

**TiO₂ KATKILI NAFION MEMBRAN SENTEZİ VE
ATIKSU DEZENFEKSİYONUNDA SÜREKLİ
SİSTEM ELEKTROLİZ/ELEKTRODİYALİZ
HÜCRESİNDE KULLANILMASI**

SABRİ KALKAN

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ

ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERSİN

HAZİRAN – 2015

**TiO₂ KATKILI NAFION MEMBRAN SENTEZİ VE
ATIKSU DEZENFEKSİYONUNDA SÜREKLİ
SİSTEM ELEKTROLİZ/ELEKTRODİYALİZ
HÜCRESİNDE KULLANILMASI**

SABRİ KALKAN

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Danışman
Doç. Dr. Bahadır Kürşad KÖRBAHTİ**

MERSİN

HAZİRAN – 2015

Sabri KALKAN tarafından Doç. Dr. Bahadır Kürşad KÖRBAHTİ danışmanlığında “TiO₂ Katkılı Nafion Membran Sentezi ve Atıksu Dezenfeksiyonunda Sürekli Sistem Elektroliz/Elektrodiyaliz Hücresinde Kullanılması” başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

Prof. Dr. Osman SERİNDAG



Prof. Dr. Ayla ÖZER



Doç. Dr. Bahadır Kürşad KÖRBAHTİ



Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 02../09/2015 tarih ve 2015.18../748 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

TiO₂ KATKILI NAFION MEMBRAN SENTEZİ VE ATIKSU DEZENFEKSİYONUNDA SÜREKLİ SİSTEM ELEKTROLİZ/ELEKTRODİYALİZ HÜCRESİNDE KULLANILMASI

Sabri KALKAN

ÖZ

Atıksuların dezenfeksiyonu insan sağlığı için hayati önem taşımaktadır. Bu çalışma ile atıksularda bulunan *Escherichia coli* bakterisinin sentezlenen TiO₂ katkılı katyonik Nafion membranlarla sürekli sistem elektroliz ve elektrokimyasal diyaliz sistemlerinde dezenfeksiyonu amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında elektrokimyasal yöntemle hipoklorit iyonu üretilmiş ve *E.coli* dezenfeksiyonunda farklı hücre konfigürasyonlarında hipoklorit, iletkenlik, pH, hücre gerilimi, *E.coli* miktarı, enerji tüketimi değişimleri incelenmiştir. Çalışmada cevap yüzey yöntemi kullanılarak verilerin istatistiksel analizi yapılmış ve yaklaşım fonksiyonları elde edilmiştir. Chick yasası uygulanarak dezenfeksiyon kinetiği belirlenmiş, elektroliz ve elektrodializ hücrelerinde birinci dereceden gerçekleşen dezenfeksiyon reaksiyonu için dezenfeksiyon hız sabiti 0,465 dakika⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

Çalışmada *Escherichia coli* bakterisinin membran sistemleri ile kısa sürede dezenfekte edildiği, membran konfigürasyonlarına göre dezenfeksiyon hızının değiştiği ve membran sistemleri ile dezenfeksiyonun basit dezenfeksiyon sistemlerine göre daha avantajlı olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dezenfeksiyon, Membran, Elektroliz, Elektrokimyasal Diyaliz

Danışman: Doç.Dr. Bahadır Kürşad KÖRBAHTİ, Mersin Üniversitesi Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı

SYNTHESIS OF TiO₂-DOPED NAFION MEMBRANE AND ITS USE IN A CONTINUOUS ELECTROLYSIS/ELECTRODIALYSIS CELL FOR WASTEWATER DISINFECTION

Sabri KALKAN

ABSTRACT

Disinfection of wastewater has vital importance for human health. In this study, the disinfection of *Escherichia coli* microorganisms in wastewater was investigated by synthesized TiO₂-doped Nafion membranes in a continuous electrolysis and electrodialysis cells. *E.coli* microorganisms were exterminated by the electrogenerated hypochlorite; and hypochlorite concentration, conductivity, pH, cell potential and amount of *E.coli* were measured, and process energy consumption was evaluated in different cell configurations. Response surface methodology (RSM) was used for the statistical analysis and approximation functions were obtained for the experimental data. Disinfection kinetics was determined using Chick's Law and rate constants were calculated as 0.465 min⁻¹ for first order disinfection kinetics in electrolysis and electrodialysis cells.

This study showed that disinfection with membrane systems has more advantageous than simple disinfection systems, and *Escherichia coli* microorganisms can be inactivated in a shorter time that disinfection time can vary by cell configurations.

Keywords: Disinfection, Membrane, Electrolysis, Electrodialysis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Bahadır Kürşad KÖRBAHTI, Mersin University, Department of Chemical Engineering

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında hoşgörüsü ve desteğıyle bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım danışman hocam Sayın Doç.Dr. Bahadır Kürşad KÖRBAHTİ'ye

Bana her konuda destek olan aileme,

Her zaman desteğini gördüğüm sayın Prof.Dr.Osman SERİNDAĞ'a,

Tez çalışmalarım sırasında her zaman hoşgörülü olan, yol gösteren, laboratuvar imkanlarını sunan sayın Prof.Dr. Manuel Andres RODRİGO'ya, Doç.Dr. Javier Llanos LOPEZ'e, UCLM (Ciudad Real) Kimya Mühendisliğı laboratuvar sorumlusu ve doktora öğrencisi sayın Salvador Cotillas SORIANO'ya, tüm Universidad de Castilla La Mancha hocaları ve laboratuvar çalışanlarına,

Tez çalışmalarım sırasında her zaman yanımda olan yakın arkadaşım sayın Mustafa Ceyhun ERDEM'e, Ahmet GÜNGÖR'e, İsmail Kutlugün AKBAY'a, Mehmet Zeki ACAR'a ve Figen YAN ERGÜL'e,

Tez çalışmalarımnda çizimlerimde yol gösteren, yardımcı olan sayın Güzin SAYAR'a,

Mersin Üniversitesi Kimya Mühendisliğı Ana Bilim Dalı Hocalarıma, yüksek lisans ve doktora yapmakta olan arkadaşlarıma,

Erasmus bursundan faydalanmamı sağlayan Ulusal Ajans ve Mersin Üniversitesi Rektörlüğü'ne

Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1.GİRİŞ	1
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. DEZENFEKSİYON	3
2.1.1 Dezenfeksiyonun Tanımı ve Çalışmalar	3
2.1.2 Dezenfeksiyon Yöntemleri, Avantajları ve Dezavantajları	4
2.1.2.1. Klorlama işlemi (Klor Gazı ile)	4
2.1.2.2. Klorlama işlemi (Sodyum Hipoklorit Çözeltisi ile).....	5
2.1.2.3. Klorlama (Katı, Kalsiyum Hipoklorit ile).....	5
2.1.2.4. Kloramin İşlemi	5
2.1.2.5. Ozonlama	5
2.1.2.6. Ultraviyole Işınları	6
2.2. ELEKTROKİMYASAL DEZENFEKSİYON.....	9
2.2.1. Sodyum Klorürün Elektrolit Olarak Kullanıldığı ya da Ortamda Klor ve Türevlerinin Bulunması Durumunda Elektroklorlama ve Klorlama İşlemlerinde Meydana Gelebilecek Reaksiyonlar.....	12
2.2.2 Ortamda Amonyum İyonlarının Bulunması Durumunda Monokloramin, Dikloramin, Trikloramin Bileşenlerine Bağlı Olarak Gerçekleşebilecek Reaksiyonlar.....	14
2.3. MEMBRAN SİSTEMLERİ ve DEZENFEKSİYON	14
2.3.1. Membranlar ve Kullanımları.....	14
2.3.2. Elektroliz/Elektrodiyaliz	17
2.4. LİTERATÜRDE ELEKTROKİMYASAL DEZENFEKSİYON İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR	20
2.5. CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ.....	30

3.MATERYAL ve METOD	32
3.1 Kimyasallar	32
3.2 Sürekli Elektrokimyasal Dezenfeksiyon Sistemleri.....	32
3.3 Sentezlenen Membranlar ve Yapıları.....	39
3.3.1. Nafion Membran Sentezi	40
3.3.2 TiO ₂ Katkılı Nafion Membran Sentezi.....	41
3.4. Analiz Yöntemleri.....	43
3.5. Yapılan Deneysel Çalışmalar	44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	46
4.1. Nafion Membran Kullanılan Sürekli Sistem Elektroliz Hücrelerinde Atıksu Dezenfeksiyon Çalışmaları	46
4.2. TiO ₂ Katkılı Nafion Membran Kullanılan Sürekli Sistem Elektroliz Hücrelerinde Atıksu Dezenfeksiyonu Çalışmaları	57
4.2.1. Sürekli Sistem Elektroliz Hücrelerinde Nafion Membran ve TiO ₂ Katkılı Nafion Membran ile Atıksu Dezenfeksiyon Çalışmaları	57
4.2.2. TiO ₂ Katkılı Nafion Membranlar ile Farklı Akım Değerlerinde Yapılan Atıksu Dezenfeksiyon Çalışmaları.....	66
4.3. TiO ₂ Katkılı Nafion Membran Kullanılan Sürekli Sistem Elektrodiyaliz Hücrelerinde Atıksu Dezenfeksiyonu Çalışmaları	74
4.4. Atıksu Dezenfeksiyonunda Sürekli Sistem Elektroliz ve Elektrodiyaliz Hücrelerinin Farklı Konfigürasyonlar İçin Karşılaştırılması	84
4.5. Dezenfeksiyon Kinetiğinin Belirlenmesi	90
4.5.1. Elektroliz Hücrelerinde Dezenfeksiyon Kinetiğinin Belirlenmesi	90
4.5.2. Elektrodiyaliz Hücrelerinde Dezenfeksiyon Kinetiğinin Belirlenmesi	92
4.6. İşletim Parametrelerinin Cevap Yüzey Yöntemi İle Optimizasyonu.....	93
4.6.1. Elektroliz Hücrelerinde Cevap Yüzey Yöntemi ile Optimizasyon.....	93
4.6.2. Elektrodiyaliz Hücrelerinde Cevap Yüzey Yöntemi İle Optimizasyon....	103
4.6.3. Farklı Konfigürasyonların Cevap Yüzey Yöntemi İle İncelenmesi.....	109
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	120
6. KAYNAKLAR	123
EKLER.....	130
ÖZGEÇMİŞ.....	131

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Dezenfeksiyon sistemlerinin karşılaştırılması	8
Çizelge 3.1. Yapılan deneysel çalışmaların planlanması	45



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Gaz klorlama sistemi [U.S.EPA, 1990].	4
Şekil 2.2. Ozonlama sistemi [U.S.EPA, 1990].	6
Şekil 2.3. Ultraviyole ışınlarıyla dezenfeksiyon sistemi [U.S.EPA,1990]	7
Şekil 2.4.Elektrodiyaliz sistemi.	18
Şekil 3.1. Elektrokimyasal dezenfeksiyon sistemi (elektroliz, elektrodiyaliz)	33
Şekil 3.2. Elektrokimyasal dezenfeksiyon sisteminin fotoğrafı (elektroliz- elektrodiyaliz)	34
Şekil 3. 3. Elektroliz ve elektrodiyaliz yöntemlerinde kullanılan elektrokimyasal hücrelerin konfigürasyonu	35
Şekil 3.4. Ticari anyonik membran (A) ve ticari katyonik membran (B) örnekleri...	36
Şekil 3.5. Elektrokimyasal dezenfeksiyon sisteminde kullanılan anot ve katot elektrotlar	36
Şekil 3.6. Boşluk sağlayıcı yapılar	37
Şekil 3.7. Membranlar ve boşluk sağlayıcı yapılar hücreye yerleştirildiği durumda hücrenin görünümü	38
Şekil 3.8. Elektrokimyasal dezenfeksiyon (elektroliz-elektrodiyaliz) hücresinin montajlı görünümü	39
Şekil 3.9. M1 kodlu sentezlendikten sonra hemen aktiveleştirilmeyen Nafion membranın görünümü	40
Şekil 3.10. M2 kodlu sentezlendikten sonra hemen aktiveleştirilen Nafion membranın görünümü	41
Şekil 3.11. M3 kodlu TiO ₂ katkılı sentezlendikten sonra hemen aktiveleştirilen Nafion membranın görünümü	42
Şekil 3.12. <i>Escherichia Coli</i> analizinde pozitif sonuçlar (A) ve negatif sonuçlar (B)	44
Şekil 4.1. Elektroliz çalışmalarında kullanılan anot-katyonik membran-katot konfigürasyonu (A-M1-K, A-M2-K, A-M3-K)	47
Şekil 4.2. Aktivasyon öncesi ve aktivasyon sonrası M1 ile yapılan deneylerde hücre gerilimi değişimi (i=0,1 A, konfigürasyon=A-M1-K 200 mg/L NaCl)	48
Şekil 4.3. Aktivasyon öncesi ve aktivasyon sonrası M1 ile yapılan çalışmalarda anolit kısmında hipoklorit derişimi değişimi (i=0,1 A, konfigürasyon=A-M1-K 200 mg/L NaCl)	49
Şekil 4.4. Aktivasyon öncesi ve aktivasyon sonrası M1 ile yapılan çalışmalarda katolit kısmında hipoklorit derişimi değişimi (i=0,1 A, konfigürasyon=A-M1-K 200 mg/L NaCl)	50
Şekil 4.5. Aktivasyon öncesi ve sonrasında M1 ile yapılan çalışmalarda birim hacim başına düşen elektrik yükünün değişimi(i=0,1 A, konfigürasyon=A-M1-K 200 mg/L NaCl)	51
Şekil 4. 6. Aktivasyon öncesi ve sonrasında M1 ile yapılan çalışmalarda enerji tüketimi değişimi (i=0,1 A, konfigürasyon=A-M1-K 200 mg/L NaCl)	52

Şekil 4.7. M2 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve atıksu varlığında anolit kısmındaki hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, $i_{\text{atıksu}}=0,3$ A, $i_{\text{NaCl}}= 0,15$ A, $C_{\text{NaCl},0}= 1500$ mg/L)	53
Şekil 4.8. M2 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve atık su varlığında katolit kısmındaki hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, $i_{\text{atıksu}}=0,3$ A, $i_{\text{NaCl}}= 0,15$ A, $C_{\text{NaCl},0}= 1500$ mg/L)	54
Şekil 4.9. M2 ile yapılan çalışmalarda atıksu ve NaCl varlığında anolit ve katolit kısımlarındaki iletkenlik değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, $i_{\text{atıksu}}=0,3$ A, $i_{\text{NaCl}}= 0,15$ A, $C_{\text{NaCl},0}= 1500$ mg/L)	55
Şekil 4.10. M2 ile yapılan çalışmalarda atık su ve NaCl varlığında hücre gerilimi değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, $i_{\text{atıksu}}=0,3$ A, $i_{\text{NaCl}}= 0,15$ A, $C_{\text{NaCl},0}= 1500$ mg/L)	56
Şekil 4.11. M2 ile yapılan çalışmalarda atıksu ve NaCl ile varlığında anolit kısmındaki pH değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, $i_{\text{atıksu}}=0,3$ A, $i_{\text{NaCl}}= 0,15$ A, $C_{\text{NaCl},0}= 1500$ mg/L)	56
Şekil 4.12. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl varlığında anolit kısmında hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,15$ A, $C_{\text{NaCl},0}= 1500$ mg/L).....	58
Şekil 4.13. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda anolit kısmında hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,3$ A, Atıksu)	58
Şekil 4.14. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl varlığında katolit kısmında hipoklorit derişimi değişimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,15$ A, $C_{\text{NaCl},0}= 1500$ mg/L).....	59
Şekil 4.15. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında katolit kısmında hipoklorit derişimi değişimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,3$ A, Atıksu) ..	60
Şekil 4.16. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl varlığında anolit ve katolit kısımlarındaki iletkenlik değişimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,15$ A, $C_{\text{NaCl},0}= 1500$ mg/L)	61
Şekil 4.17. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında anolit ve katolit kısımlarındaki iletkenlik değişimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,3$ A, Atıksu).....	61
Şekil 4.18. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve Atıksu varlığında hücre gerilimi değişimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i_{\text{atıksu}}=0,3$ A Atıksu, $i_{\text{NaCl}}=0,15$ A- $C_{\text{NaCl},0}= 1500$ mg/L)	62
Şekil 4.19. M2 ve M3 membranları kullanıldığında atıksu ile yapılan çalışmalarda anolitteki pH değişimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,3$ A, Atıksu)	63
Şekil 4.20. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve Atıksu varlığında birim hacimdeki elektriksel yük değişimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i_{\text{atıksu}}=0,3$ A- Atıksu, $i_{\text{NaCl}}=0,15$ A- $C_{\text{NaCl},0}= 1500$ mg/L)	64
Şekil 4.21. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında anolit ve katolit kısımlarındaki <i>Escherichia coli</i> miktarının değişimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,3$ A, Atıksu).....	65

Şekil 4.22. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl varlığında enerji tüketimi değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,15$ A, $C_{NaCl,0}= 1500$ mg/L).....	65
Şekil 4.23. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında anolit ve katolit kısımlarındaki enerji tüketimi değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,3$ A, Atıksu).....	66
Şekil 4.24. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda anolit kısmındaki hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu).....	67
Şekil 4.25. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda anolit kısmındaki iletkenlik değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu).....	68
Şekil 4.26. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda katolit kısmındaki iletkenlik değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu).....	68
Şekil 4.27. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda hücre gerilimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu).....	69
Şekil 4.28. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda anolit kısmındaki pH değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu).....	70
Şekil 4.29. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda birim hacimdeki elektrik yükünün değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu).....	71
Şekil 4.30. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda anolit kısmındaki <i>Escherichia coli</i> miktarının değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu).....	71
Şekil 4.31. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda katolit kısmındaki <i>Escherichia coli</i> miktarının değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu).....	72
Şekil 4.32. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda anolit kısmında hipoklorit üretimi için zamanla enerji tüketimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu).....	73
Şekil 4.33. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda anolit kısmında zamanla <i>E.coli</i> yıkımı için gerekli enerji tüketimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu).....	74
Şekil 4.34. Elektrodiyaliz çalışmalarında kullanılan A-M3-C-K konfigürasyonu	75
Şekil 4.35. M3 ile yapılan çalışmalarda ara bölge oluşturulduğunda, NaCl varlığında farklı akım değerlerinde anolit kısmındaki hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, $C_{NaCl,0}= 1500$ mg/L).....	76
Şekil 4.36. M3 ile yapılan çalışmalarda ara bölge oluşturulduğunda, NaCl varlığında farklı akım değerlerinde ara bölge kısmındaki hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, $C_{NaCl,0}= 1500$ mg/L).....	76
Şekil 4.37. M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve atık su varlığında ara bölgedeki hipoklorit değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, $i=0,3A$ $C_{NaCl,0}= 1500$ mg/L, Atıksu).....	77
Şekil 4.38. M3 ile yapılan çalışmalarda ara bölge oluşturulduğunda, NaCl varlığında farklı akım değerlerinde anolit kısmındaki iletkenlik değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, $C_{NaCl,0}= 1500$ mg/L)	78

Şekil 4.39. M3 ile yapılan çalışmalarda ara bölge oluşturulduğunda, NaCl varlığında farklı akım değerlerinde ara bölge kısmındaki iletkenlik değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, C _{NaCl,0} = 1500 mg/L)	79
Şekil 4.40. M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve atık su varlığında ara bölgedeki iletkenlik değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, i=0,3A C _{NaCl,0} = 1500 mg/L, Atıksu)	79
Şekil 4.41. M3 ile yapılan çalışmalarda ara bölge oluşturulduğunda, NaCl varlığında farklı akım değerlerinde hücre gerilimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, C _{NaCl,0} = 1500 mg/L)	80
Şekil 4.42. M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve atık su varlığında hücre gerilimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, i=0,3A C _{NaCl,0} = 1500 mg/L, Atıksu)	81
Şekil 4.43. M3 ile yapılan çalışmalarda ara bölge oluşturulduğunda, NaCl varlığında farklı akım değerlerinde birim hacimdeki elektriksel yük değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, C _{NaCl,0} = 1500 mg/L)	82
Şekil 4.44. M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve atık su varlığında birim hacimdeki elektriksel yük değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, i=0,3A C _{NaCl,0} = 1500 mg/L, Atıksu).....	82
Şekil 4.45. M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve atık su varlığında hipoklorit üretimi için enerji tüketimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, i=0,3A C _{NaCl,0} = 1500 mg/L, Atıksu)	83
Şekil 4.46. M3 ile yapılan çalışmalarda ara bölge oluşturulduğunda, NaCl varlığında farklı akım değerlerinde hipoklorit üretimi için enerji tüketimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, C _{NaCl,0} = 1500 mg/L).....	84
Şekil 4.47. Farklı konfigürasyonlarında yapılan çalışmalarda atıksu varlığında zamanla hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-K, A-M2-K, A-M3-K, A-M3-C-K i=0,3 A, Atıksu).....	85
Şekil 4.48. Farklı konfigürasyonlarında yapılan çalışmalarda atıksu varlığında zamanla iletkenlik değişimi (Konfigürasyon: A-K, A-M2-K, A-M3-K, A-M3-C-K i=0,3 A, Atıksu)	86
Şekil 4.49. Farklı konfigürasyonlarında yapılan çalışmalarda atıksu varlığında zamanla hücre gerilimi değişimi (Konfigürasyon: A-K, A-M2-K, A-M3-K, A-M3-C-K i=0,3 A, Atıksu).....	86
Şekil 4.50. Farklı konfigürasyonlarında yapılan çalışmalarda atıksu varlığında zamanla pH değişimi (Konfigürasyon: A-K, A-M2-K, A-M3-K, A-M3-C-K i=0,3 A, Atıksu).....	87
Şekil 4.51. Farklı konfigürasyonlarında yapılan çalışmalarda atıksu varlığında zamanla birim hacimdeki yük miktarı değişimi (Konfigürasyon: A-K, A-M2-K, A-M3-K, A-M3-C-K i=0,3 A, Atıksu).....	88
Şekil 4.52. Farklı konfigürasyonlarında yapılan çalışmalarda atıksu varlığında zamanla <i>E.coli</i> miktarındaki değişim (Konfigürasyon: A-K, A-M2-K, A-M3-K, A-M3-C-K i=0,3 A, Atıksu).....	89
Şekil 4.53. <i>E.coli</i> gideriminin k sabitinin belirlenmesi.....	91

