deney sonuçları	67
7.5. Paralel plakalı reaktörde 3200 hücre/ml başlangıç bakteri derişimine sahip Porsuk suyunun arıtımından elde edilen deney sonuçları	68
7.6. Damlatmalı reaktörde 9800 hücre/ml başlangıç <i>E. coli</i> derişimine sahip çalışma çözeltilisinin arıtımından elde edilen deney sonuçları	73
7.7. Damlatmalı reaktörde 8600 hücre/ml başlangıç bakteri derişimine sahip Porsuk suyunun arıtımından elde edilen deney sonuçları	73

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Damlatmalı reaktör elektrot alanı (m^2)
A_z	: Damlatmalı reaktör elektrot hacmi (m^3)
ACF	: Aktif karbon lif
α	: Dezenfeksiyon faktörü
BPG	: Düzlem esaslı grafit elektrot
C	: Dezenfektan derişimi, (mg/L)
CCS	: Karbon kloropiren tabaka
CoA	: Koenzim A
DAPI	: 4',6-diamidino-2-fenilindol
Dd	: Damlatmalı reaktör elektrot dış çapı (cm)
De	: Damlatmalı reaktör elektrot iç çapı (cm)
D_L	: Damlatmalı reaktör elektrot yüksekliği (cm)
E	: UV reaktöründeki ortalama UV yoğunluğu
GAC	: Granüler aktif karbon
GSE	: Grafit silikon elektrot
HAA	: Haloasetik asit
HAN	: Haloasetonitril
I	: Akım (amper)
i	: Akım yoğunluğu ($amper/cm^2$)
k	: Mikroorganizma yok olma hızı sabiti (t^{-1})
N	: Herhangi bir t anında birim hacimde yaşıyan mikroorganizma sayısı
N_0	: t_0 anında birim hacimde yaşıyan mikroorganizma sayısı
PI	: Propidyum iyodür
SCE	: Doygun kalomel elektrot
THM	: Trihalometan
TiN	: Titanyum nitrit
t_p	: İstenilen yok olma oranı için gerekli süre (t)
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
USEPA	: ABD Çevre Koruma Örgütü
V	: Gerilim (volt)
v	: Reaktörden geçen çözelti akış hızı (m^3/s)
UV	: Ultraviyole ışın
WHO	: Dünya sağlık örgütü

1. GİRİŞ

Çevre, insanların içinde yaşadığı ve faaliyetlerini sürdürdüğü ortam olarak tarif edilebilir. Ayrıca, çevrenin bütün canlıları ve doğal kaynakları içine alan yerküreyi ve ^{bu} küreyi çevreleyen atmosferden meydana geldiği de söylenebilir. Çevre bu şekilde geniş kapsamlı olarak ele alındığında, yeryüzünde bulunan bütün varlıkların birbirini etkilediği ve kendi aralarında bir dengenin bulunduğu varsayılır. Bu denge doğal olaylar sonucunda zaman zaman değişebilirse de insan faaliyetleri neticesinde bozulma daha hızlı ve daha sık olarak ortaya çıkar. Bu bozulma bazen düzeltilemeyecek şekilde olabilir. İçinde yaşanan ortam ve doğal kaynakların tamamını ihtiva eden çevre, günümüzde insan hayatının kaçınılmaz bir parçası olan “Çevre Kaynağı” olarak göz önünde bulundurulmak zorundadır. Çevre kaynaklarının kullanımı diğer kaynakların kullanımına göre farklılıklar gösterir. Doğal kaynakların ihtiyaçların temini için kullanılması, bu kaynakları sadece miktar olarak etkilediği halde, çevre kaynağının kullanımı, miktar ile birlikte çevrenin kalitesini bozacak yönde etkiler [1].

Yaşadığımız çevrenin, doğal dengesinin bozulmamış, yani yaşam için gerekli kalitesinin değişmemiş olarak kalması her insanın arzusudur. Burada sorulması gereken soru doğal dengenin veya yaşam için gerekli kalitenin ne olduğuna dair bir çizgi tanımlanıp tanımlanamayacağıdır. Bu çizgiyi tanımlamak bir çok ekonomik, sosyal ve kültürel nedenden dolayı çok zordur. Çünkü bu çizgi aslında kirliliğin tanımına da bağlıdır. Farklı grup insanlar kirliliği farklı şekillerde tanımlamaktadırlar.

Ekolojistler, ekosistemin dengesini bozan her şeye kirletici olarak bakarlar. Mesela su kirlenmesini “su ortamında yaşayan canlı türlerinde azalma meydana getiren ve bazı canlı türlerinin kaybolması ile sistemin dengesini bozan şey” olarak tanımlarlar.

Olayın ekonomik yönünü daha çok göz önüne alan mühendisler “herhangi bir kaynağın faydalı kullanılabilirliğine makul ölçüler dışındaki müdahale” yi kirlilik olarak tanımlarlar [2].

Çevre Kanunu' na göre ise çevre kirliliği "Çevrede meydana gelen ve canlıların sağlığını, çevresel varlığını ve ekolojik dengeyi bozabilecek her türlü olumsuz etki" olarak tanımlanmaktadır [3].

Tüm bu tanımlamaları özetlersek, çevre kirliliği dendiği zaman "hava, su ve toprak gibi canlıları barındıran ortamların fiziksel, kimyasal ve biyolojik yapısında meydana gelen değişim" anlaşılmaktadır.

Kirlenme, insanların birçok eylemleri ve özellikle üretim ve tüketim faaliyetleri sonucu ortaya çıkan bir olaydır. Ancak her kirlenme olayı çevre kirlenmesi olarak tanımlanamaz. Çünkü, doğanın sınırlı da olsa kendini temizleme ve doğal dengesini koruma yeteneği vardır. Kirlenme olgusu doğanın bu kendini temizleme, onarma yeteneğiⁿⁱ sınırlarını aşacak düzeye ulaşırsa doğal denge bozulacak ve kirlenme olgusu çevre kirlenmesi olarak ortaya çıkacaktır. Çevre kirlenmesi olarak adlandırdığımız bu olgunun nedenleri incelendiğinde bunun insanların eylemleri sonucu oluştuğu görülür. Bu da çevre kirlenmesinin doğal bir olay değil, aksine yapay bir olgu olduğunu gösterir.

Çevre kirlenmesinin yapay bir olgu oluşu, çevre kirlenmesinin saptırılarak öne sürüldüğü gibi, sanayileşmenin gelişmesiyle yoğunlaşan üretim ve tüketim ilişkilerinin doğal ve kaçınılmaz sonucu olduğu görüşünün geçersizliğini vurgulaması açısından önemlidir. Çevre kirlenmesi yapay bir olgudur ve ortaya çıkışı toplumların ekonomik yapılarıyla ilgilidir.

Çevre kirlenmesinin toplumların ekonomik yapıları ile belirlendiği gerçeği, gelişmiş ve geri kalmış ülkelerde görülen aynı tür çevre kirlenmelerinin çok farklı nedenlerden kaynaklandığını açıklayabilmektedir.

Gelişmiş ülkelerde görülen çevre kirlenmesini üretim ve tüketim belirlemektedir. Aşırı üretim ve tüketim, doğal kaynakların da aşırı kullanımını, doğal dengenin bozulmasını veya yer yer yok edilmesini beraberinde getirmiştir.

Geri kalmış ülkelerde, gerek üretim ve gerekse tüketim çok düşük düzeyde olduğundan çevre kirlenmesinin nedeni başka sebeplerden dolayıdır. Bu ülkelerde bir yandan geleneksel üretim biçimi sürdürülmekte, bir yandan da gelişmiş ülkelere benzeyen ancak bağımlı ve sağlıksız sanayileşmenin geliştiği yörelerde çevre kirlenmeleri görülmektedir. Ancak sanayinin neden olduğu çevre kirlenmesi genelde yöreseldir ve ülke boyutunda çözümü gereken en önemli sorun önceliğine

sahip değildir. Bu sanayinin neden olduğu çevre kirlenmesi de, gelişmiş ülkelerdekine aksine, aşırı üretimden değil, plansızlık ve denetimsizlikten, çevrenin yanlış veya yetersiz kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Ülkemizde ise özellikle sanayinin yoğunlaştığı yerlerde ve büyük kentlerde, nedenleri açısından değil ama sonuçları açısından gelişmiş ülkelere benzer çevre kirlenmesi sorunları görülmektedir. Ama ülkemiz genelinde görülen çevre sorunları, geri kalmış ülkelerde görülen çevre sorunlarına benzemektedir [4].

Dünyada ve ülkemizde görülen en önemli çevre sorunlarından birisi de suların kirlenmesidir. Su hayatın bir çok boyutu (yiyecek güvenliği, beslenme, sağlık, yaşanabilir bir çevre gibi) açısından kilit önem taşıdığından, su kaynaklarının rasyonel yönetimi de insanların mutluluğu, sürekli ve dengeli kalkınma, ekolojik bütünlük ve giderek bir tür olarak insanlığın kendi neslini sürdürmesi açısından vazgeçilmez unsurlardan birini oluşturur.

Su her türlü yaşam formunun varlık nedeni olduğu gibi, elbette onun zararına etkilerde de bulunabilir. Sanayi devrimi, şehirlerin büyümesi ve tarımsal üretimin yoğunlaşması sonucunda büyük bir savurganlık ve ürkütücü boyutlarda su kirliliği ortaya çıkmıştır. Araştırmalar, sulardan kaynaklanan hastalıkların % 80' inin ve ölümlerin üçte birinin kirli sulardan kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Dünyada günde ortalama 25-30 bin kişi sağlıksız su kullanımı nedeniyle ölmektedir [5].

Bu hastalık ve ölümlere neden olan kaynaklardan biri sudaki patojen mikroorganizmalardır. Su ve atık su hastalık yapıcı (patojen) mikroorganizmaların insanlara ve diğer canlılara yayılmasına yardımcı olmaktadır. İşlem görmemiş su ve atık sularda bakteri, protozoa, virüs ve helmintler gibi patojenik özellik gösterebilecek mikroorganizma türleri barınabilmektedir. Su hidrolojik devrini tamamlarken birçok kirletici ile temas ederek birçok hastalığın yayılmasına neden olmaktadır [6].

Bu nedenle bir suyun içerdiği patojenik mikroorganizmaların elimine edilerek emniyetle kullanılabilir hale getirilmesi gerekmektedir. Suda bulunan patojenleri zararlı olmayacakları seviyeye indirme işlemine dezenfeksiyon denmektedir. Dezenfeksiyon insan sağlığı açısından çok önemlidir. Dezenfeksiyon işleminde çeşitli fiziksel ve kimyasal süreçler uygulanabilmektedir. Klor ve klor türevleri ucuz

ve etkili dezenfektanlar olması nedeniyle en yaygın olarak kullanılan dezenfektanlardır [7].

Ancak, 1970'lerden itibaren klor kullanımının dezenfeksiyon sorununu çözmeye rağmen başka sorunlar yarattığı bilinmektedir. Suyu klor eklendiğinde, klor suda bulunan organik kirleticilerle tepkimeye girerek trihalometanlar gibi kanserojenik maddeler oluşmaktadır. Bu nedenle alternatif dezenfeksiyon yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar yoğunlaşmaktadır. Bu alternatiflerden biri de elektrokimyasal su dezenfeksiyonudur.

Bu çalışmada rutenyum oksit elektrot kullanılan paralel plakalı bir reaktörde, farklı başlangıç bakteri derişimine sahip çalışma çözeltilerine farklı akım yoğunlukları uygulanarak kesikli ve sürekli sistemde elektroyükseltme ile elektrokimyasal dezenfeksiyon gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, damlatmalı reaktör kullanılarak çalışma çözeltilerinin ve Porsuk çay'ından alınan su numunesinin elektrokimyasal dezenfeksiyonu da çalışılmıştır.

2. SU KİRLİLİĞİ

2.1. Su Kirliliğinin Kaynakları ve Tanımı

Yeryüzündeki sular güneşin sağladığı enerji ile sürekli bir döngü içinde bulunur. Bu döngüye “hidrolojik çevrim” adı verilir. İnsanlar, yaşamsal ve ekonomik gereksinimleri için suyu bu döngüden alır ve kullandıktan sonra tekrar aynı döngüye iade ederler. Bu süreçler sırasında suya karışan maddeler, suların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini değiştirerek “su kirliliği” olarak adlandırılan olguyu ortaya çıkarır. Söz konusu özellik değişimleri aynı zamanda sulara yaşayan çeşitli canlı varlıkları da etkiler. Böylece su kirlenmesi sucul ekosistemlerin etkilenmesine, dengelerin bozulmasına ve giderek doğadaki tüm suların sahip oldukları özümleme ve kendi kendini temizleme kapasitesinin azalmasına veya yok olmasına yol açabilir. Su kirliliğini kısaca, antropojen etkiler sonucu ortaya çıkan, kullanımı kısıtlayan veya engeleyen ve ekolojik dengeleri bozan kimyasal ve biyolojik kalite değişimleri olarak tanımlamak mümkündür. Su kirliliği; evsel ve endüstriyel atıkların su ortamlarına artılmaksızın boşaltılmaları, tarımda verimi artırma amacıyla kullanılan doğal ve yapay maddelerin su ortamlarına taşınmaları gibi sebeplerle gerçekleşir.

Endüstriyel atık sular, ayrışmaz ya da güç ayrışabilir türden maddelerin yanı sıra zehirli (toksik) bileşenleri de içerdiklerinden, bu suların alıcı ortamlara boşaltılmalarının etkileri çok daha olumsuz ve kalıcıdır. Toksik maddeler canlıların metabolik faaliyetlerini etkileyerek bireylerin ve ekosistemlerin bozulmasına neden olurlar.

Tarımsal kirlenme, daha çok dağınık (difüze) kaynak türünde olup, pestisit olarak isimlendirilen ve her türlü zirai mücadele ilacını kapsayan maddelerle, doğal ve yapay gübre kullanımından kaynaklanmaktadır.

Türkiye’ nin karasal tatlı su kaynakları coğrafi olarak bulunduğu subtropik kuşağın iklimsel özelliklerinden dolayı oldukça kısıtlıdır. Nüfusu, ekonomik beklentileri ve yaşam standartı hızla artan Türk toplumu, her geçen gün artan bir su gereksinimine sahiptir. Diğer taraftan endüstrileşme süreci içinde artan endüstriyel kullanma ve soğutma suyu ihtiyacı da dikkate değer boyuttadır.

Türkiye, üç tarafı denizlerle çevrilmiş olduğundan, deniz ortamıyla içiçe bir coğrafi konumdadır. Turizm ve balıkçılık açısından önemli bir kaynak teşkil eden kıyı ve deniz sularının kalitesinin korunması ise estetik ve ekolojik faktörlerin ötesinde, yaşamsal önem taşıyan bir ekonomik unsurun korunması olarak da anlaşılmalıdır [8].

2.2. Su Ortamlarındaki Kirleticileri Sınıflandırma Gereği

Jeolojik açıdan, yeryüzündeki akarsular oluşumlarından beri karalardan aldıkları maddeleri deniz ve okyanuslara taşımaktadır. Söz konusu maddelerin büyük bir kısmını atmosferik taşıma süreçleri sonucunda oluşan ve suda çözülmüş halde bulunan unsurlarla, akıntıyla taşınan tanecikler meydana getirmektedir. Bunun yanı sıra yeryüzündeki yaşam süreçlerinin ürünü olan çok miktarda organik atıkla akarsulara karışarak denizlere taşınır. Böylece deniz ve okyanusların karalardan doğal olarak taşınan maddeler için bir birikim ortamı olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu düşünceden hareketle, insanın yeryüzündeki etkinlikleri sonucunda oluşan atık sularda doğal dengeyi bozmayacak bir biçimde, sınırlı olarak, hidrolojik çevrim yardımıyla uzaklaştırılması akla gelmektedir. Aslında kullandığımız sular da kaynaklandıkları ortama bağımlı olarak suyun doğal olarak içerdiği maddelerin dışındaki maddelerden oluşmaktadır.

Yüzeysel suların kullanılmış sular ve diğer atıklar için bir alıcı ve uzaklaştırıcı ortam olarak kullanılması düşünüldüğünde, oluşabilecek etkilerin kestirilebilmesi açısından, bu atıkların doğal dengelere getirebilecekleri kirletici türlerinin sınıflandırılmasında yarar vardır [9].

Aşağıdaki sınıflandırma Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından yapılan sınıflandırmadır [8];

1. Bakteriler, Virüsler ve Diğer Hastalık Yapıcı Canlılar

Suların hijyenik açıdan kirlenmesine neden olan bu organizmalar, genellikle hastalıklı veya portör (hastalık taşıyıcı) olan hayvan ve insanların dışkı ve idrarlarından kaynaklanmaktadır. Bulaşıcı etki, ya bu atıklarla doğrudan temasla veya atıkların karıştığı sulardan dolaylı olarak gerçekleşebilir. İçme suyu temini açısından burada sözü edilen hijyenik kirlenme önemli bir sorun oluşturmaktadır.

2. Organik Maddelerden Kaynaklanan Kirlenme

Ölmüş hayvan ve bitki artıkları ile tarımsal artıkların yüzeysel sulara karışması sonucunda ortaya çıkan kirlenmedir. Bu maddelerin alıcı su ortamlarında yarattıkları oksijen istemi su kalitesi açısından önem taşımaktadır.

3. Endüstri Atıkları

Çeşitli endüstri faaliyetleri sonucu oluşurlar ve fenol, arsenik, siyanür, krom, kadmiyum gibi toksik maddeler içerirler. Teknolojik gelişmeye paralel olarak, endüstri atıklarının içerdikleri maddelerin bir yandan çeşitleri artmakta diğer yandan da bu bileşenlerin kimyasal yapıları giderek daha da karmaşıklaşmaktadır.

4. Yağlar ve Benzeri Maddeler

Tankerler veya boru hatlarıyla taşınan petrolün kazalar sonucunda yüzeysel sulara karışmasının yarattığı olumsuz etkiler açısından önem taşımaktadır.

5. Sentetik Deterjanlar

Bu tip deterjanların içerdikleri fosfatlar yüzeysel sularda ötrifikasyona ve dolayısıyla ikincil kirlenmeye neden olmaktadır. Sentetik deterjanların evlerde kullanılmaya başlanması, evsel atıksuların özelliğini değiştirmiş ve bu sulara endüstriyel sularda rastladıklarımıza benzer nitelikler vermiştir.

6. Radyoaktivite

Yeryüzünde nükleer enerjiden yararlanma hızla artmaktadır. Bu tip tesislerden çıkan tepkime ürünleride (örneğin plütonyum) radyoaktiftir. Nükleer atıkların yeraltında veya denizaltında çok uzun zaman süreleri boyunca saklanması için kullanılan kaplardan kaynaklanabilecek sızmalar bu maddelerin oluşturabileceği toksik etkiler açısından önem taşımaktadır. Radyoaktif kirlenme bunun dışında hastanelerden, araştırma kuruluşlarından ve bazı endüstri dallarından da kaynaklanabilmektedir. Atmosferde yapılan nükleer silah denemeleri sonucunda artan radyoaktivite, yağmur sularını da kirletmekte ve bunun sonucu olarak yüzeysel sular, radyoaktif kirlenmeye maruz kalabilmektedir.

7. Pestisitler

Bu tür yapay organik maddeler, zararlı böcek, bitki ve mantarlarla mücadelede kullanılmaktadır. Uygulamada genellikle zararlı olmayacak derecede düşük dozlarda verilmelerine rağmen, uzun zaman süreleri boyunca bu maddelere maruz kalındığında, zararlı etkileri zaman içerisinde ortaya çıkmaktadır. Pestisitlerin doğal

çevredeki biyokimyasal süreçlerle indirgenmesi çok yavaş olmaktadır. Bunların besin zincirine girmesi ve bu zincirler boyunca biyoakümülyasyona uğramaları ekosistemlerde önemli sorunlar yaratmaktadır.

8. Yapay Organik Kimyasal Maddeler

Bu maddeler farmasotik, petrokimya ve zirai kimya endüstrilerince giderek artan miktarlarda üretilmektedir. Bu yapay maddeler, yerlerini aldıkları doğal maddelere kıyasla, daha güç biyolojik indirgemeye uğrarlar.

9. İnorganik Tuzlar

Bu maddeler toksik olmayıp, ancak çok yüksek dozlarda kirletici olarak düşünülebilirler. Suları içme, sulama ve birçok endüstriyel kullanım için uygunsuz hale getirebilirler. Alışlagelmiş arıtma süreçlerinden etkilenmezler.

10. Yapay ve Doğal Tarımsal Gübreler

Gübrelerin içerdiği azot ve fosfor, sulamadan dönen drenaj suları ile yüzeysel sulara karışırlar. Azot ve fosfor bu ortamlarda ikincil kirlenmeye neden olmaktadır.

11. Atık Isı

Tek geçişli soğutma suyu sistemlerine sahip termik santraller, yüzeysel sulara büyük miktarlarda atık ısı verir. Suyun sıcaklığının artması bir yandan doğal arıtım süreçlerini hızlandırırken diğer yandan oksijenin sudaki doygunluk derişimini azaltır. Böylece anaerobik duruma geçiş kolaylaşabilir. Sıcaklığı artmış sular, ayrıca içme suyu kaynağı olarak da uygun değildir.

2.3. Su Kirliliği ile İlgili Yasal Düzenlemeler

Ülkemizde güncel anlamda çevre olgusunun hukuk sisteminde yer almaya başlamasında ilk adım 1982 Anayasası ile atılmıştır. Anayasa' nın 56.' ıncı maddesi "Herkes sağlıklı ve dengeli bir çevrede yaşamak hakkına sahiptir. Çevreyi geliştirmek, çevre sağlığını korumak ve çevre kirliliğini önlemek devletin ve vatandaşın ödevidir" ifadesiyle, çevreyi korumayı vatandaşlara ve devlete bir görev olarak vermiştir [3].

İçme suyu kaynaklarının korunmasına yönelik 1593 Sayılı Umumi Hıfzıssıhha Kanunu ile içme amaçlı su sağlanan su kaynaklarının korunması, lağım sularının dere, çay ve nehirlere verilmesine sınırlama getirilmiştir [10].

4 Nisan 1971 tarihli Resmi Gazete’ de yayınlanan 1380 sayılı “Su Ürünleri Kanunu” ile su ürünlerinin üretimi ve üretim yerlerinin sınıflandırılması ve denizler ve iç suların kirlenmesini önlemeye yönelik hükümler getirilmiş ve bu tür durumlarda uygulanacak cezai hükümler belirtilmiştir [11].

2872 sayılı Çevre Kanunu uyarınca düzenlenen “Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği”, 04.09.1988 gün ve 19919 sayılı Resmi Gazete’ de yayınlanmak suretiyle yürürlüğe girmiştir. Yönetmeliğin amacı, ülkenin yer altı ve yerüstü su kaynakları potansiyelinin her türlü kullanım amacıyla korunması, en iyi bir biçimde kullanımının sağlanması ve su kirlenmesinin önlenmesidir [12].

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği uyarınca yayınlanan tebliğler ise şöyledir;

- Suda Tehlikeli ve Zararlı Maddeler Tebliği (R.G.:12.03.1989-20106)
- İdari Usuller Tebliği (R.G.:12.03.1989-20106)
- Numune Alma ve Analiz Metodları Tebliği (R.G.:07.01.1991-20748)
- Teknik Usuller Tebliği (R.G.:07.01.1991-20748)

3. MİKROBİYAL KİRLENME

En basit yaklaşımla mikroorganizmalar, boyutları 1-100 µm arasında değişen küçük canlı organizmalar olarak tanımlanabilirler.

Geçmişte mikroorganizmalar bitkiler ve hayvanlar olarak iki temel grupta toplanmıştır. Sınıflandırmadaki güçlüklerden dolayı son eğilim mikroorganizmaları üç grupta toplamaktır; protista, bitkiler ve hayvanlar. Protista grubunun üyeleri protist olarak adlandırılmaktadır. Her gruptaki organizmaların özellikleri Çizelge 3.1.' de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Mikroorganizma Grupları [9]

Grup	Temsil eden üyeler	Özellik
Hayvan	Rotiferler Kabuklular	Çok hücreli farklılaşma
Bitkiler	Yosun Eğrelti otu	
Protista Yüksek (Çekirdek zarı var) Düşük (Çekirdek zarı yok)	Alg Protozoa Fungi Küf Mavi yeşil alg Bakteri	Tek hücreli yada farklılaşma göstermeyen çok hücreli

Mikroorganizmalar, doğada organik ve inorganik maddeler arasındaki geçişleri sağlamaktadırlar. Bu, biyosferde yaşamın sürmesi için gereklidir. C, O, N, S ve P gibi maddelerin biyojeokimyasal çevrimleri mikroorganizma faaliyetleri sonucu oluşmaktadır.

Mikroorganizmalar, atık maddelerin arıtılması ve yeniden kullanılabilir hale getirilmesi açısından büyük önem taşımaktadırlar. Mikroorganizmaların kullanıldığı yerlere örnek vermek gerekirse;

- Aktif çamur, damlatmalı filtre ve oksidasyon havuzları,
- Anaerobik çürütme ve biyogaz üretimi,
- Atıklardan hayvan yemi olarak kullanılmak üzere alg üretimi,
- Kompostlaştırma,

- Atıklardan mantar üretimi sayılabilir.

% 1' den az, çok küçük sayıda bazı mikroorganizmalar insan, hayvan ve bitkilerde hastalık yapmakta ve "patojen" olarak adlandırılmaktadır. Patojen olmayan mikroorganizmalara "saprofit" denilmektedir.

İnsan ve hayvanlardan çok sayıda patojen atıldığından ham atık su ve araziden süzülen sular patojen içermektedir. Sonuç olarak her su kütlesinde bir miktar patojen bulunur. Bu nedenle içme suyu kaynaklarının patojenler yönünden sürekli denetlenmesi ve patojenlerin belli bir derişimin altında tutulması gerekmektedir. Dünyanın pek çok yerinde içme suları patojenlerden arındırılmak üzere arıtıma tabi tutulmaktadır [9].

Patojenler, hastalık yapıcı organizmalar tarafından enfekte edilmiş insanlardan idrar ve dışkı yoluyla atılmaktadır. Patojen bulaşmış olan bir kişinin mutlaka hastalık geçirmesi gerekmez. Başka bir deyişle, patojenin bulaştığı kişi patojenin neden olduğu hastalığın belirtilerini göstermeyebilir. Bazı insanlar, belli bir hastalık yapıcı organizma bulaşmış olsa bile, herhangi bir hastalık belirtisi göstermemesine rağmen patojenler için bir bannak olabilmektedir. Böyle insanlar daimi taşıyıcı olarak nitelendirilmektedir. Belli bir patojenin daimi taşıyıcısı olan insan sayısı toplumun düşük bir yüzdesini oluşturmaktadır. Örneğin tifo hastalığı geçirmiş kişilerin yaklaşık % 2-4' ü hastalığa neden olan *Salmonella typhi*' nin daimi taşıyıcısı olmaktadır. Bazı durumlarda daimi taşıyıcı, hastalığa neden olan patojeni taşıdığıının farkında olmayabilir.