Şekil 4.54. <i>E.coli</i> giderimi için elde edilen dezenfeksiyon kinetiği modelinin deney verileri ile karşılaştırılması.....	91
Şekil 4.55. <i>E.coli</i> gideriminin k sabitinin belirlenmesi.....	92
Şekil 4.56. <i>E.coli</i> giderimi için elde edilen dezenfeksiyon kinetiği modelinin deney verileri ile karşılaştırılması.....	93
Şekil 4.57. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada hipoklorit derişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-K).....	94
Şekil 4.58. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmındaki iletkenlik değerinin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-K).....	95
Şekil 4.59. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada katolit kısmındaki iletkenlik değerinin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-K).....	96
Şekil 4.60. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada hücre geriliminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-K).....	96
Şekil 4.61. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada pH değerinin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-K).....	97
Şekil 4.62. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmında <i>E.coli</i> mikroorganizmalarının zamanla değişimi (A-M3-K).....	98
Şekil 4.63. Elektroliz hücresinde katolit kısmında <i>E.coli</i> mikroorganizmalarının zamanla değişimi (A-M3-K).....	99
Şekil 4.64. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmında hipoklorit üretimi sırasında enerji tüketimi değişimi (A-M3-K).....	100
Şekil 4.65. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmında <i>E.coli</i> mikroorganizmalarının yıkımı sırasındaki enerji tüketimi değişimi (A-M3-K).....	101
Şekil 4.66. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada katolit kısmında <i>E.coli</i> mikroorganizmalarının yıkımı sırasındaki enerji tüketimi değişimi (A-M3-K).....	102
Şekil 4.67. Elektrodiyaliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmalarda ara bölge kısmında hipoklorit derişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-C-K).....	104
Şekil 4.68. Elektrodiyaliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmalarda anolit kısmında hipoklorit derişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-C-K).....	105
Şekil 4.69. Elektrodiyaliz sırasında atıksu ile yapılan çalışmalarda anolit kısmında iletkenlik değerinin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-C-K).....	105
Şekil 4.70. Elektrodiyaliz sırasında atıksu ile yapılan çalışmalarda ara bölge kısmında iletkenlik değerinin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-C-K).....	106
Şekil 4.71. Elektrodiyaliz sırasında atık su ile yapılan çalışmalarda hücre geriliminin değerinin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-C-K).....	107
Şekil 4.72. Elektrodiyaliz sırasında atıksu ile yapılan çalışmalarda anolit kısmında hipoklorit üretimi sırasındaki enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-C-K).....	108
Şekil 4.73. Elektrodiyaliz sırasında atıksu ile yapılan çalışmalarda ara bölge kısmında hipoklorit üretimi sırasındaki enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-C-K).....	108

Şekil 4.74. Farklı konfigürasyonlarda pH- <i>E.coli</i> değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi.....	110
Şekil 4.75. Farklı konfigürasyonlarda iletkenlik- <i>E.coli</i> değişiminin cevap yüzeyi yöntemi ile incelenmesi.....	110
Şekil 4.76. Farklı konfigürasyonlarda enerji tüketimi- <i>E.coli</i> değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi.....	111
Şekil 4.77. Farklı konfigürasyonlarda <i>E.coli</i> tüketimi için gerekli enerji tüketimi- <i>E.coli</i> değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi	112
Şekil 4.78. Farklı konfigürasyonlarda reaksiyon süresi- <i>E.coli</i> değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi	112
Şekil 4.79. Farklı konfigürasyonlarda <i>E.coli</i> - hipoklorit değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi.....	113
Şekil 4.80. Farklı konfigürasyonlarda <i>E.coli</i> -hücre gerilimi değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi.....	114
Şekil 4.81. Farklı konfigürasyonlarda iletkenlik- hipoklorit değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi.....	115
Şekil 4.82. Farklı konfigürasyonlarda hipoklorit üretimi için gerekli enerji tüketimi- hipoklorit değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi	116
Şekil 4.83. Farklı konfigürasyonlarda <i>E.coli</i> tüketimi için gerekli enerji tüketimi- hipoklorit değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi	116
Şekil 4.84. Farklı konfigürasyonlarda pH-hipoklorit değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi.....	117
Şekil 4.85. Farklı konfigürasyonlarda hücre gerilimi-hipoklorit değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi	118
Şekil 4.86. Farklı konfigürasyonlarda reaksiyon süresi- hipoklorit değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi	119

SİMGELER VE KISALTMALAR

Q	:Birim hacimdeki elektrik yükü
A.Ö	:Aktivasyon öncesi
A.S	:Aktivasyon sonrası
A	:Anot
cfu	:Besiyerinde çoğalan bakteri kümeleri
L	:Litre
M1	:Membran1
M2	:Membran2
M3	:Membran3
C	:Ticari katyonik membran
I	:Akım (Amper)
K	: Katot
DSA	:Boyut olarak kararlı elektrotlar
V _t	:t anındaki hücre gerilimi (V)
Δ _t	:t anına kadar geçen süre
ClO ₀ ⁻	:Başlangıçta ClO ⁻ derişimi
ClO _t ⁻	:t anında ClO ⁻ derişimi
<i>E.coli</i> ₀	:Başlangıçta <i>E.coli</i> miktarı
<i>E.coli</i> _t	: t anında <i>E.coli</i> miktarı
t	: Zaman (dakika veya saat)

1.GİRİŞ

Kirlenmiş su ve su ürünlerinin geri dönüşümü dünya çapında su ihtiyacının karşılanması ve iyi kalitede su elde edilmesi Kimya Mühendisliğinin önemli bir çalışma konusudur [Lacasa vd., 2012].

Dünya üzerindeki su kaynaklarının sadece %1'i tam olarak doğal haliyle içime hazır halde bulunmaktadır. Diğer suların içilmeden önce işlemlere tabi tutulması gerekmektedir. Bir insanın ortalama su ihtiyacı ve ulaşabildiği yıllık su miktarı 1500 m³'tür. Yapılan öngörülere göre 2025 yılında sağlıklı su bulmak oldukça zor olacak iken günümüzde insan nüfusunun sadece %50'si sağlıklı suya ulaşabilmektedir [Laxman vd., 2015].

Bulaşıcı ve hastalık yapıcı mikroorganizmaların neden olduğu hastalıklar atıksuların atıldığı alanlarda ekonomik açıdan da büyük kayıplara neden olmaktadır. Endüstriyel, hayvansal ve kanalizasyon atıklarının genellikle atıldığı kıyı bölgelerinde bulaşıcı hastalıklar daha fazla görülmektedir. Bu bölgelerde yüzey filtreleme ve basit filtreleme işlemleri yapıldığında ise hastalık yapıcı mikroorganizmaların filtreleme işlemi sonrasında daha fazla birikim yaptığı, *Escherichia coli* gibi bakterilerin deniz suyuna dayanıklılığının az olduğu fakat bu durumda dahi bir kaç hafta yaşayabildikleri gözlemlenmiştir [Birbir vd., 2009].

Dezenfeksiyon, tüketicilerin hastalık yapıcı mikroorganizmalardan korunması için çok önemli bir prosestir. Basit ve gelişmiş dezenfeksiyon yöntemleri klorlama, monokloramin uygulanması, ozon uygulanması, hidrojen peroksit uygulanması, ultraviyole uygulamaları ve elektrokimyasal uygulamalar olarak sıralanabilir [Li vd., 2011]. Yüzey sularının dezenfeksiyonunda gümüş ve bakır iyonları kullanılarak ani ısıtma ve hiperklorlama sistemi ile dezenfeksiyon işlemleri de uygulanmaktadır [Delaedt vd., 2008].

Son yıllarda klorlama gibi kimyasal ajanların eklenmesinin yanı sıra dezenfeksiyon ve elektrokimyasal dezenfeksiyon yöntemi de oldukça değer kazanmıştır [Mezule vd., 2013].

Klorlama işlemi bilinen en eski ve basit dezenfeksiyon yöntemidir. Ozon ise güçlü bir oksidan olup birçok tip mikroorganizmayı inaktif duruma getirebilir. Son yıllarda elektroliz yöntemi ile ortamda üretilen oksidanlarla yapılan çalışmalar önem kazanmıştır. Bu amaçla yapılan çalışmalarda farklı anotlar ve katotlar üzerinde çalışmalar yoğunluk kazanmış ve bor-doplanmış elmas elektrotlarla yapılan çalışmalardan iyi verim elde edilmiştir [Li vd., 2011]. Elektrokimyasal dezenfeksiyon işleminde bor doplanmış elmas elektrot dezenfeksiyon işlemi sırasında daha az klor ve bileşiklerine ihtiyaç duyulması açısından tercih edilmektedir [Lopez-Galvez vd., 2012].

Bu çalışmada elektroliz ve elektrokimyasal diyaliz hücreleri ile farklı akım değerleri ve farklı konfigürasyonlarda *Escherichia coli* içeren atık suların dezenfeksiyonu amaçlanmıştır. Elektroliz/elektrodiyaliz hücrelerinde kullanılmak üzere Nafion membranlar sentezlenmiş, H₂O₂ ve H₂SO₄ ile aktive edilmiştir. Çalışmada TiO₂ katkılı Nafion membranların kullanıldığı elektrodiyaliz hücresinde *E. coli* mikroorganizmaları içeren gerçek atıksuyun dezenfeksiyonu araştırılmıştır. Literatürde dezenfeksiyon sistemleri ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır, ancak elektroliz ve elektrokimyasal diyaliz hücrelerinde TiO₂ katkılı membranların kullanılması ile ilgili elektrokimyasal dezenfeksiyon çalışmalarına rastlanmamıştır.

2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. DEZENFEKSİYON

Su içerisinde *Legionella pneumophila* gibi hepatit ve lejyon hastalığına neden olan, *Escherichia coli*, *Compylobacter jejuni*, *Yersinia enterocolitica*, *Cryptosporidium parvum* gibi halsizleştiren ve ishale neden olan, *Hepatitis A* gibi sarılığa neden olan organizmalar bulunmaktadır. Bu nedenle suyun dezenfeksiyonu oldukça önemlidir [Tchobanoglous vd., 2013].

Escherichia coli dışkı kaynaklarından gelen, içme suyunun dezenfeksiyon çalışmalarında indikatör mikroorganizma olarak kullanılan, ishale ve vücudun susuz kalmasına neden olan hastalık yapıcı mikroorganizmalardır [Tchobanoglous vd., 2013].

2.1.1 Dezenfeksiyonun Tanımı ve Çalışmalar

İnsan vücudunun %70'ini oluşturan su insan için temel ihtiyaçtır. Su aynı zamanda endüstriyel olarak da her çeşit maddenin eldesinde gerekli olan bir bileşendir. Ancak yeryüzünde kullanılan suların büyük kısmı biyolojik olarak kirlilik içermektedir ve suyun kullanılmadan önce dezenfekte edilmesi gerekmektedir [Di Zio vd., 2005].

Dezenfeksiyon, hastalık yapıcı mikroorganizmaları etkisiz kılan ve su sağlayan sistemlerde yaygın şekilde kullanılan, etkinliğinin insan sağlığı için çok önemli olduğu bir prosestir [Xu vd., 2015].

Mikroorganizmaların su içerisinde ölü ya da canlı olarak bulunması insan sağlığı için zararlıdır. Vücut içerisine giren mikroorganizmalar insan vücudunda genellikle ateşli hastalık yapıcı özelliklere sahiptir [Madaeni, 1999]. Su içerisinde bulunan mikroorganizmalar özellikle çocuk ve yaşlılarda ishal ve idrar yolları rahatsızlıklarına neden olabilir [Chen vd., 2009].

Biyolojik olarak kirlenmiş suların iyileştirilmesinde dezenfeksiyon etkili bir yöntemdir ancak sadece dezenfeksiyon prosesinin uygulanması ile su iyileştirilmiş olmaz. Su içerisindeki mikroorganizmaların büyük bir kısmı inaktif duruma

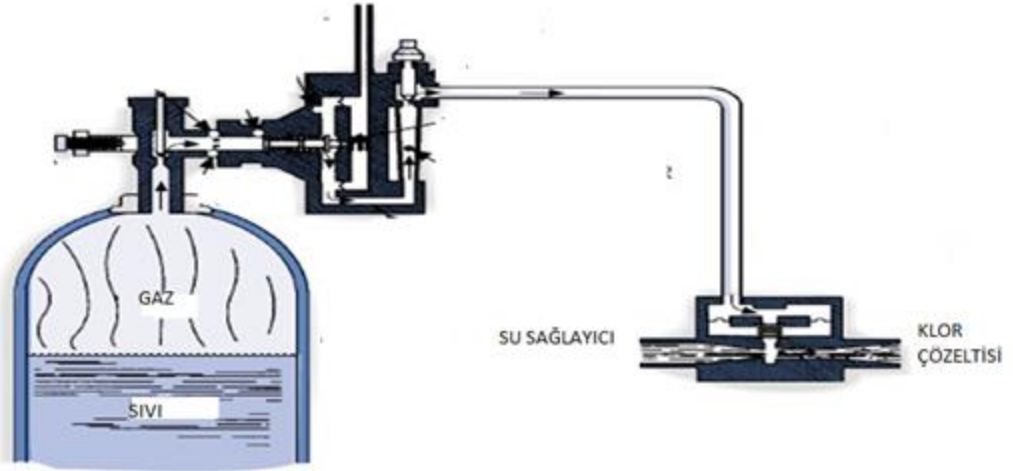
getirilmiş olsa da geri kazanım prosesi sırasında sterilizasyon gibi işlemler uygulanarak suyun içerisinden hastalık yapıcı mikroorganizmaların arındırılması gerekmektedir [Di Zio vd., 2005].

2.1.2 Dezenfeksiyon Yöntemleri, Avantajları ve Dezavantajları

2.1.2.1. Klorlama işlemi (Klor Gazı ile)

Klor, normal basınçta elementel halde toksik, sarı-yeşil gaz halinde bulunur, tüm mikrobiyal patojenlerin gideriminde etkin rol oynar, düşük konsantrasyonlarda dahi tehlikeli ve zararlı bir gazdır, havada %0,1 den fazla bulunmamalıdır. Klor gazı sıvı olarak yüksek basınçta tutulur. Atmosfer basıncından daha düşük basınca sahip olan uçta kontrol vanası ile su akımına verilir. Bu arada istenilen durumlarda suyun pH değerleri ölçülebilir.

SİLİNDİR REAKTÖRLÜ KLORİNATÖR



Şekil 2.1. Gaz klorlama sistemi [U.S.EPA, 1990].

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi gaz klorlama sisteminde klor reaktörde sıvı halde iken basınç farkıyla gaz hale dönüştürülüp ortama gaz halde verilir.

2.1.2.2. Klorlama işlemi (Sodyum Hipoklorit Çözeltisi ile)

Sodyum hipoklorit çözeltisi % 5-15 klor konsantrasyonu içerebilir ve klor gazından daha pahalıdır. Sodyum hipoklorit oldukça koroziftir ve korozyondan etkilenen ekipmanlardan uzak tutulmalıdır. Hipoklorit çözeltileri bir aydan fazla saklanmamalıdır ve soğuk, kuru ve karanlık ortamlarda tutulmalıdır ve basit klorlama sistemi ile çözelti tankı ve pompanın bulunması sistem için yeterlidir.

2.1.2.3. Klorlama (Katı, Kalsiyum Hipoklorit ile)

Kalsiyum hipoklorit beyaz katı maddedir ve %65 klor içerir. Kalsiyum hipoklorit paketlenmiş karardır, 1 seneye kadar bozunmadan kalabilir. Sert kokulu, korozif bir maddedir. Organik maddelerden uzak tutulmalıdır. Organik maddelerle etkileşimi sonucunda yangın veya patlama gerçekleşebilir. Kalsiyum hipoklorit karıştırma tankında doğrudan serbest akan suya çözdürülebilir veya düşük basınçlı ortamda tanklarda saklanabilir. Klorlama işlemi elektrokimyasal yöntemler kullanıldığında, ortamda klor iyonlarının oluşturulması için fazla miktarda kimyasal eklenmediği ve küçük yer kaplayıp daha verimli olduğu için daha avantajlıdır [Moraes ve Bertazzoli, 2005].

2.1.2.4. Kloramin İşlemi

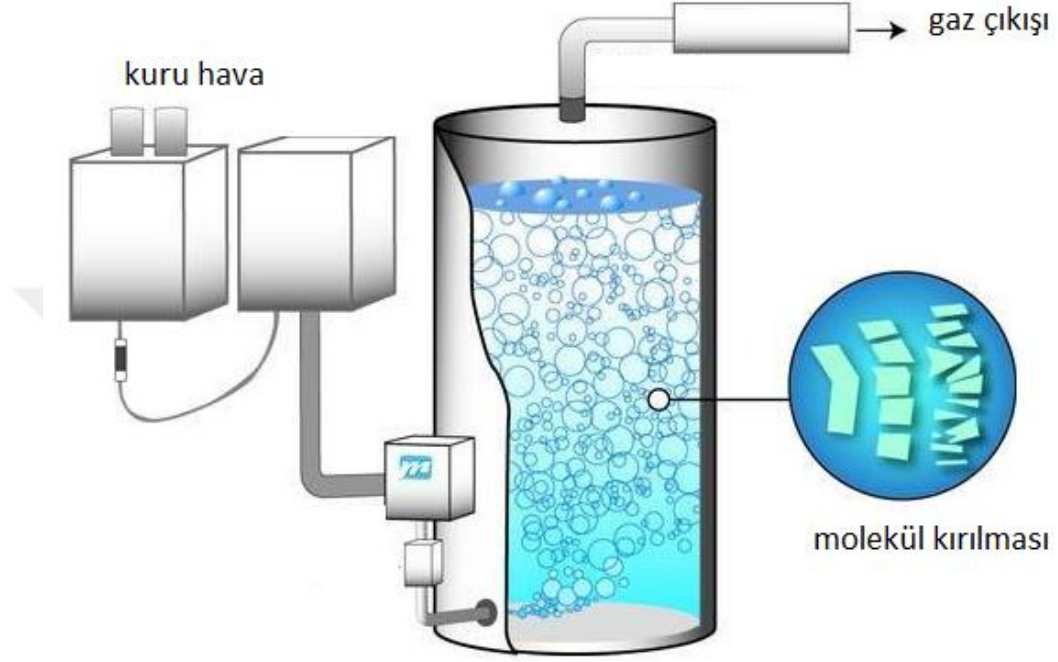
Kloramin amonyak içeren suyun klorlanması ile oluşabilir. Etkili bir bakteri öldürücüdür ve daha az dezenfeksiyon yan ürünleri oluşturur. Zayıf dezenfektandır. Virüs ve protozoalara karşı serbest klorlardan çok daha zayıf etki gösterir. Amonyak içeren çözeltiliye klor gazı uygulanarak kısa sürede elde edilebilir.

2.1.2.5. Ozonlama

Ozon oksijenin üç atomlu allotropudur. Güçlü oksitleyici ve dezenfekte edicidir. Yüksek voltajlı elektrotlardan geçirilen kuru hava ile elde edilir. Dozajlama ve kısa sürede etkileşimi açısından klora göre daha avantajlıdır. Stabil değildir. Yerinde üretilip direk uygulanmalıdır. Oksijen veya hava sağlayıcı elektriksel güç kaynağına ya da elektrotlara güç sağlar bu şekilde ozon üretimi sağlanmış olur. Saf oksijen sağlanması hava sağlanmasından daha avantajlıdır. Daha az enerji harcanarak yüksek ürün yoğunluğu sağlanır [U.S.EPA,1990].