Patojenlerin bulaştığı bazı kişiler gerçekte daimi taşıyıcı değildir. Fakat hastalığa yakalanan ve iyileşen bu kişilerin dışkı ve idrarlarında yüksek miktarda hastalığa neden olan patojen vücuttan atılabilmektedir. Böyle kişiler patojenin geçici taşıyıcısı olarak adlandırılır. Hayvanlara da insanlar için patojenik olan organizmalar bulaşabilir. Bu nedenle hayvanlar da patojenlerin taşıyıcısı olabilmektedir [13].

3.1. Atık Suda Bulunan Patojenler

Atık suda bulunan patojenler hastalığa yakalanmış yada hastalığın taşıyıcısı olan insanlardan atılmaktadır. Atık suda bulunabilen dört grup patojen-virüs,

bakteriler, protozoa ve helmint yumurtaları salgın hastalıkların nedenidir. Bu bölümde atık suda bulunan patojenler sunulmaktadır.

3.1.1. Bakteriyel patojenler

Sulardan kaynaklanan hastalıkların oluşturduğu salgınların ve hastalıkların yaklaşık % 20' si *Salmonella* ve *Shigella*' dan kaynaklanmaktadır. *Salmonella* ve *Shigella* bakterilerinin neden olduğu hastalıklar sırasıyla salmonellosis ve shigellosis olarak adlandırılmaktadır. Salmonellosis genellikle ishal ve mide krampları ile akut mide ve bağırsak iltihaplarına neden olmaktadır. Ateş, bulantı ve kusma da meydana gelebilmektedir. Normal koşullar altında insanların yaklaşık % 1-4' ü *Salmonella* atmaktadır. İnsanlarda atma oranı salmonellosis salgınları sırasında çok daha yüksek olmaktadır. *Salmonella*' nın birkaç yüz tipinin insanlar için patojenik olduğu bilinmektedir. *Salmonella typhi*' nin neden olduğu tifo, muhtemelen en iyi bilinen salmonellosis hastalığıdır [13].

Shigellosis, *Shigella* adı verilen basil tipi bakterinin neden olduğu dizanteri olup, basilli dizanteri olarak da adlandırılmaktadır. Bağırsaktan atılan *Shigella* uzun süre yaşayamaz. Yaşamını sürdürebilmesi için düşük sıcaklıklara ihtiyaç duymaktadır. Shigellosis sudan kaynaklanan salgınlara neden olmasına rağmen tifodan daha az rastlanmaktadır [9]. Aşağıdaki çizelgede atık suda bulunan bakteriyel patojenler ve suda bilinen miktarları verilmektedir.

Çizelge 3.2. Atık suda bulunan bakteriyel patojenler [14]

Organizma	Hastalık	Atık sudaki miktarı(100 ml başına)
<i>Salmonella</i>	Tifo, paratifo, Salmonellosis	2,3-8000
<i>Shigella</i>	Basilli dizanteri	1-1000
Enteropatojenik <i>E. Coli</i>	Gastroenteritis	
<i>Yersinia</i>	Gastroenteritis	
<i>Campylobacter</i>	Gastroenteritis	3700
<i>Vibrio</i>	Kolera	10-10000
<i>Leptospira</i>	Leptospirosis	
<i>Legionella</i>	Akut solunum rahatsızlığı	
<i>Mycobacterium</i>	Tüberküloz	

3.1.2. Viral patojenler

Virüsler ultra mikroskobik parçacıklar olup, yalnızca canlı hücre içinde yaşayıp çoğalabilmektedir. Bu süreç içerisinde, üzerinde bulunduğu hücrede bir takım değişikliklere neden olmakta ve bitki ve hayvanlarda bazı hastalıklara yol açmaktadır. Virüsler çok küçük oldukları için filtrelerden geçebilmektedir, bu özellik virüslerin izole edilmesinde kullanılmaktadır.

Çizelge 3.3. Atık suda bulunan viral patojenler [14]

Organizma	Hastalık	Atık sudaki miktarı (litre başına)
Adenovirüs	Solunum rahatsızlığı, kusma, ishal	
Astrovirüs	Kusma, ishal	
Kalisivirüs	Kusma, ishal	
Koronavirüs	Kusma, ishal	
Enterovirüs: Poliovirüs Coxsackie A Coxsackie B Ekovirüs Enterovirüs 68-71	Felç, menenjit, ateş Menenjit, ateş, solunum rahatsızlığı Konjenital kalp sapmaları, deride kızarıklık, ateş, menenjit Menenjit, solunum rahatsızlığı, deride kızarıklık, ishal, ateş Menejit, solunum rahatsızlığı, ateş	182-492000
Hepatit A virüsü	Bulaşıcı hepatit	
Hepatit B virüsü	Hepatit	
Norwalk virüsü	Salgın kusma ve ishal	
Reovirüs	Tam olarak belirlenmemiştir	
Rotavirüs	İshal, kusma	400-85000
Küçük yuvarlak virüsler	İshal, kusma	

Bugüne kadar yüzlerce virüs belirlenmiş olmasına rağmen, binlerce değişik tipte virüsün var olduğu sanılmaktadır. Beş grup patojenik virüs özellikle önem taşımaktadır;

- Hepatit A virüsü,

- Adenovirüsler,
- Enterovirüsler,
- Reovirüsler,
- Retovirüsler [9].

Bazı patojen virüs türlerine dikkat çekmek gerekmektedir. İndikatör türlerin ortamdan yok olmasından sonra bile, özellikle düşük sıcaklıklarda bazı virüs türleri uzun süre suda yaşayabilmektedir. Bu sebeple, koliformlar açısından emniyetli görülebilecek su ortamlarının, virüs kirlenmesi açısından tehlike oluşturabileceği bilinmelidir [8].

3.1.3. Protozoalar ve helmintler

Çizelge 3.4. Atık sudaki protozoa ve helmintler [14]

Organizma	Hastalık	Atık sudaki miktarı (litre başına)
Protozoa:		
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amipli dizanteri	4
<i>Giardia lamblia</i>	İshal	125-100000
<i>Balantidium coli</i>	Hafif ishal, kolonik cerahat toplanma	28-52
<i>Cryptosporidium</i>	İshal	
<i>Toxoplasma</i>	Toxoplasmosis	0.3-122
<i>Microsporidium</i>		
Helmintler:		
<i>Ascaris</i>	Ascariasis	5-111
<i>Ancylostoma</i>	Kansızlık	6-188
<i>Necator</i>	Kansızlık	
<i>Taenia</i>	Tenyasis	
<i>Trichuris</i>	İshal, karın ağrısı	10-41
<i>Toxocara</i>	Ateş, karın ağrısı	
<i>Strongyloides</i>	İshal, karın ağrısı, mide bulantısı	

Protozoaların bir çok türü insanlarda enfeksiyona neden olarak hastalıklara yol açmaktadırlar. Bu organizmaların bir kısmı insan ve hayvanların bağırsaklarında bulunan, ishal ve dizanteri gibi hastalıklara neden olan türlerdir. Protozoaların özellikle üç türü sık rastlanılan patojenik özellikleriyle bilinmektedir; *Giardia lamblia*, *Balantidium coli* ve *Entamoeba histolyca*.

Parazitik kurtların ve helmintlerin bazı türleri insanlarda çoğalamazlar ve bu olay hastalık yapma şekilleri ve çevresel değişikliklerin kontrollerine olan etkileri açısından önemlidir [6].

3.2.Arıtım Süreçleri ile Patojenlerin Giderimi

Atık su arıtım süreçleri ile özellikle enterik bakterilerin önemli miktarda giderimi sağlanabilmektedir. Bununla birlikte, dezenfeksiyon ya da ileri üçüncül arıtım yöntemleri, yeterli seviyede patojen giderimi sağlamak ve atık suyun yeniden kullanımına olanak vermesi için gerekmektedir [14].

Patojen organizmaların arıtımında giderilen miktardan ziyade giderilemeyen miktar önemlidir. Örneğin % 99 veya % 99,9 oranındaki giderim sonucunda giderilemeyen miktar % 1 veya % 0,1' dir. Bu değerler patojenlerin arıtma ünitesine giriş derişiminin yüksek olması durumunda önemli değerler haline gelmektedir. 10^5 CFU/L patojenik bakteri içeren bir atık su % 99' luk bir arıtım sonucunda arıtma tesisi çıkış suyu 10^3 CFU/L patojenik bakteri içermektedir. Bu çıkış suyunun tekrar kullanılacağı veya içme suyu kaynağı olarak kullanılan bir akarsuya deşarj edileceği bir bölgede kalitesinin yetersiz olacağı düşünülebilir.

Bu nedenlerle, literatürde verilen patojen giderimine ait rakamlar yanıltıcı olabilir. Örneğin geleneksel arıtma tesisleri % 90-99 oranlarında enterik bakteri giderimi sağlayabilmektedir. Evsel atık suların yüksek oranlarda patojenik organizma içerdiği gelişmekte olan ülkelerde % 1 oranındaki kalıntı patojen bir çok probleme neden olacaktır.

Geleneksel arıtma sistemleri ilk geliştirildiğinde organik kirliliğin giderimine yönelik dizayn edilmiş ve yüksek miktarda patojen arıtımı amaçlanmamıştır. Enfeksiyonel olayların sık görüldüğü tropik ülkelerde bu sistemlerin kullanımı önerilmemektedir. Bu sistemler yerine yüksek patojen gideriminin sağlandığı stabilizasyon havuzlarının kullanılması tercih edilmelidir [6]. Aşağıdaki çizelgede atık suda bulunan çeşitli patojenlerin arıtım süreçleri ile giderim miktarları verilmektedir.

Çizelge3.5. Atık su arıtımında patojen giderimi [14]

	Enterik virüsler	<i>Salmonella</i>	<i>Giardia</i>	<i>Cryptosporidium</i>
Ham atık sudaki derişimi (litre başına)	100000-1000000	5000-80000	9000-200000	1-3960
Sırasında giderim				
Birincil arıtım				
% Giderim	50-98,3	95,5-99,8	27-64	
Litrede kalan miktar	1700-500000	160-3360	72000-146000	0,7
İkincil arıtım				
% Giderim	53-99,92	98,65-99,996	45-96,7	
Litrede kalan miktar	80-470000	3-1075	6480-109500	
Üçüncül arıtım				
% Giderim	99,983-99,99999	99,99-99,9999995	98,5-99,99995	
Litrede kalan miktar	0,007-170	0,000004-7	0,099-2,951	2-7

Izgaradan geçirme veya öğütme gibi ön arıtma sistemlerinde atık suda bulunan patojen içeriğinde bir değişiklik meydana gelmez. İlk çöktürme tankında da virüs giderimi gerçekleşmemekte, arıtma sisteminin diğer kademeleri de göz önüne alındığında en fazla % 50 oranında giderim olmaktadır. Buna karşılık ilk çöktürmedeki bakteri giderimi % 50-90 oranlarında olabilmektedir.

Benzer giderim verimlerine son çöktürme tanklarında da ulaşılabilir. Atık suyun flokulasyonu patojenlerin çökelme verimlerini büyük ölçüde artırabilir.

Damlatmalı filtreler virüs gideriminde tek başına yüksek verime sahip değildir. Damlatmalı filtrelerde virüs giderimi % 15-75 arasındadır. İndikatör bakterilerin giderimi ise % 25-99 aralığında olmaktadır. Sisteme son çöktürme tankı ilave edildiğinde *Salmonella* giderim değerlerinin % 71-99 aralığında olduğu gözlenmiştir. Damlatmalı filtrelerde yükleme oranları düştükçe patojen giderim oranları artmaktadır [6].

Aktif çamur yöntemi diğer biyolojik arıtım yöntemleriyle karşılaştırıldığında, ham atık sudaki patojenlerin miktarını azaltan en etkili yöntemdir. Aktif çamur süreci genellikle enterik bakterilerin % 90' ını ve enterovirüs ve rotavirüslerin % 80 ile % 90-99' unu gidermektedir. *Giardia* ve *Cryptosporidium*' un da yaklaşık % 90' ı giderilmekte ve çamurda derişik halde bulunmaktadır. Bununla birlikte, aktif

çamur süreci ile yüksek patojen giderimi gerçekleşiyormuş gibi görünmesine rağmen, atık suda bulunan başlangıç derişiminin yüksek olduğu unutulmamalıdır.

Yeterli bekletme sürelerine sahip oksidasyon havuzları da önemli miktarda enterik patojen derişiminin (Özellikle helmint yumurtalarının) azaltımına neden olmaktadır. Bu nedenle, atık suyun sulama amacıyla yeniden kullanılması için düşük maliyetli bir patojen azaltım yönteminin gerekli olduğu yerlerde oksidasyon havuzları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, oksidasyon havuzlarının en önemli dezavantajı uzun bekletme sürelerinin gerekmesidir. Çoklu-havuz sistemlerinde bile bu süre 90 güne kadar çıkabilmektedir.

Oksidasyon havuzlarında patojen giderimi ve/veya inaktivasyonu sıcaklık, güneş ışığı, pH, diğeri organizmalar tarafından yok edilme ve çökebilir katılara tutunma veya adsorpsiyon gibi bir takım faktörler nedeniyle gerçekleşmektedir. Oksidasyon havuzlarında indikatör ve patojenik bakterilerin miktarı % 90-99 oranında veya bekletme sürelerine bağılı olarak daha fazla oranda azaltılabilmektedir [14].

3.3.İndikatör Organizmalar

Suda bulunan patojenlerin belirlenmesi zordur, ekonomik ve pratik değildir. Bu nedenle patojenik organizmaların doğrudan belirlenmesi yerine indikatör organizmalar kullanılır. İndikatör organizmalar da bağırsakta yüksek miktarlarda bulunurlar ve bazı patojenlerle birlikte daima dışkıda bulunarak fekal kirliliğin göstergesi olarak kullanılırlar.

İyi bir indikatör organizmanın temel özellikleri şunlar olmalıdır; (1) indikatör organizmanın ortamda bulunmayışı enterik patojenlerin de ortamda bulunmadığı anlamına gelmelidir, (2) indikatör organizmanın sudaki yoğunluğu patojenlerin suda bulunma ihtimali ile orantılı olmalıdır, (3) ortamda bulunan indikatör organizmalar patojenlerden daha uzun süre yaşmalıdır. Bu nedenle toplam koliformlar, fekal koliformlar, fekal streptokok ve Clostridium perfringens' lerin suda bulunması fekal kirlenmenin kanıtı olmakta ve uzun yıllardır su kalitesi değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Bir çok indikatör organizma bulunsa da toplam koliform grubu bakteriler en yaygın kullanılan indikatör organizma grubudur. Toplam koliform grubu “tüm aerobik ve fakültatif anaerobik, gram negatif, spor oluşturmeyen, çubuk şekilli bakterileri” içermektedir. Toplam koliform grubu bakteriler 35 °C’ de 48 saat içinde gaz oluşturarak laktozu fermente ederler. Koliform grubu *Escherichia coli*, *Enterobacter* ve *Citrobacter freundii*’ yi içermektedir.

Bir kaç çeşit koliformun bulunmadığı içme sularında toplam koliform fekal kirliliğin indikatörü olarak kullanılmaktadır. Kanalizasyon çıkışları ve yüzme alanları gibi kirlenmiş akımlardaki fekal koliformlar yükseltilmiş sıcaklık testi kullanılarak (44,5±0,5 °C) sayılır. Toplam ve fekal koliformlar arasındaki farklılaşma onların 44,5±0,5 °C’ deki büyüme yeteneklerine dayanmaktadır. *E. coli*’ ye ılıman iklimlerde daha sık rastlanılmaktadır. *E. coli* insan bağırsağında bulunan koliformların baskın türüdür. Koliform grubunun diğer üyeleri genellikle toprakta ve bitkilerde bulunmaktadır. Tropikal ülkeler de ise *E. coli* bağırsakta bulunan baskın koliform türü değildir. Bu nedenle fekal koliform testi yerine toplam koliform testi yapmak daha yararlı olacaktır.

Bağırsakta bulunan diğer bir bakteri çeşidi olan ve insanlardan çok hayvanlarda bulunan fekal streptokok’ un sayımı fekal koliformla birlikte sık sık yapılmaktadır ve fekal koliformların fekal streptokok’ a oranı kirliliğin insanlardan mı yoksa hayvanlardan mı kaynaklandığını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır Evcil hayvanlar için FC/FS oranı 1’ den daha düşüktür, oysa bu insanlar için bu oran 4’ ten daha fazladır [15].

Eğer FC/FS oranı 1-2 aralığında çıkarsa kirliliğin insan kaynaklı mı yoksa hayvan kaynaklı mı olduğu hakkında yorum yapılamaz. Eğer alınan örnek şüphe edilen kirlilik kaynağının yakınından alınmışsa yapılabilecek en uygun yorum kirliliğin insan ve hayvan kaynaklarından eşit olarak yayıldığıdır [16].

3.4. *Escherichia Coli*

Escherichia coli insan ve hayvanların kalın bağırsağında, dolayısıyla dışkıında daima bulunan bir bakteridir. Bir dışkı örneğinden patojen bakterilerin ayırt edilebilmesi için genellikle *E. coli*’ nin üremesini engelleyen, en azından farklı

koloniler oluşturduğu besi yerleri kullanılırken çoğu zaman bu bakterinin bir bağırsak patojeni olduğu unutulmaktadır.

E. coli bağırsak patojeni olarak ilk önce veteriner hekimler tarafından belirlenmiş, yavru domuz ve danalarda birkaç saat ile birkaç gün arasında ölüme yol açan bazı sulu ishal vakalarında bazı *E. coli* suşlarının etkili olduğu saptanmıştır. Daha sonra 1940' larda *E. coli*' nin insanda da bağırsak patojeni olabileceği belirlenmiştir [17].

E. coli yaklaşık olarak 2-6 µm boyunda ve 1-1,5 µm eninde düz, uçları yuvarlak çomakçık şeklinde bakterilerdir.

Bazı kültürlerde koka benzer küçük ve kısa, bazı kültürlerde de normalden uzun ve hatta Y harfi şeklinde dallanan kamçılı şekilleri bulunabilmektedir. Genellikle etraflarında bulunan kirpikleri aracılığı ile hareket etmekle birlikte hareketleri oldukça yavaştır. Hatta hareketsiz görünebilirler.

E. coli bakteriyolojik boyalarla kolay boyanmaktadır ve gram negatiftirler. Etrafında kapsül maddeleri bulunmakla birlikte organizmada bağırsak dışı yerlerden soyutlanan kökenlerin çoğunda kapsül yada mikrokapsül bulunmaktadır.

E. coli hayvan ve jelüloz gibi genel besi yerlerinde rahatlıkla ürer. Fakültatif anaerob olup en uygun üreme sıcaklığı 37 °C' dir. 15-45 °C arası sıcaklıklarda da üreyebilir. Özellikle 44 °C' de üreyebilmeleri benzer bazı bakterilerden ayırt edilmesine yarayan bir özelliktir. pH 7,2' de *E. coli* daha iyi üremektedir. Buyyonda *E. coli* homojen bulanıklık yapmaktadır. Jelülozda ise hafif kabarıklık, yuvarlak, düzgün 1-2 mm çapında parlak koloniler oluşturmaktadır.

E. coli oldukça dirençli bir bakteridir. 60 °C sıcaklıkta 30 dakika canlı kalabilmektedir. Soğuğa karşı da dirençlidir. Fakat dezenfektanlara karşı dayanıklı değildir. Malaşit yeşili, brillant yeşili ve füksin gibi boyalar, safra, safra tuzları, sodyum tetrasyonat, bizmut sitrat, sodyum sülfat, sodyum dezoksikolat selenit tuzlarına karşı dirençleri *Salmonella* ve *Shigella* gibi bakterilere göre daha az olduğundan bu maddeler belli derişimlerde besi yerlerine konularak *E. coli*' nin üremesi engellenerek birlikte bulunduğu *Salmonella* ve *Shigella*' lar için ayırt edici ve çoğaltıcı özellik kazandırılmaktadır.

% 7 NaCl içeren besi yerlerinde üremeleri engellendiğinden dışkıda *stafilokok*' un ayırt edilmesinde de kullanılmaktadır [18].

3.4.1. *E. coli*' nin bağırsakta oluşturduğu hastalıklar

E. coli bağırsak florasının en önemli üyesi olmakla beraber bazı kökenleri bağırsakta hastalık oluşturabilmektedir. Bunlar ETEC, EPEC ve EIEC olarak bilinmektedir.

EIEC(Entero Invaziv *E. coli*): *Shigella*' rın neden olduğu dizanteriye benzer hastalık tablosu oluşturmaktadır. Hastalık *Shigella*' dakine benzer şekilde bakterinin bağırsak mukozasının zedelenmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu bakterilerin enterotoksinleri yoktur.

EPEC(Entero Patojenik *E. coli*): Daha çok süt çocukluğu döneminde ishallere neden olmaktadır. Bunların hastalık oluşturma mekanizmaları tam olarak bilinmemekte, birçok serotip etken olarak üretilebilmektedir.

ETEC(Entero Toksin *E. coli*): Oluşturduğu toksinlerle kolera benzeri ishale neden olmaktadır. Isıya duyarlı ve dirençli olmak üzere iki ekzotoksini belirlenmiştir. Isıya duyarlı ekzotoksin kolerada olduğu gibi bağırsak epitek hücresinde siklik adenzin monofosfat düzeyini arttırarak, diğer toksin ise siklik guanozin monofosfat derişimini arttırarak bağırsak boşluğunda izotonik sıvı artışına neden olarak ishallere neden olmaktadır [19].

3.5.2. *E. coli*' nin bağırsak dışında oluşturduğu hastalıklar

Normal bağırsak florasında bulunan *E. coli* bakterileri herhangi bir nedenle buldukları yerin dışına başka dokulara geçme fırsatı buldukları takdirde çeşitli ve bazen önemli enfeksiyonların oluşmasında etken olabilmektedir.

E. coli bakterilerinin değişik dokulara geçmeleri bağırsakların mekanik veya diğer biyolojik etkilerle yaralanmaları veya organizmanın savunma mekanizmasındaki bozukluklar nedeniyle meydana gelebilmektedir. Çok küçük çocuklarda ve yaşlı insanlarda vücut savunması zayıflayabileceği gibi bazı ilaçların etkisi ile de bu savunma zayıflayabilir. Ayrıca sterilizasyonuna dikkat edilmeyen idrar sondaları ve kateterler de bu bakterilerin diğer dokulara ve kana yayılmasına olanak vermektedir.

Koli basillerin safra ve safra yollarına yerleşmeleri ile kolesistit ve kalanjit enfeksiyonları da oluşmaktadır. Ayrıca *E. coli* menenjitleri daha çok yeni doğan çocuklarda görülmektedir [18].

4. DEZENFEKSİYON

Dezenfeksiyonun su arıtımındaki tanımı, “suda bulunan organizmaların, bu suyun kullanımı sonrası herhangi bir hastalığa neden olmayacakları düzeye kadar azaltılması” dır. Suda bulunan tüm organizmaların yok edilmesi demek olan sterilizasyon, dezenfeksiyon ile karıştırılmamalıdır.

Dezenfeksiyon işlemi ile sudan giderilmesi hedeflenen organizmalar bakteri, spor, virüs, kist ve protozoaları (larvalar, kurtçuklar vb.) içerir. Dezenfeksiyona rağmen bu organizmaların tümüyle yok edilememesi organizmanın türü ve derişimine, dezenfektan türü, derişimi ve uygulanış biçimine, suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerine (başlıca sıcaklık, askıda katı madde ve organik madde derişimi, pH vb.) ve temas süresine bağlıdır. Pek çok parametreye bağlı olan başarılı bir dezenfeksiyon işlemi için deneysel çalışma yapmak gerekmektedir [20].

4.1. Dezenfeksiyon Mekanizması ve Hızı

Hastalık yapıcı mikroorganizmaların yok edilme mekanizması kullanılan dezenfektanın ve patojenlerin türüne bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Kuvvetli oksitleyiciler ile hücre proteinine ve enzimlere etki ederek gerçekleştirilen kimyasal dezenfeksiyon yöntemlerinin yanı sıra fiziksel yöntemler de dezenfeksiyon için kullanılmaktadır.

Kimyasal dezenfeksiyon, bir dizi kimyasal ve biyokimyasal tepkimenin sonucu olarak tamamlanmaktadır. Oldukça karmaşık olan dezenfeksiyon kinetiği Chick tarafından ortaya atılan ampirik eşitliğe göre, mikroorganizmaların sayısı ile doğrudan bağlantılıdır.

$$-\frac{dN}{dt} = kN \quad (4.1)$$

burada;

N = herhangi bir t anında birim hacimde yaşayan mikroorganizma sayısı,

k = mikroorganizma ve dezenfektan türü ile dezenfeksiyon sistemine bağlı olarak değişen yok olma hızı sabiti, t⁻¹

$$-\frac{dN}{dt} = \text{yok olma hızı.}$$

Bu eşitlik, $t = 0$; $N = N_0$ ve $t = t$; $N = N$ sınır şartlarında entegre edilirse,

$$\ln \frac{N}{N_0} = -kt \quad (4.2)$$

$$N = N_0 \cdot e^{-kt} \quad (4.3)$$

$$t = \frac{2.303}{k \cdot \log \frac{N_0}{N}} \quad (4.4)$$

k sabitinin değeri deneysel olarak belirlenebilmektedir.

4.1.1. Dezenfeksiyon Hızını Etkileyen Faktörler

Dezenfeksiyon hızını etkileyen faktörler şunlardır;

- a. Dezenfektan Derişimi: Dezenfektan derişimi ile istenilen oranda mikroorganizmanın yok edilmesi için gerekli süre arasındaki ampirik ilişki aşağıda verilmiştir.

$$C^n \cdot t_p = k \quad (4.5)$$

Burada;

C = Dezenfektan derişimi, mg/L

t_p = İstenilen yok olma oranı için gerekli süre, t (% yok olma süresi)

n, k = Dezenfektan sabiti

- b. Sıcaklık: Sıcaklığın artması dezenfeksiyon tepkimelerinin hızını arttırdığı gibi aynı zamanda mikroorganizmaları da olumsuz yönde etkilemektedir.
- c. pH Etkisi: Ortamda pH' ın değışmesi gerek mikroorganizmanın ve gerekse dezenfektanın etkinliğini değıştirmektedir. Bu bakımdan pH dezenfeksiyon hızı üzerinde çok etkili bir değışkendir.
- d. Organik Maddeler: Su ve atık sularda mikroorganizmalar için enerji kaynağı olan organik maddeler dezenfeksiyona çeşitli şekillerde etki etmektedir ;
 - Hücre üzerine yapışarak, dezenfektanın hücreye etkimesine engel olur.
 - Dezenfektanlarla tepkimeye girerek kompleks maddeler oluştururlar. Bu kompleks maddelerin dezenfeksiyon etkisi çok zayıftır.