Ozon dezenfeksiyonu hücreyi eriterek veya hücre zarını yırtarak meydana gelir ve yapılan çalışmalara göre ozon gazının dezenfeksiyon etkisi aynı şartlarda klordan 3125 kat daha fazladır.

OZONLAMA SİSTEMİ



Şekil 2.2. Ozonlama sistemi [U.S.EPA, 1990].

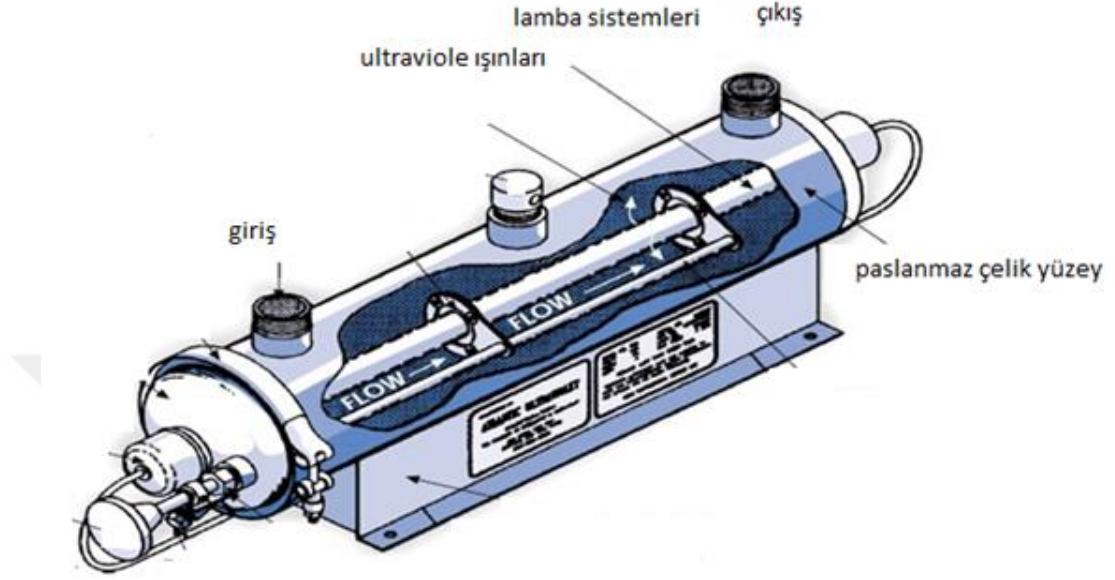
Ozonlamada, ozon ortamda oluşturulmalı ve oluşturulduğu yerde kullanılmalıdır. Ozon, havanın elektrotlar içeren sisteme verilmesiyle oksijenden elde edilir ve dezenfeksiyon işleminin yapılacağı ortamda kullanılır.

2.1.2.6. Ultraviyole Işınları

Zehirli kimyasalların suyu kontamine etmesi nedeniyle ultraviyole ışınları yardımıyla dezenfeksiyon işlemi klorlama ve benzeri yöntemlere göre daha yüksek maliyetine karşın kullanılmaktadır [Wolfe, 1990].

Özel lambalar ile yapılır. Uygulandığı zaman organizmanın hücre duvarı, hücre zarı, genetik maddesi gibi yapıları bozar. UV bakteri ve virüslerin yıkımında etkindir. Ozon gibi ikinci bir dezenfektanın kullanımıyla mikroorganizmaların tekrar çoğalmaları da önlenebilir. Küçük sistemler için uygundur. Çünkü toksik kalıntıları tam olarak bilinmemektedir. *Giardia lamblia* ve *Cryptosporidium* gibi

mikroorganizmaları inaktif etmez. Askıda katısı bulunan sıvı dezenfeksiyonları için uygun değildir. Verim organizmanın adsorpladığı enerjiye bağlıdır [U.S.EPA,1990].



Şekil 2.3. Ultraviyole ışınlarıyla dezenfeksiyon sistemi [U.S.EPA,1990]

Şekil 2.3’de görüldüğü gibi ultraviyole ışınlarıyla dezenfeksiyon işleminde su girişten çıkışa kadar ultraviyole ışınlarına maruz kalmaktadır.

Genel olarak dezenfeksiyon sistemleri karşılaştırıldığında; sodyum hipoklorit ile yüksek derecede bakteri inaktivasyonu sağlanırken ortamda hipoklorit kaynaklı çok fazla ara ürün oluşur. Ozon ve ultraviyole ışınlarının uygulandığı dezenfeksiyon sistemlerinin verimleri iyidir ancak maliyeti yüksektir. TiO₂’nin fotokatalitik özellikleri yardımıyla yapılan dezenfeksiyon işleminde mikroorganizmaların bir çoğunun dezenfekte edildiği görülmüştür ancak dezenfeksiyon hızı düşüktür. Membran filtreleme yöntemlerinde yüksek verim alınmıştır mali durumlar minimize edilmeye çalışılmaktadır [Norton-Brandão vd., 2013].

Dezenfeksiyon sistemleri için ekonomik boyutu, güvenilir olması, düşük enerji ihtiyacı, kullanılan kimyasalın kolay depolanabilir olması, taşınmasında sorun yaşanmaması ve az yer kaplaması oldukça önemlidir. Bu yüzden elektrokimyasal

yöntemle dezenfeksiyon son zamanlarda oldukça önem kazanmıştır [Patermaraxis ve Fountoukidis, 1990].

Elektrokimyasal yöntemlerin uygulanması ile kimyasalların taşınması sırasında veya ortama eklenmesi sırasında kimyasallardan korunma ve diğer taşınma problemlerinin önüne geçilmesini de sağlar [Jeong vd., 2007].

Çizelge 2.1’de dezenfeksiyon sistemleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.1. Dezenfeksiyon sistemlerinin karşılaştırılması

Özellik	Klor Gazı	Sodyum Hipoklorit	Klorlu bileşikler	Klor dioksit	Ozon	UV ışınları
<i>Maliyet</i>	düşük	orta	orta	orta	yüksek	yüksek
<i>Koku Giderimi</i>	yüksek	orta	orta	yüksek	yüksek	çok düşük
<i>Organik Madde ile Etkileşimi</i>	oksitler	oksitler	oksitler	oksitler	oksitler	uv ışını absorbe olur
<i>Korozif Özellik</i>	yüksek	orta	orta	yüksek	yüksek	korozif değil
<i>Toksik Özellik</i>	yüksek	yüksek	orta	orta	orta	orta
<i>Parçacık İçerisine Etkisi</i>	yüksek	yüksek	orta	yüksek	yüksek	orta
<i>Güvenlik Endişesi</i>	yüksek	orta	yüksek	yüksek	orta	düşük
<i>Çözünürlük</i>	orta	yüksek	yüksek	yüksek	orta	çözünürlük değeri yok
<i>Kararlılık</i>	kararlı	az kararsız	kararsız	kararsız	kararsız	kararlılık değeri yok
<i>Bakteriler Üzerine Etkisi</i>	mükemmel	mükemmel	iyi	mükemmel	mükemmel	iyi
<i>Protozoalar Üzerine Etkisi</i>	düşük	düşük	düşük	iyi	iyi	mükemmel
<i>Virüsler Üzerine Etkisi</i>	mükemmel	mükemmel	orta	mükemmel	mükemmel	iyi
<i>Dezenfektan Olarak Kullanımı</i>	yaygın	yaygın	yaygın	artıyor	artıyor	hızla artıyor

2.2. ELEKTROKİMYASAL DEZENFEKSİYON

Son yıllarda gelişmekte olan dezenfeksiyon teknolojilerinden birisi de elektrokimyasal dezenfeksiyon yöntemidir [Cano vd., 2012]. Basit ve pahalı olmayan bir yöntem olduğu için de son zamanlarda diğer yöntemlere göre önem kazanmaya başlamıştır [Ninomiya vd., 2013]. Elektrokimyasal dezenfeksiyon, doğrudan elektroliz edilen suyun elektrokimyasal hücre içerisinde tekrar kullanılmasıyla gerçekleşir [Cano vd., 2012].

Elektrokimyasal dezenfeksiyon, doğrudan oksidasyon ve dolaylı oksidasyon olmak üzere iki farklı reaksiyon mekanizması ile açıklanabilir. Mikroorganizmaların yıkımı ve organik kirleticilerin oksidasyonu/degradasyonu doğrudan oksidasyonda anot yüzeyinde elektron transferi ile, dolaylı oksidasyonda HOCl/OCl⁻ gibi güçlü oksitleyici ajanların varlığında reaksiyon ortamında gerçekleşir [Feng vd. 2004; Cano vd., 2012; Delaedt vd., 2008; Liu vd., 2012a; Jeong vd., 2007; Ninomiya vd., 2013; Tanaka vd., 2013; Mascia vd., 2012; Kerwick vd., 2005; Xu vd., 2010; Lacasa vd., 2013; Ciu vd., 2013; Nayakkara vd., 2011; 2012].

Elektrokimyasal dezenfeksiyon işlemi sırasında mikroorganizmalar ortamda üretilen kimyasallarla veya serbest radikaller ile etkisiz hale getirilebilmektedir [Nayakkara vd., 2012].

Elektrokimyasal yöntemle dezenfeksiyonun avantajları diğer yöntemlerle kıyaslandığı zaman ekipmanların kullanım kolaylığı, prosesin otomasyonunun kolaylığı, kullanımı sırasında ekipmanların az yer kaplaması, ekstra kimyasalların kullanımına gereksinimin olmaması, istenilen kimyasalların reaksiyon ortamında üretilmesi ve enerji dostu olması olarak gösterilebilir [Liu vd., 2012a]. Elektrokimyasal yöntemle reaksiyon ortamında hipoklorit ve benzeri klorlu bileşenlerin üretilmesi işlemine elektrokimyasal klorinasyon (klorlama) işlemi denir [Lacasa vd., 2013].

Elektrokimyasal dezenfeksiyon yönteminin verimliliği hücre yapısına ve kullanılan elektrotlara, akış hızına ve akım yoğunluğuna bağlı olarak değişir [Kerwick vd., 2005].

Elektrokimyasal yöntemle dezenfeksiyonda elektrot seçimi çok önemlidir. Bu nedenle son zamanlarda elektrotları geliştirmek için yapılan çalışmalar artmış, bor doplanmış elmas elektrotlar ön plana çıkmıştır. Bor-doplanmış elmas elektrotların korozyona karşı dayanıklı olması, ortamda dezenfeksiyon için istenilen kimyasalların daha kolay olarak elde edilmesine yardımcı olması ve kimyasal kararlılığı gibi özellikleri bor doplanmış elmas elektrotları avantajlı hale getirmiştir [Liu vd., 2012b].

Bor-doplanmış elmas elektrotlarla zor oksidasyon koşullarında çalışılabilir, ozon ve hidrojen peroksit gibi diğer anotlarla üretimin çok zor ya da imkansız olduğu bileşenler çözelti ortamında üretilebilir [Lacasa vd., 2013]. Bor-doplanmış elmas elektrot sayesinde klor iyonlarından faydalanarak daha fazla serbest klor elde edilebilir ve ortamda hidroksil radikalleri daha kolay üretilebilir [Lopez-Galvez vd., 2012].

Elektrokimyasal dezenfeksiyon teknolojilerinde dezenfeksiyon ajanları üretimi olabileceği gibi [Gordon vd., 1998], dezenfekte edilecek bileşenler elektrot yüzeyinde toplanabilir [Oren vd., 1983], elektrot yüzeyinde yok edilebilir [Okochi vd., 1997] ya da elektroforez ile [Wouters vd., 2001] inaktif duruma getirilebilir [Jeong vd., 2007].

Elektrokimyasal dezenfeksiyon işleminde genellikle düşük akımlarda çalışılmak istenir. Bunun temel nedeni yüksek akım değerlerine çıkıldıkça anoda bağlı olarak ortamda klorat ve perklorat gibi istenmeyen bileşenlerin oluşabilecek olmasıdır. Boyut olarak kararlı elektrotlar anot olarak kullanıldığı durumlarda yüzme havuzlarını temizleyecek kadar hipokloritin üretilmesi mümkündür. Düşük akım yoğunluklarında boyut olarak kararlı anot materyalleriyle çalışıldığı zaman ortamda klorat ve perklorat gibi bileşenlerin oluşması önlenir [Cano vd., 2012].

Ti/RuO₂ - Ti/IrO₂ gibi boyut olarak kararlı anotların kullanılmasıyla ortamda klorür iyonunun varlığında serbest klor, HClO, ClO⁻ gibi bileşenler kolaylıkla elde edilebilir [Schmalz vd., 2009].

Hidrojen peroksit üretimi de dezenfeksiyon için önemli olup katot materyali olarak karbon, grafit veya karbon kaplanmış elektrotlar kullanıldığında yüksek miktarda hidrojen peroksit üretimi kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Karbon ve türevleri katot, demir ve türevleri anot olarak kullanıldığında Fenton reaksiyonu ile ortamda hidroksil iyonları ve hidroksil radikalleri de oluşturulabilir. Anot olarak demir kullanılması Fenton reaksiyonlarını gerçekleştirmesinin yanı sıra ortamda bulunan demir iyonları koagülasyon reaksiyonlarına da yardımcı olur [Cotillas vd., 2015].

Son yıllarda hidrojen peroksit, hidroksil ve benzeri radikallerin üretilmesi ile dezenfeksiyon işlemi önem kazanmıştır ve diğer yöntemlerle kıyaslandığında önemli avantajları bulunmaktadır. Hidroksil radikali kullanılan dezenfeksiyon proseslerinin verimi klor kullanılanlardan 10^5 kat kadar daha fazladır ve çok küçük miktarlardaki hidroksil radikali bile büyük miktarlarda atıksuyun dezenfeksiyonunu sağlayabilmektedir [Schmalz vd., 2009].

Elektrokimyasal dezenfeksiyon proseslerinde paslanmaz çelik, karbon, karbonlu malzemeler, titanyum ve platin anot ve katot materyalleri olarak kullanılacağı gibi polimer ve polimer destekli malzemeler de dezenfeksiyon amaçlı kullanılabilir [Natishan, 1984].

Dezenfeksiyonda dikkat edilmesi gereken önemli bir konu da NaCl'nin elektrolizi sırasında ortaya çıkan zehirli nitelikteki bileşenlerdir. Bu bileşenlerin ortamda bulunması içme suyu kalitesini olumsuz etkiler. NaCl'nin ortamdaki miktarının çokluğuna veya azlığına göre su güçlü asidik veya zayıf asidik olarak sınıflandırılır [Nakajima vd., 2004]. Yüksek derişimde NaCl içeren çözeltilerin elektrolizi sonucu ortaya çıkacak bileşenler yüksek korozif özellikte olup, düşük konsantrasyonlarda NaCl içeren çözeltilerin elektroliziyle birlikte medikal ortamların dezenfeksiyonunu sağlayacak çözeltiler elde edilebilir [Kumon, 1997].

Deniz suyunda bulunan yüksek miktarda NaCl nedeniyle herhangi bir katkı maddesi kullanılmadan deniz sularının elektrokimyasal yöntemle dezenfeksiyonu mümkündür [Tsolaki vd., 2010].

Kloramin grupları da dezenfeksiyon kapasiteleri yüksek gruplardandır. Ancak içme suyunda bulunan organik yapılar ve klor iyonları ile aminler arasında gerçekleşen reaksiyonlar sonucu oluşan kimyasallar insan sağlığı için tehlikelidir ve içme suyunda bulunmaması gerekir [Kimbrough ve Suffet, 2002]. Reaksiyon ortamında bulunan ya da oluşturulan kloramin grupları ile de dezenfeksiyon uygulanabilir. Elektrokimyasal dezenfeksiyon yöntemiyle ortamda sentezlenen ClO⁻ iyonları ortamdaki NH₄⁺ iyonları ile tepkimeye girerek klor amin gruplarını oluştururlar. Bu durum elektrokimyasal dezenfeksiyon sistemlerinde dezenfeksiyon verimini arttıran koşullardan birisidir [Cotillas vd., 2013].

2.2.1. Sodyum Klorürün Elektrolit Olarak Kullanıldığı ya da Ortamda Klor ve Türevlerinin Bulunması Durumunda Elektroklorlama ve Klorlama İşlemlerinde Meydana Gelebilecek Reaksiyonlar

Çözelti içerisindeki klor iyonları çözülmüş klor gazı haline gelebilir.



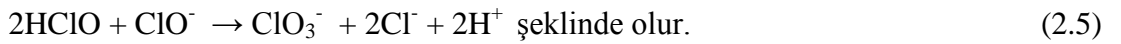
Anotta oksijen gazı meydana gelebilir.



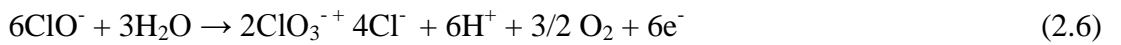
Çözülmüş klor su ile hipokloröz asit ve hipoklorit iyonları meydana getirir.



Alkalin varlığında ve zayıf asidik ortamda pH değerlerine bağlı olarak mekanizma;



Özel koşullarda hipokloritin elektrokimyasal oksidasyonu nedeniyle klorat oluşumu görülebilir.



Ayrıca RuO₂ / TiO₂ anotlarda klorür doğrudan elektrokimyasal oksidasyonla çözünmüş hipoklorit türü olmadan klorat oluşturabilir.



Bölünmemiş hücrelerde aktif klorun hidrojen eldesi ile birlikte katodik reaksiyonu görülebilir.



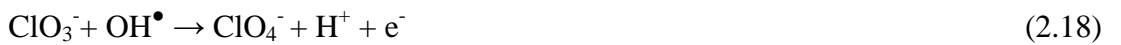
[Mascia vd., 2012].

Ortamda bulunan ClO⁻ iyonları ve Cl₂'nin etkisiyle pH değerlerine bağlı olarak ;



reaksiyonları gerçekleşir [Lacasa vd., 2012].

Elektrokimyasal dezenfeksiyon sistemlerinde anot materyallerinin tipine bağlı olarak kimyasal reaksiyonlarda değişiklik olabilir [Lacasa vd., 2011]. Eğer anot materyali olarak bor-doplanmış elmas elektrot kullanılırsa;



reaksiyonları görülür [Lacasa vd., 2012].

Elektrokimyasal reaksiyon hızlı olduğu için aktif klorun indirgenmesi tepkimeleri kütle transferi tarafından kontrol edilir [Mascia vd., 2012].

2.2.2 Ortamda Amonyum İyonlarının Bulunması Durumunda Monokloramin, Dikloramin, Trikloramin Bileşenlerine Bağlı Olarak Gerçekleşebilecek Reaksiyonlar



ve bu bileşenlere bağlı olarak;



reaksiyonları gerçekleşir [Lacasa vd., 2012].

2.3. MEMBRAN SİSTEMLERİ ve DEZENFEKSIYON

2.3.1. Membranlar ve Kullanımları

Membran sistemlerinin içme suyu eldesinde kullanımı Almanların İkinci Dünya Savaşı sırasında bakteri yoğunluğu fazla sulardan membran sistemleri yardımıyla içme suyu eldesine kadar dayanmaktadır. 1947 yılında Müller membran temelli su geri kazanım ünitesini bulmuş ve savaş sırasında bu sistem yardımıyla 12 ile 24 saat arasında içme suyu elde edilmiştir. 1957 yılında ise Birleşmiş Milletler ve Amerikalı su dernekleri membran sistemlerini coliform bakterilerinden suyun geri kazanım yöntemi olarak kabul etmişlerdir [Madaeni, 1999].

Membranlar genel olarak; partiküler karışımların ayrılmasında, kontrollü salım proseslerinde, enerji depolama sistemlerinde ve reaktör uygulamalarında kullanılır [Telakıl, 2008].

Membran sistemleri yiyecek endüstrisinde ve içme suyu proseslerinde dünya çapında oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle besin hazırlama sektöründe membran sistemleri genel sistemlerin %45'ini kapsamaktadır. Bu amaçla en fazla kullanılan sistem ultrafiltrasyon sistemidir [Paugam vd., 2010]. Ultrafiltrasyon yöntemi besleyici, fonksiyonel ve biyolojik olarak alınması gereken ya da zenginleştirilmesi gereken maddelerin zenginleştirilmesi için kullanılan bir yöntemdir [Regula vd., 2014].

Ultrafiltrasyon işlemi iyi bir su geri kazanım yöntemi olarak da uygulanmaktadır. Ultrafiltrasyon membranlarının yüksek seçiciliği sayesinde, son on beş yılda suyun geri kazanım proseslerinde kullanılmış ve sınırlı kimyasallar ve sıcaklık durumlarından daha az etkilenmesi sayesinde yüksek düzeyde yararlı bulunmuştur [Regula vd., 2014].

Membranlar ile filtreleme yöntemi ve ultraviyole ışınlarının uygulanması ile de dezenfeksiyon işlemi yapılabilir. Yüksek maliyeti ve kullanım zorluğuna rağmen klorlama gibi bilinen işlemlere göre daha avantajlı olduğu düşünülmektedir. Elektrokimyasal dezenfeksiyon işleminin bu işlemlere göre temel avantajı ise gelen atıksu ya da farklı bileşenlerde dezenfeksiyon işlemi sürekli olarak, uygulanan elektrik akımı ile doğrudan ya da dolaylı olarak yapılabilmesidir [Schmalz vd., 2009].

Membranların uzun süreli kullanılabilmeleri ve bozulmamaları için maruz kaldığı koşullar ve düzenli olarak temizlenmeleri önemlidir. Membranlar kullanıldıkları konfigürasyonlara, çalışılan kimyasalların veya çözeltilerin iyonik kuvvetliliğine, sahip oldukları yapıya ve sıcaklık aralıklarına göre belirli kullanım ömrüne sahip olan yapılardır [Regula vd., 2014].

Sıvı faz membran sistemleriyle de ortamdaki bazı maddeler ortamdaki alınabilir. Sıvı faz membran sistemlerinde sürekli akım sistemleriyle çalışıldığında zaman akım sırasında membran sistemlerinden molekül ağırlıkları düşük olan bileşenler geçerken molekül ağırlıkları büyük olan bileşenler ortamda kalır [Rivas vd., 2011].

Dezenfeksiyon Proseslerinde Membran Sistemlerinin Kullanılmasının Bazı Avantajları;

Dezenfektan, koagülant benzeri kimyasal ajana ihtiyaç duymaması (dezenfektan, koagülant), parçacık büyüklüğüne göre de ayırma işlemi yapabiliyor olması sürekli sistem olarak kolayca çalışılabilmesi ve beslenen suyun kalitesinden bağımsız olması, etkili ve yoğun bir sistem olması, otomasyonunun kolay yapılabilmesi, membran karakterine bağlı olarak kullanım kapasitesinin kolayca arttırılabilir olmasıdır. Membran sistemlerinde halojen yapılı organik maddeler oluşturulmaz, ara madde olarak ya da işlem sonucunda inorganik yapılar oluşturulmaz, dezenfektanlara ihtiyaç yoktur, birçok virüs ve bakterinin dezenfeksiyonunda kullanılabilir, aynı zamanda renk ve bulanıklık giderimi yapılı ve geniş sistemlerde kullanılmaya müsaittir [Di Zio vd., 2005, Arnal vd., 2002].

Ayrıca ultrafiltrasyon yöntemi ve membran sistemlerinin dezenfeksiyon amaçlı kullanılması diğer sistemlere göre daha avantajlı görünmektedir [Di Zio vd., 2005].

Dezenfeksiyon sistemlerinde ortamda bulunan mikroorganizmalar öldürülür yani inaktif duruma getirilir ancak ortamda ölü ya da diri halde kalıntıları bulunmaktadır. Membran sistemlerinde membran yüzeyindeki gözenek büyüklüğüne göre kalıntılar ortamdaki alınabilmektedir [Madaeni, 1999].

Membran sistemlerinde dezenfeksiyonun başka bir yöntemi de pH yardımıyla membran sistemlerini pozitif yükle, kirleticileri negatif yükle yükleyerek kirleticilerin membran yüzeyine tutunmalarını sağlamaktır [Madaeni, 1999].

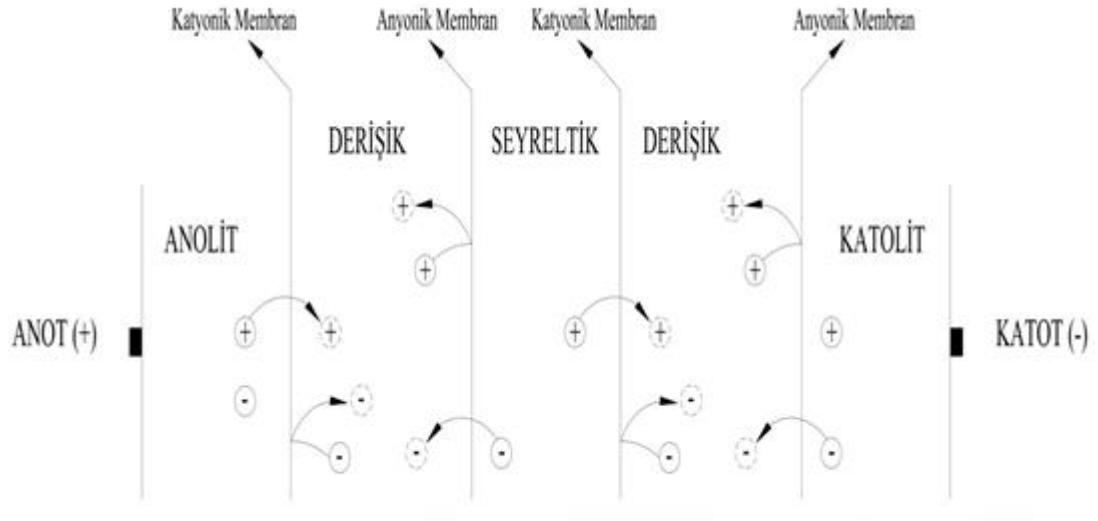
Kullanılan birçok membran çeşidinden birisi de elektriksel yüklü membranlardır. Bu membranlar yapısında pozitif veya negatif yüklü iyonlar içerirler. Bir membran pozitif yüklü iyonlar taşıyorsa anyon değiştirici membran, negatif yüklü iyonlar taşıyorsa o katyon değiştirici membran olarak adlandırılır. Geçirim mekanizması aynı yüklü iyonların birbirini itip farklı iyonların birbirini çekmesine dayanmaktadır. Bu yapılar genellikle elektrokimyasal hücrelerde kullanılır [Telakıl, 2008].

Membran kirliliği elektrokimyasal diyaliz yöntemi için en önemli sınırlayıcı etkilere birisidir membran sistemlerinde biyolojik kirlilik olması durumunda membran içerisinden geçiş sınırlanmaktadır [Lee vd., 2002].

2.3.2. Elektroliz/Elektrodiyaliz

Elektroliz ve elektrodiyaliz işlemleri potansiyel farkının yürütücü güç olduğu sistemlerdir. Eğer bir elektriksel potansiyel farkı bir elektrolit çözeltisine uygulanırsa sonrasında pozitif iyonlar (katyonlar) negatif elektroda (katot), negatif iyonlar (anyonlar) pozitif elektroda (anot) göç ederler. Yüksüz moleküller yürütücü kuvvetten etkilenmezler ve böylece elektriksel yüklü bileşenler onların yüksüz karşılıklarından ayrılabilirler. Elektriksel yüklü membranlar iyonların göçünü kontrol etmek için kullanılırlar. Bu tip membranlar elektriksel iletkenlerdir. Bu membranlar iki farklı tipte incelenirler. Katyon değiştirici membranlar pozitif yüklerin, anyon değiştirici membranlar negatif yüklerin geçişine izin verirler [Telakıl, 2008].

Elektrodiyaliz sistemi anolit, katolit, seyreltik ve derişik olarak tanımlanan kısımlardan oluşmaktadır. Deney sistemlerinde bu kısımlardan bir kaç ya da tamamı kullanılabilir. Amaçlanan farklı koşullar için farklı kısımlar oluşturulabilir. Elektrodiyaliz sisteminin yapısı Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Elektrodiyaliz sistemi.

Tanklardan pompalar aracılığı ile hücreye gelen elektrolit, anot tarafından giriş yaptığında ilk olarak anot elektrodu ile kullanılan ilk membran arasında kalan bölgeye geçiş yapar. Anot ile ilk membran arasında kalan bölme anolit olarak adlandırılır. Katot tarafından giriş yapan elektrolit ise, ilk olarak katot ile katoda en yakın ilk membran ile etkileşir. Katot ile membran arasında kalan bölge katolit olarak adlandırılır.

Katyonik membranlar pozitif yüklü iyonları geçirirken anyonik membranlar negatif yüklü iyonları geçirirler.

Elektrodiyaliz sisteminde membranlar arasında anyon ve katyonların geçişleri dolayısıyla daha fazla bulunduğu kısım derişik kısım, daha az bulunduğu kısım seyreltik kısım olarak adlandırılır.

Üretilen dezenfektanların çoğunluğu derişik bölgede iyon halinde bulunduğundan derişik kısımda dezenfeksiyonun daha etkili olduğu düşünülebilir. Bununla birlikte, uygulanan akım nedeniyle seyreltik bölgede iyonik olmayan oksitleyici bileşenlerin üretilmesiyle seyreltik bölgede de dezenfeksiyon gerçekleşir.

Elektroliz/Elektrodiyaliz ile membranlar aracılığı ile dezenfeksiyon sağlanır. Farklı akım değerlerinde ve konfigürasyonlarda farklı dezenfeksiyon verimleri elde edilir [Tchobanoglous vd., 2013]. Elektrokimyasal dezenfeksiyon işlemi sırasında hipoklorit iyonları, klor ve klorlu bileşenlerin, hipoklorik asitin ortamda bulunması ve membranlarla uzun süre etkileşmesi membranlara zarar verir [Regula vd., 2014].

Membran içerisine katkı maddelerinin eklenmesi, membran içerisinde geçişi sağlayan boşlukların tasarlanması, anyon ve katyon geçişleri ve membran aktifliği, membran sistemlerinde oldukça önemlidir. Membran sistemlerinde katyon değişimini sağlayan en temel yapılardan birisi de Nafion membranlardır [Pontiè vd., 2012].

İyon değiştirici polimerik yapıli membranlar sayesinde metallerin sudan geri alınması ve tuz yoğunluğunun azaltılması sağlanmıştır [Sata vd., 1999]. Katyon ve anyon değişimini sağlayan polimerik yapıdaki membranlar sayesinde deniz suyunun tuz yoğunluğu elektrokimyasal diyaliz yöntemi ile ayarlanabilmekte ve deniz suyundan normal su elde edilmesi prosesleri endüstriyel ölçekte yapabilmektedir [Sata vd., 1996].

İyon değiştirici polimer yapıli membranların elektrokimyasal dezenfeksiyon sistemlerinde kullanmasında en önemli unsurlardan birisi akım yoğunluğunun sınırlandırılması durumudur. Elektrokimyasal dezenfeksiyon sistemlerinde hangi akım yoğunluğu aralığında çalışılacağıının belirlenmesi membranların kullanım ömürleri bakımından önemlidir [El Sayed vd., 2008].

Membran sistemleriyle içme sularında eş zamanlı olarak maddelerin ortamda yıkımı, foto-katalitik dezenfeksiyon ve ayırma işlemleri yapılabilir. Özellikle titanyum ve titanyum katkıli yapılarda titanyumun foto-katalitik özelliğinden faydalanılarak kirleticinin membran yüzeyinde ayrılması, membran içerisinde bulunacak titanyumun dezenfeksiyon etkisi ve membran üzerine uygulanacak akımın ya da membranın yıkım etkisiyle maddelerin ortamda yıkımı sağlanabilir [Liu vd., 2012b]

Sıfır değerlikli demir partiküllerinin selüloz kaynaklı membran yüzeylerine paladyum ve nikel ile birlikte katkılanmasıyla demirin havadaki bileşiklerle kolay etkileşimi engellenir ve kirlilik giderici olarak demirden daha verimli şekilde faydalanılabilir. Membran sistemlerinde sıfır değerlikli demir kullanılarak özellikle ortamdaki kloro-fenoller, perkloroetilen ve trikloroetilen gibi bileşenler ortamdan ayrıştırılabilir [Meyer vd., 2004].

2.4. LİTERATÜRDE ELEKTROKİMYASAL DEZENFEKSİYON İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Cotillas vd. [2013] boyut olarak kararlı anot, iletken elmas anot, paslanmaz çelik katot ve alüminyum plakalar kullanarak atık suların elektrokimyasal yöntemlerle geri kazanımını incelemiştir. Çalışmaları sırasında elektrokimyasal dezenfeksiyon ve elektrokoagülasyon yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla ortamdaki bulanıklığın ve *Escherichia coli* kolonilerinin zamanla azaldığını alüminyum plakaların hücre içerisine yerleştirilerek bipolar kısımlar oluşturulduğunda elektrokoagülasyon ve elektrokimyasal dezenfeksiyonun veriminin arttığını gözlemlemiştir. Elektrik uygulanmasının *Escherichia coli* mikroorganizmalarını dezenfekte etmeden önce bulanıklığı gidermede etkili olduğunu, iletken elmas elektrotlar kullanıldığında klorlu bileşenlerin oluştuğunu ve klorat gibi zararlı yapılar için sınırlandırıcı etkiye sahip olduğunu belirlemiştir. pH değeri 8 civarında olduğunda elektrokimyasal dezenfeksiyon ve elektrokoagülasyon işlemlerinin daha verimli olduğunu, yüksek akış hızlarında çalışıldığında kütle transferinin artmasıyla bulanıklık gideriminin de arttığını gözlemlemiştir [Cotillas vd., 2013].

Chen vd. [2009] kurşun anot ve titanyum katotlarla *Escherichia coli* bakterisinin dezenfeksiyonunu incelemiştir. Kurşun elektrotların korozyona dayanıklı olduğunu, elektriksel iletkenliğinin iyi olduğunu, kurşun elektrotlarla dezenfeksiyon sistemlerinin kurulabileceğini ve kısa sürede mikroorganizmaların inaktif duruma gelebileceğini belirlemiştir. Ayrıca ortamda hidroksil radikallerinin oluşturulmasının dezenfeksiyon sistemlerinde dezenfeksiyon verimi için önemli olduğunu gözlemlemiştir [Chen vd., 2009].

Tsolaki vd. [2010] balast sularının elektrokimyasal yöntemle dezenfeksiyonunu incelemişlerdir. Çalışmalarında sodyum hipokloritin güçlü bir dezenfektan olduğunu, elektrokimyasal dezenfeksiyon yöntemiyle ortamda bulunan mikroorganizmaların kısa sürede dezenfekte edildiğini, trihalometan derişiminin düşük olduğu durumlarda ortamda bulunan organik karbon miktarının artış gösterebileceğini gözlemlemişlerdir [Tsolaki vd., 2010].

Feng vd [2004] çimlenmiş kahverengi pirinç suyundaki *Legionella* bakterilerinin dezenfeksiyonu üzerine çalışmışlardır. Çalışmaları sırasında 3x10 cm büyüklüğünde titanyum katot ve 3x10 cm büyüklüğünde (Ti/RuO₂ kaplanmış) titanyum anot kullanmışlar 87 mL/dakika akış hızında 100 ml lik reaktörde 1-1,5 kv voltaj ve 5 kHz akım uygulamış ve zamanla *Legionella* bakteri yoğunluğunun azaldığını gözlemlemişlerdir [Feng vd., 2004].

Gusmão vd. [2010] boyut olarak kararlı elektrotlarla *Escherichia coli* mikroorganizma kolonilerinin dezenfeksiyonunu incelemiş ve 60 dakikada 10⁶ cfu/mL lik mikroorganizma yoğunluğunun 200 L/saat akış hızında tamamen dezenfekte edildiğini gözlemlemişlerdir [Gusmão vd., 2010].

Cano vd. [2012] *E.coli* miktarı, toplam azot miktarı, klor miktarı, nitrat miktarı, oksijen miktarı ve pH değerlerine göre atıksuları üçe ayırmış BDD anot ve paslanmaz çelik katot kullanarak 0,6 dm³’lük tankta 2.5 dm³/dakika akış hızıyla 1.3-13 A/m² aralığında akım yoğunluğu uygulamışlardır. Çalışmalarının sonucunda dezenfeksiyonun gerçekleşmesinin klor konsantrasyonu ile doğru orantılı olduğunu yüksek akım yoğunluğunda dezenfeksiyonun daha iyi olduğunu, *E. coli* miktarının uygulanan akımla birlikte zamanla azaldığını ve harcanan enerji miktarının artmasıyla *E. coli* miktarının azaldığını gözlemlemişlerdir [Cano vd., 2012].

Guillou ve El Murr, [2002] düşük akım değerlerinde platin elektrotlar kullanarak *Saccharomyces cerevisiae* mikroorganizmalarının inaktivasyonunu incelemişlerdir. Çalışmalarında pH değerinin 7'nin altında olmasının daha etkili dezenfeksiyona sağlandığını, akım değerinin artışıyla ortam sıcaklığının arttığını, pH, sıcaklık ve akım değerleri gibi değerlerde optimum koşullarda çalışıldığında dezenfeksiyonun maksimum düzeyde olduğunu gözlemlemişlerdir [Guillou ve El Murr, 2002].

Li vd. [2004] klorlama ve elektrokimyasal klorlama prosesleri arasındaki dezenfeksiyon verimi farklarını NaCl, Na₂SO₄ ve NaNO₃ gibi kimyasalların dezenfeksiyon sistemlerine etkisini incelemişler ve özellikle NaCl'nin dezenfeksiyon verimini arttırdığını, elektrokimyasal klorlama işleminin klorlama işlemine göre daha avantajlı bir proses olduğunu ve serbest radikaller oluşturularak dezenfeksiyonu kolayca sağladığını gözlemlemişlerdir [Li vd., 2004].

Delaedt vd. [2008] *E. coli* ve *L. pneumophila* bakterilerinin 0.07-0,11 A aralığında akım yoğunluklarında serbest oksidantların başlangıç konsantrasyonlarının 0,25 ve 0,5 mg/L aralığında değiştiği koşullarda titanyum elektrotlarla elektrokimyasal dezenfeksiyonu incelemişler ve *E. coli* ve *L. pneumophila* bakterilerinin dezenfekte olduğunu gözlemlemişlerdir [Delaedt vd., 2008].

Liu vd. [2012a] titanyum yapıları bileşiklerin membran yüzeylerine tutturularak membranda fotokatalitik dezenfeksiyonunu incelemiş ve membran yüzeyine titanyum ve titanyum katkılı bileşiklerin tutturulmasının dezenfeksiyon etkisini olumlu etkilediğini gözlemlemişlerdir [Liu vd., 2012a].

Liu vd. [2012b] atık suların bor doplanmış elmas film elektrot ve NaCl varlığında elektrokimyasal dezenfeksiyonu araştırmışlardır. Çalışmalarında akım yoğunluğunun artması ile maksimum inaktivasyon değerine ulaşmak için gereken çevirim sayısının azaldığını, akış miktarının artmasıyla maksimum inaktivasyon değerine ulaşmak için gereken çevirim sayısının arttığını, yüksek akım yoğunlukları ve düşük akış hacimlerinde dezenfeksiyon oranının arttığını, klor iyon konsantrasyonunun göze çarpan şekilde etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir [Liu vd., 2012b].

Jeong vd. [2007] platin anot ve grafit katot kullanarak potansiyostat ve galvanostat aracılığı ile 0-100 mA/cm² akım yoğunluğu uygulayarak klor iyonu varlığında *E. coli* inaktivasyonunu incelemişlerdir. Çalışmaları sırasında yüksek akım yoğunluğunun yüksek oranda inaktivasyon sağladığı ve 180 dakika boyunca 100 mA/cm² akım yoğunluğunda en yüksek inaktivasyon değerini gözlemlemişlerdir. Ayrıca Jeong vd. yapmış oldukları çalışmalarda farklı iki akım yoğunluğunda metil alkol bulunması durumunda *E. coli* inaktivasyonunu incelemişler ve metil alkol bulunduğu durumlarda inaktivasyon değerinin daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir [Jeong vd., 2007].

Ninomiya vd. [2013] 1.5x3.5 cm² boyutlarında TiO₂ anot ve (1x1.5 cm²) platin katot ile 5 g/L NaCl varlığında *Escherichia coli*'nin sanoelektrokatalitik inaktivasyonunu incelemiş ve *E. coli* hücrelerinin TiO₂ anot yüzeyinde dolaylı oksidasyon ile inaktif olduğunu belirlemişlerdir [Ninomiya vd., 2013].

Kim vd. [2008] sıfır değerlikli demir partiküllerini membran içerisinde kullanarak kirleticilerin yıkımını ve katyonik iyon değiştirici özelliğini incelemişler ve sıfır değerlikli demirin membran içerisine yerleştirilmesi ile membranın katyonik iyon değiştirici özelliği kazandığını gözlemlemişlerdir [Kim vd., 2008].

Tanaka vd. [2013] sürekli akış reaktöründe balık patojenlerinin (*Vibrio alginolyticus*, *Edwardsiella tarda*, *Lactococcus garvieae* ve *Vibrio anguillarum*) deniz suyundan 1 volt potansiyel uygulayarak 200 mL/dakika akış hızında platin kaplı titanyum elektrotlarla elektrokimyasal dezenfeksiyonunu incelemiş, yüksek voltaj uygulamalarında daha iyi verim alındığını ve patojenlerin tamamının 90 dakikada dezenfekte olduğunu gözlemlemişlerdir [Tanaka vd., 2013].

El Sayed vd. [2008] iyon değiştirici membranlarda akım-voltaj değişimini ve iyon geçişlerini incelemişlerdir. Çalışmalarında uygulanan akım yoğunluğu ile voltaj değerinin bağlantılı olduğunu, akım yoğunluğunun artışıyla voltaj değerinin arttığını ve sınırlanması gereken değerlerin öngörülmesi gerektiğini, membran sistemlerinde yüksek elektrolit derişiminin sistem için avantajlı olduğunu ve elektrolit derişimi arttıkça iletkenliğin artacağını gözlemlemişlerdir [El Sayed vd., 2008].