- Çoğunlukla, kuvvetli yükseltgen olan dezenfektanlar organikleri yükseltgeyerek kendileri indirgenirler ve dezenfeksiyon güçlerini kaybederler.
- e. İnorganik Maddeler: Organik maddeler kadar olmamakla birlikte Fe^{2+} ve Mn^{2+} gibi bazı inorganik iyonlarda dezenfektanları indirgeyerek öldürücü güçlerini azaltmaktadırlar [7].

4.2. Dezenfeksiyon Yöntemleri

Dezenfeksiyon işlemi için kullanılan başlıca dezenfektanlar şunlardır;

- klor (gaz ya da hipoklorit olarak),
- kloraminler,
- klor dioksit,
- ozon.

Çeşitli amaçlar için kullanılan diğer dezenfeksiyon yöntemleri ise;

- küçük ölçekli dezenfeksiyon işlemleri için ultraviyole ışın,
- küçük ölçekli dezenfeksiyon işlemleri ya da acil durumlar için iyot,
- ön dezenfeksiyon için potasyum permanganat,
- suların kullanılmadan önce kaynatılması.

Klor, ucuz ve etkili bir dezenfektan olması sebebiyle klor ile dezenfeksiyon en yaygın kullanılan dezenfeksiyon yöntemidir [20].

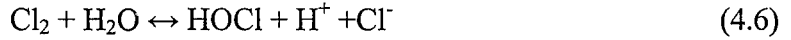
4.2.1. Klor ile dezenfeksiyon

Suya eklenen klor bileşikleri organizmaların enzim üretimini engelleyerek yaşamlarına son vermektedir. Klor suya gaz şeklinde (Cl_2) serbest klor olarak ya da katıların iyonize olmuş ürünü kalsiyum hipoklorit ve sodyum hipoklorit olarak [$Ca(OCl)_2$, $NaOCl$] suya uygulanmaktadır. Serbest haldeki klor gazı sarımsı yeşil renkte olup son derece tahriş edici, keskin kokulu zehirli bir gazdır. Son derece korozif olan klor gazı, yüksek basınç altında sıvı hale getirilmektedir. Sıvı klor, yüksek buharlaşma özelliğinden dolayı, özel olarak dizayn edilmiş olan çelik tanklar içerisinde sıkıştırılmış sıvı şeklinde temin edilmektedir [21]. Uygulamada kullanılan klor bileşiklerinin özellikleri Çizelge 4.1' de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Dezenfeksiyon için kullanılan klor bileşikleri [21]

Klor bileşiği	Kimyasal formülü	Depolama	Mevcut şekli	Ticari saflığı %	Özelliği
Serbest klor	Cl ₂	Çelik	Sıvı Gaz	100	Atmosfer şartlarında sıvı buhar
Sodyum hipoklorit	NaOCl	Seramik, cam, plastik, kauçuk	Açık sarı sıvı	12-15 klor	Açıkta kalınca bozunur
Kalsiyum hipoklorit	Ca(OCl) ₂	Cam, porselen, kauçuk	Beyaz taneli toz	70 klor	Çamur oluşumu fazladır ve patlayıcıdır

Serbest klor suya eklendiğinde su ile meydana gelen tepkime aşağıdaki gibidir;



Daha sonra zayıf bir asit olan hipoklorit asidi (HOCl), H⁺ ve hipokloröz aside (OCl⁻) ayrışır.

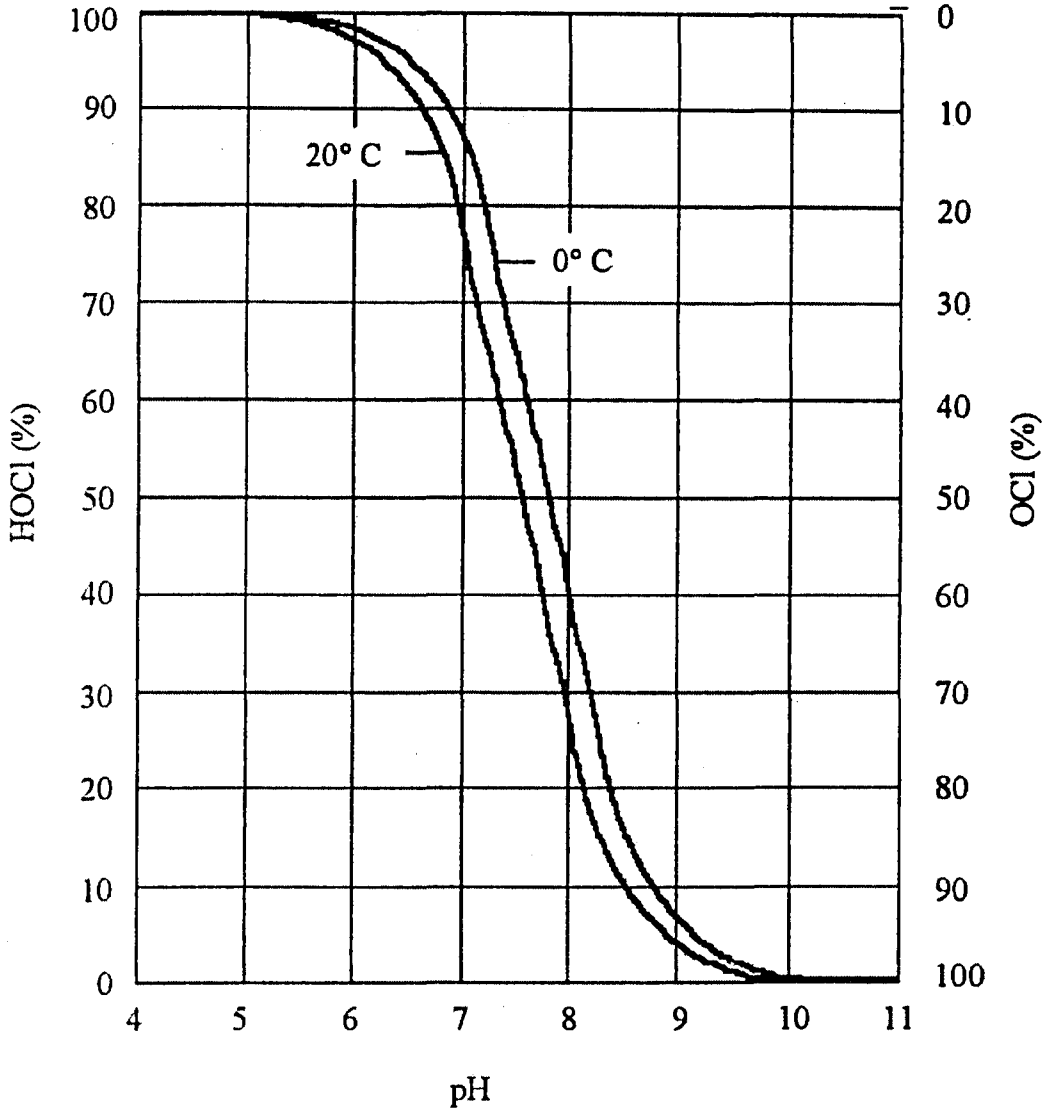


Bu ayrışmanın düzeyi ortamın pH' ı ile ilişkilidir. (Şekil 4.1)

Oluşan hipokloröz asit zayıf bir asittir ve pH<6 değerlerinde çok az çözünür. Hipoklorit asit ise kuvvetli bir asittir ve bu yüzden 4.7 numaralı tepkimenin sola doğru yönelmesi istenir. Bu ise ancak düşük pH değerlerinde mümkün olmaktadır [20].

Hipokloritler, sodyum hipoklorit çözeltisi ve yüksek kaliteli kuru kalsiyum hipoklorit formunda kullanılırlar. Hipokloritler çok kuvvetli yükseltgendirler. Sodyum hipoklorit son derece kararsız bir bileşiktir. Isı, ışık, depolanma süresi ve demir gibi safsızlıklar bozunmasını hızlandırmaktadır. Kalsiyum hipoklorit de normal atmosferik koşullar altında kararsızdır. Terebentin, yağ veya suyla karıştığında bozunmaya uğrayabilir. Bu nedenle kuru yerlerde depolanmalıdır [22].

Sodyum hipoklorit örneğin atık su dezenfeksiyonunda olduğu gibi büyük miktarlarda ihtiyaç duyulduğunda, kalsiyum hipoklorit ise sınırlı kullanımın gerekli olduğu durumlarda kullanılır. Her ikisi de suda hipoklorit iyonu oluşturmak üzere çözünürler;

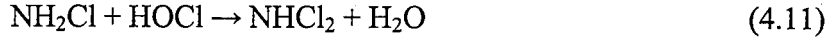


Şekil 4.1. HOCl ve OCl⁻ nin pH ile değişimi [17]

Çözünen iyon denklemlerden görülebileceği gibi hidrojen iyonları ile bir denge oluşturacaktır. Bu dengenin klorür ya da hipoklorit eklenmesine bakılmaksızın suda oluşacağını söyleyebiliriz. Bunlardan birinin eklenmesiyle oluşacak temel fark pH' da olacaktır. Klor pH' ı düşürürken hipoklorit yükseltmektedir, bu da denge halindeki OCl⁻ ve HOCl miktarlarındaki değişim şeklinde etkiyecektir [23].

Ortamdaki hipoklorit asit ve hipoklorit iyonu toplamı "serbest kullanılabilir klor" olarak adlandırılır.

Eğer ortamda amonyak varsa, monokloramin (NH_2Cl), dikloramin (NHCl_2) ve trikloramin (NCl_3) oluşur. Bu bileşiklerden monokloramin ve dikloramin toplamı “birleşik kullanılabilir klor” olarak adlandırılır [20]. Kloraminlerin oluşum tepkimeleri aşağıda gösterilmiştir;



Bu tepkimeler, en önemlileri pH, sıcaklık ve tepkimeye giren maddelerin miktarları olan çeşitli etkenlere bağlıdır. Örneğin 6.5’ tan yüksek pH değerlerinde ortamda monokloramin daha çok bulunacaktır. Kloraminler kararlı bileşiklerdir ve su dağıtım sistemlerinde yeniden büyümeye karşı sürekli koruma sağlamaktadır. Kloraminler de dezenfektan olarak kullanılmaktadır [24].

Kloraminler klordan daha yavaş tepkimeye girdiği için suda daha geç tükenmektedirler. Kloraminler suyun ve atık suyun pH’ ından etkilenmezler. Kloraminler balıklar için toksik maddelerdir ve bu nedenle çıkış suyundan giderilmeleri gerekir. Atık suyun kloraminlerle dezenfeksiyonunu kontrol etmek zordur. Çünkü atık suda bulunan amonyağın derişimi çok değişken olabilmektedir [22].

Dezenfeksiyon gücü bazında serbest kullanılabilir klor ($\text{HOCl} + \text{OCl}^-$), birleşik kullanılabilir klordan ($\text{NH}_2\text{Cl} + \text{NHCl}_2$) yaklaşık 25-80 kat daha etkilidir. Aynı doz ve aynı düzey dezenfeksiyon için, birleşik kullanılabilir klor bileşikleri serbest kullanılabilir bileşiklerinden 100 kat daha fazla temas süresine ihtiyaç duymaktadır [20].

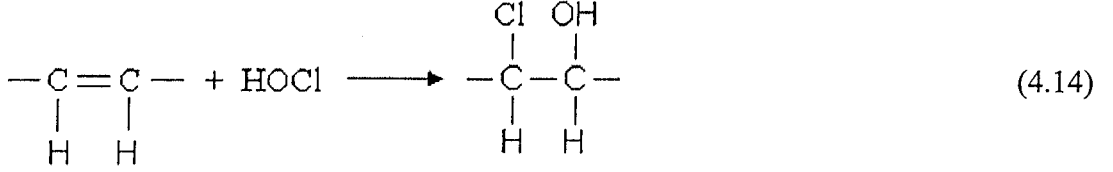
Klor çok çeşitli maddelerle, özellikle indirgen maddelerle tepkimeye girmektedir. Bu tepkimelerin büyük bir kısmı çok hızlı gerçekleşirken bazıları yavaştır. Klorun dezenfektan özelliğinin başarılı olabilmesi için bu yan tepkimeleri gerçekleştiren maddelerin klor ihtiyaçları önceden karşılanmalıdır. Bu tepkimeler sonucu oluşacak klorlu organik maddelerin insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinden dolayı çok dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir.

Hidrojen sülfür ile klor arasındaki tepkime bu tip tepkimelere bir örnektir;



Fe^{2+} , Mn^{2+} ve NO_2^- klor ile tepkimeye giren anorganik maddelere diğer örneklerdir.

Doymamış bağları bulunan organik maddelerde hipokloröz asidi ile tepkimeye girerek klor ihtiyacını arttırmaktadır [23].



Eğer dezenfekte edilecek su doğal olarak amonyak içeriyorsa, klor eklendiğinde ortamdaki klorun amonyak bileşiklerine oranı 5:1'e ulaşana kadar kloramin bileşikleri oluşur. Bu noktadan sonra klor eklenmesi yükseltgeme sonucu, ortamdaki kloramin bileşiklerinin azalmasına neden olur. Bu tepkime tamamlandığında ya da ortamdaki klorun amonyağa oranı 10:1'e yükseldiğinde, klor eklenmeye devam edilmesi ortamdaki serbest klor bileşiklerini arttırmaktadır. Serbest klor bileşiklerinin oluşmaya başladığı bu noktaya "kırılma noktası" denir.

Kırılma noktası klorlaması işleminin en önemli avantajı, dezenfektan olarak kloraminlerden çok daha etkili olan serbest klor bileşiklerinin ortaya çıkmasıdır[20].

4.2.1.1. Klorlama ile trihalometan oluşumu

Dünyada ve Türkiye' de pek çok su arıtma tesisinde dezenfektan olarak kullanılan klorun, sulardaki doğal organik maddelerle tepkimeye girerek "dezenfeksiyon yan ürünleri" olarak adlandırılan klorlu-organik bileşiklerin oluşumuna yol açtığı bilinmektedir.

Dezenfeksiyon yan ürünleri, organik maddedeki aktif kısımların halojen olarak adlandırılan klor, brom veya iyot ile yer değiştirmesi sonucunda meydana gelmekte olup, başlıcaları trihalometanlar (THMs), haloasetik asitler (HAA) ve haloasetonitriller (HAN)dir [25].

Klorlama ile oluşan en büyük ve en bilinen klorlu organik madde grubu halometanlar ve benzeri bileşiklerdir[26].

En sık rastlanılan THM bileşikleri; kloroform(CHCl₃), bromodiklorometan (CHBrCl₂), dibromoklorometan (CHBr₂Cl) ve broform (CHBr₃) olarak sıralanmakta olup, genellikle toplam olarak ifade edilmektedir.

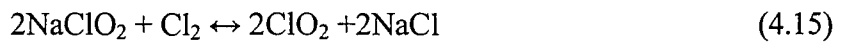
Sindirim sistemi kanserleri ile, içme suyunda düşük seviyede bulunan THM' lere uzun süre maruz kalınması arasında bir bağlantı olduğu bilinmektedir. Klorlanmış su içenler bağırsak ve mesane kanserine klorlanmamış su içenlere oranla daha yüksek oranda yakalanmaktadır. ABD Çevre Koruma Örgütü (USEPA) Ulusal Birincil İçme Suyu Kirletici Standartları' nda THM' lerin kanserojen oldukları ve karaciğer, böbrek ve sinir sistemi üzerinde olumsuz etkileri olduğunu belirtilmektedir [25].

THM oluşumuna neden olan başlıca organik fonksiyonlar asetil grubu içerenler veya yükseltgenme sonucu asetil grubu verenler, B-diketonlar ve hümik asitler gibi polihidroksibenzen grubu içeren maddeler bulunmaktadır. THM' lerin oluşumu sıcaklığa, pH ve klor derişimine bağlıdır. Ayrıca suda bulunan amonyak ve halojenür miktarı da oluşan uçucu organohalojenlerin miktar ve niteliğini etkiler [27].

1998 yılında USEPA tarafından yürürlüğe konulan talimatlarda THM sınır değeri 2000 yılı itibariyle 40 µg/L olarak belirtilmektedir. Avrupa Birliği' nin 1995 yılında öngördüğü yönergeyle, kloroform ve bromodiklorometan sınır değerleri sırasıyla 40 ve 15 µg/L olarak belirlenmiştir. Türkiye' de içme suyu standartlarında (TSE 266) bu yönde herhangi bir düzenleme bulunmamaktadır [25].

4.2.2. Klor dioksit ile dezenfeksiyon

Su dezenfeksiyonunda, genellikle dezenfektan olarak kullanılacağı zaman sodyum klorit ve klorun aşağıdaki tepkimesiyle üretilen kuvvetli bir yükseltgen olan klor dioksit de kullanılmaktadır. /



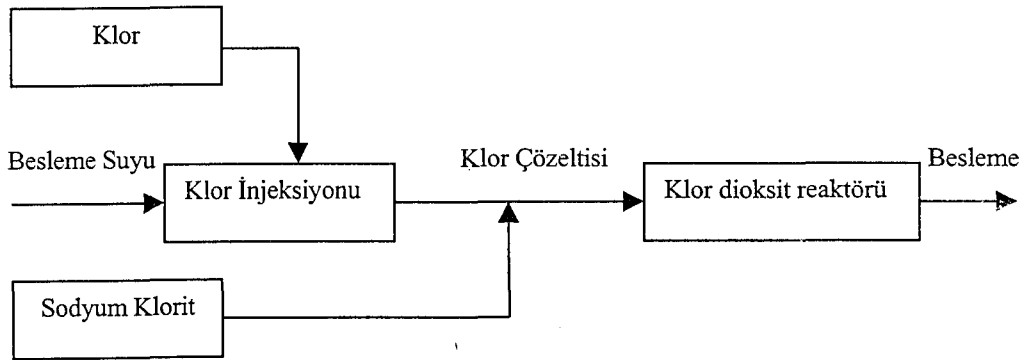
Klor dioksit genellikle asıl dezenfektan olarak kullanılır. Bakterileri ve kistleri inaktive eder. Klor dioksit dağıtım sistemlerinde dezenfektan olarak kullanıldığında yeteri kadar uzun bir kalıntı dezenfeksiyon kapasitesine sahip değildir. Klor

dioksinin klorla göre en önemli avantajı THM' ler oluşturmak üzere organik maddelerle tepkimeye girmemesidir [28].

Klor dioksinin dezenfeksiyon etkinliği klorun etkilendiği aralıktaki pH' larda değişmemektedir. Ayrıca klor dioksit demir ve manganın yükseltgenmesinde klordan daha etkilidir. Demir ve manganın giderimi için klor dioksit suya flokulasyon ve sedimantasyon süreçlerinde eklenmelidir [29].

Klor dioksit suyla tepkimeye girdiği zaman iki yan ürün oluşturmaktadır. Bu yan ürünler klorit ve klorattır. Bu bileşikler yüksek derişimlerde insanlar için sorun yaratabilir. Bu nedenle bir çok ülkede suya uygulanan klor dioksit dozu 1 mg/L olarak sınırlandırılmıştır, ancak bazı durumlarda bu doz iyi bir dezenfeksiyon sağlamak için yeterli olmayabilmektedir [28].

Klor dioksit kullanımının avantajlarından biri de kloraminler oluşturmak üzere amonyakla tepkimeye girmemesidir. Klor dioksit daha etkili bir dezenfektan olduğu için patojenlerin aynı miktarda inaktivasyonunu sağlamak için klordan daha düşük dozlarda kullanılmaktadır. Ayrıca klor dioksit klorüre karşı dirençli olan patojenlere karşı da etkilidir. Klor dioksit üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri Şekil 4.2' de gösterilmiştir. Bu sistem besleme suyu içindeki klorun ayrışmasını içermektedir. Reaktör veya üretici içindeki sodyum klorit ile temas ettirilerek bu iki akım tepkimenin gerçekleşmesi için karıştırılmaktadır. Eğer klor dioksit oluşturmak için optimum pH aralıklarında tepkimeyi kontrol etmek gerekiyorsa ya reaktör içinde ya da reaktör çıkışındaki boru hattında asit eklenebilir.



Şekil.4.2. Basit Klor Dioksit Sistemi (klor/klorit çözeltisi) [19]

Bütün bir klor dioksit sistemi klorlama ile karşılaştırıldığında işletimi ve bakımı nispeten daha karmaşıktır.

Sonuç olarak, klor dioksit evsel atık su arıtımında önemli bir geçmişe sahip değildir. Ayrıca klor dioksit yerinde üretilmelidir ve elementer klorun çok daha pahalıdır. Bununla birlikte, iki tehlikeli gaz kullanılmasından dolayı klor dioksit ile dezenfeksiyon emniyetle uygulanabilirlik açısından önemli sorunlara sahiptir [22].

4.2.3. İyot ve brom ile dezenfeksiyon

Brom ve iyot da diğer halojenler gibi dezenfeksiyon gücüne sahiptir. Dezenfektan olarak kullanılmaları maliyet gibi çeşitli nedenlerden dolayı sınırlandırılmıştır. Brom ve iyot kullanımı klorla karşılaştırıldığında 3-40 kat daha pahalıdır. Brom suda bir dereceye kadar çözünmesine rağmen elementer iyot suda az çözünür. Her iki halojende doğada düşük miktarlarda bulunmaktadır.

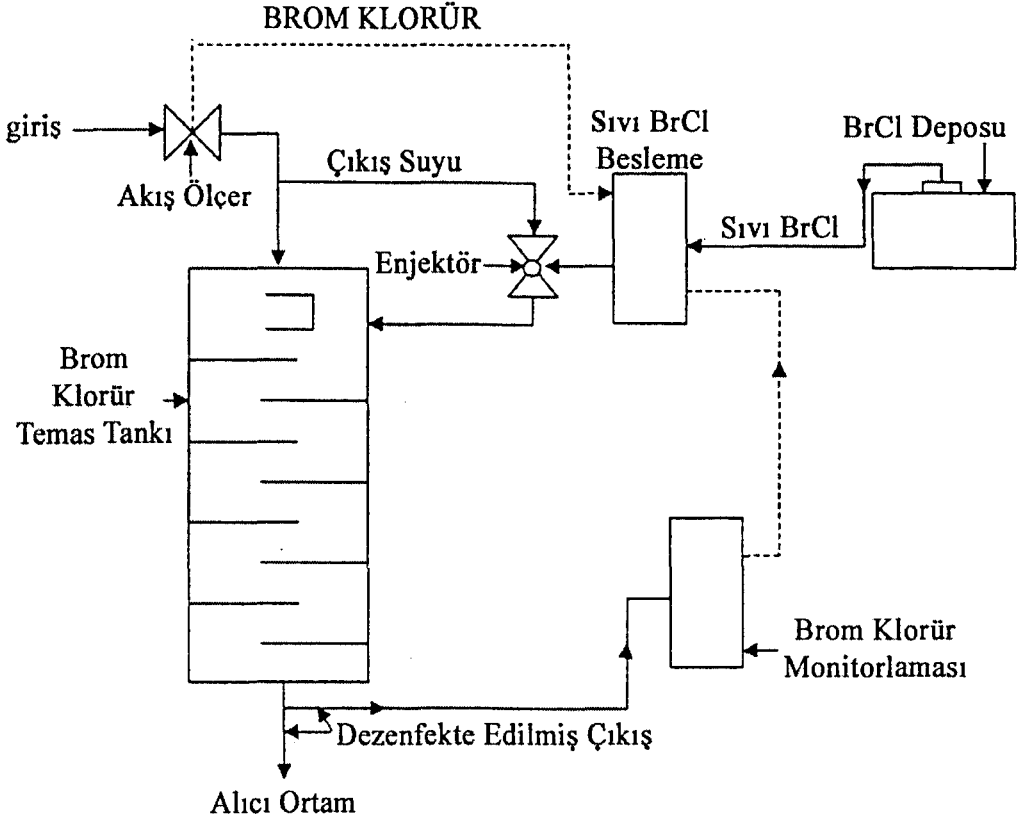
İyot oldukça etkili bir dezenfektandır ve kistlere ve sporlara karşı klor ve bromdan daha etkilidir. Hem ayrılmamış iyot, I_2 hem de hipoyotöz asiti, HOI dezenfeksiyon gücüne sahiptir. İyot organik maddeyle yavaş bir şekilde tepkimeye girer, fakat amonyakla tepkimeye girmeyerek iyotaminler oluşturmaz. İyot eksikliği bir çok hastalığa neden olmaktadır. En sık rastlanılan guatr hastalığıdır. Bu nedenle iyot eksikliği görülen sularda iyot ile dezenfeksiyon uygulamak daha uygun bir dezenfeksiyon yöntemi olmaktadır.

Brom dezenfeksiyon amacıyla kullanılacağı zaman genellikle brom klorür şeklinde uygulanır.



BrCl su ile karıştırıldığında hidrokarbonlar ve hipoklorik asit oluşturmaktadır. Brom klorür çok iyi bir dezenfektandır. Brom klorür atık suya eklendiği zaman meydana gelen tepkimeler klor eklendiği zaman meydana gelen tepkimelere benzerdir. En önemli fark kloraminlerin yerine bromaminlerin oluşmasıdır. Bromamin bileşikleri kloramin bileşiklerinden daha kararsızdır ve suda hemen yok olmaktadır. BrCl suya eklendiğinde hemen hipobromöz asite hidrolize olmakta ve amonyak içeren sulara uygulandığında mono- ve dibromaminler oluşturmaktadır. Brom klorür ile dezenfeksiyon USEPA tarafından atık su arıtımında uygun bulunmaktadır. BrCl yüksek pH seviyelerinde daha etkili olmaktadır. Klorla aynı miktarda patojen yok etmek için daha düşük dozlarda brom

klorür uygulanmaktadır. BrCl suya uygulandığında gerekli olan temas süresi de daha düşüktür, bu nedenle daha küçük temas odaları kullanılmaktadır. Sıvı BrCl deri ile temas ettiğinde yanmaya neden olmakta, düşük derişimlerdeki buharı göz ve solunum sistemi için tahriş edici olmaktadır. Özel olarak tasarlanmış bir besleme sistemi sıvı brom klorürü güvenli ve etkili bir biçimde uygulamak için geliştirilmiştir [22]. (Şekil 4.3)



Şekil 4.3. Sıvı Brom Klorür Besleme Sistemi [22]

4.2.4. Potasyum permanganat ile dezenfeksiyon

Potasyum permanganat ($KMnO_4$) ilk olarak 1900' lerin başında Londra' da kullanılmaya başlanan bir yükseltgendir. Bununla birlikte, 1960' larda tat ve koku kontrolündeki etkinliğinin farkına varılması ile geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Potasyum permanganat koyu mor kristaller şeklinde bulunur. Suya eklendiğinde su koyu mor bir renk almakta ve daha sonra yükseltgenme tamamlandıktan sonra bu

renk yok olmaktadır. 0.05 ppm' lik düşük derişimlerde bile $KMnO_4$ suya renk vermektedir. Bu nedenle yükseltgeme tepkimesinin tamamlanmasını sağlamak için $KMnO_4$ mümkün olduğunca arıtım sürecinin başlangıcında suya eklenmelidir. Potasyum permanganatın çözünme hızı sıcaklığa, partikül boyutuna, karıştırma hızına ve çözeltildeki diğer tuzların derişimine bağlıdır. $KMnO_4$ son derece reaktiftir ve hemen hemen tüm kimyasal tepkimeleri ısı yaymaktadır (Ekzotermik). Potasyum permanganat geniş bir mikroorganizma aralığına karşı etkilidir; bakteriler, mantarlar, virüsler ve algler. Potasyum permanganat klorla karşılaştırıldığında arıtılmamış sudaki tat ve kokuya neden olan birçok maddenin kontrolünde daha etkilidir [22].