Mascia vd. [2012] sabit yataklı reaktörde 100 mg/dm³ klor iyonu varlığında 2.5-7.5 mA/cm² aralığında akım yoğunluğu uygulandığında boyutsal olarak kararlı 100 cm² platin kaplı titanyum katot ve Ir / Ru karışım oksidi anot ile suların elektrokimyasal arıtımını incelemişlerdir. Çalışmaları sırasında akım yoğunluğunun artışıyla aktif klor konsantrasyonunun arttığını, Reynold sayısının artması ile aktif klor konsantrasyonunun azaldığını, aynı koşullarda katot yüzeyi arttırıldığında aktif klor konsantrasyonunun azaldığını gözlemlemişlerdir [Mascia vd., 2012].

Kerwick vd. [2005] iki adet platin kaplı niyobyum örgü anot ve iki adet çelik katot ile Na₂SO₄ ve NaCl varlığında 10 litrelik suda *E. coli* bakterisinin pH, sıcaklık ve akış kontrolü ile dezenfeksiyonunu incelemişlerdir. Çalışmaları sırasında 0.01 M NaCl varlığında ve 5V potansiyelde *E. coli* inaktivasyonunun klor miktarı artışı ile arttığını gözlemlemişlerdir. 0.03 M Na₂SO₄ varlığında ve yaklaşık olarak 32 mA/cm² akım yoğunluğunda ise *E. coli* inaktivasyonunun elektrik yoğunluğunun artması ile ciddi şekilde arttığını gözlemlemişlerdir [Kerwick vd., 2005].

Xu vd. [2010] 1 litrelik elektrokimyasal hücrede H₂O₂ oluşturmak için oksijen ile beslenen Pt/C katot ve grafit anot kullanarak Na₂SO₄ elektrolit ve NH₄HCO₃ (gözenek oluşturucu madde) varlığında elektrokimyasal dezenfeksiyonu incelemişlerdir. Çalışmaları sırasında dezenfeksiyonun Pt yüzey alanı artışı ile arttığını, gözenek oluşturucu madde (NH₄HCO₃) eklendiğinde gazlar için elektrot yüzeyinin ve dezenfeksiyonun arttığını, 4-5-7-8 pH değerlerinde ortam pH ya bağlı olarak H₂O₂ nin antiseptik özelliğinin en fazla 4'de olup pH 8'e doğru azaldığını buna bağlı olarak pH 8'e doğru dezenfeksiyonun da azaldığını ve katotta oksijen akış hızının arttırılmasıyla antiseptik etkinin arttığını gözlemlemişlerdir [Xu vd., 2010].

Lacasa vd. [2013] NaCl varlığında BDD anot ve katot kullanarak, 0-1273 A/m² arasında değişen akım yoğunluklarında *E.coli* hücrelerinin balast suyundaki elektrokimyasal dezenfeksiyonunu incelemiş ve klor konsantrasyonu ile akım yoğunluğunun artmasıyla dezenfeksiyonun arttığını gözlemlemişlerdir [Lacasa vd., 2013].

Cui vd. [2013] arkadaşları rutenyum oksit ve tantalyum oksitle sinterlenmiş titanyum anot kullanılarak 0.59 A/m² akım yoğunluğunda ve NaNO₃ elektrolit varlığında çamur yapıdan *E. coli* hücrelerinin dezenfeksiyonunu incelemişler ve klor derişiminin enerji tüketimi ile başlarda artıp sonradan azaldığını ve dezenfeksiyonun klor derişimi ile doğrudan bağlantılı olduğunu gözlemlemişlerdir [Cui vd., 2013].

Schmalz vd. [2009] bor doplanmış elmas elektrot kullanarak evsel atıksuların elektrokimyasal dezenfeksiyonu üzerine farklı akım yoğunlukları ve farklı sıcaklıklarda çalışmalar yapmış ve akım yoğunluğundaki artışın inaktivasyonu arttırdığını, 9 - 22 ve 35°C sıcaklıklarda çalışıldığında en fazla inaktivasyonun 35°C de sonra ise 22°C ve 9°C de olduğunu gözlemlemişlerdir [Schmalz vd., 2009].

Nayakkara vd. [2011] deniz suyu örneğinden balast suyu hazırlayarak *E. coli* ve *E. feacalis* mikroorganizmalarının elektrokimyasal giderimini çalışmış ve *E. coli* ve *E. feacalis* mikroorganizmalarının 0.006 kWh/m³'lük enerji harcaması ile dezenfekte edildiğini gözlemlemişlerdir [Nayakkara vd., 2011].

Lopez-Galvez vd. [2012] BDD anot ve katot kullanarak NaCl varlığında *Escherichia coli* mikroorganizmalarının yıkama sularında dezenfeksiyonunu araştırmışlardır. Çalışmaları sırasında akım yoğunluğunun artışı ile dezenfeksiyonun arttığını ve anot yüzeyinde doğrudan oksidasyon reaksiyonlarının oluşabileceğini belirlemişlerdir. Çalışmada sebze ve meyvelerin yıkanmasından sonra elektrokimyasal yöntemle dezenfeksiyon yapılarak suyun kalitesi artırılmıştır [Lopez-Galvez vd., 2012].

Diao vd. [2004] klorlama, ozonlama ve elektrokimyasal dezenfeksiyon sistemlerinin karşılaştırılmasını araştırmışlar elektrokimyasal dezenfeksiyonda titanyum kaplı rutenyum ve zirkonyum yapılarını elektrot olarak kullanmışlardır. Çalışmaları sırasında elektrokimyasal dezenfeksiyon proseslerinde bütün mikroorganizmaların kolayca inaktif duruma getirildiğini, elektrokimyasal dezenfeksiyon proseslerinin mikroorganizmalar üzerine etkisinin hidroksil radikallerinin etkisine benzer olduğunu, Fenton reaksiyonlarının hücre yapılarına zarar verebileceğini ve kullanım ömrünü azaltabileceğini, klorlama işleminin kullanışlı olduğunu fakat elektrokimyasal dezenfeksiyon işlemi ile düşük ömürlü

radikaller üretilerek dezenfeksiyon işleminin yapılacağını ve daha çevreci bir sistem olduğunu belirlemişlerdir [Diao vd., 2004].

Li vd. [2011] BDD anot ve paslanmaz çelik katot ile Na₂SO₄ NaH₂PO₄ ve NaNO₃ varlığında 5 - 40 mA/cm² akım yoğunluğu uygulandığında içme suyunda *E. coli*'nin elektrokimyasal dezenfeksiyonunu araştırmışlardır. Çalışmaları sırasında *E. coli* inaktivasyonu için 0.2 M Na₂SO₄ derişimi ve 2 mA/cm² akım yoğunluğunun olduğu koşulları optimum koşullar olarak belirlemişlerdir. Yapılan çalışmada dezenfeksiyon miktarına göre; elektrokimyasal prosesler > ozonlama > klorlama > monokloraminleme şeklinde sıralama belirlenmiştir. Dezenfektanların gücü kıyaslandığında ise; hidroksil radikali > ozon > klor > monokloramin şeklinde olacaktır [Li vd., 2011].

Nayakkara vd. [2012] balast suyundaki *Escherichia coli* hücrelerinin titanyum elektrotlarla dezenfekte edilmesi üzerine çalışmışlar ve dezenfeksiyon verimi ile harcanan enerji arasında doğru orantı olduğunu gözlemlemişlerdir [Nayakkara vd., 2012].

Birbir vd. [2009] Ayamama ve Sarısu nehirlerinden aldıkları örneklerde organik kirleticiler ve *Escherichia coli* gibi mikroorganizmaların giderimi üzerine çalışmalar yapmışlar ve çalışmaların sonucunda alternatif elektrik akımı uygulanarak *Escherichia coli* mikroorganizmalarının dezenfekte edilebildiğini, bu yöntemin iyi bir alternatif yöntem olduğunu, aynı zamanda yöntem içerisinde düşük akım yoğunlukları uygulandığında sodyum klorürün az olması durumunda (<2%) dezenfeksiyon veriminin de az olduğunu gözlemlemişlerdir [Birbir vd., 2009].

Birbir vd. [2008] elektrik akımı uygulamalarının bakteri kültürleri ve miktarları üzerine etkisini incelemişler ve akım uygulaması ile birlikte voltaj değerinin önce bakterilerin tamamı ölene kadar azaldığını, bakterilerin tamamının ölmesinden sonra zamanla voltaj değerinin zamanla arttığını, elektroliz hücresinde pH değerinin ve sıcaklığın arttığını gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında 50 dakika boyunca 2 A akım uygulanmış ve sonucunda istenilen bakteri kültürlerinin tamamen inaktif edildiği belirlenmiştir [Birbir vd., 2008].

Bergmann vd. [2008] dezenfeksiyon proseslerinin kimyasal karakterlerini belirlemek için *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Saccharomyces cerevisiae* mikroorganizmaları bulunan ultrasafsu ortamında, IrO₂ ve RuO₂ anot kullanarak farklı dezenfeksiyon sistemlerinde deneyler yapmışlardır. Çalışmalarında ozonun hücreyi mutasyona uğrattığı sonrasında hücre yüzeyine etki ederek yıktığını, ClO₂ gibi klorlu bileşiklerin yarı geçirgen hücre zarının yarı geçirgenlik özelliğini kaybettirerek hücreyi etkisiz duruma getirdiğini, klorun genellikle hücre içerisindeki enzim yapılarıyla etkileşip zarı etkisiz hale getirerek hücreyi yıktığını, hidroksil radikallerinin hücre DNA'sı ile etkileşip zarar vererek hücreyi yıktığını gözlemlemişlerdir. Ortamdaki oksijen bileşikleri ve hidroksi iyonlarının ise zar hücrelerine direkt zarar vererek yıktığını gözlemlemişlerdir. Deneyler sonucunda rutenyum anodun iridyum dioksit, karışım oksitler, ve elmas elektrotlara göre daha fazla aktif klor üretebildiğini, elmas elektrotların ise daha fazla radikal ve peroksit üretiminde etkili olduğunu, elektroliz ile yapılan dezenfeksiyon işlemlerinden daha fazla verim elde edildiğini, ayrıca *Escherichia coli* mikroorganizmasının kullanılan diğer mikroorganizmalara göre daha hassas olduğunu gözlemlemişlerdir [Bergmann vd., 2008].

Birbir vd. [2006] tuz yoğunluğu yüksek kaynaklardaki bakterilerin elektrik akımı ile doğrudan inaktif hale getirilmesini incelemiştir. Çalışmaları sırasında Tuz Gölü, Kaldırım Köy ve Tuz Köy'den örnekler alınarak inceleme sonucunda 10⁵-10⁶ cfu'luk bakteri birikimi olduğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar 0,5 A akım uygulayarak yaklaşık 20-25 dakika aralığında mikroorganizmaları inaktif duruma getirmiş, elektrik uygulamalarının bu koşullarda etkili olduğunu bakteri miktarının elektrik uygulanması ile azaldığını ve dezenfekte edildiğini gözlemlemişlerdir [Birbir vd., 2006].

Cano vd. [2012] elektrokimyasal oksidasyon ile şehir atıklarının dezenfekte edilmesi üzerine çalışmışlar ve iletken elmas elektrotların katkı maddesi gerekmeden akım yoğunluğuna bağlı olarak klorlu bileşenler üreterek dezenfeksiyon sağlandığını, çok yüksek akım yoğunluklarına çıkılmadıkça klorat ve perklorat gibi bileşenlere rastlanmadığını gözlemlemişlerdir [Cano vd., 2012].

Särkkä vd. [2008] yaptıkları çalışmalarda kağıt üretiminde sorun meydana getiren bakterilerin elektrokimyasal yöntemle inaktivasyonunu incelemişlerdir. Çalışmaları sırasında akım yoğunluğunun artmasıyla birlikte oksitlenmiş miktarın arttığını, pH'nin asidik olmaması durumunda çok fazla etki etmediğini, ortamdaki klorlu bileşiklerin yoğunluğunun artmasıyla bakteri inaktivasyonunun arttığını ve farklı oksitleyici kimyasalların farklı organizmalarla reaksiyonlarının değişkenlik gösterdiğini gözlemlemişlerdir [Särkkä vd., 2008].

Nakajima vd. [2004] atık yüzey sularının klor varlığında elektrokimyasal dezenfeksiyonunu araştırmışlardır. Çalışmaları sırasında serbest klor miktarının akım ile bağlantılı olduğunu, farklı bakteri yapılarının farklı konsantrasyondaki serbest klor ve klorlu bileşenlerden etkilendiğini, bu bileşenlerin sodyum klorürün elektrolizi ile elde edilebileceğini ve mikroorganizmaların inaktif hale getirilmesi için DNA'nın yıkılmasının çok önemli olmadığını sitoplazmik proteinlerin yıkımının yeterli olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca NaCl ile elektroliz yapıldığında aktif oksijen içeren yapıların eldesi ile yapılan dezenfeksiyonun askorbik asitle yaklaşık olarak aynı işlevi gördüğünü ve elektroliz yönteminin yüzey sularının dezenfeksiyonunda kullanışlı olduğunu belirlemişlerdir [Nakajima vd., 2004].

Schaefer vd. [2015] yüzey sularının titanyum/iridyum anot materyalleri ile dezenfeksiyonunu incelemişler ve yüksek akım yoğunluklarında dezenfeksiyon işleminin daha verimli gerçekleştiğini, aktif klor ve klorlu bileşiklerin ortamda bulunmasının dezenfeksiyona yardımcı olduğunu gözlemlemişlerdir [Schaefer vd., 2015].

Hamaiedeh [2009] yaptığı çalışmada elektrolit bileşenleri ile dezenfeksiyon verimini incelemiştir. Çalışmada başlangıç pH derişiminin artmasıyla ortamda oluşturulan aktif klorlu bileşenlerin derişiminin arttığını, ortama eklenen kalsiyum klorür ile ortamda üretilen klorürlü bileşenlerin derişiminin arttığını ancak sodyum florürün ortama eklenmesiyle üretilen klorürlü bileşenlerin derişiminin değişmediğini gözlemlemiştir [Hamaiedeh, 2009].

Jeong vd. [2007] Pt anot ile *Escherichia coli* dezenfeksiyonunu incelemiştir. Çalışmada *Escherichia coli* mikroorganizmalarının

dezenfeksiyonunun iki aşamada gerçekleştiğini, birinci aşamada doğrudan elektrot yüzeyinde dezenfeksiyonun etkili olduğunu ikinci aşamada ise ortamda üretilen reaktiflerin daha fazla rol aldığını ve dezenfeksiyonun ortamda klor ve klorlu bileşenler olmasa da uygulanan akım ile gerçekleşebildiğini gözlemlemişlerdir [Jeong vd., 2007].

Cong vd. [2008] elektrokimyasal hücre içerisinde oluşturulan kimyasallar ile ortamdaki mikroorganizmaların inaktivasyonunu incelemişlerdir. Çalışmaları sırasında 7 mA/cm² akım yoğunluğunda 5 dakikada mikroorganizmaların %99.99 inaktif hale geldiğini, pH değerinin 5-9 aralığında olduğunda mikroorganizmaların daha kolay inaktif edilebildiğini, hücre dışından klor ve türevleri gibi maddeler eklemeyen hücre içerisinde kimyasalların oluşturulmasının bakteri inaktivasyonunda daha etkili olduğunu ve elektrokimyasal dezenfeksiyon yöntemi uygulandığında ortamda bulunan ya da oluşturulan zehirli bileşenlerin de daha az görüldüğünü gözlemlemişlerdir [Cong vd., 2008].

Cotillas vd. [2015], karbon yapılı katot ve boyut olarak kararlı elektrot, iletken elmas elektrot ve demir anot kullanarak elektrokimyasal yöntemlerle atık suların geri kazanımı üzerine çalışmışlardır. Çalışmaları sırasında karbon yapılı katot materyalleri ve boyut olarak kararlı anot ya da iletken elmas anot kullanımında çok düşük akım yoğunluklarında dezenfeksiyon işleminin tamamlandığını, ortamda hipoklorit, kloramin, hidrojen peroksit gibi dezenfekte edici maddelerin bulunduğunu, perklorat ve organik yapılı kloratlı bileşiklerden kaçınarak hidrojen peroksit üretimi için karbon yapılı katot ve iletken elmas elektrot ya da boyut olarak kararlı elektrotların kullanılmasının uygun olduğunu gözlemlemişlerdir. Demir anot ve karbon yapılı katot kullanıldığında kolayca kloramin reaksiyonları, hidrojen peroksit oluşumu ve fenton reaksiyonlarıyla birlikte koagülasyonun da veriminin artacağını, düşük akım yoğunluklarında en uygun anot materyalinin demir elektrot olduğunu ve 5 A m⁻² den fazla değerlerde ise boyut olarak kararlı elektrotların uygun olacağını gözlemlemişlerdir [Cotillas vd., 2015].

Patermaraxis ve Fountoukidis [1990], doğal sulardaki mikroorganizmaların titanyum elektrotlarla dezenfeksiyonunu incelemişler ve titanyum elektrotlara doğru akım uygulandığında güçlü dezenfektanlar üretildiğini ve yüksek verimde

dezenfeksiyon sağlandığını, elektrokimyasal dezenfeksiyon işleminin sürekli akım sistemlerinde daha avantajlı olduğunu gözlemlemişlerdir [Patermaraxis ve Fountoukidis, 1990].

2.5. CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ

Cevap yüzey yöntemi araştırmacılar tarafından bilimsel veya mühendislik prosesleri ile ilgili problemleri çözmek için kullanılan matematiksel ve istatistiksel bir yöntemdir. Cevap yüzey yöntemi öncelikli olarak araştırmacının sistem veya prosesin mekanizmasını anlamasını amaçlamaz; daha çok optimum işletim parametrelerini belirlemeyi ya da belirli işletim parametrelerinde bağımsız değişkenler (faktörler) için uygun bir çalışma bölgesini belirlemeyi amaçlar [Körbahti ve Tanyolaç, 2008].

Cevap yüzey yönteminin en geniş uygulama alanları, girdi değişkenlerinin ürünün veya prosesin karakteristik özelliklerini veya ölçümün performansını etkilediği durumlardır. Ölçümün performansı veya prosesin karakteristik özelliği cevap olarak adlandırılırken; bağımsız değişkenler olarak tanımlanan ve araştırmacının kontrolünde olan girdi değişkenlerinin seviyelerinin değişiminden etkilenen değerleri, cevap değişkeni olarak adlandırılır. Bazı proseslerde girdi değişkenleri ile cevap arasındaki ilişki bilinirken, bazı proseslerde bu ilişkinin gerçek yapısı bilinmez. Bu durumda girdi değişkenleri ve cevap yüzeyi arasındaki ilişki genellikle birinci veya ikinci dereceden bir polinom modeli olarak ifade edilir [Myers ve Montgomery, 2002].

Eşitlik 2.27 ikinci dereceden bir modeli ifade etmektedir.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.27)$$

Cevap yüzey yönteminin amacı uygun bir yaklaşım fonksiyonu elde ederek prosesin gelecekteki cevabını tahmin eden ve en iyi cevabı veren optimum değerleri belirlemektir. Optimizasyon aşamasında cevabı maksimize eden x_1, x_2, \dots, x_k değerleri belirlenir [Körbahti, 2003].

Cevap yüzey yönteminin bazı uygulamalarında birden fazla cevap değişkeninin optimizasyonu gerekebilir veya cevap değişkenlerinin sınır değişkenlerinin içinde faktörlerin düzeyleri araştırılıyor olabilir. Optimizasyon için uygulanan amaçlar doğrultusunda istenen yaklaşım fonksiyonu maksimize veya minimize edilebilir, hedef gösterilerek, kısıtlama giderilerek veya istenen değerler arasında hesaplanabilir. Her parametre için alt ve üst sınırlar belirlenerek, her amaç için istenen yaklaşım fonksiyonunun büyüklüğü belirli bir ağırlık oranı atanarak ayarlanabilir. Ağırlık oranı programlayıcının öngörüsüne bağlı olarak ne derecede modele katılacağı konusunda algoritmaya verilen değerdir. Genellikle üç artı (+++) ile belirlenen amaçlar, çok önemli amaçlar için beş artı (+++++) olarak değiştirilir ve amaçların önem sırası belirlenir. Değişkenlerin birbirine önem bakımından üstünlükleri farklı olduğundan değişkenlerin biri veya daha fazlası minimize veya maksimize edilerek istenilen en verimli optimum koşulların elde edilmesi sağlanır[Design-Expert, 2011, Körbahti, 2003].

3.MATERYAL ve METOD

3.1 Kimyasallar

Çalışmada kullanılan atıksu İspanya'da 80000 kişinin yaşadığı Ciudad Real şehrinin(38°59'N 3°55'W) atıksu arıtım tesisinin ikincil filtreleme kısmından günlük olarak alınmıştır. Atıksu içerisinde ortalama değer olarak 156.68 mg/L Klor, 4.21 mg/L Nitrat, 259.16 mg/L Sülfat, 0,95 mg/L Amonyum ve 2400-16000 CFU/100 mL *Escherichia coli* bakterisi bulunmaktadır.

Ftalik asit (Panreac), sodyum klorür (Panreac), dihidrojen fosfat (Panreac), etilen diamin tetra asetik asit (Panreac), sodyum dihidrojen fosfat (Panreac), Potasyum dihidrojen fosfat (Panreac), sodyum hidroksit N,N-dietil-p-fenildiamin (Panreac), Resazurin (Panreac) ve tris(hidroksimetil)aminometan (Panreac) Medio EC ISO 7251 (*Escherichia coli* besiyeri, 20g/L Triptaz, 5g/L Laktoz, 1,9 g/L Bile Salt No.3, 4g/L K₂HPO₄, 1,5 g/L KH₂PO₄, 5 g/L NaCl) Conda tercih edilmiştir, Arsenik trioksit (Fluka)'dan TiO₂XH₂O (Merck)' ten sağlanmıştır.

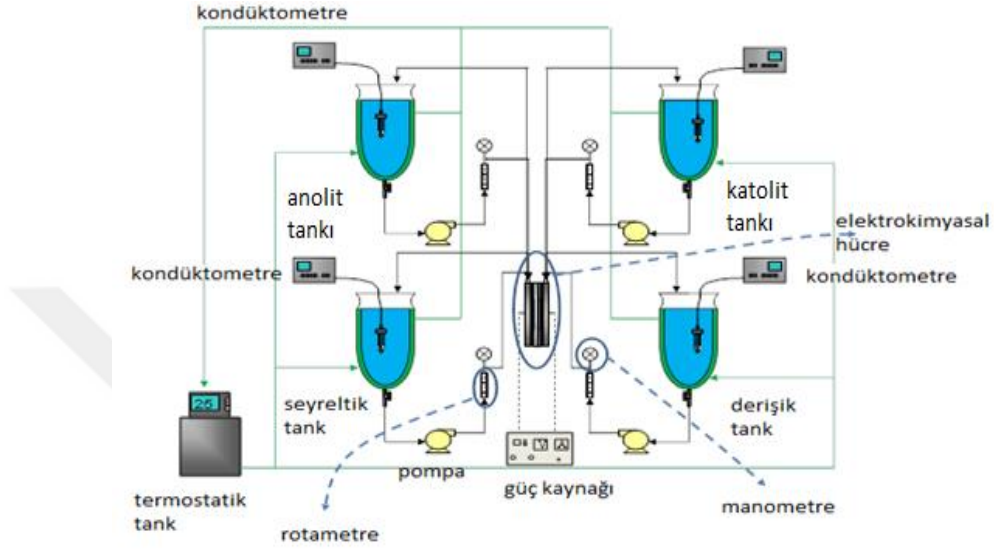
Tris(hidroksimetil)aminometan ve ftalik asit iyon kromatografisinde, Medio EC ISO 7251, resazurin ve sodyum klorür *Escherichia coli* analizinde, sodyum hidroksit ve arsenik trioksit hipoklorit analizinde, N,N-dietil-p-fenildiamin, etilen diamin tetra asetik asit, potasyum dihidrojen fosfat ve sodyum dihidrojen fosfat kloramin tayininde kullanılmıştır.

Anot ve katot malzemesi olarak Ti/IrO₂ ve Ti/RuO₂ kullanılmıştır.

3.2 Sürekli Elektrokimyasal Dezenfeksiyon Sistemleri

Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de görüldüğü gibi deneysel çalışmada kullanılan PCCell marka elektrokimyasal dezenfeksiyon sisteminde derişik tank, seyreltik tank, anolit tankı ve katodik tankı olmak üzere 4 adet 2 litrelik tank bulunmaktadır. Uygulanan konfigürasyona bağlı olarak en az bir tank, en fazla 4 tank atıksu dezenfeksiyon prosesinde çeşitli amaçlarla kullanılmıştır. Aynı zamanda sistemde her bir tanka bağlantılı 4 adet peristaltik pompa, rotametre ve manometre

bulunmaktadır. Membranların yerleştirildiği hücre merkezde kalacak şekilde konumlandırılmış ve tanklara eşit uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Elektrokimyasal dezenfeksiyon sistemi (elektroliz, elektrodiyaliz)

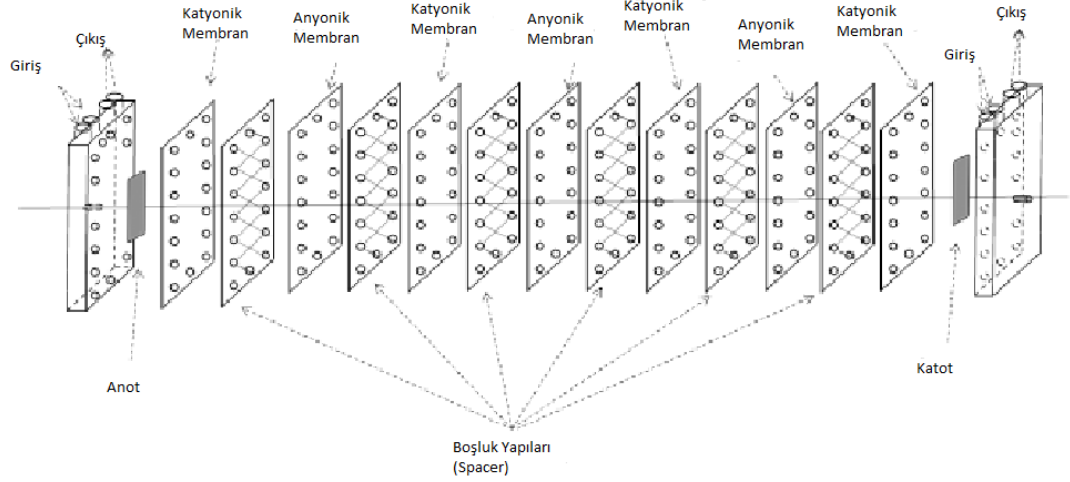
Deneysel çalışmada gerçek atıksu ya da sentetik atıksu, istenilen membranlarla etkileşecek biçimde tanklara konulmuş ve kullanılacak olan tanklardan pompalar aracılığı ile istenilen miktarlarda akış sağlanarak membranlarla ya da elektrotlarla etkileşimleri sağlanmıştır.

Elektroliz/elektrodiyaliz hücresine anot ve katot materyalleri ile sabit akım veya sabit voltaj uygulanmıştır. Corison pH 25 cihazı ile istenilen bölgenin pH değeri ölçülmüş ve pH değerindeki artma ya da azalma ile ortamdaki dezenfeksiyon durumu belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Elektrokimyasal dezenfeksiyon sisteminin fotoğrafı (elektroliz-elektrodiyaliz)

Membranlar aracılığı ile elektroliz ve elektrokimyasal diyaliz yapıldığı zaman hücre içi konfigürasyonlar değişmektedir. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi hücre içerisinde anyon geçirimli membranlar (anyonik membran) ve katyon geçirimli membranlar (katyonik membran), boşluk sağlayıcı ve akımın yönünü belirleyen boşluk sağlayıcı yapılar (spacer), anot-katot elektrotlar bulunmaktadır.



Şekil 3.3. Elektroliz ve elektrodiyaliz yöntemlerinde kullanılan elektrokimyasal hücrelerin konfigürasyonu

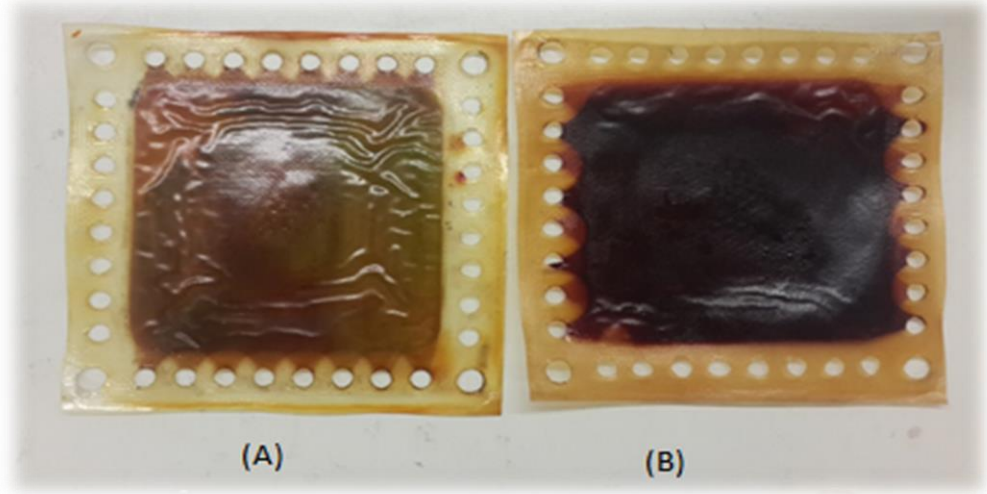
Anolit tankından giren elektrolit, anot ve anota en yakın membran ile etkileşir ve membranın tipine göre katyon ya da anyonların geçişi gerçekleşir, iyonlar ve su anolit tankına geri dönüş yapar ve hücre içerisine tekrar alınarak prosesin sürekliliği sağlanır.

Katolit tankından giren elektrolit, katot ve katoda en yakın membran ile etkileşir, katota en yakın membranın tipine göre anyon ya da katyonların geçişi gerçekleşir, geçiş yapamayan iyonlar ve su katolit tankına geri dönüş yapar ve hücre içerisine tekrar alınarak prosesin sürekliliği sağlanır.

Seyreltik tankından gelen elektrolit boşluk sağlayıcıların (spacer) suyun yönünü değiştirmesiyle seyreltik kısma gider, iyonlar membranlar ile etkileşerek geçişleri sağlanır ve daha az iyon yoğunluğu ile tanka geri dönüş yapar.

Derişik tankından gelen elektrolit boşluk sağlayıcıların suyun yönünü değiştirmesiyle derişik kısma gider, iyonlar membranlarla etkileşerek geçişleri sağlanır ve daha yüksek iyon yoğunluğu ile tanka geri dönüş yapar.

Şekil 3.4'te ticari anyonik membran ve ticari katyonik membran görülmektedir.



Şekil 3.4. Ticari anyonik membran (A) ve ticari katyonik membran (B) örnekleri

Şekil 3.4(A)'da açık kahverengi görünümlü membran ticari anyonik membran, Şekil 3.4.(B)'de koyu kahverengi renkli görünümlü membran ticari katyonik membrandır. Sağ ve sol, alt ve üst taraflarında kenarlara doğru “V” şeklinde görünen kısım elektrolitin yönünü göstermektedir. Boşluk sağlayıcılar ile bu kenara geçişler sağlanır ve giren elektrolitin çıkış yönü belirlenir.

Şekil 3.5’de elektrokimyasal dezenfeksiyon sisteminde kullanılan anot ve katot elektrotlar görülmektedir.



Şekil 3.5. Elektrokimyasal dezenfeksiyon sisteminde kullanılan anot ve katot elektrotlar

Şekil 3.5’de görüldüğü gibi, elektrokimyasal dezenfeksiyon sisteminde mazgal şeklinde suyun yüzeyle iyi etkileşebileceği ve geçişini sağlayacağı biçimde Ti/IrO₂ ve Ti/RuO₂ anot ve katot elektrotlar kullanılmıştır. Deneyleerde kullanılan elektrotlar literatürde DSA (boyut olarak kararlı anotlar) olarak adlandırılmaktadır. Elektrokimyasal dezenfeksiyon yönteminde ortamda üretilmek istenen oksitleyici bileşene göre elektrotlar seçilebilir. Düşük akım yoğunlukları uygulanarak ortamda hipoklorit gibi dezenfekte edici bileşenler oluşturulmak isteniyorsa iletken elmas elektrotlar ve boyut olarak kararlı elektrotlar kullanılır. Ortamda Fenton reaksiyonları gerçekleştirilmek isteniyorsa demir anot, katolit kısmında hidrojen peroksit üretilmek isteniyorsa karbon bileşimli katotlar kullanılır.

Şekil 3.6’da elektroliz/elektrodializ hücrelerinde membranlar arasında çözeltinin yönlendirilmesini ve membranların birbirleriyle etkileşmemesini sağlayan boşluk sağlayıcı yapılar (spacer) görülmektedir.

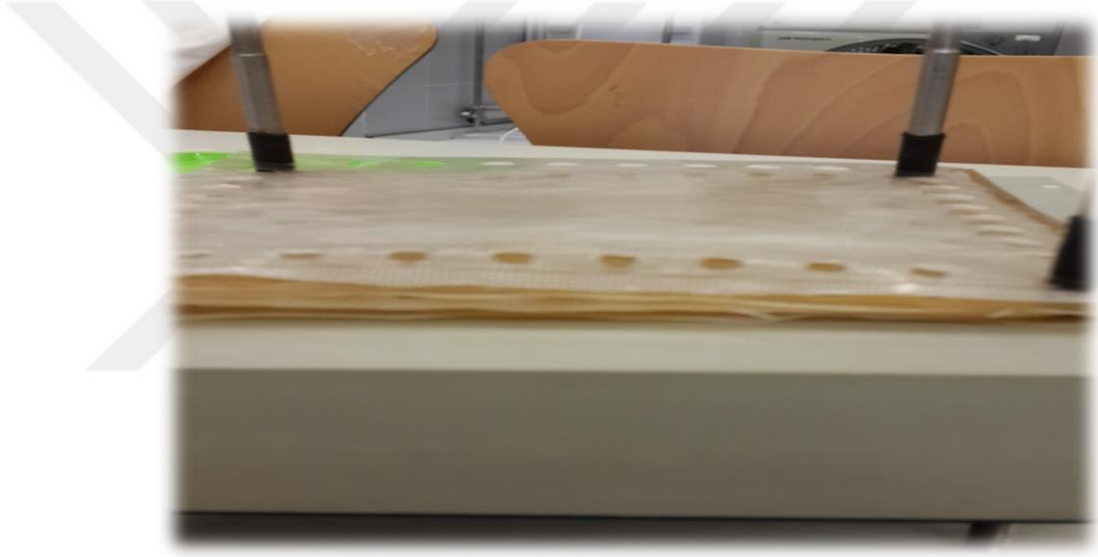


Şekil 3.6. Boşluk sağlayıcı yapılar

Şekil 3.6’da görüldüğü gibi, boşluk sağlayıcılar elektrokimyasal hücre içerisinde iki membranın birbirine etki etmesini engelleyen yapılardır. Membranlarla etkileşim sağlayacak su veya iyonlar membranlarla boşluk sağlayıcılar arasında dolaşır ve boşluk sağlayıcıların yönlendirmesiyle hücre içerisine geçiş yapar. Şekil

3.6’da görüldüğü gibi boşluk sağlayıcıların kenarlarında delikler bulunmaktadır ve bu deliklerin elektrokimyasal hücre konfigürasyonunda açık ya da kapalı olarak yerleştirilmesi sonucunda membranlarla etkileşecek elektrolitin yönü belirlenmektedir. Eğer anolit bölümüne gidecek olan delikler açık bırakılırsa anolit kısmına, katolit bölümüne giden delikler açık bırakılırsa katolit kısmına, seyreltik ya da derişik kısımla ilgili delikler açık bırakılırsa bu bölmelere geçiş sağlanır.

Şekil 3.7’de membranlar ve boşluk sağlayıcı yapılar hücreye yerleştirildiği durumdaki hücre görülmektedir.



Şekil 3.7. Membranlar ve boşluk sağlayıcı yapılar hücreye yerleştirildiği durumda hücrenin görünümü

Şekil 3.7’de görüldüğü gibi yapı da anot üzerine yerleştirilen anyonik-katyonik membranlar ve boşluk sağlayıcılar görülmekte ve üzerine katot materyalinin konulup hücrenin kapatılmasıyla hücre kullanıma hazır hale gelmektedir.



Şekil 3.8. Elektrokimyasal dezenfeksiyon (elektroliz-elektrodiyaliz) hücresinin montajlı görünümü

Elektrokimyasal dezenfeksiyon hücresi olarak kullanılan elektroliz-elektrodiyaliz hücresi anolit girişi ve çıkışı, katolit girişi ve çıkışı, derişik kısım girişi ve çıkışı ile seyreltik kısım girişi ve çıkışından oluşur. Membranlar ve boşluk sağlayıcılar hücre içerisine istenilen konfigürasyonlarda yerleştirilir. Elektrokimyasal hücre etrafında bulunan tanklardan hücreye denge durumunu sağlaması için genellikle eşit miktarlarda sıvı beslenir ve üretilmek istenen kimyasal ya da oksitleyici bileşen tanklara geri alınır.

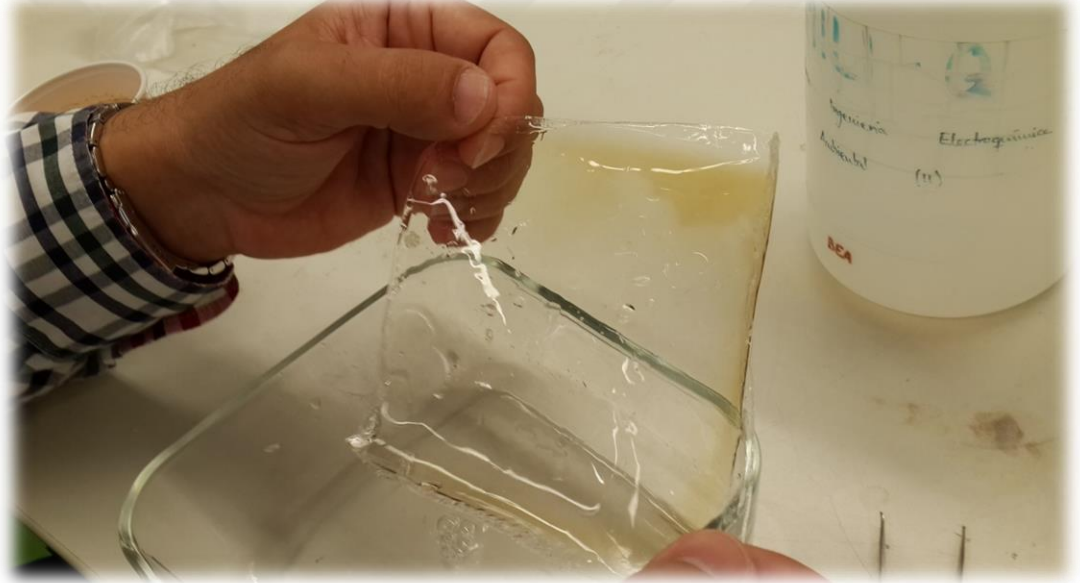
3.3 Sentezlenen Membranlar ve Yapıları

Nafion membranlar laboratuvar ortamında sentezlenmiş ve ticari Nafion membranlarla kıyaslama çalışmaları yapılmıştır. Sentezlendikten sonra hemen aktifleştirilmeyen Nafion membran M1, sentezlendikten sonra hemen aktifleştirilen membran M2, TiO₂ katkılı sentezlendikten sonra hemen aktifleştirilen Nafion membran M3 olarak kodlanmıştır.

3.3.1. Nafion Membran Sentezi

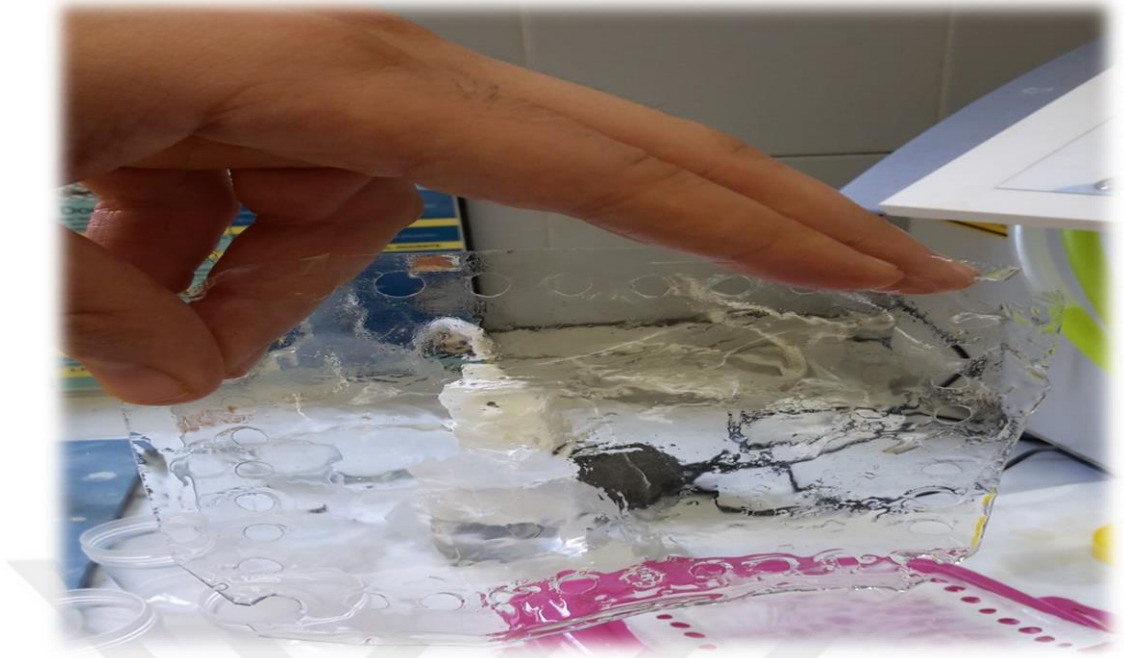
Nafion membran sentezi Nafion çözeltisinin beher içerisinde alınıp daha sonra ultrasonik banyoda bekletilip fırına alınması ve fırından alınan membranın aktifleştirilmesi sürecidir.