4.2.5. Ozon ile dezenfeksiyon

Ozon daha önce bahsedilen diğer dezenfektanlardan daha kuvvetli bir yükseltgendir. 1906' dan itibaren kentsel ölçekteki içme suyu arıtma tesislerinde ozon kullanılmaktadır. Şu anda başta Fransa ve İngiltere olmak üzere 2000' den fazla su arıtma tesisinde dezenfeksiyon ve tat ve koku sorunlarını gidermek amacıyla uygulanmaktadır [29].

Ozon keskin kokusu olan kararsız bir gazdır. Ozon üç oksijen atomunun O_3 molekülü oluşturmak üzere birleşmesinden oluşan oksijenin bir allotropudur. Ozon kararsız olması nedeniyle kullanılacağı yerde üretilmelidir [28].

Ozon, havanın veya oksijenin ya elektriksel deşarja yada ultraviyole ışına maruz kalması ile üretilmektedir. Ozonun oluşumu 4.17 eşitliği ile verilmektedir.



Ozon üretim hızı oksijen derişiminin ve besleme gazındaki toz ve su buharı gibi safsızlıkların bir fonksiyonudur. Ozon üretmek için yaygın olarak horizontal tüp ozon üreticisi kullanılmaktadır. Yüksek bir alternatif akım, içleri metal kaplı olan cam dielektrik tüplere 6-20 kV aralığında değişen gerilimler üretmek amacıyla uygulanmaktadır. Ozon üreticisine giren gaz kuru olmalıdır. Ozon üretimi için gerekli enerji miktarı 15-20 w-h/g O_3 aralığında değişmektedir [29].

Ozonun uygulanmasındaki temel sorunlardan biri dozlama tekniğidir. Ozon suda az çözünmektedir. Bu nedenle ozon ya poröz seramikler, venturi injektörler

kullanılarak yada arıtılacak suyun altında bulunan sabit pervaneler sayesinde ozonca zengin hava injekte edilerek çok miktarda ozon kabarcığı yaratılarak gaz/sıvı emülsiyonu oluşturularak uygulanmalıdır. Bu yolla gaz/su ara yüzeyinde maksimum kütle transferi elde edilmektedir. Ozonlama için yaygın olarak kullanılan işletim biçimleri; (a) 5-15 dakikalık temas sürelerine ve 4,5-6 m. sıvı derinliğine sahip karşı akışlı havuzlarda difüzörler kullanılır, (b) “kısmi injeksiyon” , bu sistemde yüksek basınçlı akışa sahip bir miktar sıvı ozonca zengin çözelti üretmek amacıyla kullanılır, daha sonra bu çözelti arıtılacak suyun geri kalan kısmıyla karıştırılmaktadır ve (c) “toplam injeksiyon” bu sistemde ise tüm sıvı akışı injektör içinden geçmektedir. Tüm durumlarda salınan gazlar (bu gazlar hala bir miktar ozon içermektedir) ozon üreticisine geri döngü yapılabilir [30].

Ozonun oksijene ayrışma hızı oldukça yüksektir. Bu nedenle suda uzun süre serbest ozon sağlamak imkansızdır. Ozonun yarı ömrü tipik koşullar altında yaklaşık 20 dakikadır. Bu nedenle bakterilerin dağıtım sistemlerinde yeniden çoğalmasını önlemek için ikinci bir dezenfektan uygulanmalıdır.

Ozon bir çok organik maddeyle tepkimeye girmektedir. Ozon organik maddeyi ya doğrudan ayrıştırır yada ozonun ayrışması ile oluşan serbest radikal türler (hidroksil radikali gibi, OH) organik maddeyi yükseltmektedir. Su arıtımında ozonlama ile oluşan insanlar için tehlike yaratabilecek önemli yan ürünler organik peroksitler, doymun olmayan aldehitler ve epoksitlerdir. Diğer taraftan, ozonlama klorlama ile oluşabilen halojenmiş birçok yan ürünü yok etmektedir, örneğin THM, haloasetik asitler ve haloasetonitriller [29].

Ozon diğer dezenfektanlarla karşılaştırıldığında daha düşük derişimlerde uygulanmaktadır. Çizelge 4.2’ de bakteri + virüs ve bakteriyel sporların %99’unu inaktive etmek için gerekli dezenfektan derişim değerleri gösterilmektedir.

Ozonun dezenfeksiyon kapasitesini etkileyen faktörler aşağıdaki gibidir;

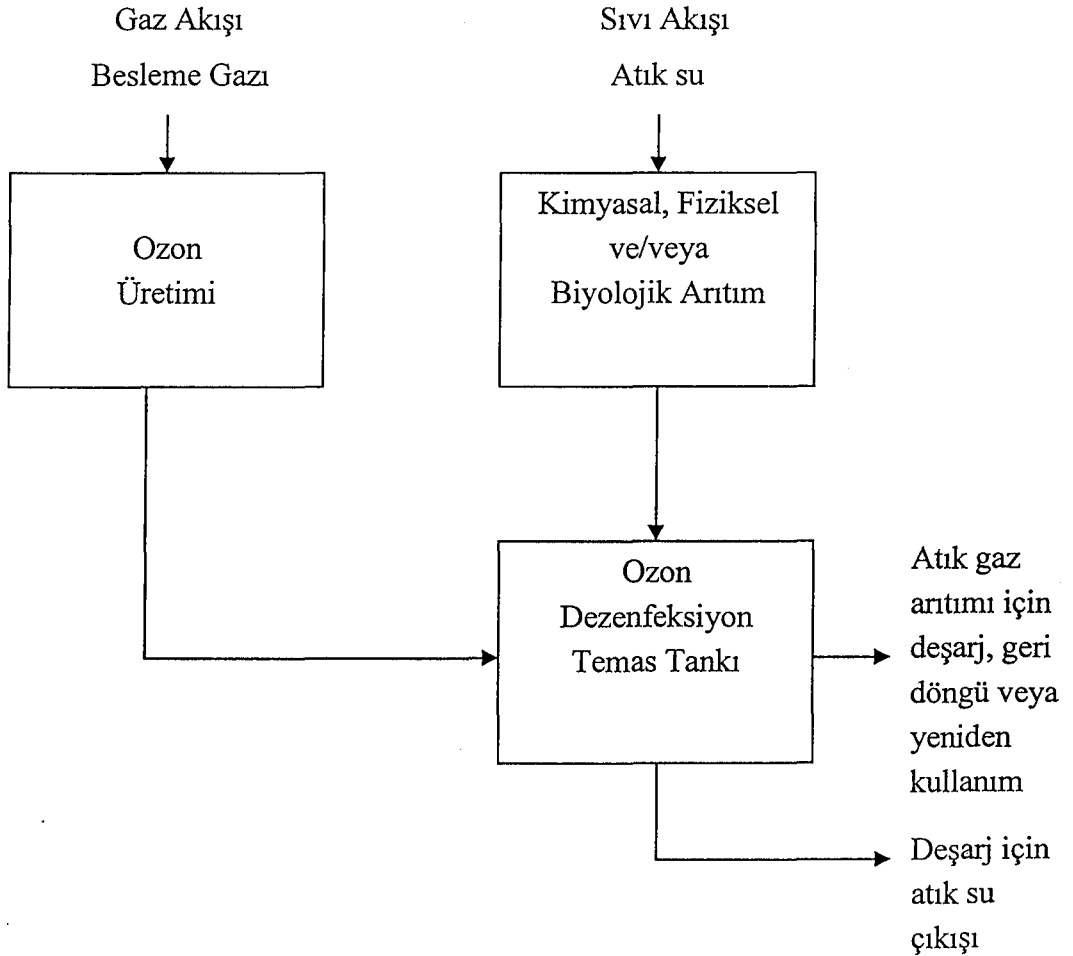
- Ozon dozu,
- Temas süresi,
- Askıda katı maddeler,
- pH,
- Kimyasal oksijen ihtiyacı,
- Organik karbon,

- Sıcaklık,
- Temaslaştırmacı tasarımı.

Çizelge 4.2. Bazı organizmaların %99' unu 10 dk içinde inaktive etmek için gerekli dezenfektan derişimleri (mg/L) [27]

Dezenfektan	Enterik bakteriler	Virüsler	Bakteriyel sporlar
O ₃	0.001	0.10	0.2
HOCl	0.02	0.40	10
OCl ⁻	2	>20	>1000
NH ₂ Cl	5	100	400
Serbest klor (pH 7.5)	0.04	0.8	20

Bir ozonlama sistemi tipik olarak (1) hava hazırlama veya oksijen besleme, (2) elektrik güç kaynağı, (3) ozon üretme, (4) ozon temas ettirme ve (5) ozon temas ettirici çıkış gazının yok edilmesinden oluşmaktadır. Şekil 4.4.'te bir ozon dezenfeksiyon sürecinin sıvı ve gaz akım şeması görülmektedir.



Şekil 4.4. Ozon ile dezenfeksiyon süreci gaz ve sıvı akış şeması [22]

Sonuç olarak ozonlama sürecinin temel avantajları şunlardır;

- Virüsleri ve bakterileri dezenfekte etme özelliği mükemmeldir,
- Daha kısa işlem süresi uygulanmaktadır,
- Ozonla dezenfekte edilen çıkış suyu yüksek çözünmüş oksijen derişimine sahip olduğundan alıcı ortam kalitesini iyileştirir,
- Ozonla arıtılan suda toplam çözünmüş katı derişimi artmaz,
- Atık su kalitesini iyileştirir [22].

4.2.6. UV ile dezenfeksiyon

UV ile dezenfeksiyon etkili bir fiziksel dezenfeksiyon yöntemidir. UV radyasyonu bakteri, virüs ve diğer mikroorganizmaların nükleik asitlerini doğrudan bozmakta ve sonunda mikroorganizmaların ölümüne neden olmaktadır.

UV dezenfeksiyonu 19. yy' in sonlarında bir dezenfeksiyon yöntemi olarak benimsenmesine rağmen klorun avantajları nedeniyle yaygın bir kullanım alanı bulamamıştır. Bununla birlikte son yıllarda toksik klor kalıntılarının deşarjındaki endişeler nedeniyle atık su alanındaki uygulamaları artmaktadır.

Ultraviyole ışın yüksek seviyede mikroorganizma yok etme kapasitesine sahiptir. UV ışını hastanelerde, biyolojik deney yapılan tesislerde vb. yerlerde kullanılmaktadır. Atık su arıtımında, tesisten çıkan su 250-270 nm dalga boyuna sahip ultraviyole ışına yeterli bir süre maruz bırakılmaktadır.

UV ile dezenfeksiyon sürecinin etkinliği aşağıdaki faktörlere bağlıdır;

- UV ışın yoğunluğu,
- Temas süresi,
- Atık su kalitesi (bulanıklık, toplam askıda katı madde).

Dezenfekte edilecek atık suyun bulanıklığı önemli sorunlar yaratabilmektedir. Eğer dezenfekte edilecek suyun kalitesi kötüyse, UV ışını katılara nüfuz edemez ve sürecin etkinliği azalır.

Bir UV sisteminin işletiminde kullanılan UV lambalarının değiştirilmesi gerekli olacağından kolayca elde edilebilecek olanının seçilmesi gerekmektedir. UV dezenfeksiyonu için en uygun lambalar 7500 saatlik bir işletim ömrüne sahip olan ve yüksek miktarda ozon veya hidrojen peroksit üretmeyen lambalardır. Eğer atık

su arıtımında, UV lambaları suya daldırılarak kullanılacaksa bu lambalar kuvarz tüpler içine yerleştirilmelidir. Böylece UV lambasından yayılan ışın korunur ve değiştirilmesi ve temizlenmesi daha kolay olur [22].

UV ile dezenfeksiyonda kullanılan en yaygın lamba tipi düşük basınçlı ark lambalardır. Bu lambaların maksimum çıkış gücü ilk 100 saatlik kullanım süresi boyunca değişkendir. % 100' lük çıkış gücü 100 saatlik işletimden sonra elde edilmektedir. Lambaların mikroorganizmaları yok etme etkinliği zamanla azalmaktadır.

✓ Bu durum tasarım sırasında göz önüne alınmalıdır.

UV ışımına maruz kalan mikroorganizmaların inaktivasyon hızı birinci basamak bir tepkime olarak kabul edilmektedir;

$$N=N_0e^{-kEt} = N_0e^{-kD} \quad (4.18)$$

burada,

N ve N_0 = Başlangıçtaki ve t süresindeki bakteri derişimi veya miktarı,

k = İnaktivasyon katsayısı,

E = Reaktördeki ortalama UV yoğunluğu,

t = Reaktördeki ortalama bekleme süresi,

D = Radyasyon dozu [29].

Sonuç olarak;

- UV ile dezenfeksiyon çevresel olarak güvenli, kimyasal olmayan, toksik yan ürünler üretmeyen fiziksel bir süreçtir.
- UV radyasyonu bakteri ve virüsleri yok etmede etkilidir.
- Ozon ile dezenfeksiyonda olduğu gibi UV ile dezenfeksiyonda da mikroorganizmaların yeniden çoğalmasını engellemek için ikinci bir dezenfektan uygulanmalıdır.
- UV dezenfeksiyon sisteminin işletimi ve bakımı nispeten kolaydır.
- UV ile dezenfeksiyon birkaç dakikada yeterli dezenfeksiyon seviyesini sağlar, oysa klorlamada bu süre 1/4-1/2 saat arasındadır.
- UV ile dezenfeksiyon klorlama sırasında meydana gelen toplam çözünmüş katılarda artış oluşturmaz.
- UV ile dezenfeksiyonda aşırı dozlama gibi bir endişe yoktur.

- UV ile dezenfeksiyonun kontrolü kolaydır ve dezenfeksiyondan çıkan suyun kalitesinde fazla bir değişim gözlenmez.
- UV ile dezenfeksiyon bulanıklık sorunundan etkilendiği için ikincil arıtmadan çıkan atık sulara uygulanması sınırlı olmaktadır.
- UV dozajı, dezenfeksiyon verimini etkilemektedir. UV dozajı, değişik sayıda lamba kullanılarak veya UV lambaları etrafındaki hidrolik bekleme süreleri ayarlanarak kontrol edilebilmektedir.
- UV ile dezenfeksiyon klorlama için iyi bir alternatiftir.
- UV ile dezenfeksiyonunun temel avantajı, standart dezenfeksiyon yöntemlerinden klorun kullanım ve taşınım gibi sorunları eleyen, ışığa dayanan bir yöntem olmasıdır [22].

5. ELEKTROKİMYASAL SU DEZENFEKSİYONU

İnsan sağlığı açısından suyun dezenfeksiyonu önemlidir. Ayrıca evsel su filtrasyon birimlerindeki gibi bakteriyolojik büyüme içme suyu dağıtım sistemlerinde önemli bir sorundur. Bakteriyel kirlenmenin önüne geçilmesi ve mikrobiyolojik birikimin önlenmesi için temel strateji kimyasal dezenfektanların kullanılmasıdır. Genellikle bu amaç için klor kullanılmaktadır [31]. Bununla birlikte, klorun uygulanması ile içme suyunda trihalometanlar gibi dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşmasından endişe edildiği için kullanımına kısıtlamalar getirilmiştir. Bu nedenle dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumunu azaltan alternatif teknolojiler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

Su dezenfeksiyonu çeşitli kimyasal ve fiziksel süreçlerle gerçekleştirilebilmektedir. Fiziksel süreçler; UV, γ -radyasyonu ve X-Ray gibi elektromanyetik radyasyon ve ultrasonik uygulamaları, ısıtma ve bakterileri tutmaya elverişli filtrelerle filtrasyonu ve ters osmozu kapsarken kimyasal süreçler ise halojenler, ozon, hipohalöz tuzları, enzimler ve gümüş katyonları ile suyun arıtımını kapsamaktadır.

Yukarıdaki süreçlerden herhangi birinin seçimi; arıtılacak suyun kalitesine ve miktarına, arıtmadan çıkan sudan istenen kalite özelliklerine, sürecin ekonomikliğine ve emniyetle işletilebilirliğine bağlıdır. Doğrudan enerji tüketimi (UV radyasyon uygulamasında olduğu gibi) yada dolaylı tüketim olarak (dezenfeksiyon maddelerinin üretimi, taşınması ve depolanması gibi) hesaplanan gerekli enerjinin maliyeti dezenfeksiyon sürecinin seçiminde oldukça önemlidir ve içme suyu arıtımında olduğu gibi yüksek miktarda suyun arıtımının gerekli olduğu yerlerde maliyet çok daha fazla önem kazanmaktadır. Daha küçük sistemler için genellikle başlangıç maliyeti, emniyet, güvenilirlik ve işletim uygunluğu dezenfeksiyon sürecinin seçiminde öne çıkan özelliklerdir.

Su dezenfeksiyonu elektrokimyasal olarak da gerçekleştirilebilmektedir. Son zamanlarda bu konu üzerinde yapılan çalışmalar artmaktadır. Suyun elektrokimyasal dezenfeksiyonu en az uygulama alanı gerektiren dezenfeksiyon sürecidir. Elektrokimyasal süreçle yapılan dezenfeksiyonun en önemli avantajı, dezenfekte etme özelliğine sahip kimyasalların kullanılacağı yerde üretilmesidir.

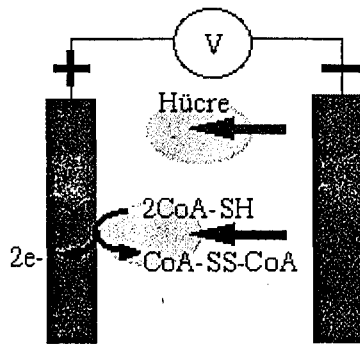
Böylece klorlamada endişe yaratan klorun depolanması ve taşınması sırasında meydana gelebilecek tehlikelerin önüne geçilmektedir. Elektrokimyasal su arıtımı bakır, civa, kurşun, nikel, demir gibi ağır metal katyonlarını, sülfat ve fosfat gibi iyonik kirleticileri ve sürecin elektroyükseltgeme veya elektroindirgeme etkisinden dolayı organik bileşikleri gidermek için de kullanılmaktadır. Elektrokimyasal su arıtımı suyun bulanıklığını azaltırken tat ve kokusunu da iyileştirmektedir.

Elektrokimyasal dezenfeksiyonda doğru akım veya düşük veya yüksek frekanslı (0,5-800 Hz) alternatif akım uygulanabilmektedir. Fakat yapılan çalışmalarda doğru akımın dezenfeksiyonda alternatif akımdan çok daha etkili olduğu bulunmuştur. Elektrokimyasal su dezenfeksiyonunda elektrot malzemesi olarak grafit, platinlenmiş titanyum, granüler aktif karbon, aktif karbon lif ve gümüş kullanılabilir. Bazı durumlarda NaCl ve NaBr gibi maddeler suya eklenerek sürecin etkinliği artırılmaktadır.

Elektrokimyasal su arıtımı ile boyutları virüslerden bakteri ve algelere kadar değişen yaklaşık 40 tür mikroorganizma türünü başarılı olarak sudan giderilebilmektedir [32].

Elektrokimyasal su dezenfeksiyonunun etki mekanizması temel olarak bakterilerin anotta direkt olarak yükseltgenmesine yada elektrokimyasal olarak bir yükseltgen üretilerek bakterilerin elektrokimyasal reaktörde indirekt yolla yükseltgenmesine dayanmaktadır.

5.1. Direkt Yükseltgeme ile Elektrokimyasal Dezenfeksiyon



Şekil 5.1. Hücre ve elektrot arasındaki direkt elektron transferine dayanan elektrokimyasal su dezenfeksiyonu [33]

Direkt yükseltgeme ile elektrokimyasal dezenfeksiyonda, elektrokimyasal reaktöre sabit gerilim uygulanması ile bakteri hücrelerinin solunum aktivitesinin azalması sağlanmakta ve sonuçta hücre ölümüne sebep olunmaktadır. Bu yöntem hücre içi koenzim A' nın elektro yükseltmesine dayanmaktadır. Koenzim A disülfid bağ oluşumu ile koenzim A dimer' e elektrokimyasal ve tersinmez olarak dönüşmektedir. Bu dezenfeksiyon yöntemi toksik maddeler üreten diğer elektrokimyasal dezenfeksiyon yöntemlerinden farklıdır [34].

5.2.İndirekt Yükseltgeme ile Elektrokimyasal Dezenfeksiyon

İndirekt yükseltgeme ile elektrokimyasal dezenfeksiyonun prensibi elektrokimyasal bir hücrede bir yükseltgen üretilmesine dayanmaktadır. Üretilen yükseltgen de genellikle klordur. Suda her zaman bulunan klorür elektrokimyasal olarak yükseltgenerek yada suya ilave edilen sodyum klorür ile klor veya hipoklorit üretilerek kirleticilerin dezenfeksiyonunda kullanılabilir.

Suda bulunan çok düşük klorür içeriği bile aktif klor üretimi sağlayabilir. Üretilen bu klor da içme suyu dezenfeksiyonu için yeterlidir. Aşağıdaki çizelgede suda bulunan klorür derişimine bağlı olarak üretilen klor hızını göstermektedir. Çizelgede verilen değerler 4 paralel elektrot içeren silindirik hücre ile yapılan tipik bir flow-through deneyinden elde edilmiştir (Elektrot malzemesi aktif titanyum 4 cmx10 cm) [35].

Çizelge 5.1.Bir flow-through hücresinde klorür derişimine bağlı olarak aktif klor oluşumu [35]

Cl ⁻ derişimi (mg/L)	12	25	50	100	200	500
Aktif klor (mg/dk)	0.9	1.5	2.2	4.3	7.9	13.0

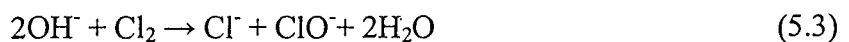
Klor üretiminde anotta oluşan tepkime aşağıdaki gibidir;



Katot tepkimesi ise;



şeklindedir. Çözeltide gerçekleşen tepkime,



şeklindedir. Hipoklorit ve serbest klorun her ikisi de dezenfektandır ve yükseltgen özellik taşımaktadırlar.

Atık sular genellikle düşük derişimlerde kirletici içermektedirler. Bu seyreltik atık sular nedeniyle elektrotta gerçekleşen tepkime kütle aktarımı ile sınırlıdır. Eğer atık suya yemek tuzu gibi pahalı olmayan maddeler eklenirse 5.1 tepkimesi gerçekleşir ve oluşan yükseltgenler seyreltik atık su ile tepkimeye girer. Böylece artım sadece hücrede değil depolama tanklarında da sürer [36].

Ayrıca elektrokimyasal dezenfeksiyon aşağıda belirtilen maddelerin reaktörde oluşması ile de meydana gelebilir.

- Elektrokimyasal süreçlere de katılan aktif oksijen atomları anotta üretilir;



Bakteriler üzerine dezenfeksiyon etkisi çok kısa süre aktif olan ve suda bulunmayan oksijen radikali sayesinde elektrot yüzeyinin çevresinde oluşmaktadır. İşlem tamamlandıktan sonra bakiye dezenfeksiyon kapasitesi beklenmez.

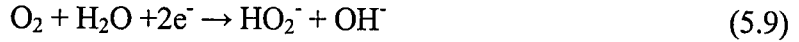
- Bir takım elektrolitleri içeren suların elektrolizi sırasında bir miktar ozon üretilmektedir, örneğin sülfürik asit. Bu durumda anotta üretilen ozon aşağıdaki tepkimelere katılır.



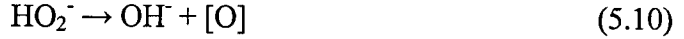
Serbest radikaller olan HO_2 ve OH^- kısa ömürleri boyunca kuvvetli bir dezenfeksiyon etkisi göstermektedir. Ozonun dezenfeksiyon etkisi tüm su kütlelerinde meydana gelebilir ve bakiye dezenfeksiyon kapasitesi az miktarda da olsa beklenir.

- Suda bulunan karbonat ve sülfat iyonları; bakterileri yükseltgemek için mükemmel maddeler olan perkarbonat ve persülfat şekline (anotta yükseltgenerek) dönüşebilmektedir. Bunun tüm su kütlelerinde meydana gelmesi ve az miktarda da olsa bakiye dezenfeksiyon kapasitesi beklenmektedir.
- Öldürücü türler, katoda difüzyon yoluyla aktarılan moleküler oksijenin su ile

sayesinde katotta da üretilebilir. Hidrojen peroksit iyonları aşağıdaki tepkimede ki gibi üretilir;



Hidrojen peroksit iyonları kısa ömürlü ve kararsız olan çok aktif dezenfeksiyon maddeleridir. Bu iyonlar aktif oksijen şekline dönüşebilir – çok aktif bir dezenfektan – veya aşağıdaki tepkimede oluşması istenmeyen OH^- iyonu verecek şekilde indirgenmeye uğrayabilir.



Tüm su kütleğinde meydana gelen dezenfeksiyon etkisi kısa ömürlüdür ve az miktarda da olsa bakiye dezenfeksiyon kapasitesi bu süreç için oluşabilmektedir [32].

5.3. Elektrokimyasal Dezenfeksiyon ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Su dezenfeksiyonu ile ilgili oldukça fazla sayıda çalışma yapılmasına rağmen elektrokimyasal su dezenfeksiyonu ile ilgili yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Gerçekleştirilen çalışmalar uygun çalışma parametrelerini belirleme ve gerçek bir işletme de uygulanabilirliği üzerine olmaktadır.