Şekil 3.9'da görülen M1 kodlu Nafion membran 43.8 gram Nafion çözeltisinin 200 mL'lik beherde 2 saat kadar jp selecta marka ultrasonik banyoda bekletilmesi ve daha sonra membran yapısının oluşturulacağı cam malzemeye alınması ile elde edilmiştir. Sentezlenen membran 80°C'lik etüvde 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonunda etüvden alınan membranın 25°C'ye kadar soğuması beklenmiş ve membran su yardımıyla cam malzemenin yüzeyinden alınmıştır.



Şekil 3.9. M1 kodlu sentezlendikten sonra hemen aktifleştirilmeyen Nafion membranın görünümü

Membran üzerinde delikler açılarak elektroliz-elektrodiyaliz hücrelerine uygun hale getirilmiş ve kullanılmadığı zamanlarda 0,1 M NaCl çözeltisi içerisinde saklanmıştır. M1 kodlu membranın ortalama kalınlığı 155 µm'dir.



Şekil 3.10. M2 kodlu sentezlendikten sonra hemen aktifleştirilen Nafion membranın görünümü

Şekil 3.10'da görülen M2 kodlu Nafion membran 40 gram nafion çözeltisinin 200 mL'lik beherde 3 saat kadar jp selecta marka ultrasonik banyoda bekletilmesi ve daha sonra membran yapısının oluşturulacağı cam malzemeye alınması ile elde edilmiştir. Sentezlenen membran 80°C'lik etüvde 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonunda etüvden alınan membranın 25°C ye kadar soğuması beklenmiş ve membran su yardımıyla cam malzemenin yüzeyinden alınmıştır. Aktifleştirme aşamasında membran, 1 saat kaynama noktasındaki 0,1 M H₂SO₄ ve 0,1 M H₂O₂ ile muamele edilmiş ve hemen sonra kaynama noktasındaki ultra saf su ile yıkanmıştır.

Membran üzerinde delikler açılarak elektroliz-elektrodializ hücresine uygun hale getirilmiş ve kullanılmadığı zamanlarda 0,1 M NaCl çözeltisi içerisinde saklanmıştır. M2 kodlu membranın ortalama kalınlığı 158 µm'dir.

3.3.2 TiO₂ Katkılı Nafion Membran Sentezi

TiO₂ katkılı nafion membran sentezinin nafion membran sentezinden tek farklı başlangıçta nafion çözeltisi içerisine ağırlıkça %5 oranında TiO₂.XH₂O eklenmesidir. Sonrasında nafion membran sentezi için yapılan işlemler tekrarlanarak TiO₂ katkılı nafion membran elde edilir.

Şekil 3.11’de görülen M3 kodlu membran, 40 gram Nafion çözeltisi ve 0,04 gram TiO₂.XH₂O ile 200 mL’lik beherde 3 saat kadar ultrasonik banyoda bekletilmesi ve daha sonra membran yapısının oluşturulacağı cam malzemeye alınması ile elde edilmiştir. Sentezlenen membran 80°C’lik etüvde 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonunda etüvden alınan membranın 25°C’ye kadar soğuması beklenmiş ve membran su yardımıyla cam malzemenin yüzeyinden alınmıştır. Aktifleştirme aşamasında membran, 1 saat kaynama noktasındaki 0,1 M H₂SO₄ ile sonra 1 saat 0,1 M H₂O₂ ile muamele edilmiş ve hemen sonra kaynama noktasındaki ultra saf su ile yıkanmıştır.



Şekil 3.11. M3 kodlu TiO₂ katkılı sentezlendikten sonra hemen aktifleştirilen Nafion membranın görünümü

Membran üzerinde delikler açılarak elektroliz/elektrodiyaliz hücrelerine uygun hale getirilmiş ve kullanılmadığı zamanlarda 0,1 M NaCl çözeltisi içerisinde saklanmıştır. M3 kodlu membranın ortalama kalınlığı 120 µm’dir.

3.4. Analiz Yöntemleri

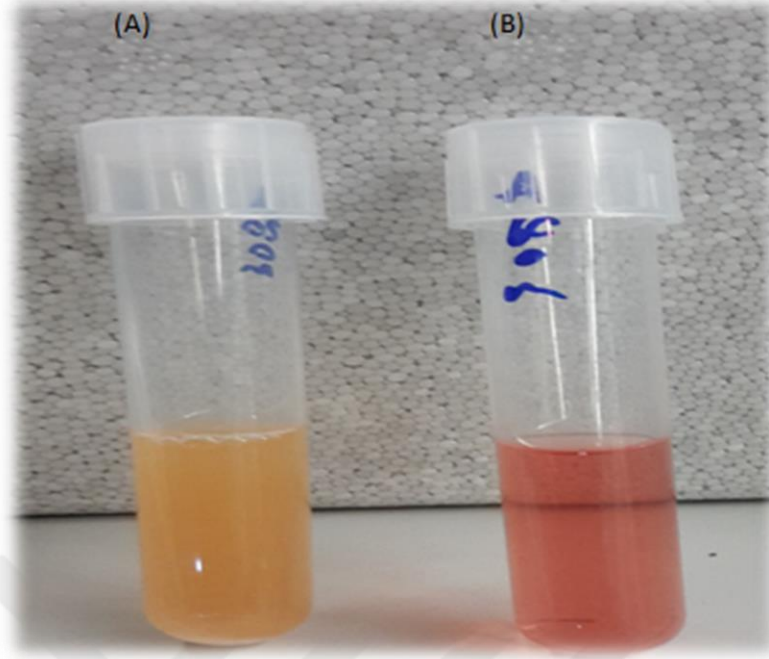
Hipoklorit derişimi analizi 0,0001 M As₂O₃ titrant ve 2 M NaOH çözeltileriyle Ω Metrohm marka 702 SM Titrino model titratör, Ω Metrohm marka 728 model karıştırıcı yardımıyla Tiamo 2.3 programı kullanılarak yapılmıştır.

pH ölçümü Crison marka pH 25 model pH metre ile, iletkenlik ölçümü Crison marka GLP 31 model iletkenlik ölçer ile yapılmıştır.

İnorganik anyonların (NO₃⁻, Cl⁻, ClO₃⁻, ClO₄⁻, SO₄⁻² analizi Shimadzu marka LC-20A model iyon kromatografisi kullanılarak yapılmıştır. Analiz metodu Shodex IC-I-524A dolgu maddesi ile pH 4'te 400°C sıcaklıkta, 1 ml/dakika akış hızında 2.5 Mm ftalik asit hareketli faz kullanılarak uygulanmıştır.

Escherichia coli bakteri sayımı %95 güvenilirlik aralığında en muhtemel sayı yöntemine göre yapılmıştır. En muhtemel sayı yönteminde alınan örnekler besi yeri içerisine 1:10, 1:100, 1:1000 oranında seyreltilerek beşer tüpe bölünür, 44°C sıcaklıktaki etüve yerleştirilir ve 24 saat beklenir. 24 saat sonunda tüplerdeki renk değişimine ve renk değiştiren tüp sayısına göre kodlama yapılır ve kodlar en muhtemel sayı yöntemi tablosundan sayı olarak karşılığı bulunarak ifade edilir [APHA, 1998].

Şekil 3.12'de görüldüğü gibi *Escherichia coli* analizinde ortamda *Escherichia coli* kolonileri varlığı ve var olmaması durumunda farklı renkler gözlemlenir. Ortamda *Escherichia coli* bulunmaması durumunda renk turuncu-sarı olur ve bu durum pozitif olarak nitelendirilir. Ortamda *Escherichia coli* kolonilerinin bulunması durumunda ortam rengi kırmızı olarak kalır ve bu durum negatif olarak nitelendirilir. Pozitif tüp sayısına göre en muhtemel sayı yöntemindeki tabloya bakılır ve *Escherichia coli* koloni sayısı belirlenir. En muhtemel sayı yöntemindeki tablo Ek.1'de verilmiştir.



Şekil 3.12. *Escherichia coli* analizinde pozitif sonuçlar (A) ve negatif sonuçlar (B)

3.5. Yapılan Deneysel Çalışmalar

Çalışmada 1 L/dak sabit akış hızı uygulanmıştır.

Tez çalışmaları kapsamında farklı derişimlerdeki NaCl çözeltileri ve atıksu arıtım tesisinden alınan gerçek atıksu elektroliz/elektrodiyaliz hücrelerine beslenerek deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmalar Çizelge 3.1’de belirtildiği gibi farklı konfigürasyonlarda (A,B,C,D,E), farklı reaksiyon sürelerinde(60-120-180 dk), farklı akım değerleri (0,15A 0,3A 0,5A 0,75A 1A) uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3. 1. Yapılan deneysel çalışmaların planlanması

Konfigürasyon	Elektrolit	Akım (i)	Reaksiyon Süresi (Dakika)
A	NaCl (200ppm)	0,3 A	120 dk
B	NaCl (1500ppm)	0,15 A	120-180 dk
	Atıksu	0,3 A	60-120 dk
C	NaCl (1500ppm)	0,15 A	180 dk
	Atıksu	0,1-0,3-0,5-0,75-1 A	60-120 dk
D	NaCl(1500ppm)	0,3A-0,5A-1,5 A	120-180 dk
	Atıksu	0,3 A	60-120-180 dk
E	Atıksu	0,3 A	60 dk

Konfigürasyonlar:
A: Anot-M1-Katot, (A-M1-K)
B: Anot-M2-Katot, (A-M2-K)
C: Anot-M3-Katot, (A-M3-K)
D: Anot-M3-Katyonik Membran-Katot, (A-M3-C-K)
E: Anot-Katot, (A-K)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalarda katyonik Nafion membranlar ve TiO₂ katkılı katyonik Nafion membranlar hazırlanmış ve atıksu dezenfeksiyonu amacı ile sürekli çalışan elektroliz/elektrodiyaliz hücresinde kullanılmıştır. Sentezlenen membranların ticari Nafion membranlar ile verim bakımından karşılaştırılması yapılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında katyonik Nafion membran sentezlendikten sonra aktive edilmeden deneyler yapılmıştır. Bir süre kullanılan membranlar H₂O₂ ve H₂SO₄ kullanılarak aktive edilmiş ve ticari Nafion membranlarla kıyaslama çalışmaları yapılarak elektroliz sisteminde kullanılmıştır.

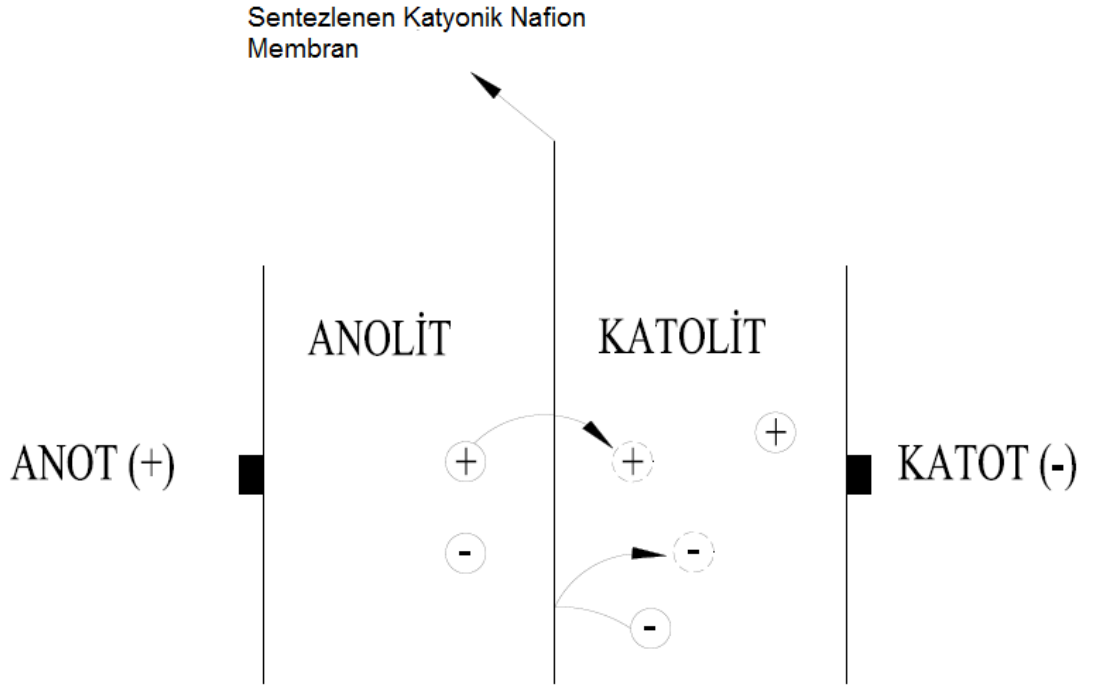
Çalışmanın ikinci aşamasında katyonik Nafion membranlar birinci aşamadaki gibi hazırlanmış ve membranlar sentezlendikten hemen sonra H₂O₂ ve H₂SO₄ ile aktive edilerek elektroliz sisteminde kullanılmıştır.

Çalışmanın üçüncü aşamasında TiO₂ katkılı Nafion membranlar sentezlenmiş, H₂O₂ ve H₂SO₄ ile aktive edilmiş ve ticari Nafion membranlarla kıyaslama çalışmaları yapılarak elektroliz sisteminde kullanılmıştır. Membranların yapısına TiO₂ katkısı yapılarak konfigürasyonlara göre bipolar ortam oluşturulması ile dezenfeksiyon verimine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın dördüncü aşamasında TiO₂ katkılı Nafion membranlar kullanılarak elektrodiyaliz sisteminde hücre konfigürasyonunun hipoklorit üretimi ve *E. coli* içeren atık suyun dezenfeksiyonu incelenmiştir.

4.1. Nafion Membran Kullanılan Sürekli Sistem Elektroliz Hücresinde Atıksu Dezenfeksiyon Çalışmaları

Şekil 4.1'de elektroliz çalışmalarında kullanılan anot-katyonik membran-katot (A-M1-K, A-M2-K, A-M3-K) sistemi görülmektedir. Anot-katyonik membran-katot sistemindeki öncelikli amaç anolit kısmında üretilen hipoklorit iyonlarının katyonik membran sayesinde katolit kısmına geçmesini önlemek ve böylece anolit ve katolit kısmında üretilen hipoklorit derişimlerini net bir şekilde gözlemlemektir.

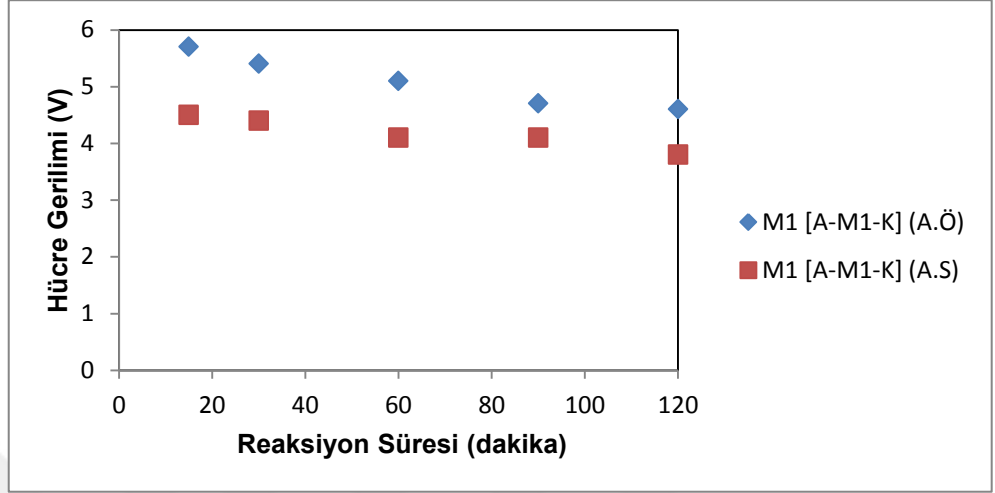


Şekil 4.1. Elektroliz çalışmalarında kullanılan anot-katyonik membran-katot konfigürasyonu (A-M1-K, A-M2-K, A-M3-K)

M3 kodlu membran içerisinde bulunan TiO₂ partikülleri sayesinde M3 kodlu membranın katot kısmına bakan yüzeyi anot görevi görür ve böylece hipoklorit iyonu üretiminde katolit kısmı da anolit kısmı ile aynı etkinliğe sahip olur. Ayrıca anot ve katot seçimine göre ortamda gerçekleşen farklı reaksiyonlar ile oluşan farklı oksitleyici bileşenlerin etkisiyle dezenfeksiyon hızında da değişiklikler gözlemlenmiştir.

Membran aktivasyonunun etkisini incelemek amacıyla, anot-M1-katod konfigürasyonunda anolit ve katolit kısımları oluşturularak 200 mg/L NaCl varlığında 0,1 A akım uygulanmıştır. M1 kodlu Nafion membranın aktivasyonu öncesi ve 0,1 M H₂O₂ ve 0,1 M H₂SO₄ ile aktivasyonu sonrasında yapılan deneyler ile hücre gerilimi değişimi, anolit kısmında hipoklorit değişimi, katolit kısmında hipoklorit değişimi, birim hacim başına düşen elektrik yükü değişimi ve enerji tüketimi değişimi incelenmiştir.

Şekil 4.2’de 200 mg/L NaCl çözeltisi ile A-M1-K konfigürasyonunda 0,1 A akım uygulandığında aktivasyon öncesinde ve sonrasında zamanla hücre gerilimi değişimi gösterilmiştir.

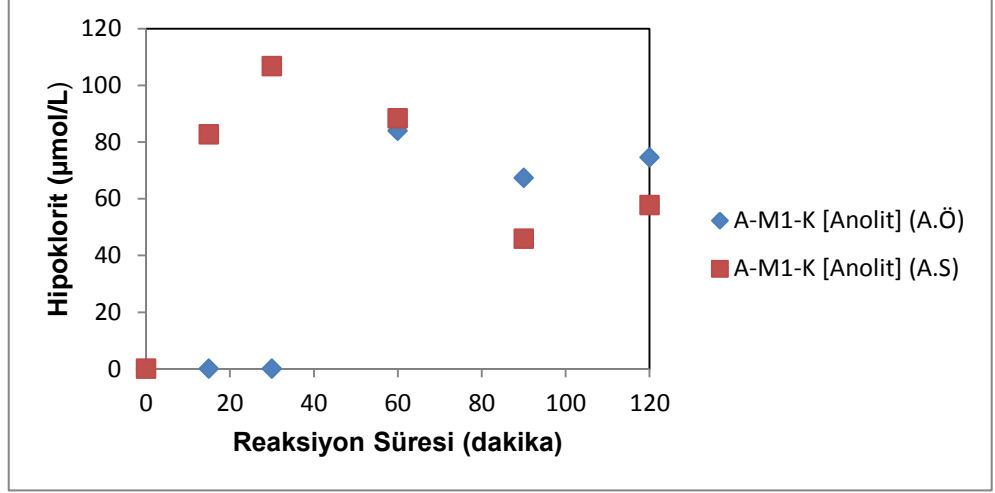


Şekil 4.2. Aktivasyon öncesi ve aktivasyon sonrası M1 ile yapılan deneylerde hücre gerilimi değişimi ($i=0,1$ A, konfigürasyon=A-M1-K 200 mg/L NaCl)

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi membranın 0,1 M H₂O₂ ve 0,1 M H₂SO₄ ile aktivasyonu sonrasında hücre gerilimi daha düşük değerlerde elde edilmiştir. Hücre gerilimi değerinin düşük olması sabit akım değeri uygulandığında daha düşük direnç olduğu anlamına gelmektedir. Bu membran sistemi için istenilen bir durumdur, çünkü membran sistemlerinde direncin artması durumunda yüksek hücre gerilimi değerlerine ulaşılır ve membran zarar görebilmektedir. Direnç yüksek olduğunda ise daha fazla güç harcanmasına neden olmaktadır.

Tanaka vd. [2013] platin kaplı titanyum elektrotlarla 1,2 V – 1,0 V – 0,9 V hücre gerilimi değerlerinde sabit akımda balık patojenlerinin deniz suyunda dezenfeksiyonunu araştırmışlar ve çalışmalarında en hızlı dezenfeksiyonun 1,2 V’da en yavaş dezenfeksiyonun ise 0,9 V’da olduğunu gözlemlemişlerdir [Tanaka vd., 2013].

Şekil 4.3’de 200 mg/L NaCl çözeltisi ile A-M1-K konfigürasyonunda 0,1 A akım uygulandığında aktivasyon öncesinde ve sonrasında anolit kısmındaki zamanla hipoklorit derişimi değişimi gösterilmiştir.