Patemarakis ve Fountoukidis [32] tarafından yapılan çalışmada yüksek miktarda koliform ve fekal streptokok ile kirlenmiş su, polaritesi sıra ile değişen titanyum elektrotlar kullanılarak suya herhangi bir kimyasal madde eklenmeden elektrokimyasal bir hücrede arıtılmıştır. Çalışmanın amacı sürecin etkinliğinin kanıtlanması; arıtım süresi, bakteri derişimi ve yöntemin etkinliği üzerine akım yoğunluğu gibi bazı parametrelerin etkisinin gösterilmesi, bakterilerin yok olma kinetik modelinin bulunması ve elektrokimyasal arıtım tamamlandıktan sonra kalır dezenfeksiyon kapasitesinin yeterli olup olmadığının belirlenmesidir. Çalışmalarda elektrokimyasal hücreye doğru akım uygulanmıştır.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan su Atina yakınlarındaki bir baraj gölünden alınmıştır. Bu suya çeşitli miktarlarda koliform ve fekal streptokok eklenmiştir. Daha sonra bu su örneklerine 5x5 cm' lik titanyum elektrotlar kullanılarak farklı akım yoğunlukları kesikli sisteme uygulanmıştır. Uygulanan akım yoğunlukları 2,5-

5 mA/cm² aralığında arıtım süresi ise 5—30 dakika aralığındadır. Arıtmadan sonra suda bulunan canlı bakteriler membran filtre yöntemiyle sayılmıştır. 2,5 mA/cm² lik akım yoğunluğu 30 dk süreyle uygulandıktan sonra canlı hücreye rastlanmamıştır. Sonuç olarak süreç toplam koliform ve fekal streptokok' la yüksek miktarda kirlenen suyun arıtımında etkili bulunmuştur.

Yapılan bu çalışmada buluna bakterilerin yok olma kinetik modeli aşağıdaki gibidir;

$$\alpha = k.i^2.t \quad (5.12)$$

Burada;

α = Dezenfeksiyon faktörü

k = Sistemin karakteristik sabiti

i = Akım yoğunluğu

t = Arıtım süresidir.

Ayrıca deneyler sonucunda süreç, bakiye dezenfeksiyon kapasitesi de göstermiştir.

Matsunaga ve ark. [37] tarafından yapılan çalışmada ise içme suyunun elektrokimyasal dezenfeksiyonu araştırılmıştır. Deneylerde bakteri türü olarak *E. coli* kullanılmıştır. Elektrokimyasal reaktörde çalışma ve karşı elektrot olarak karbon kumaş elektrotlar, referans elektrot olarak ise doygun kalomel elektrot kullanılmıştır. İlk olarak cm³ başına 10² hücre içeren hücre süspansiyonu elektrokimyasal reaktörde inkübe edilerek SCE' ye(Doygun kalomel elektrot) karşı 0,7 V' luk sabit bir gerilim uygulanmış ve bunun sonucunda 10 dk sonunda hayatta kalma oranı % 2' ye düşmüştür.

Daha sonra reaktöre uygulanan gerilimin hayatta kalma oranına etkisi incelenmiştir. 10² hücre/cm³' lük süspansiyon 6.0 sa⁻¹, lik bir seyreltme hızında reaktörden geçirilirken SCE' ye karşı uygulanan gerilim 0,5 V' a yavaş yavaş arttırıldığında hayatta kalma oranında azalma gözlenmiştir. SCE' ye karşı 0,6 V' un üzerinde gerilim uygulandığında hayatta kalma oranı hızla azalmış, 0,7 V' un üzerindeki gerilimlerde ise % 5' in altına düşmüştür.

Uygulanan bu süreçte dezenfektan üretiminin olup olmadığının araştırmak için yapılan deneyde ise çalışma elektrotu olarak grafit elektrot, karşı elektrot olarak platin tel, referans elektrot olarak SCE ve mikrobiyolojik hücrelerin tespiti için

membran filtre kullanılmıştır. *E. coli* hücre süspansiyonu membran filtreden geçirilmiş ve grafit elektrota yapıştırılmıştır. SCE' ya karşı 0,6 ve 0,7 V' luk sabit gerilimler uygulandığında canlı hücre sayısı sırasıyla % 45 ve % 5' e düşmüştür. Grafit elektrot yüzeyi diyaliz membranı ile kaplanıp aynı işlemler tekrarlandığında ise canlı hücre miktarında azalma gözlenmemiştir. Bu durum hücre sayısındaki azalmanın hücreler ve grafit elektrot arasındaki direkt elektron transferi nedeniyle oluştuğunu göstermektedir.

Hayatta kalma oranı ve dezenfeksiyon hızı üzerine seyreltme hızının etkisinin incelendiği deneyde artan seyreltme oranı ile hayatta kalma oranının arttığı ve seyreltme hızının 6.0 sa⁻¹' den düşük olduğu zaman hayatta kalma oranının % 1' den az olduğu belirlenmiştir. Bir başka deneyde hücre derişiminin artırılması ile hayatta kalma oranı azalmıştır. Ayrıca *E. coli* hücrelerinin sürekli sterilizasyonu 24 saat süreyle karbon kumaş elektrotlu elektrokimyasal reaktörde başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Yapılan bir başka çalışmada yapışkan bir deniz bakterisi olan *Vibrio alginolyticus* düzlem esaslı grafit elektrot (BPG) ve grafit silikon elektrot (GSE) üzerinde elektrokimyasal dezenfeksiyonu incelenmiştir. Tüm deneyler steril deniz suyunda gerçekleştirilmiştir. BPG elektrot kullanılan elektrokimyasal dezenfeksiyonda BPG elektrota 10⁵ hücre içeren membran filtre tutturulmuş ve 0-1,5 V aralığında sabit gerilimler 20 dk süreyle uygulanmıştır. Hayatta kalma oranı 0-0,6 V aralığında değişmezken bu gerilimden yüksek gerilimler uygulandığında hızla azalmıştır. Yaklaşık 0,8 V gerilim uygulandığında canlı bakteri oranı % 13' e düşmüş ve 1 V uygulandığında ise ortamda canlı bakteri kalmamıştır. Dezenfeksiyon CoA' nın elektrokimyasal dimerizasyonu ile gerçekleşmektedir.

GSE kullanılarak yapılan deneyde ise sistem potentiostattan, referans elektrot olarak SCE' den, karşı elektrot olarak karbon liften, çalışma elektrotu olarak GSE' den ve bir tuz köprüsünden oluşmaktadır. 10⁵ hücre/ml içeren hücre süspansiyonuna GSE daldırılmış 60 dk süreyle karıştırılarak hücrelerin elektrota adsorbe olmaları sağlandıktan sonra süspansiyondan çıkarıldıktan sonra steril deniz suyu içinde 1-1,5 V aralığında sabit gerilimlere 10 dk süreyle maruz bırakılmıştır. Elektrot yüzeyine (6,76 cm²) adsorbe olan başlangıçtaki bakteri miktarı 1800 hücre/cm²' dir. SCE' ye karşı 0,8 V' un altında gerilimler uygulandığında canlı hücre sayısı değişmemiş 1

ve 1,5 V uygulandığında ise canlı hücre sayısı sırasıyla 1300 ve 270 hücre/cm², e düşmüştür.

Canlı hücre miktarı üzerine zamanın etkisinin incelendiği deneyde 0-30 dk zaman aralığında SCE' ye karşı 1,5 V gerilim uygulandığında canlı hücre miktarı hızla azalarak 10 dk sonra canlı hücrelerin sadece % 3' ü ortamda kalmıştır.

Ayrıca elektrokimyasal dezenfeksiyonda kalıntı klor derişimi ve pH değişimi de incelenmiştir. SCE' ye karşı sabit gerilimler steril deniz suyuna uygulandığında 1,6 V' tan düşük gerilimlerde kalıntı klor derişimi belirlenememiştir. pH değişimi de uygulanan gerilimlerde oluşmamaktadır. Bu sonuçlar GSE' nin dezenfeksiyon etkisinin pH değişimi veya klor üretimi ile etkilenmediğini göstermektedir [38].

Granüler aktif karbon (GAC) üzerine adsorplanmış olan bakterilerin elektrokimyasal olarak giderimi hakkında yapılan bir başka çalışmada GAC çalışma elektrotu, karbon lif karşı elektrot ve SCE referans elektrot olarak kullanılmıştır. GAC üzerindeki bakterilerin üzerindeki bakterilerin hayatta kalma oranlarının uygulanan gerilime bağlı olduğu belirtilmiştir. *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis* ve *Saccharomyces cerevisiae* hücrelerinin hayatta kalma oranı SCE' ye karşı sırasıyla 0,65-0,75-0,8 ve 1 V' luk gerilimler uygulandığında % 1' in altında olmaktadır. Ayrıca *E. coli* içeren musluk suyunun elektrokimyasal dezenfeksiyonu başarıyla gerçekleştirilmiştir. Musluk suyundaki hücre derişimi zamanla hızla azalmış ve GAC üzerindeki hücre sayısı hızla artmıştır. 5 saat sonunda musluk suyundaki *E.coli* hücre miktarı başlangıç hücre derişiminin % 1' inden düşüktür. SCE' ye karşı 0,7 V uygulandığında musluk suyundaki *E. coli*' nin ve GAC üzerindeki canlı hücre sayısının zamanla incelendiğinde hücre derişimi hızla azalmış ve sudaki *E. coli* sayısı % 1' in altına inmiştir [39].

Bir başka çalışmada aktif karbon lif (ACF) kullanılarak elektrokimyasal su dezenfeksiyonu gerçekleştirilmiştir. ACF çalışma elektrotu, karbon lif karşı elektrot ve SCE referans elektrot olarak kullanılmıştır. ACF üzerine adsorplanmış *E. coli* hücreleri üzerine uygulanan gerilimin etkisinin incelendiği deneyde 1x10³ hücre/ml' lik *E. coli* hücre süspansiyonu 0,1 g ACF ile inkübe edildiği zaman ACF reaktörüne çeşitli gerilimler uygulanmıştır. ACF üzerine adsorplanan canlı *E. coli* sayısı SCE' ye karşı 0,3 V uygulandığında 6,4x10³ hücre/g' dir. SCE 'ye karşı 0,8 V uygulandığında ACF üzerine adsorplanmış olan canlı hücre sayısı başlangıçtaki

hücre sayısının % 5' inden daha düşüktür. 1,2 V uygulandığında ise ACF üzerinde canlı hücreye rastlanmamıştır.

ACF reaktör kullanılan içme suyundaki bakterilerin sürekli elektrokimyasal dezenfeksiyonu çalışmasında 22 hücre/ml bakteri derişimine sahip su 12 saat süreyle 2 ml/dk' lık akış hızında reaktörden geçirilmiş ve 24 saat süreyle su akışı kesildikten sonra yeniden 6 saat boyunca 1 ml/dk' lık akış hızında su reaktörden geçirilmiştir. Bu süreç sırasında reaktöre 0,8 V uygulanmış, aynı işlemler gerilim uygulanmadan da tekrarlanmıştır. Sonuçta 0,8 V uygulanarak içme suyunun dezenfeksiyonu 42 saat süreyle başarılıdır [40].

Yapılan bir diğer çalışmada, deniz bakterisi olan *Vibrio alginolyticus*' un karbon kloropiren tabaka (CCS) elektrot ($10,6 \text{ cm}^2$) üzerinde elektrokimyasal olarak giderimi araştırılmıştır. SCE referans elektrot, karbon lif karşı elektrot ve CCS bir tuz köprüsüyle birleştirilerek çalışma elektrotu olarak kullanılmıştır. Belli derişimde bakteri içeren hücre süspansiyonuna CCS daldırılarak bakterilerin elektrot yüzeyine adsorplanması sağlandıktan sonra süspansiyondan çıkarılıp steril deniz suyuna daldırılarak canlı hücre miktarı üzerine gerilimin ve zamanın etkisi araştırılmıştır. Uygulanan gerilim aralığı 0-1,5 V, zaman aralığı ise 0-30 dk' dır. Gerilimin canlı hücre miktarı üzerine etkisinin incelendiği deneyde CCS' a adsorbe olan bakteri sayısı $4,5 \times 10^3$ hücre/ cm^2 ' dir. 20 dk süreyle farklı gerilimler uygulandığında 0,9 V' a kadar elektrot yüzeyindeki canlı hücre miktarı değişmemiş, 1,2 ve 1,5 V uygulanması ile canlı hücre miktarı sırasıyla $2,1 \times 10^3$ ve 8×10^2 hücre/ cm^2 ' ye azalmıştır.

Zamanın etkisinin incelendiği deneyde cm^2 ' si başına 5×10^5 hücre adsorplamış olan CCS' ye 1,2 V uygulandığında elektrot yüzeyindeki canlı bakteri sayısı hızla azalmış ve bakterilerin % 90' ı 20 dk sonunda giderilmiştir.

Süreç sırasında klor üretimi belirlenmemiştir. Sürecin dezenfeksiyon etkisinin, elektrot ve hücre arasındaki elektron transferine bağlı olduğu saptanmıştır [41].

Bir diğer çalışmada elektrokimyasal dezenfeksiyon sistemi potentiostattan, çalışma elektrotu olarak düzlem esaslı pirolitik grafit elektrottan, referans elektrot olarak SCE' den ve karşı elektrot olarak da karbon liften oluşmaktadır. Bu çalışmada, *Vibrio alginolyticus* hücreleri grafit elektrota adsorbe edilmiş, 0-1,5 V

aralığında gerilimler uygulanmış ve ölü ve canlı hücreler PI (propidyum iyodür) ve DAPI (4',6-diamidino-2-fenilindol) kullanılan direkt sayma yöntemiyle belirlenmiştir. Bu sayım yöntemi elektrokimyasal dezenfeksiyon uygulamasında hücrelerin doğrudan sayımı için geliştirilmiştir. SCE' ye karşı 0,7 V' tan düşük gerilimler uygulandığında ölü hücre oranı % 10' nun altındadır ve yaklaşık 0,8 V' tan yüksek gerilimlerde hızla artmaktadır. 1 V uygulandığında ise elektrot yüzeyinde canlı hücre kalmamaktadır.

Hücre canlılığı üzerine zamanın etkisi incelendiğinde, SCE' ye karşı 1 V uygulanması ile 5 dakika sonunda grafit elektrotta adsorplanmış olan bakterilerin tamamının öldüğü direkt sayım yöntemiyle belirlenmiştir [42].

İçme suyunun elektrokimyasal dezenfeksiyonu amacıyla gerçekleştirilen bir başka çalışmada, çalışma elektrotu olarak sıkıştırılmış ACF, karşı elektrot olarak elektroiletken polimer tüp ve referans elektrot olarak da SCE kullanılmıştır. ACF üzerindeki *E. coli* hücrelerinin elektrokimyasal dezenfeksiyonunda $2,3 \times 10^3$ hücre/ml' lik 500 ml hücre süspansiyonu 15 saat süreyle ACF reaktörde inkübe edilmiştir. İnkübasyondan sonra ACF reaktörünün çıkışındaki hücre sayısı $7,9 \times 10^3$ hücre/ml olmuştur. 0-1,5 V aralığındaki gerilimler ACF reaktöre uygulandığında canlı hücre miktarı başlangıç değerinin % 15' inden daha düşük olmuştur. 1,2 ve 1,5 V' ta ise artılan suda canlı hücre belirlenmemiştir.

ACF' deki bakteri hücrelerinin desorpsiyonunun incelendiği deneyde, 792 saat süreyle musluk suyu ACF reaktörden geçirilmiş ve artılmış sudaki canlı hücre miktarı artmıştır. Bunun nedeni, ACF üzerine ölü bakteri hücrelerinin birikmesidir. Bu birikimi önlemek için negatif gerilimler uygulanmış ve $-0,8$ V' ta ACF üzerine biriken ölü hücrelerin uzaklaştırılması sağlanmıştır.

Bu sonuçlar ışığında değişken gerilimler uygulanarak ACF reaktörde musluk suyunun sürekli dezenfeksiyonu başarılmıştır. Musluk suyunun başlangıçtaki bakteri derişimi 180 hücre/ml' dir. SCE' ye karşı sırasıyla $-0,8$ V ve 1 V' luk gerilimler 840 saat boyunca uygulanmıştır. İçme suyu 300 ml/dk akış hızında 12 saat reaktörden geçirilmiş, bu süre sonunda 12 saat su akışı kesilmiştir. Reaktör çıkışındaki bakteri derişimi daima 20 hücre/ml' den düşük bulunmuştur. Ayrıca, süreç sırasında pH' da ve klor derişiminde değişim gözlenmemiştir [31].

Yapılan bir başka çalışmada titanyum nitrit (TiN) elektrot kullanılmıştır. TiN elektrot yüzeyine adsorblanmış olan *Vibrio alginolyticus* hücreleri ($1,5 \times 10^7$ hücre/cm²) sabit gerilim uygulanarak dezenfekte edilmiştir. TiN elektrot çalışma elektrotu, platinyum tel karşı elektrot ve Ag/AgCl referans elektrottur. Ag/AgCl' ye karşı 10 ve 30 dk süreyle 0-0,8-1 V uygulanmış ve hayatta kalma oranı belirlenmiştir. Optimum hayatta kalma oranı Ag/AgCl' ye karşı 0,8 V, 30 dakika süreyle uygulandığında elde edilmiştir [43].

Bir diğer çalışmada, elektrot üzerine yapışan *Vibrio alginolyticus* hücrelerinin elektrokimyasal dezenfeksiyonu üzerinedir. İletken boya grafit ve karbon siyahının üretran reçine içine yayılması ile hazırlanmış daha sonra naylon üzerine kaplanmıştır. Elektrot hücre süspansiyonuna daldırılarak bakterilerin yüzeye yapışması sağlanmıştır. Elektrota yapışan hücre miktarı $1,9 \times 10^6$ hücre/cm²'dir. Daha sonra elektrot steril deniz suyuna daldırılarak 0-1,4 V aralığındaki gerilimler SCE' ye karşı 30 dakika süreyle uygulanmıştır. Canlı bakteri sayısı plaka sayma yöntemiyle belirlenmiştir. SCE' ye karşı 0,8 V uygulandığında hayatta kalma oranı % 65' e düşmüştür. 0,8 V' tan yüksek gerilimler uygulandığında hayatta kalma oranı hızla azalmış ve 1,2 V' ta 0' a düşmüştür. Ayrıca süreç sırasında pH değişimi ve klor üretimi gözlenmemiştir [44].

Düzlem esaslı pirolitik grafit elektrota ($1,78 \text{ cm}^2$) yapışmış olan *Nitzschia closterium* deniz bakterisinin (3×10^4 hücre/cm²) elektrokimyasal dezenfeksiyonunun araştırıldığı bir başka çalışmada referans elektrot olarak SCE ve karşı elektrot olarak da platinyum tel kullanılmıştır. Elektrota yapışmış canlı ve ölü *N. closterium* hücre miktarı TO-PRO-1 iyodür ile boyanarak direkt olarak belirlenmiştir. 0,9 V' un altındaki gerilimlerde ölü hücre miktarı düşük bir seviyede sabit kalmış 1 V' ta ölü hücre oranı % 98' e ulaşmıştır. *N. closterium* hücrelerinin elektrokimyasal olarak yok edilmesinin zamanla değişimi incelendiğinde ölü hücre oranı zamanla artmış ve 60 dakika sonunda % 98' e yükselmiştir [45].

İçme suyunun dezenfeksiyonunun araştırıldığı bir diğer çalışmada TiN (2 cm^2) elektrot kullanılmıştır. SCE' ye karşı 1,2 V' luk bir gerilim uygulandığında mikroorganizmaların hayatta kalma oranları % 40' ın altına düşmüştür. Uygulanan bu gerilimde pH' da değişim gözlenmemiştir. Ayrıca, 30 dakika süreyle SCE' ye karşı -0,6 V gerilim uygulanarak elektrot yüzeyindeki hücrelerin % 69' u

elektrostatik iteleme nedeniyle yüzeyden ayrılmıştır. Bu nedenle, çalışma ve karşı elektrot olarak TiN ağ kullanılan bir elektrokimyasal reaktör yapılmıştır. 73 hücre/ml bakteri derişimine sahip içme suyu 15 ml/dk'lık bir akış hızında sürekli olarak reaktörden geçirilmiştir. Arıtılmış sudaki canlı hücre derişimi 5 hücre/ml' nin altına inmiştir. Gerilim uygulanmadığı zaman 200 saatlik reaktör işletiminden sonra arıtılmış suda hücre derişimi zamanla artmış ve 441 saat sonra 2023 hücre/ml' ye yükselmiştir. Karşılaştırma yapmak için, Ag/AgCl' ye karşı 1,2 ve -0,6 V' luk gerilimler belirli aralıklarla değişken olarak TiN ağ çalışma elektrotuna uygulandığında canlı hücre derişimi 440 saatlik işletim süresi boyunca 100 hücre/ml' nin altında kalmıştır. Sonuç olarak 440 saat boyunca 1,2 ve -0,6 V uygulanarak içme suyunun dezenfeksiyonu gerçekleştirilmiştir [46].

Bir başka çalışmada grafit elektrotun yüzeyindeki mikrobiyolojik hücrelerin solunum aktivitesi sabit gerilimler uygulanarak engellenmiştir. *Saccharomyces cerevisiae* hücrelerinin solunum aktivitesi SCE' ye karşı 0,74 V uygulanarak 7 dakika sonra başlangıç aktivitesinin % 25' ine azalmıştır. Solunum aktivitesi kaybı *Bacillus subtilis* ve *E. coli* içinde gözlenmiştir. Hücrede bulunan CoA elektrokimyasal olarak dimerik CoA' ya yükseltgenmiş ve sonuç olarak hücrelerin solunumu engellenmiştir. Solunum aktivitesinin engellenmesi de hücrelerin ölümüne neden olmuştur [34].

Daniel Golub ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada *E. coli* ve *S. Typhimurium* hücrelerinin lifli karbon elektrotlarda elektroadsorpsiyonu araştırılmıştır. Anot-katot çifti çok basamaklı bir seri elektrofiltre şeklinde yerleştirilmiştir. Her iki bakteri türü elektrikle yüklü elektrot yatağına güçlü bir şekilde bağlanmış ve bakteri hücrelerinin tamamının uzaklaştırılması sağlanmıştır [47].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1.Paralel Plakalı Reaktörde Elektrokimyasal Su Dezenfeksiyonunun Gerçekleştirildiği Deneysel Çalışmalar

6.1.1. Kesikli sistemde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar

Çalışmalarda laboratuvar koşullarında hazırlanan *Escherichia coli* içeren çözelti kullanılmıştır. Hazırlanan çözeltinin kimyasal bileşimi aşağıda verilmiştir.

Cl ⁻	3,56 mg/L
SO ₄ ²⁻	12,0 mg/L
NO ₃ ⁻	0,4 mg/L
Mg ²⁺	0,3 mg/L
Na ⁺	2,4 mg/L
Fe ³⁺	0,03 mg/L
Ca ²⁺	1,2 mg/L

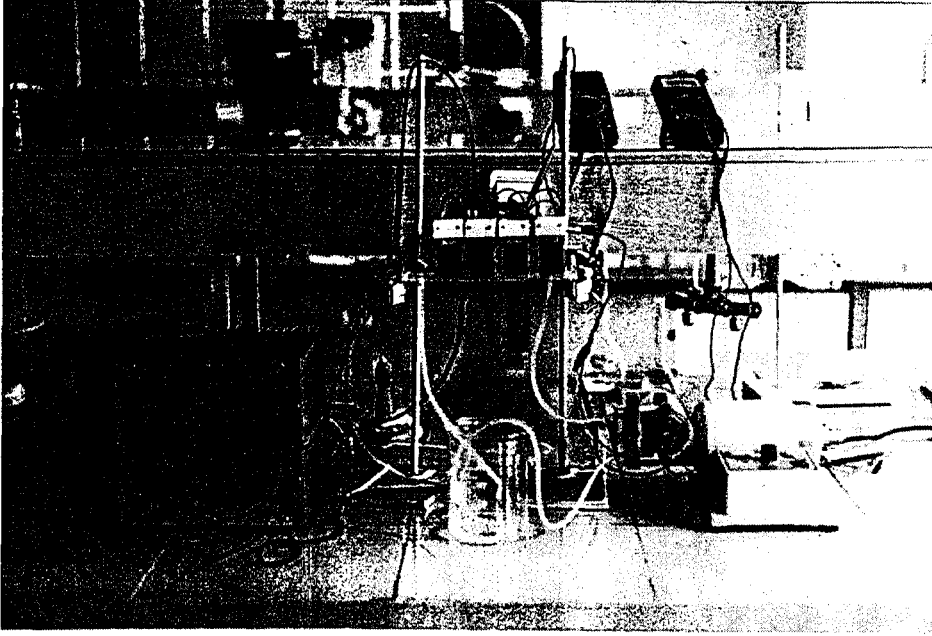
ve pH = 7,4' tür.

Farklı başlangıç derişimlerinde (10^3 ; 10^4 ; 10^5 hücre/ml) çözeltiler elde etmek amacıyla, bir gün önceden hazırlanan gecelik bakteri kültüründen seyreltmeler yapılmış ve uygun miktarda *E. coli* çözeltiye (400 ml) eklenmiştir. Elde edilen çözelti ile elektrokimyasal reaktörde 50 ml/dk'lık geri döngü hızında ve 120 dakikalık süre ile kesikli sistemde çalışılmıştır. Farklı akım yoğunlukları (0,5; 1; 1,5 ve 3 mA/cm²) uygulanarak dezenfeksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Elektrokimyasal dezenfeksiyonun gerçekleştirildiği reaktör 5 bölmeden oluşmaktadır. Çalışma çözeltisi beş bölmeli reaktörden peristaltik pompa vasıtasıyla geçirilmekte ve çıkan çözelti reaktöre geri döngü edilmektedir. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği düzenek Şekil 6.1.'de verilmiştir.

Kesikli sistemde yapılan çalışmada bölmelerden birine 8 adet rutenyum oksit plaka elektrot yerleştirilmiştir. Plaka elektrotun boyutu 3x5 cm' dir ve su içinde kalan elektrot alanı ise 3x4 cm' dir. Reaktöre gerilim uygulandığında plakalar anot

ve katot olarak davranmaktadır. Reaktör hacmi ve anot yüzey alanı hesabı Ek Açıklamalar A' da verilmiştir.



Şekil 6.1. Elektrokimyasal su dezenfeksiyonu deney düzeneği

6.1.1.1. Kullanılan malzemeler

Gecelik bakteri kültürü ve seyreltmeleri hazırlamak için Nutrient broth kullanılmış ve başlangıçta ve 30' ar dakika arayla alınan örneklerde canlı bakteri sayısını belirlemek amacıyla Nutrient agar hazırlanmıştır. Çalışmalarda kullanılan tüm malzemeler otoklavda (121°C , 20 dakika) steril edilmiştir.

6.1.1.2. Kullanılan yardımcı araçlar

Çalışmalarda, akım Statron marka (Type 3240.2) güç kaynağından sağlanmış, reaktörden geçen akım DT-3800 B model dijital ampermetre ve reaktörün gerilimi ise OGSM marka 3900 model dijital multimetre ile ölçülmüştür. Çalışma çözeltisi, MULTİFIX marka MC 1000 PEC model peristaltik pompa ile reaktöre beslenmiştir. Deneylerde kullanılan malzemeler Nüve marka OT 4060 model otoklavda steril edilmiştir.

6.1.1.3. Tayin

Çözeltideki bakteri derişimini belirlemek amacıyla standart plak sayma yöntemi kullanılmıştır. Başlangıçta ve her 30 dakikada bir reaktör çıkışından örnek alınarak Nutrient agarlı petri kaplarına ekim yapılmış ve 37 °C, 24 saatlik inkübasyondan sonra oluşan koloniler sayılarak canlı hücre sayısı belirlenmiştir.

6.1.1.4. Deney sonuçlarının hesaplanmasında kullanılan eşitlikler

Hayatta Kalma Oranı

$$\text{Hayatta Kalma Oranı} = \frac{\text{Arıtımdan sonra canlı hücre sayısı}}{\text{Arıtımdan önce canlı hücre sayısı}} \times 100 \quad (6.1)$$

Enerji Tüketimi

$$\text{Enerji Tüketimi} = \frac{I \times V}{v \times 10^3} \quad (6.2)$$

I = Reaktörden geçen akım, (Amper,A)

V = Toplam reaktör gerilimi, (Volt,V)

v = Reaktörden geçen çözelti akış hızı (m³/s)

Yukarıdaki eşitlikler ilgili örnek hesaplamalar Ek Açıklamalar C' de verilmiştir.

6.1.2. Sürekli sistemde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar

Sürekli sistemde gerçekleştirilen çalışmalar sırasında elektrokimyasal reaktörün dört bölmesine rutenyum oksit plaka elektrotu yerleştirilmiştir. 10700 hücre/ml *E. coli* derişimine sahip çözelti farklı akım yoğunluklarında ve akış hızlarında elektrokimyasal reaktörden geçirilmiştir. Ayrıca Porsuk çayından (3200 hücre/ml) alınan su örneği de bu şartlar altında elektrokimyasal arıtıma tabi tutulmuştur.

6.2. Damlatmalı Reaktörde Elektrokimyasal Su Dezenfeksiyonunun Gerçekleştirildiği Çalışmalar

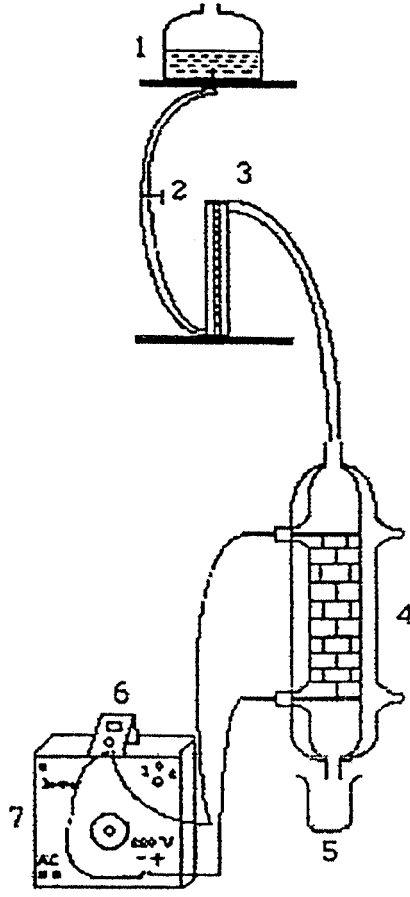
Çalışmalarda laboratuvar koşullarında hazırlanan 9800 hücre/ml *E. coli* derişimine sahip çözelti kullanılmıştır. Bu çözelti farklı akış hızlarında (5,6; 30 ve 72 ml/dk) damlatmalı reaktörden geçirilmiştir. Deneysel çalışmalar elektrot olarak rutenyum oksitten yapılmış rasching halkalarının kullanıldığı iki kutuplu kimyasal reaktörde gerçekleştirilmiştir. Bu reaktörle çözünmeyen anotta elektrokimyasal yükseltgeme amaçlanmıştır. Reaktör, 4 cm iç çapında, 21,5 cm uzunluğunda iç içe iki cam borunun içteki kısmına rutenyum oksit rasching halkaları doldurularak hazırlanmıştır. Bakterileri yükseltgeme özelliğine sahip bir elektrot malzemesi olan rutenyum oksit rasching halkaları, 8,2 mm dış, 6,5 mm iç çapında olup yükseklikleri 7 mm' dir. Dolgulu kısım, her biri dört rasching halkasından oluşan ve birbirlerinden yalıtkan polyesterle ayrılarak iki kutupluluk sağlanan 28 tabaka içermektedir. Reaktörün iki ucunda, gerilimin uygulandığı iki grafit çubuktan oluşan anot ve katot bağlantıları bulunmaktadır.

Reaktöre gerilim uygulandığında, her bir rasching halkası bir ucu (-), bir ucu (+) olan bir hücre gibi davranmaktadır. Reaktör hacmi ve anot yüzey alanı hesabı Ek Açıklamalar B' de verilmiştir.

Reaktöre çözeltiyi beslemek amacıyla 5 L' lik cam hazne ve bu hazneye bağlı rotametre kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği düzenek Şekil 6.2.' de verilmiştir.

6.2.1. Kullanılan yardımcı araçlar

Çalışmalarda gerilim STATRON marka (Type 3234.9) güç kaynağından sağlanmış, geçen akım DT-3800 B model dijital ampermetre kullanılarak ölçülmüştür. Çalışma çözeltisi akış hızları rota 870909-3601 rotametre ile ölçülmüştür.



1. Çalışma çözeltisi haznesi
2. Musluk
3. Rotametre
4. Reaktör
5. Çözelti toplama kabı
6. Ampermetre
7. Güç kaynağı

Şekil 6.2. Damlatmalı Reaktör Düzenegi

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR DAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

7.1. Paralel Plakalı Reaktörde Elektrokimyasal Su Dezenfeksiyonun Gerçekleştirildiği Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar

7.1.1. Kesikli sistemde elde edilen deney sonuçları

Bu çalışmada *Escherichia coli* içeren çözeltilerin paralel plakalı reaktörde elektrokimyasal dezenfeksiyonu üzerine çalışılmıştır. Uygulanan akım yoğunluğunun, işlem süresinin ve başlangıç *E. coli* derişiminin hayatta kalma oranına ve enerji tüketimine olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla üç farklı başlangıç derişiminde (10^3 ; 10^4 ; 10^5 hücre/ml) hazırlanan 400 ml çalışma çözeltilisine 0,5; 1; 1,5 ve 3mA/cm^2 lik akım yoğunlukları 120 dakika süreyle uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 7.1-3' te ve Şekil 7.1-18' de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Paralel plakalı reaktörde 10^5 hücre/ml başlangıç *E. coli* derişimine sahip çalışma çözeltilisinde elde edilen deney sonuçları

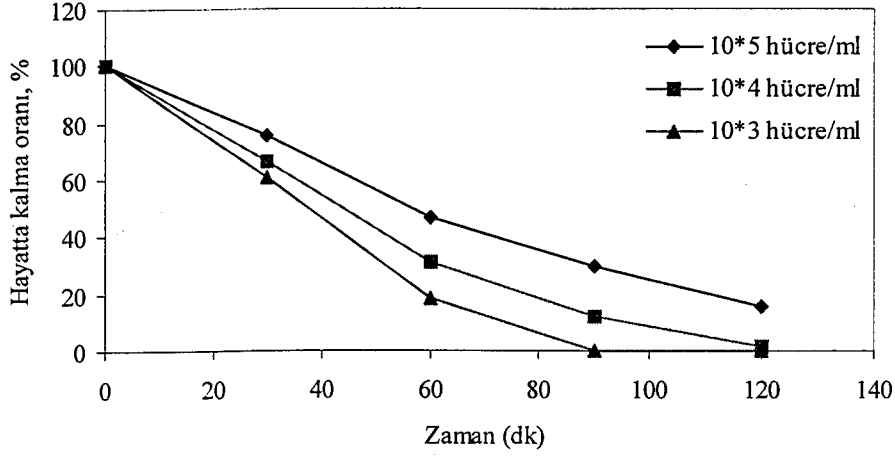
Akım Yoğunluğu (mA/cm^2)	Akım (mA)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (hücre/ml)	Hayatta Kalma Oranı, %	Enerji Tüketimi (kwh/m^3)
0,5	48	0	0	372000	100	0
		30	5,3	280000	75,2688	0,318
		60	5,4	172000	46,2365	0,648
		90	5,4	109400	29,4086	0,972
		120	5,4	58500	15,7258	1,296
1	96	0	0	332000	100	0
		30	6,4	60000	30,7228	0,768
		60	6,3	750	4,7590	1,512
		90	6,4	0	0,4367	2,304
		120	6,1	0	0,0090	2,928
1,5	144	0	0	387000	100	0
		30	6,9	60000	15,5038	1,242
		60	7,1	750	0,1938	2,556
		90	7,0	0	0	3,780
		120	7,1	0	0	5,112
3	288	0	0	592000	100	0
		30	9,2	11850	2,0016	3,312
		60	9,2	155	0,0262	6,624
		90	9,4	0	0	10152
		120	9,3	0	0	13,392

Çizelge 7.2. Paralel plakalı reaktörde 10^4 hücre/ml başlangıç *E. coli* derişimine sahip çalışma çözeltisinde elde edilen deney sonuçları

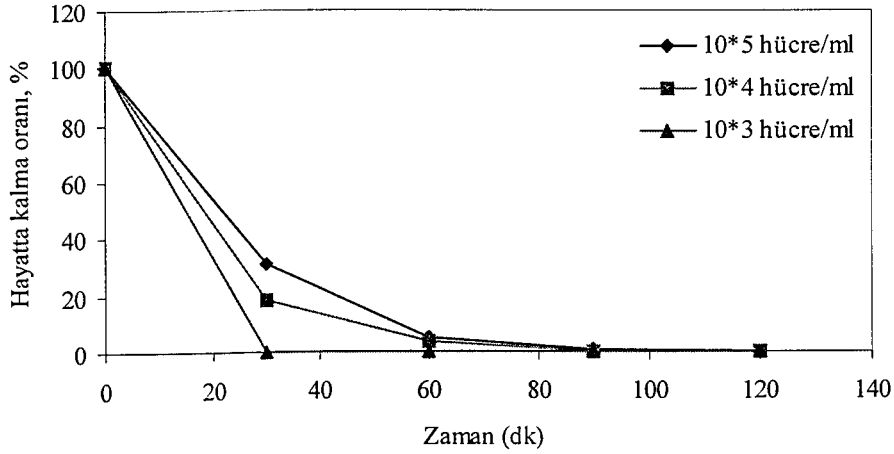
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Akım (mA)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (hücre/ml)	Hayatta Kalma Oranı, %	Enerji Tüketimi (kwh/m ³)
0,5	48	0	0	10200	100	0
		30	6,0	6800	66,6667	0,360
		60	6,1	3200	31,3725	0,732
		90	6,2	1200	11,7647	1,116
		120	6,1	120	01,1764	1,464
1	96	0	0	30000	100	0
		30	7,0	5600	18,6667	0,840
		60	7,2	1070	3,5667	1,728
		90	7,2	8	0,0267	2,592
		120	7,3	0	0	3,504
1,5	144	0	0	11200	100	0
		30	8,6	1300	11,6071	1,548
		60	8,5	0	0	3,060
		90	8,5	0	0	4,590
		120	8,5	0	0	6,120
3	288	0	0	30900	100	0
		30	9,8	0	0	3,528
		60	9,8	0	0	7,056
		90	10,1	0	0	10,908
		120	10,2	0	0	14,688

Çizelge 7.3. Paralel plakalı reaktörde 10^3 hücre/ml başlangıç *E. coli* derişimine sahip çalışma çözeltisinde elde edilen deney sonuçları

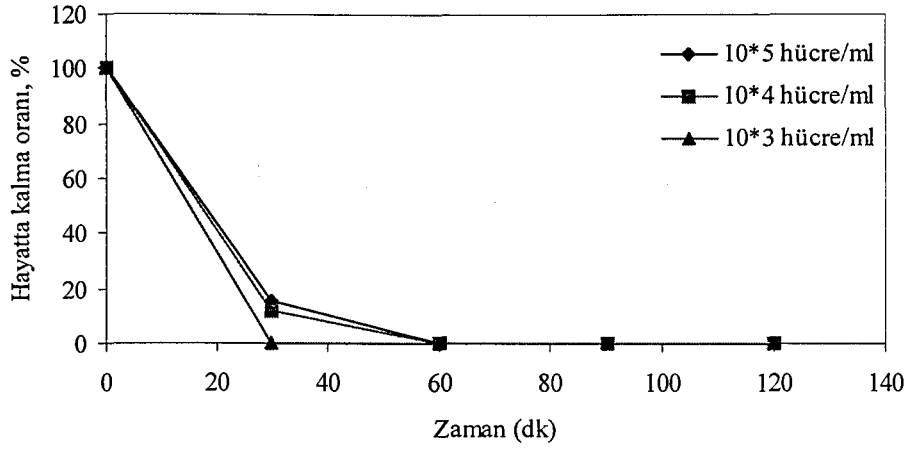
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Akım (mA)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (hücre/ml)	Hayatta Kalma Oranı, %	Enerji Tüketimi (kwh/m ³)
0,5	48	0	0	3290	100	0
		30	7,2	2000	60,7902	0,432
		60	7,5	610	18,5410	0,900
		90	7,4	0	3,4042	1,332
		120	7,4	0	0	1,776
1	96	0	0	7660	100	0
		30	8,1	10	0,1305	0,972
		60	8,2	0	0	1,968
		90	8,2	0	0	2,952
		120	8,4	0	0	4,032
1,5	144	0	0	6200	100	0
		30	9,2	0	0	1,656
		60	9,2	0	0	3,312
		90	9,4	0	0	5,076
		120	9,3	0	0	6,696
3	288	0	0	6800	100	0
		30	11,4	0	0	4,104
		60	11,3	0	0	8,136
		90	11,4	0	0	12,312
		120	11,4	0	0	16,416



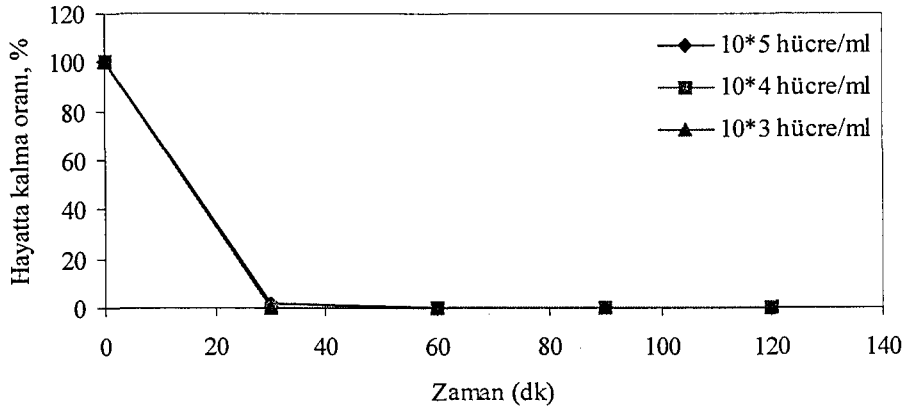
Şekil 7.1. Paralel plakalı reaktöre $0,5 \text{ mA/cm}^2$ lik akım yoğunluğu uygulandığında farklı *E. coli* derişimine sahip çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranının zamanla değişimi



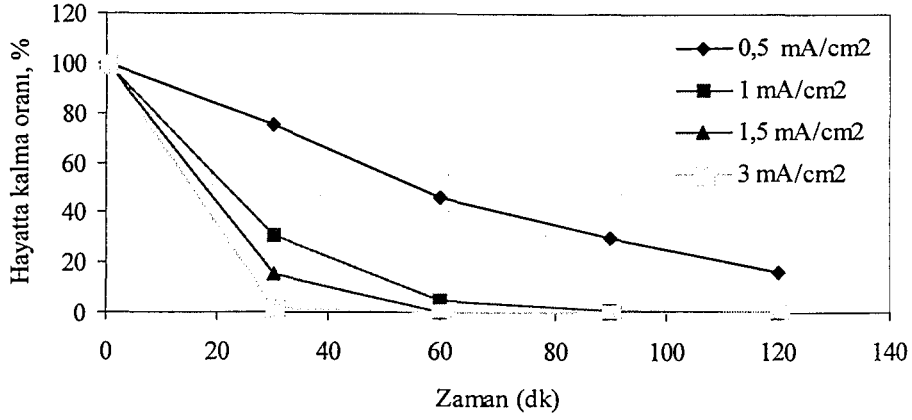
Şekil 7.2. Paralel plakalı reaktöre 1 mA/cm^2 lik akım yoğunluğu uygulandığında farklı *E. coli* derişimine sahip çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranının zamanla değişimi



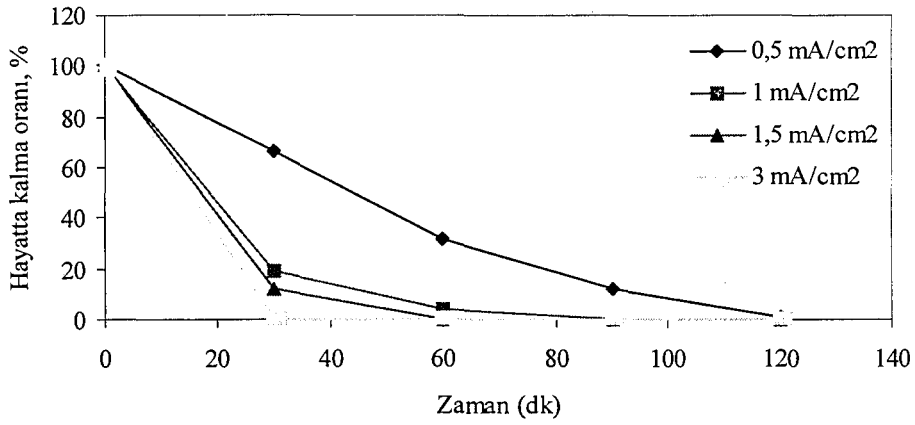
Şekil 7.3. Paralel plakalı reaktöre $1,5 \text{ mA/cm}^2$ lik akım yoğunluğu uygulandığında farklı *E. coli* derişimine sahip çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranının zamanla değişimi



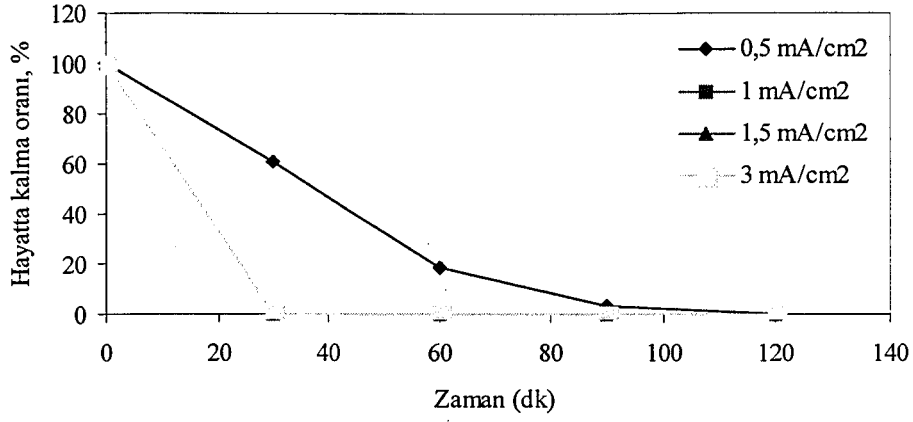
Şekil 7.4. Paralel plakalı reaktöre 3 mA/cm^2 lik akım yoğunluğu uygulandığında farklı *E. coli* derişimine sahip çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranının zamanla değişimi



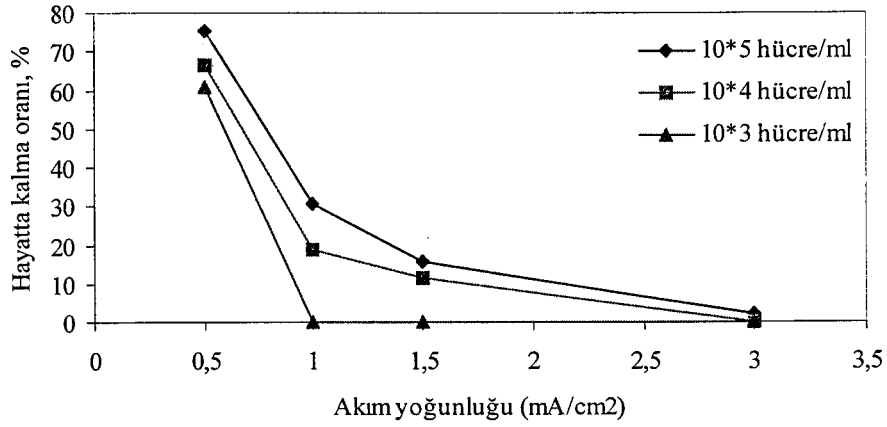
Şekil 7.5. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığında 10^5 hücre/ml başlangıç *E. coli* derişimine sahip çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranının zamanla değişimi



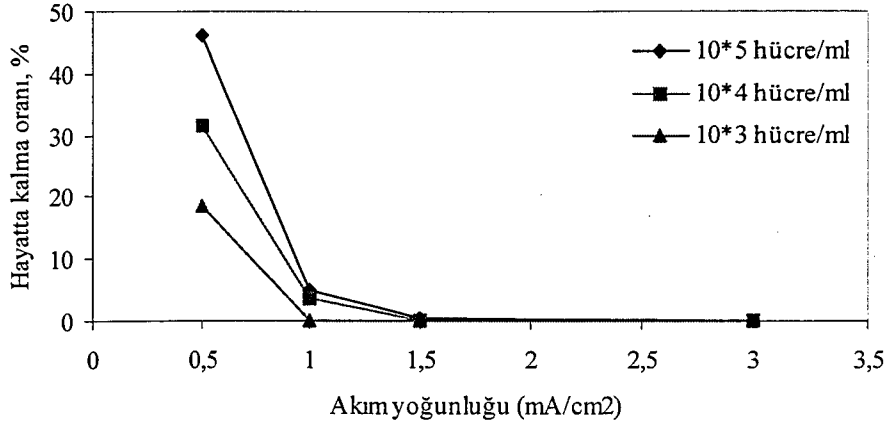
Şekil 7.6. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığında 10^4 hücre/ml başlangıç *E. coli* derişimine sahip çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranının zamanla değişimi



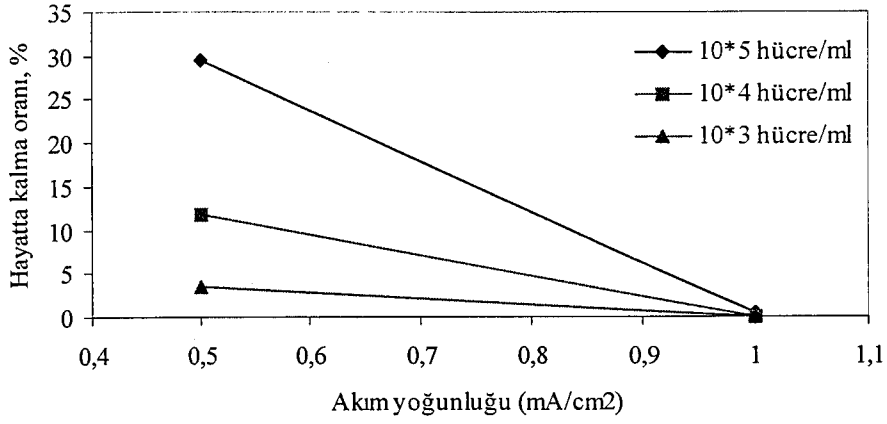
Şekil 7.7. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığında 10^3 hücre/ml başlangıç *E. coli* derişimine sahip çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranının zamanla değişimi



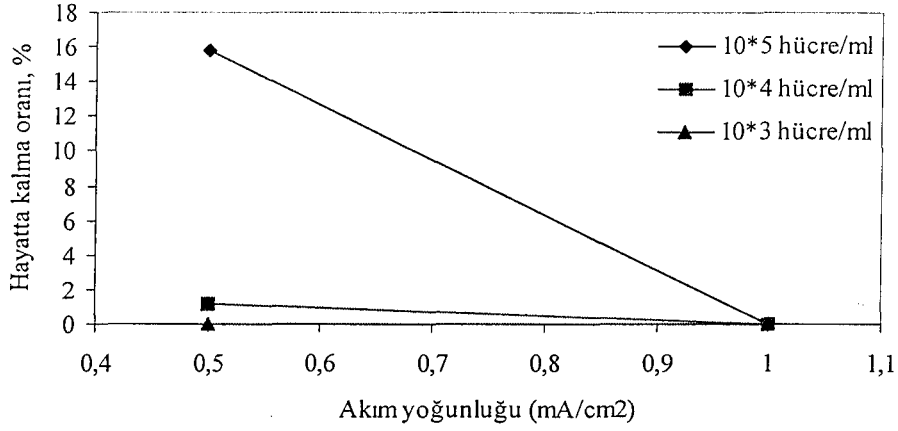
Şekil 7.8. Paralel plakalı reaktörde, farklı başlangıç *E. coli* derişimine sahip çözeltideki bakterilerin 30. dakikada hayatta kalma oranlarının akım yoğunluğu ile değişimi



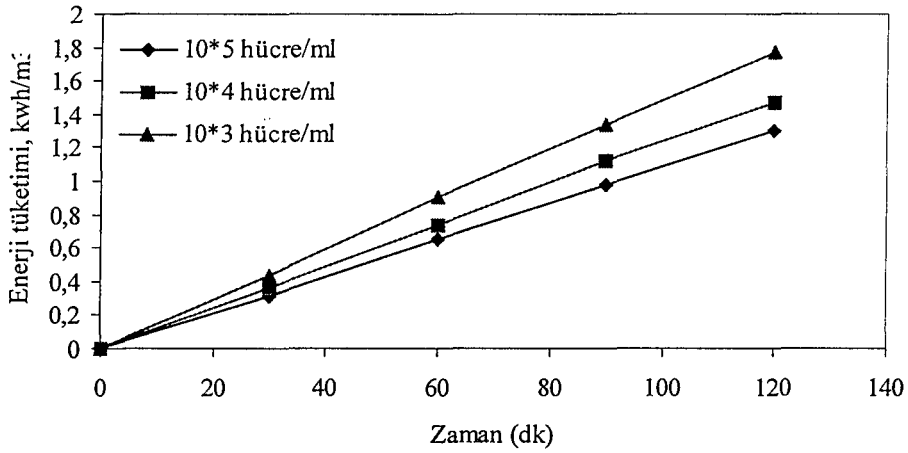
Şekil 7.9. Paralel plakalı reaktörde, farklı başlangıç *E. coli* derişimine sahip çözeltideki bakterilerin 60. dakikada hayatta kalma oranlarının akım yoğunluğu ile değişimi



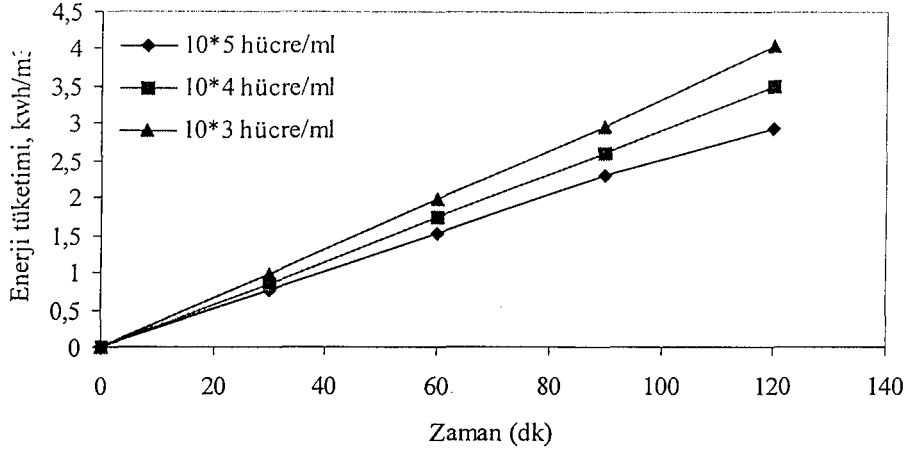
Şekil 7.10. Paralel plakalı reaktörde, farklı başlangıç *E. coli* derişimine sahip çözeltideki bakterilerin 90. dakikada hayatta kalma oranlarının akım yoğunluğu ile değişimi



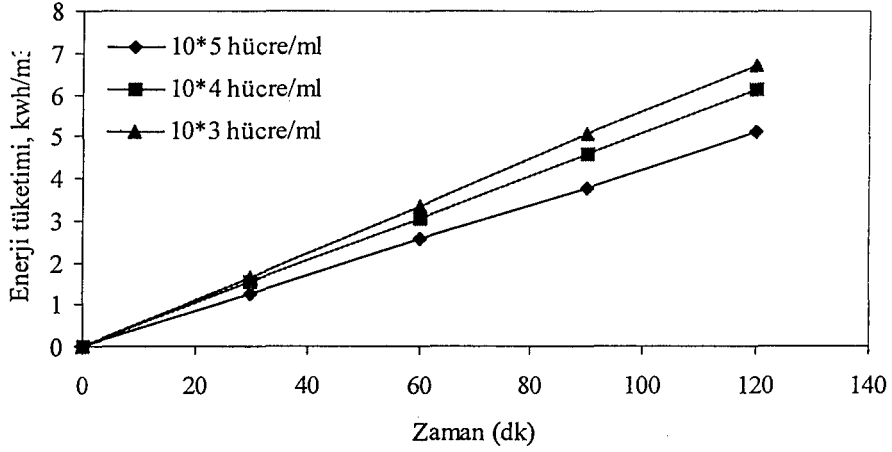
Şekil 7.11. Paralel plakalı reaktörde, farklı başlangıç *E. coli* derişimine sahip çözeltideki bakterilerin 120. dakikada hayatta kalma oranlarının akım yoğunluğu ile değişimi



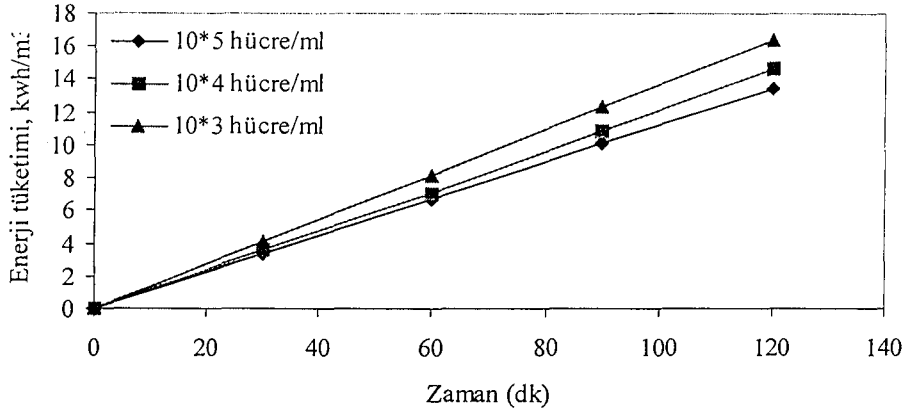
Şekil 7.12. Paralel plakalı reaktöre 0,5 mA/cm² lik akım yoğunluğu uygulandığında enerji tüketiminin zamanla değişimi



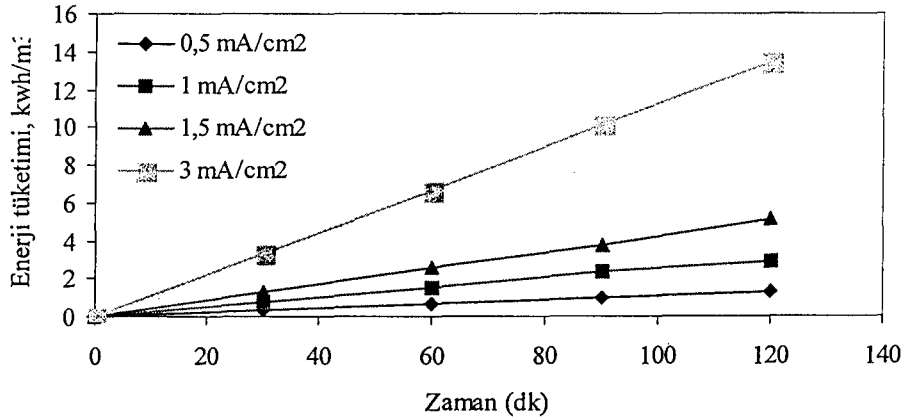
Şekil 7.13. Paralel plakalı reaktöre 1 mA/cm^2 lik akım yoğunluğu uygulandığında enerji tüketiminin zamanla değişimi



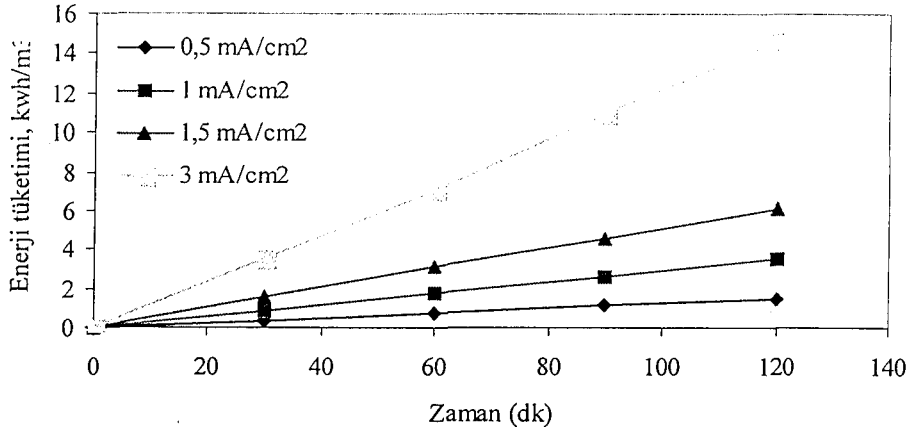
Şekil 7.14. Paralel plakalı reaktöre $1,5 \text{ mA/cm}^2$ lik akım yoğunluğu uygulandığında enerji tüketiminin zamanla değişimi



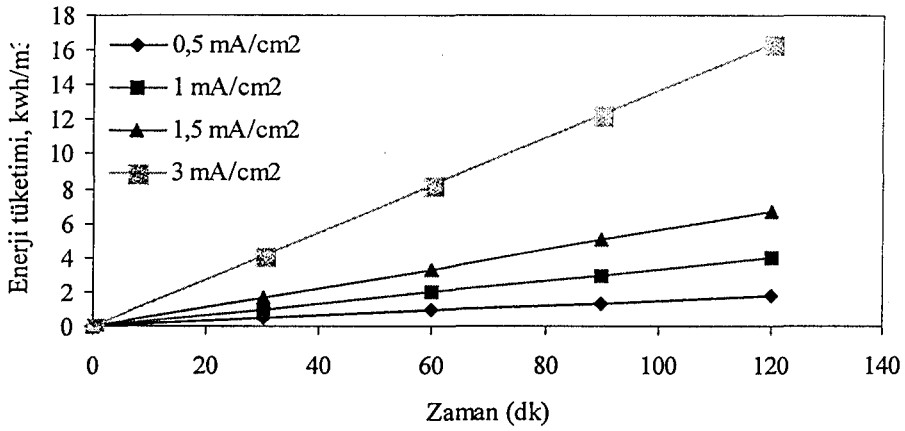
Şekil 7.15. Paralel plakalı reaktöre 3 mA/cm^2 lik akım yoğunluğu uygulandığında enerji tüketiminin zamanla değişimi



Şekil 7.16. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığında enerji tüketiminin zamanla değişimi (Başlangıç *E. coli* derişimi 10^5)



Şekil 7.17. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığında enerji tüketiminin zamanla değişimi (Başlangıç *E. coli* derişimi 10^4)



Şekil 7.18. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığında enerji tüketiminin zamanla değişimi (Başlangıç *E. coli* derişimi 10^3)

7.1.2. Sürekli sistemde elde edilen deney sonuçları

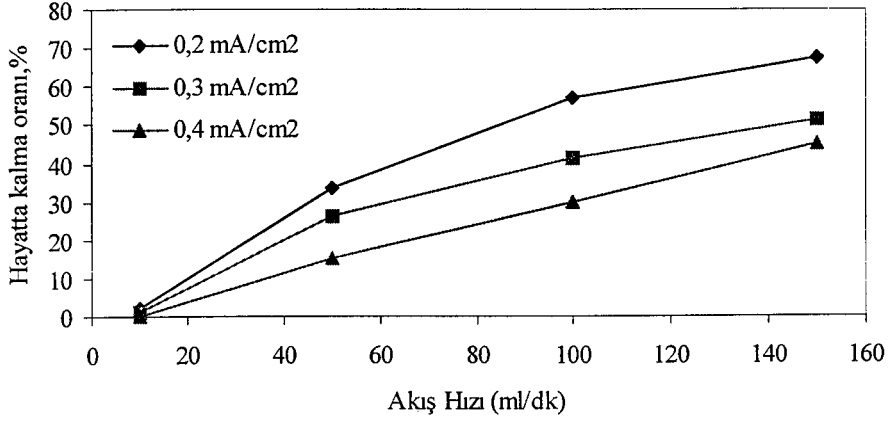
Bu çalışmada 10700 hücre/ml *E. coli* derişimine sahip çözelti 10, 50, 100, 150 ml/dk'lık akış hızlarında rutenyum oksit plakalı elektrokimyasal reaktörden geçirilmiş ve bu çözeltiye 0,2; 0,3 ve 0,4 mA/cm²'lik akım yoğunlukları uygulanmıştır. Ayrıca Porsuk çayından alınan çalışma çözeltisi de 10 ve 50 ml/dk'lık akış hızlarında ve 0,2; 0,3; 0,4 ve 0,5 mA/cm²'lik akım yoğunluklarında elektrokimyasal yükseltgeme ile dezenfekte edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 7.4-5' te ve Şekil 7.19-26' da verilmiştir.

Çizelge 7.4. Paralel plakalı reaktörde 10700 hücre/ml *E. coli* derişimine sahip çalışma çözeltisinin farklı akış hızlarında arıtımından elde edilen deney sonuçları

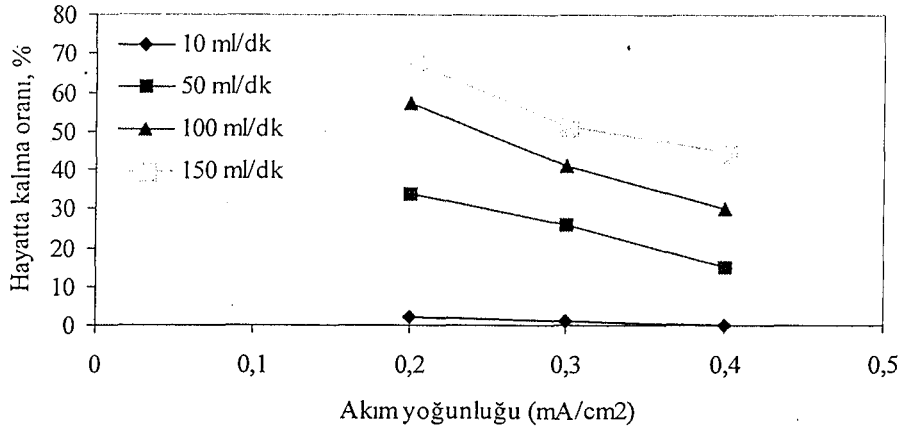
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Akım (mA)	Akış Hızı (ml/dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (hücre/ml)	Hayatta Kalma Oranı %	Enerji Tüketimi (kwh/m ³)
0,2	76,8	10	6,55	200	1,8691	0,8384
		50	7,05	3600	33,6448	0,1804
		100	7,90	6100	57,0093	0,1011
		150	8,10	7200	67,2897	0,0669
0,3	115,2	10	7,92	90	0,8411	1,5206
		50	8,30	2800	26,1682	0,3187
		100	8,62	4400	41,1215	0,1655
		150	8,84	5500	51,4018	0,1131
0,4	153,6	10	8,68	20	0,1869	2,2220
		50	9,05	1600	14,9532	0,4633
		100	9,68	3200	29,9065	0,2478
		150	9,92	4800	44,8598	0,1693

Çizelge 7.5. Paralel plakalı reaktörde 3200 hücre/ml başlangıç bakteri derişimine sahip Porsuk suyunun arıtımından elde edilen deney sonuçları

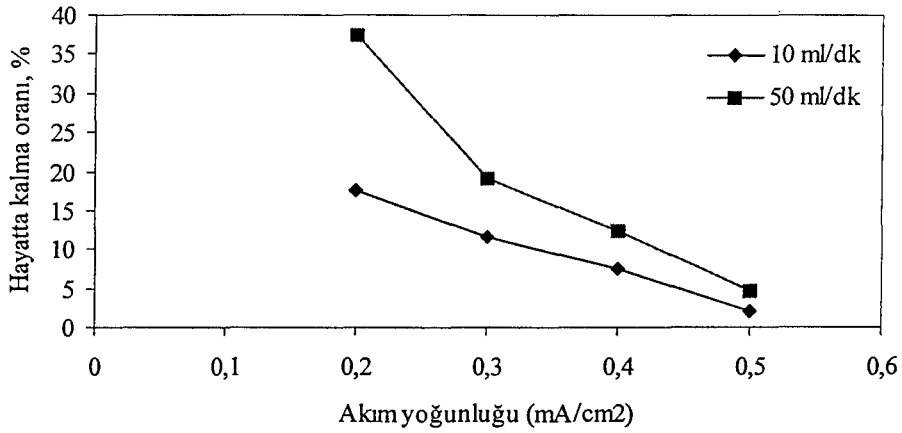
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Akım (mA)	Akış Hızı (ml/dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (hücre/ml)	Hayatta Kalma Oranı %	Enerji Tüketimi (kwh/m ³)
0,2	76,8	10	3,74	560	17,5000	0,4787
		50	3,91	1200	37,5000	0,1001
0,3	115,2	10	4,40	370	11,5625	0,8448
		50	4,46	610	19,0625	0,1712
0,4	153,6	10	4,86	240	7,5000	1,2441
		50	4,95	400	12,5000	0,2534
0,5	192	10	5,38	62	1,9375	1,7216
		50	5,50	145	4,5312	0,3520



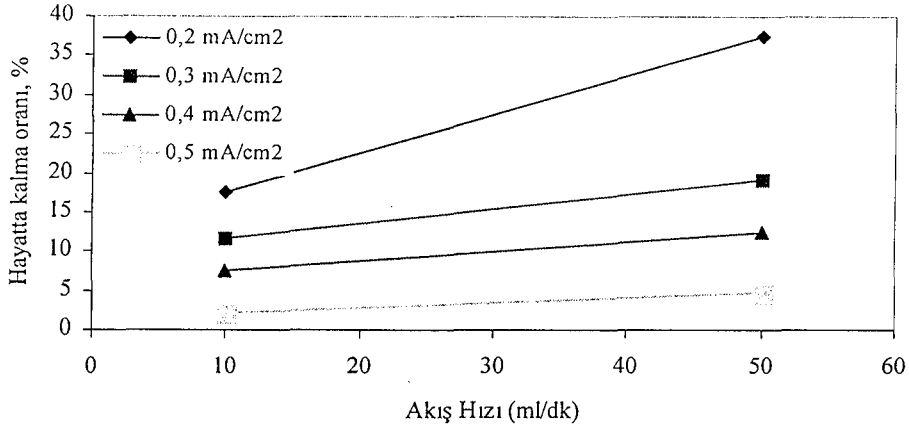
Şekil 7.19. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığı zaman hayatta kalma oranının akış hızıyla değişimi.(Çalışma çözeltisi başlangıç *E. coli* derişimi 10700 hücre/ml)



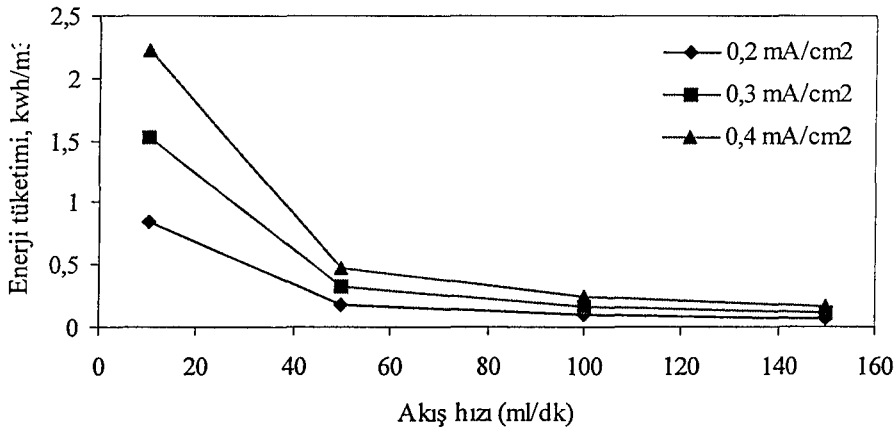
Şekil 7.20. Paralel plakalı reaktörde hayatta kalma oranının akım yoğunluğuyla değişimi. (Çalışma çözeltisi başlangıç *E. coli* derişimi 10700 hücre/ml)



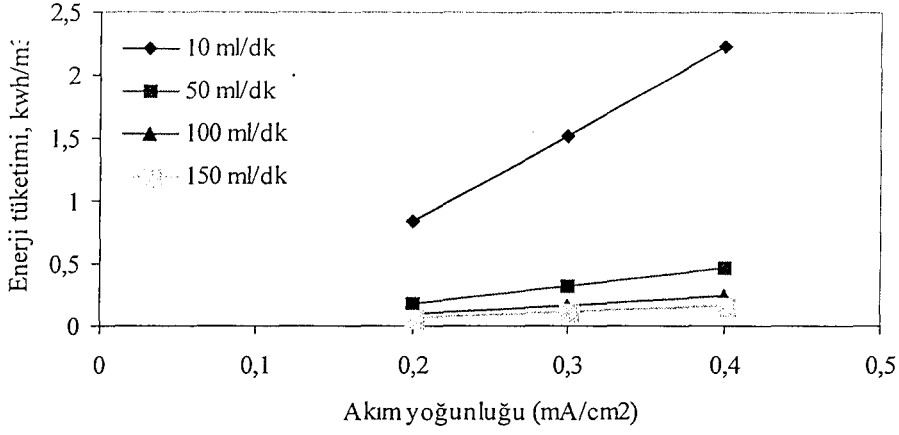
Şekil 7.21. Paralel plakalı reaktörde hayatta kalma oranının akım yoğunluğuyla değişimi.(Porsuk suyu başlangıç bakteri derişimi 3200 hücre/ml)



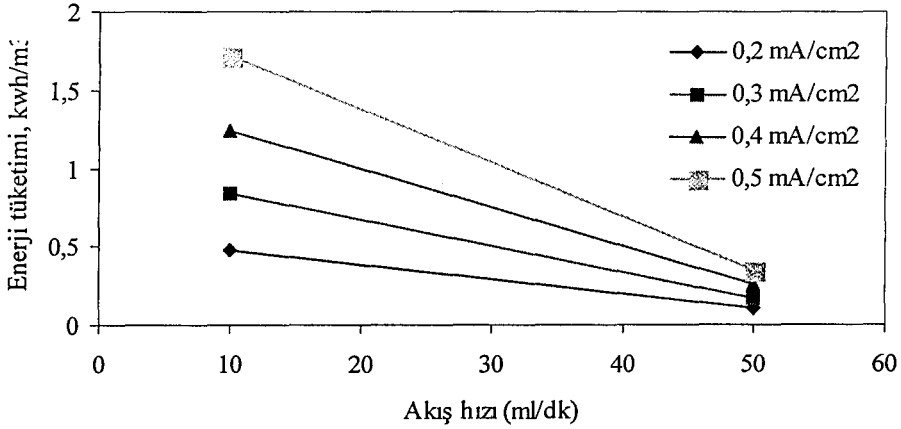
Şekil 7.22. Paralel plakalı reaktöre farklı akım yoğunlukları uygulandığı zaman hayatta kalma oranının akış hızıyla değişimi. (Porsuk suyu başlangıç bakteri derişimi 3200 hücre/ml)



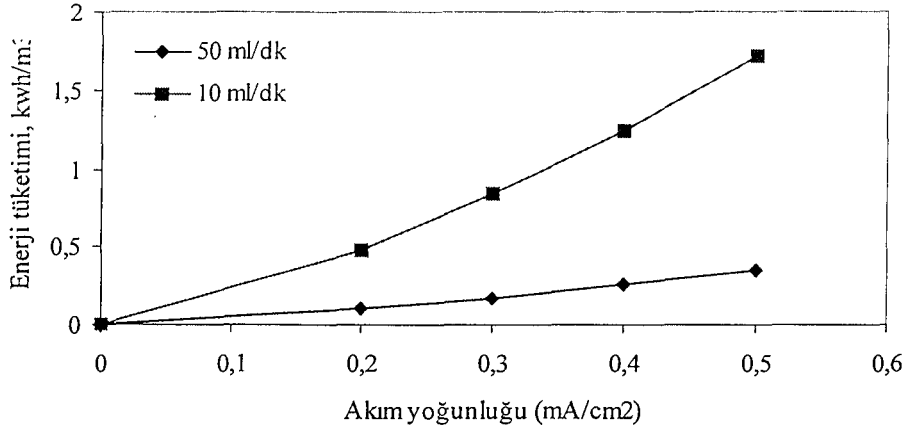
Şekil 7.23. Paralel plakalı reaktörde farklı akım yoğunluklarında enerji tüketiminin akış hızıyla değişimi (Çalışma çözeltisi başlangıç *E. coli* derişimi 10700 hücre/ml)



Şekil 7.24. Paralel plakalı reaktörde farklı akış hızlarında enerji tüketiminin akım yoğunluğuyla değişimi (Çalışma çözeltisi başlangıç *E. coli* derişimi 10700 hücre/ml)



Şekil 7.25. Paralel plakalı reaktörde farklı akım yoğunluklarında enerji tüketiminin akış hızıyla değişimi (Porsuk suyu başlangıç bakteri derişimi 3200 hücre/ml)



Şekil 7.26. Paralel plakalı reaktörde farklı akış hızlarında enerji tüketiminin akım yoğunluğuyla değişimi (Porsuk suyu başlangıç bakteri derişimi 3200 hücre/ml)

7.2. Damlatmalı Reaktörde Elde Edilen Denev Sonuçları

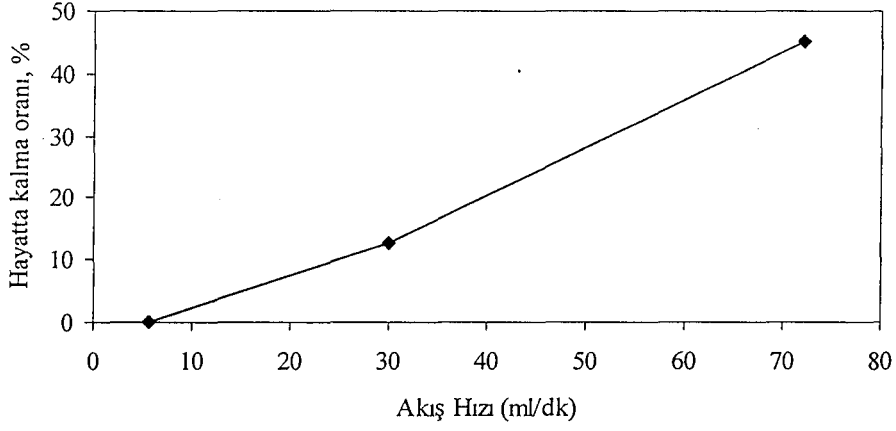
Bu alışmada *Escherichia coli* içeren çözeltinin rutenyum oksit elektrotta elektrokimyasal yükseltgeme ile giderilebilirliği araştırılmıştır. Uygulanan gerilimin ve akış hızının hayatta kalma oranına ve enerji tüketimine olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla belli bir başlangıç *E. coli* derişimine sahip çözelti damlatmalı reaktörden geçirilirken gerilim (175 ve 200) uygulanmıştır. Çalışma özeltisi reaktörden 5,6;30 ve 72 ml/dk'lık akış hızlarında geçirilmiştir. Ayrıca, Porsuk ayından alınan su örneği de artırılmıştır. Uygulanan gerilimin ve akış hızının etkisinin incelendiği denev sonuçları izelge 7.6-7' de ve Şekil 7.27-30' da verilmiştir.

Çizelge 7.6. Damlatmalı reaktörde 9800 hücre/ml başlangıç *E. coli* derişimine sahip çalışma çözeltisinin artırımından elde edilen denev sonuçları

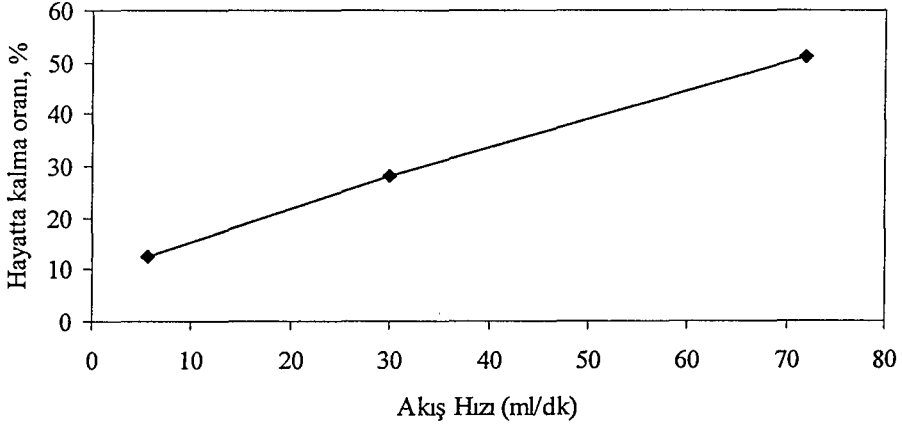
Gerilim (V)	Akış Hızı (ml/dk)	Akım (mA)	Son Derişim (hücre/ml)	Hayatta Kalma Oranı %	Enerji Tüketimi (kwh/m ³)
175	5,6	2,770	8	0,00082	1,4427
	30	3,280	1230	12,55	0,3189
	72	3,314	4420	45,10	0,1342
250	5,6	5,100	0	0	3,79464

Çizelge 7.7. Damlatmalı reaktörde 8600 hücre/ml başlangıç bakteri derişimine sahip Porsuk suyunun artırımından elde edilen denev sonuçları

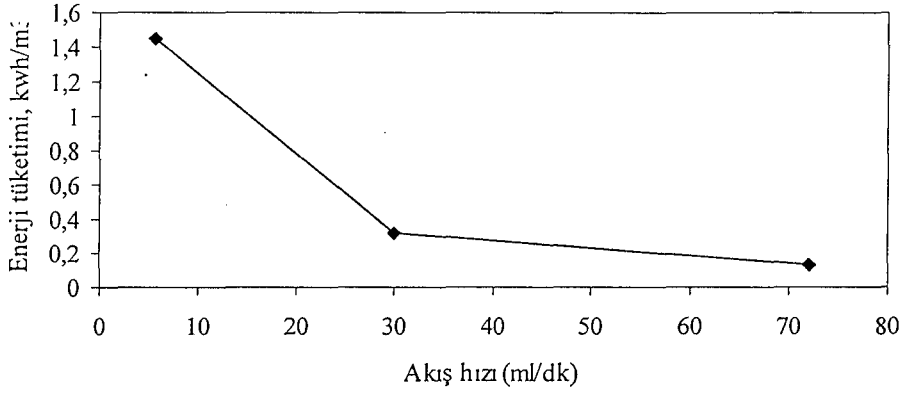
Gerilim (V)	Akış Hızı (ml/dk)	Akım (mA)	Son Derişim (hücre/ml)	Hayatta Kalma Oranı %	Enerji Tüketimi (kwh/m ³)
175	5,6	4,500	1080	12,56	2,3437
	30	6,690	2410	28,02	0,6504
	72	8,100	4400	51,16	0,3281
250	5,6	9,600	200	2,32	7,1428



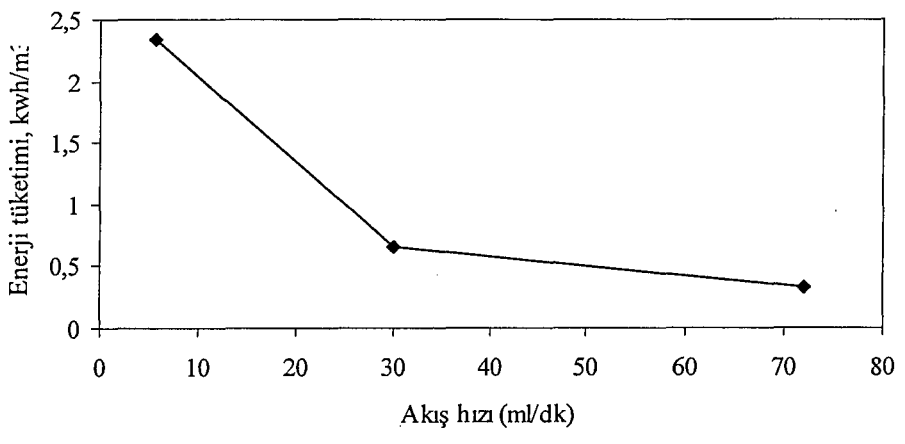
Şekil 7.27. Damlatmalı reaktörde 175 V' ta bakterilerin hayatta kalma oranının akış hızıyla değişimi (Çalışma çözeltisi başlangıç E. coli derişimi 9800 hücre/ml)



Şekil 7.28. Damlatmalı reaktörde 175 V' ta bakterilerin hayatta kalma oranının akış hızıyla değişimi (Porsuk suyu başlangıç bakteri derişimi 8600 hücre/ml)



7.29. Damlatmalı reaktörde enerji tüketiminin akış hızıyla değişimi (Çalışma çözeltisi)



7.30. Damlatmalı reaktörde enerji tüketiminin akış hızıyla değişimi (Porsuk suyu)

8. BULGULARIN TARTIŞILMASI

8.1. Paralel Plakalı Reaktörde Elektrokimyasal Su Dezenfeksiyonundan Elde Edilen Deneysel Bulguların Tartışılması

Kesikli Sistemde Elde Edilen Deneysel Bulguların Tartışılması

Yapılan çalışmalardan elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 7.1-3' te ve Şekil 7.1-18' de verilmiştir. Bu çalışmada anodik yükseltgeme ile çalışma çözeltilisinin elektrokimyasal dezenfeksiyonunun başarıyla gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma sırasında arıtım süresi arttıkça çözeltideki bakterilerin hayatta kalma oranı azalmıştır (Şekil 7.1-5). Arıtım süresinin etkisinin incelendiği bu çalışmalar sonucunda genellikle % 100' lük giderim oranlarına ulaşılmıştır.

Kaynak sularında daima bulunan Cl^- iyonu (3 ppm seviyesinde) elektrokimyasal su dezenfeksiyonu sırasında Cl_2 ' ye anotta yükseltgenmektedir. Cl_2 ' de suyla tepkimeye girerek etkili dezenfektanlar olan OCl^- ve $HOCl$ ' yi oluşturmaktadır. Çalışmalarda kullanılan çözeltilinin de bileşimi kaynak suyunun bileşimine yakındır. Bununla birlikte, kaynak sularının elektrokimyasal yükseltgeme ile arıtımı sırasında dezenfeksiyon etkisine sahip türler de (aktif oksijen, hidrojen peroksit gibi) suda oluşmaktadır [32,35]. Ayrıca bakterilerden elektrota direkt elektron transferi ile bakterilerin öldürülmesi sağlanabilmektedir [31,33,34,37-46]. Elektrokimyasal su dezenfeksiyonu sırasında uygulanan akımın artmasıyla birlikte yukarıda bahsedilen dezenfeksiyon etkisine sahip türlerin oluşum hızı ve elektrot ile bakteri arasındaki direkt elektron transfer hızı artmaktadır. Böylece bakterilerin hayatta kalma oranı hızla azalmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda da akım yoğunluğu arttıkça düşük hayatta kalma oranları elde edilmiştir (Şekil 7.5-8).

Başlangıç derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçlarına göre çalışma çözeltisindeki başlangıç *E. coli* derişiminin artmasıyla (10^3 ; 10^4 ; 10^5) birlikte hayatta kalma oranı artmış yani daha düşük giderim değerleri elde edilmiştir (7.8-11). Fakat giderim oranı düşük olsa bile giderim hızı yüksektir. Giderim hızının

yüksek olduğu başlangıç derişiminde enerji tüketiminin düşük olması beklenir. Bu durum Şekil 7.12-15' te görülmektedir. Ayrıca beklenildiği gibi uygulanan akım yoğunluğu arttıkça enerji tüketimi de artmıştır (Şekil 7.15-18).

Sürekli Sistemde Elde Edilen Deneysel Bulguların Tartışılması

Yapılan çalışmalardan elde edilen deney sonuçları Çizelge 7.4-5 ve Şekil 7.19-26 da verilmiştir. *E. coli* içeren çalışma çözeltisinin sürekli sistemde elektrokimyasal dezenfeksiyonunda akış hızının artmasıyla hayatta kalma oranı da artmıştır (Şekil 7.19). Bunun nedeni, akış hızının artmasıyla çözeltinin reaktörde kalış süresinin azalmasıdır. Böylece, çözeltinin elektrot ile temas süresi azalmıştır. Bununla birlikte, beklenildiği gibi akım yoğunluğu arttıkça hayatta kalma oranı azalmıştır (Şekil 7.20). Ayrıca akış hızının ve akım yoğunluğunun artmasıyla enerji tüketimi de artmıştır (Şekil 7.23-24).

Porsuk çayından alınan su örneğinin elektrokimyasal dezenfeksiyonunun gerçekleştirildiği deney sonuçlarına göre de çalışma çözeltisine benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 7.21-22 ve Şekil 7.25-26)

8.2. Damlatmalı Reaktörde Elektrokimyasal Su Dezenfeksiyonundan Elde Edilen Deneysel Bulguların Tartışılması

Yapılan çalışmalardan elde edilen deney sonuçları Çizelge 7.6-7' de ve Şekil 7.27-30' da verilmiştir. Çalışma çözeltisi ile yapılan deney sonuçlarına göre akış hızının artmasıyla *E. coli* bakterilerinin hayatta kalma oranı artmıştır (Şekil 7.27). Bir başka deyişle, % giderim düşmektedir. Sürekli akışlı reaktörlerde akış hızı başlangıç derişiminden bağımsız ve çözeltinin reaktörde kalış süresine bağlıdır. Reaktörde kalış süresi arttıkça çözeltinin elektrot ile temas süresi arttığı için giderim artmakta ve enerji tüketiminde artış görülmektedir. Bu durum Şekil 7.29' da görülmektedir.

Porsuk çayından alınan su örneğinin damlatmalı reaktörde elektrokimyasal dezenfeksiyonu ile ilgili yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 7.28 ve Şekil 7.30).

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmalarda *E. coli* içeren çalışma çözeltilisinin kullanılan her iki elektrokimyasal reaktörde de elektrokimyasal dezenfeksiyonunun etkili bir şekilde gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır. Paralel plakalı reaktörde kesikli sistemde yapılan çalışmalarda 120 dakikalık arıtım süresi sonunda genellikle % 100' lük bakteri giderimi sağlanmıştır. Sürekli sistemde yapılan çalışmalarda ise düşük akış hızlarında daha iyi bir giderim elde edilmiştir. Damlatmalı reaktörde yapılan çalışmalarda da sürekli sistemde elde edilenlere benzer sonuçlar bulunmuştur.

Bu çalışmalara ilave olarak Porsuk çayından alınan ve gerçek kirlilik koşullarına sahip su örneği de hem paralel plakalı reaktörde sürekli sistemde hem de damlatmalı reaktörde elektrokimyasal dezenfeksiyona tabi tutulmuştur. Paralel plakalı reaktörde % 95,5 oranında, damlatmalı reaktörde ise % 98 oranında bakteri giderimi sağlanmıştır.

Sürecin dezenfeksiyon etki mekanizması oldukça karmaşıktır. Basit bir şekilde açıklamak gerekirse, kaynak sularında bulunabilecek kadar düşük derişimlerde Cl^- iyonu hem çalışma çözeltilisinde hem de Porsuk çayından alınan su örneğinde mevcuttur. Elektrokimyasal süreç sırasında bu Cl^- iyonları anotta yükseltgenerek Cl_2 ' ye dönüşmektedir. Cl_2 ' de suyla tepkimeye girerek etkili birer dezenfektan olan OCl^- ve $HOCl$ ' yi oluşturmaktadır. Bununla birlikte, elektrokimyasal süreç esnasında reaktörde oluşması muhtemel $[O]$, HO_2 ve O_3 gibi dezenfeksiyon etkisine sahip türler, dezenfeksiyona katkıda bulunmaktadır [32,35]. Ayrıca, elektriksel alan içerisinde meydana gelen, bakterilerdeki hücre içi CoA' dan elektrota direkt elektron transferi sayesinde bakteri ölümü gerçekleşmektedir [31,33,34,37-46].

Bu çalışmanın pilot ölçekte gerçekleştirilecek çalışmalara temel teşkil etmesi ile gerçek boyutta bir işletmede kullanılması mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

1. KARPUZCU, M. ve BAYAR, S., *Türkiye' deki Çevre Kirlenmesinin Genel Boyutu*, Türkiye' de Çevre Kirlenmesi Öncelikleri Sempozyumu III, Cilt-I, (Ed: KARPUZCU, M., ŞENLİER, N. ve KINLI, H.), Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, 1-8 (1999).
2. ELERLİ, B., *Madencilik, Çevre ve ÇED Raporu*, Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları, SİVAS (1999).
3. Resmi Gazete, Çevre Kanunu, 11 Ağustos 1983, Sayı: 18132.
4. KÜRÜN, Z. E., *Sanayileşme ve Çevre Sorunları*, Çevre'84: V. Türk-Alman Çevre Mühendisliği Sempozyumu, (Ed: USLU., O.), Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir, A-38-40 (1984).
5. ÇAKMAK, L., *Su Kirliliği ve Etkileri*, Çevre ve İnsan, 36, 26-29 (1997).
6. ALKAN, U., TAŞDEMİR, Y., KARAER, F. ve TEKSOY, A., *Evsel Atık Suların Mikrobiyolojik Kompozisyonu ve Halk Sağlığına Etkileri*, Kayseri I. Atık Su Sempozyumu Bildiri Kitabı,(Ed: ATLI, V. ve BELENLİ, İ.), Kayseri Büyükşehir Belediyesi KAYSU Genel Müdürlüğü, Kayseri, 22-28 (1998).
7. ŞENGÜL, B. ve ŞENGÜL, Ü., *İçme ve Kullanma Suyu Klorlama Teknikleri*, Kayseri I. Atık su Sempozyumu Bildiri Kitabı, (Ed: ATLI, V. ve BELENLİ, İ.), Kayseri Büyükşehir Belediyesi KAYSU Genel Müdürlüğü, Kayseri,132-138 (1998).
8. *Türkiye' nin Çevre Sorunları' 99*, Türkiye Çevre Vakfı Yayını, Ankara (1998).
9. USLU, O. ve TÜRKMEN, A., *Su Kirliliği ve Kontrolü*, T.C. Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü Yayınları Eğitim Dizisi-1, Ankara (1987).
10. Resmi Gazete, Umumi Hıfzıssıhha Kanunu, 6 Mayıs 1930, Sayı: 1489.
11. Resmi Gazete, Su Ürünleri Kanunu, 4 Nisan 1971, Sayı: 13799.
12. Resmi Gazete, Su Kirliliği ve Kontrolü Yönetmeliği, Sayı: 19919.
13. LAWS, E. A., *Aquatic Pollution*, J. Wiley, New York, USA (1993).
14. ASAN, O. T., *Wastewater Reclamation and Reuse*, Technomic Pub. Co., Lancaster, UK (1998).
15. HENRY, J. G., *Environmental Science and Engineering*, Prentice-Hall International, New Jersey,USA, (1996).

16. METCALF&EDDY Inc., *Wastewater Engineering*, McGraw Hill, New York, USA (1981).
17. *Ülkemizde Yeterince İncelenmeyen Enterik Patojenler*, (Ed: TÖRECİ, K.), Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir (1989).
18. BİLGEHAN, H., *Klinik Mikrobiyoloji*, Bilgehan Basımevi, İzmir (1983).
19. AKŞİT, F., *Klinik ve Uygulamalı Mikrobiyoloji*, Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Yayınları, Eskişehir (1993).
20. AKŞİT, F., DURAN, M. ve DEMİRER, G. N., *Su Arıtımında Temel İşlemler*, TMMOB Çevre Mühendisliği Odası, Ankara (1997).
21. *Atık Su Arıtma Tesisleri*, (Ed: TOPACIK, D.), İstanbul Büyükşehir Belediyesi İSKİ Genel Müdürlüğü, İstanbul (2000).
22. SPELLMAN, F. R., *Choosing Disinfection Alternatives for Water/Wastewater Treatment*, Technomic Pub. Co., Lancaster, UK (1999).
23. SAMSUNLU, A., *Çevre Mühendisliği Kimyası*, Samsun Çevre Teknoloji Merkezi Yayınları, İstanbul (1999).
24. PEAWY, H.S., ROWE, D.R. ve TCHOBANOGLOUS, G., *Environmental Engineering*, McGraw Hill, New York, USA (1985).
25. TOKMAK, B., ÇAPAR, G., DİLEK, F. B. ve YETİŞ, Ü., *Ankara İçme Suyunda Trihalometanlar*, 1. Ulusal Çevre Kirliliği Kontrolü Sempozyumu Bildiriler, (Ed: ÇAPAR, G., GİRGİN, S., TOKCAER, E., TOKMAK, B. ve YÜNCÜ, B.), ODTÜ Basım, Ankara, 101-108 (2000).
26. ÖZCİMDER, M., *Klorlama ile İçme Sularında Oluşan Klorlu Organik Bileşikler*, Çevre ve İnsan, 6, 73-75 (1987).
27. ÇELEBİ, K., *Suda Klorun Davranışı ve Trihalometanların Oluşum Mekanizması*, Çevre' 83: II. Ulusal Çevre Mühendisliği Sempozyumu, (Ed: USLU, O.), İzmir, Ç-36-38 (1983).
28. DAVIS, M. L., *Introduction to Environmental Engineering*, McGraw Hill, New York, USA (1991).
29. DROSTE, R. L., *Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment*, J. Wiley, New York, USA (1997).
30. FORSTER, C. F., *Biotechnology and Wastewater Treatment*, Cambridge University Press, Cambridge, UK (1985).

31. OKOCHI, M., LIM, T. K. ,NAKAMURA, N. ve MATSUNAGA, T., *Electrochemical Disinfection of Drinking Water Using on Activated-Carbon-Fiber Reactor Capable of Monitoring its Microbial Fouling*, Applied Microbiology and Biotechnology, **47**, 18-22 (1997).
32. PATERMARAKIS, G. ve FOUNTOUKIDIS, E., *Disinfection of Water by Electrochemical Treatment*, Water Research, **24**, 1491-1496 (1990).
33. www.tuat.ac.jp/~matunaga/emokoji/study/electro/main.html.
34. MATSUNAGA, T., NAMBA, Y. ve NAKAJIMA, T., *Electrochemical Sterilization of Microbial Cells*, Bioelectrochemistry and Bioenergetics, **13**, 393-400 (1984).
35. *Experimental studies on disinfecting and by-products formation during electrochemical water disinfection*, www.electrochem.org/meetings/past/200/abstracts/symposia/fl/0841.pdf.
36. ÖNDER, E., *Yüzey Aktif Maddelerin Elektrokimyasal Yöntemlerle Sudan Uzaklaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye (2001).
37. MATSUNAGA, T., NAKASONO, S., TAKAMUKU, T., BURGESS, J. G., NAKAMURA, N. ve SODE, K., *Disinfection of Drinking Water by Using a Novel Electrochemical Reactor Employing Carbon-Cloth Electrodes*, Applied and Environmental Microbiology, **58**, 686-689 (1992).
38. MATSUNAGA, T., NAKASONO, S., NAKAMURA, N. ve SODE, K., *Electrochemical Disinfection of Marine Bacteria Attached on a Plastic Electrode*, Bioelectrochemistry and Bioenergetics, **27**, 191-198 (1992).
39. MATSUNAGA, T., NAKASONO, S. ve MASUDA, S., *Electrochemical Sterilization of Bacteria Adsorbed on Granular Activated Carbon*, FEMS Letters, **93**,255-260 (1992).
40. MATSUNAGA, T., NAKASONO, S., KITAJIMA, Y. ve HORIGUCHI, K., *Electrochemical Disinfection of Bacteria in Drinking Water Using Activated Carbon Fibers*, Biotechnology and Bioengineering, **43**, 429-433 (1994).
41. MATSUNAGA, T., NAKASONO, S., BURGESS, G., TAKAHASHI, K., KOIKE, M., MURAYAMA, C. ve NAKAMURA, S., *Electrochemical*

- Prevention of a Marine Biofouling with a Carbon-chloroprene Sheets*, Applied and Environmental Microbiology, **59**, 3735-3763 (1993).
42. MATSUNAGA, T., OKOCHI, M. ve NAKASONO, S., *Direct Count of Bacteria Using Flourescent Dyes: Application to Assessment of Electrochemical Disinfection*, Analytical Chemistry, **67**, 4487-4490 (1995).
43. NAKAYAMA., T., WAKE, H., OZAWA, K., NAKAMURA, N. ve MATSUNAGA, T., *Electrochemical Prevention of Marine Biofouling on a Novel Titanium-Nitride-Coated Plate Formed by Radio-Frequency Arc Spraying*, Applied Microbiology and Biotechnology, **50**, 502-508 (1998).
44. MATSUNAGA, T., NAKAYAMA, T., WAKE, H., TAKAHASHI, M., OKOCHI, M. ve NAKAMURA, N., *Prevention of Marine Biofouling Using a Conductive Paint Electrode*, Biotechnology and Bioengineering, **59**, 374-378 (1998).
45. OKOCHI, M., TAGUCHI, T., TSUBOI, M., NAKAMURA, N., MATSUNAGA, T., *Fluorometric Observation of Viable and Dead Adhering Diatoms Using TO-PRO-1 Iodide and its Application to the Estimation of Electrochemical Treatment*, Applied Microbiology and Biotechnology, **51**, 364-369 (1999).
46. MATSUNAGA, T., OKOCHI, M., TAKAHASHI, M., NAKAYAMA, T., WAKE, H. ve NAKAMURA, N., *TiN Electrode Reactor for Disinfection of Drinking Water*, Water Research, **34**, 3117-3122 (2000).
47. GOLUB, D., BEN-HUR, E., OREN, Y., ve SOFFER, A., *Electroadsorption of Bacteria on Porous Carbon and Graphite Electrodes*, Bioelectrochemistry and Bioenergetics, **17**, 175-182 (1987).

EKLER

EK-A Paralel Plakalı Reaktör Hacmi ve Anot Yüzey Alanı Hesabı

EK-A.1 Reaktör Hacmi Hesabı

5 bölmeden oluşan reaktörün hacmi, reaktörde bulunan toplam çözelti hacmine eşittir. Reaktöre çözelti beslendiğinde reaktörün dört bölmesi çözeltiyle dolmaktadır. Reaktör bölmelerinden birinin boyutu 3,8x3 cm' dir. Bölmedeki su yüksekliği ise 4 cm' dir. Böylece tek bir bölmenin toplam hacmi;

$$\text{Bölme Hacmi} = 3,8 \cdot 3 \cdot 4 = 45,6 \text{ cm}^3 \text{ dir.}$$

Reaktör hacmi ise,

$$\text{Reaktör Hacmi} = 45,6 \cdot 4 = 182,4 \text{ cm}^3 = 1,824 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ tür.}$$

EK-A.2. Anot Yüzey Alanı Hesabı

Rutenyum oksit elektrot, 8 adet paralel plakadan oluşmaktadır. Akım uygulandığında bu plakalardan 4 tanesi anot olarak davranmaktadır. Rutenyum oksit plakalardan birinin boyutu 4x3 cm' dir. Her bir plakanın iki yüzeyi olduğuna göre anot yüzey alanı,

$$\text{Anot Yüzey Alanı} = 4 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 = 96 \text{ cm}^2 = 96 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ dir.}$$

EK-B Damlatmalı Reaktör Hacmi ve Anot Yüzey Alanı Hesabı

EK-B.1 Reaktör Hacmi Hesabı

Her biri 4 elektrot içeren 28 tabakadan oluşan reaktörün hacmi, elektrotların toplam hacmine eşittir. Reaktör hacmini hesaplamak için dış çapı $D_d = 0,82$ cm, iç çapı $D_e = 0,65$ cm ve yüksekliği $D_L = 0,7$ cm olan bir elektrotun kapladığı alanı buluruz.

Reaktör hacmi (V_R) = Elektrot hacmi * elektrot sayısı

Elektrot hacmi (A_Z) = Elektrot alanı * elektrot sayısı

Elektrot alanı (A) = Eşkenar üçgen alanı * 2

$$\text{Üçgenin alanı} = \frac{(0,8 * \sin 60 * 0,82)}{2} * 2 = 0,580 \text{ cm}^2$$

$$\text{Elektrot hacmi} = 0,557 * 0,7 = 0,406 \text{ cm}^2$$

$$\text{Reaktör hacmi} = 0,406 * 28 * 4 = 45,47 * 10^{-6} \text{ m}^3$$

EK-B.2 Anot Yüzey Alanı Hesabı

$$\text{Elektrotun dış yüzey alanı} = \frac{D_L}{2} * D_d * \pi$$

$$\text{Elektrotun iç yüzey alanı} = \frac{D_L}{2} * D_e * \pi$$

$$\text{Elektrotun yüzey alanı} = \frac{D_L}{2} * D_d * \pi + \frac{D_L}{2} * D_e * \pi$$

$$A = 0,7 * \frac{0,82}{2} * 3,14 + 0,7 * \frac{0,65}{2} * 3,14$$

$$A = 1,65 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

EK-C ÖRNEK HESAPLAMALAR

EK-C.1. Hayatta Kalma Oranı Hesabı

Çizelge 7.1.' den alınan 372000 başlangıç E. coli derişimi için, 0,5 mA/cm²' lik akım yoğunluğundaki hayatta kalma oranı hesabı eşitlik 6.1. kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Hayatta Kalma Oranı} = \frac{\text{Arıtımdan sonra canlı hücre sayısı}}{\text{Arıtımdan önce canlı hücre sayısı}} \times 100$$

$$\text{Hayatta Kalma Oranı} = \frac{280000}{372000} \times 100 = 75,2688, \%$$

EK-C.2. Enerji Tüketimi Hesabı

Çizelge 7.6.' dan alınan 9800 hücre/ml başlangıç E. coli derişimine sahip çözelti için 5,6 ml/dk akış hızında ve 175 V' ta enerji tüketimi hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\text{Enerji Tüketimi} = \frac{I \times V}{v \times 10^3}$$

$$\text{Enerji Tüketimi} = \frac{2,77 * 10^3 \times 175}{5,6 \times 10^3} = 1,4427 \text{ kwh/m}^3$$