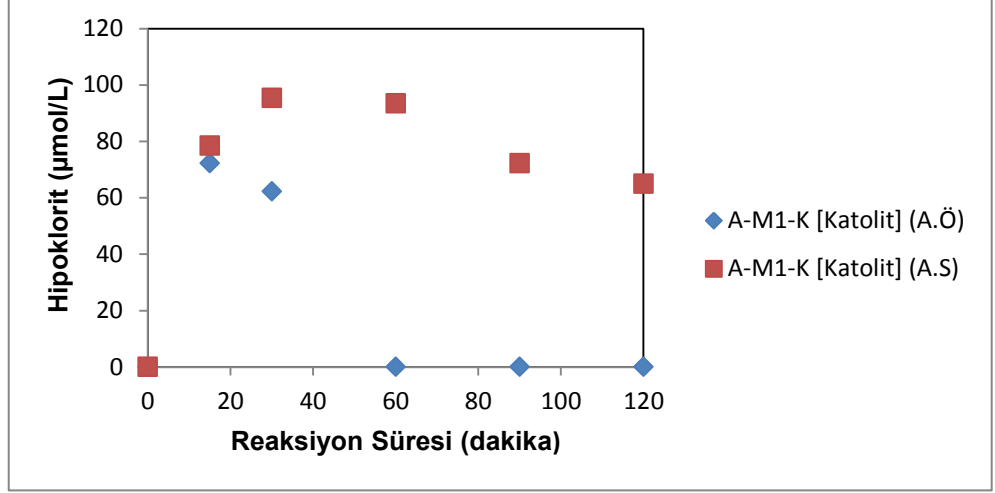


Şekil 4.3. Aktivasyon öncesi ve aktivasyon sonrası M1 ile yapılan çalışmalarda anolit kısmında hipoklorit derişimi değışimi ($i=0,1$ A, konfigürasyon=A-M1-K 200 mg/L NaCl)

Şekil 4.3’de görüldüğü gibi M1’in aktivasyonu öncesi ve sonrası anolit kısımlarındaki hipoklorit derişimi farkı yaklaşık olarak 20 µmol/L kadardır. Aktivasyon öncesinde ve sonrasında elde edilen hipoklorit iyonları derişimi 16000 cfu/100 mL kadar *Escherichia coli* bakterisini dezenfekte edebilmektedir.

Yapılan çalışmalarda farklı konfigürasyonlarda anolit kısmında elde edilen hipoklorit iyonu kadar katolit kısmında da elde edilmeye çalışılmıştır.

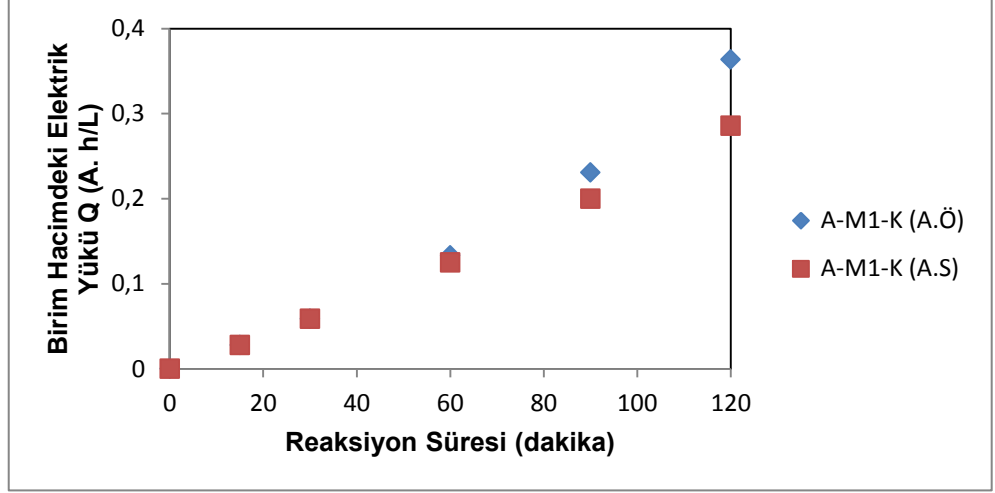
Şekil 4.4’de 200 mg/L NaCl çözeltisi ile A-M1-K konfigürasyonunda 0,1 A akım uygulandığında aktivasyon öncesinde ve sonrasında zamanla katolit kısmındaki hipoklorit derişimi değışimi gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Aktivasyon öncesi ve aktivasyon sonrası M1 ile yapılan çalışmalarda katolit kısmında hipoklorit derişimi değişimi ($i=0,1$ A, konfigürasyon=A-M1-K 200 mg/L NaCl)

Şekil 4.4'de görüldüğü gibi M1'in aktivasyonu sonrası katolit bölgesindeki hipoklorit derişimi aktivasyon sonrasında aktivasyon öncesine göre artış göstermektedir. Bu durum membranın aktifleşmesiyle ilişkilendirilebilir. Membranın aktifleştirilmesinden sonra daha düşük direnç ile iyonların geçişi sağlanmış ve anolit kısmından katolit kısmına iyonların geçişi kolaylaşmıştır. Akım uygulanmasıyla katolit kısmında da hipoklorit elde edilmiştir.

Şekil 4.5'de 200 mg/L NaCl çözeltisi ile A-M1-K konfigürasyonunda 0,1 A akım uygulandığında aktivasyon öncesinde ve sonrasında zamanla birim hacimdeki elektrik yükünün değişimi gösterilmiştir.

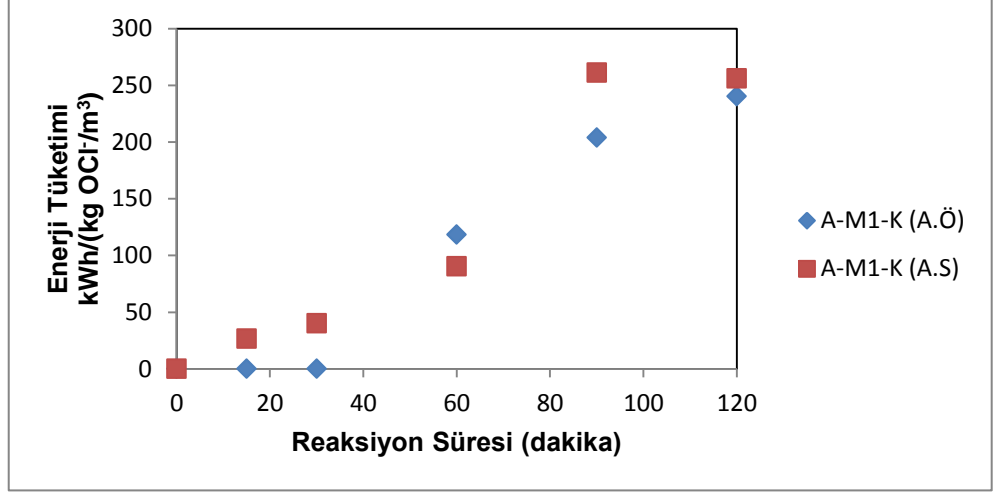


Şekil 4.5. Aktivasyon öncesi ve sonrasında M1 ile yapılan çalışmalarda birim hacim başına düşen elektrik yükünün değişimi ($i=0,1$ A, konfigürasyon=A-M1-K 200 mg/L NaCl)

Şekil 4.5’de görüldüğü gibi Q değerleri birbirlerine oldukça yakın ve bazı zamanlarda eşit olarak elde edilmiştir. Bunun nedeni deneylerin aynı sabit akım değerlerinde yapılmış olması, aynı zaman aralıklarında eşit hacimde örnekler alınması olarak açıklanabilir.

Cotillas vd. [2013] bor doplanmış elmas elektrot ve boyut olarak kararlı elektrotlarla yaptıkları çalışmalarda birim hacimdeki elektrik yükünün 0,01 olduğu durumda 35000 cfu/100 mL kadar *Escherichia coli* bakterisinin tamamının 5,61 A/m² akım yoğunluğunda dezenfekte edildiğini gözlemlemişlerdir. Birim hacimdeki elektriksel yük miktarının fazla olması dezenfeksiyon hızını arttıran durumlardan birisidir [Cotillas., 2013].

Şekil 4.6’da 200 mg/L NaCl çözeltisi ile A-M1-K konfigürasyonunda 0,1 A akım uygulandığında aktivasyon öncesinde ve sonrasında zamanla bir m³ hacimde 1 kg hipoklorit üretimi için gerekli enerji tüketimi değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4. 6. Aktivasyon öncesi ve sonrasında M1 ile yapılan çalışmalarda enerji tüketimi değişimi ($i=0,1$ A, konfigürasyon=A-M1-K 200 mg/L NaCl)

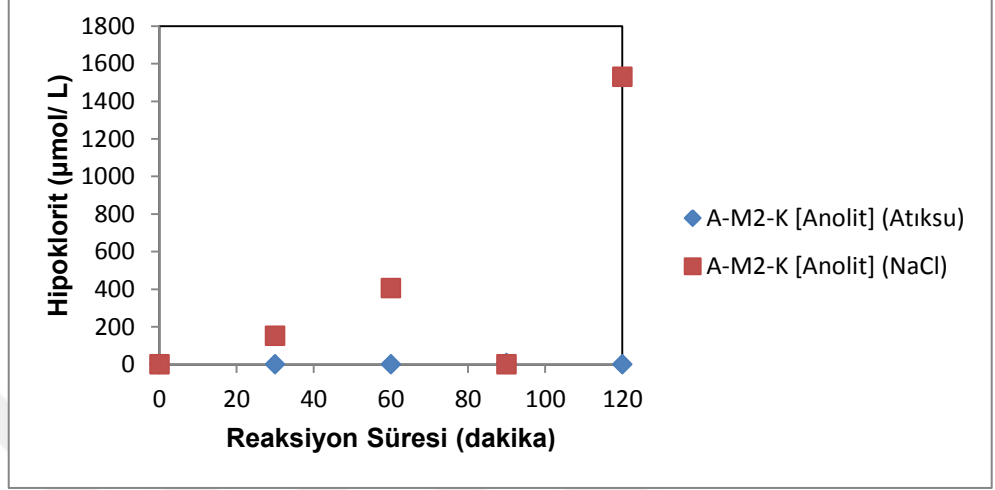
Şekil 4.6'da görüldüğü gibi enerji tüketimi aktivasyon öncesinde ve sonrasında yapılan çalışmalarda zamanla artmıştır. Aktivasyon sonrasında enerji tüketiminin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmada Şekil 4.1-4.6'da elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi ile Nafion membranların sentezlendikten sonra hemen 0,1 M H₂SO₄ ve 0,1 M H₂O₂ ile aktive edilerek kullanılmasına karar verilmiştir.

Sentezlendikten sonra hemen aktive edilen Nafion membran kullanılarak sürekli sistem elektroliz hücresinde anot-M2-katod konfigürasyonunda anolit ve katolit kısımları oluşturularak atıksu ve 1500 mg/L NaCl çözeltisi ile karşılaştırma deneyleri yapılmıştır.

Atıksu ile yapılan çalışmalarda 0,3 A akım uygulanmış, 1500 mg/L NaCl çözeltisi ile yapılan çalışmalarda 0,15 A akım uygulanmıştır. Klor ve klorlu bileşiklerin hipoklorite dönüşmesi reaksiyonu bazik ortamda gerçekleştiğinden NaCl ile yapılan çalışmalarda pH istemli olarak iki bölmede de 12'nin üzerinde tutulmuştur. Atıksu ile yapılan çalışmalarda başlangıçta anolit kısmında 750 cfu/100mL *Escherichia coli* mikroorganizma kolonisi, katolit kısmında 1300 cfu/100mL *Escherichia coli* mikroorganizma kolonisi bulunurken 30 dakikada her iki kısımda da kolonilerin tamamı yıkılmıştır.

Şekil 4.7’de A-M2-K konfigürasyonunda atıksu ile yapılan çalışmalarda 0,3 A akım uygulanmış, 1500 mg/L NaCl çözeltisi ile yapılan çalışmalarda 0,15 A akım uygulanmış ve zamanla anolit kısımlarındaki hipoklorit derişimi değişimleri incelenmiştir.



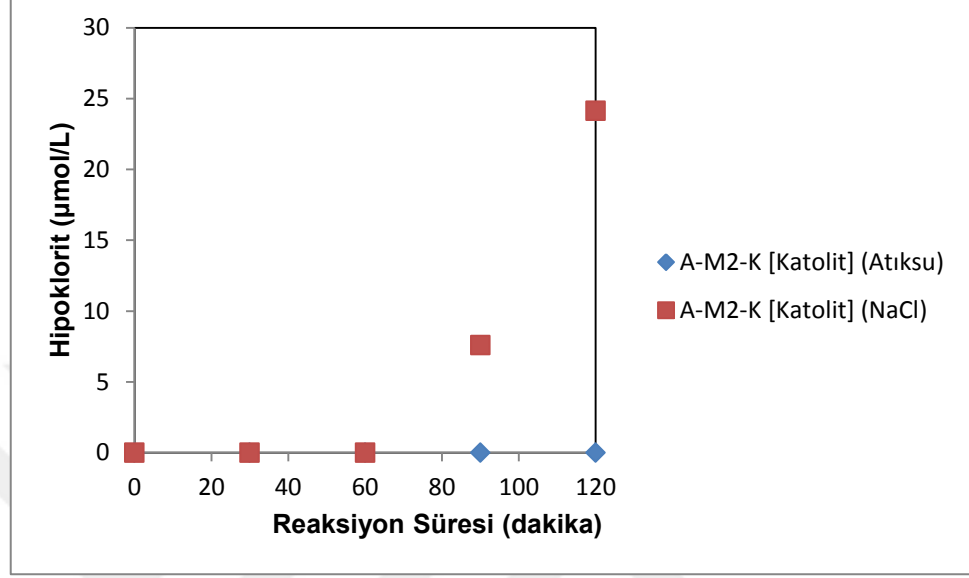
Şekil 4.7. M2 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve atıksu varlığında anolit kısmındaki hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, $i_{\text{atıksu}}=0,3$ A, $i_{\text{NaCl}}=0,15$ A, $C_{\text{NaCl},0}=1500$ mg/L)

Li vd. [2004] TiO₂ kaplı RuO₂ elektrotlar ve 0,01M – 0,025 M– 0,05 M– 0,075 M ve 0,1 M NaCl çözeltileri ile yaptıkları dezenfeksiyon çalışmalarında NaCl çözeltilerinin dezenfeksiyon ortamına eklendiği durumlarda dezenfeksiyonun daha hızlı olduğunu, direk klorlama ile elektrokimyasal klorlama karşılaştırıldığında elektrokimyasal klorlamanın daha etkili olduğunu, 0,1 M NaCl çözeltisi varlığında 10⁹ / mL *Escherichia coli* bakterisinin 10 – 15 dakikada dezenfekte edildiğini gözlemlemişlerdir [Liv d., 2004].

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi atıksu ile yapılan çalışmalarda hipoklorit miktarının çok az olmasının nedeni atıksu içerisindeki klorlu bileşiklerin miktarının az olmasıdır. NaCl çözeltisinin ortama sağladığı klor iyonları sayesinde hipoklorit üretimi daha kolay elde edilmiştir.

Şekil 4.8’de A-M2-K konfigürasyonunda atıksu ile yapılan çalışmalarda 0,3 A akım uygulanmış, 1500 mg/L NaCl çözeltisi ile yapılan çalışmalarda 0,15 A akım

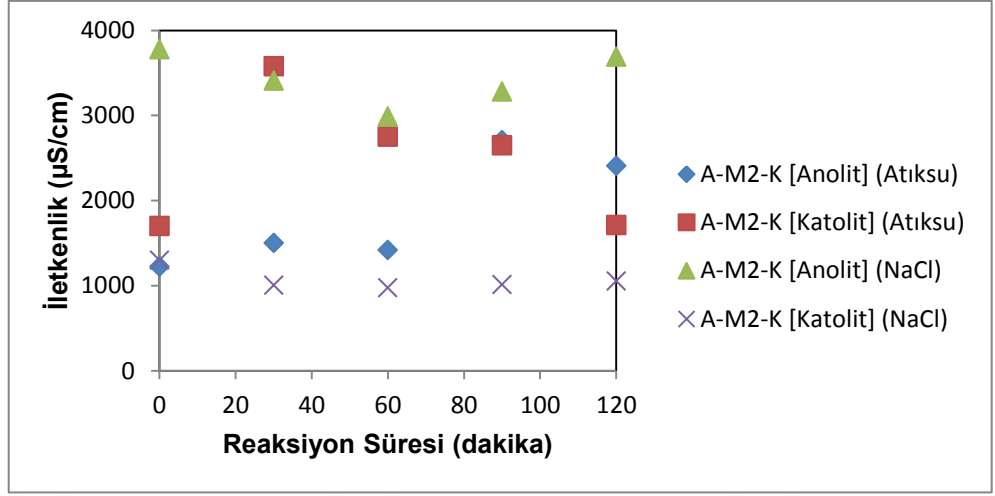
uygulanmış ve zamanla katolit kısımlarındaki hipoklorit derişimi değişimleri incelenmiştir.



Şekil 4.8. M2 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve atık su varlığında katolit kısmındaki hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, $i_{atıksu}=0,3$ A, $i_{NaCl}= 0,15$ A, $C_{NaCl,0}= 1500$ mg/L)

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi anot-M2-katod konfigürasyonunda atıksu ile yapılan çalışmalarda hipoklorit derişiminin çok az olmasının nedeni atıksu içerisindeki klorlu bileşiklerin miktarının az olmasıdır. NaCl çözeltisinin ortama sağladığı klor iyonları sayesinde ortamda daha fazla hipoklorit elde edilmiştir. Normal koşullarda katolit kısmında hipoklorit üretiminin anolit kısmından daha düşük miktarda olması beklenir. Ancak bu çalışmada NaCl çözeltisi ile yapılan deneylerde katolit kısmında daha fazla hipoklorit üretildiği gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni anolitte üretilen iyonların aynı zamanda farklı klor bileşiklerine dönüşmesi, katolit kısmında ise bu reaksiyonların gerçekleşmemesi olarak açıklanabilir.

Şekil 4.9’da A-M2-K konfigürasyonunda atıksu ile yapılan çalışmalarda 0,3 A akım uygulanmış, 1500 mg/L NaCl çözeltisi ile yapılan çalışmalarda 0,15 A akım uygulanmış, zamanla anolit ve katolit kısımlarında iletkenlik değişimleri incelenmiştir.

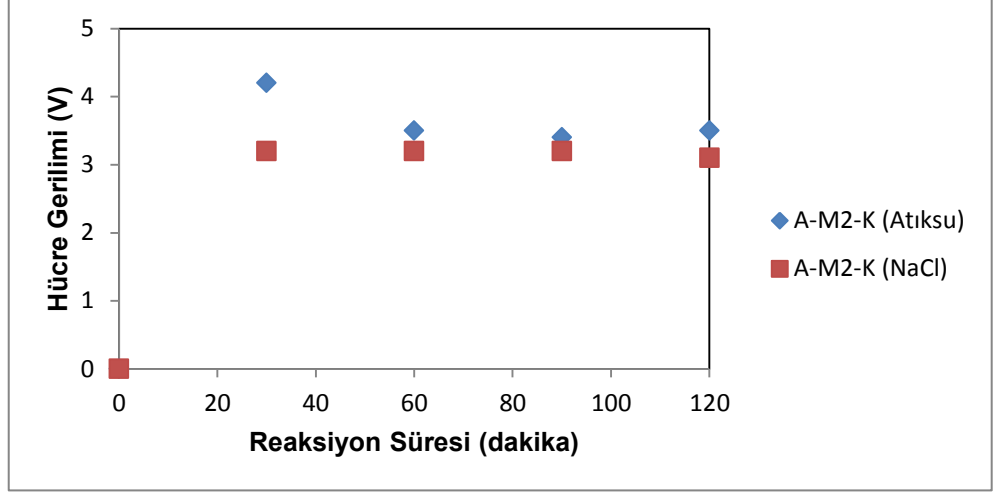


Şekil 4.9. M2 ile yapılan çalışmalarda atıksu ve NaCl varlığında anolit ve katolit kısımlarındaki iletkenlik değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, $i_{\text{atıksu}}=0,3$ A, $i_{\text{NaCl}}=0,15$ A, $C_{\text{NaCl},0}=1500$ mg/L)

Şekil 4.9’da görüldüğü gibi anolit kısmında iletkenlik genellikle azalmış, katolit kısmında ise genellikle artmıştır. Bunun nedeni olarak iletkenliği artırıcı etkiye bulunan iyonların anot yüzeyinde gerçekleşen tepkimelerle artması, katot yüzeyindeki tepkimelerle azalması olarak açıklanabilir. NaCl çözeltisi kullanıldığı durumda 60. dakikada görülen dalgalanmanın sebebi ortam pH değerinin azalması sonucunda ortama dışarıdan eklenen NaOH çözeltisinin etkisidir.

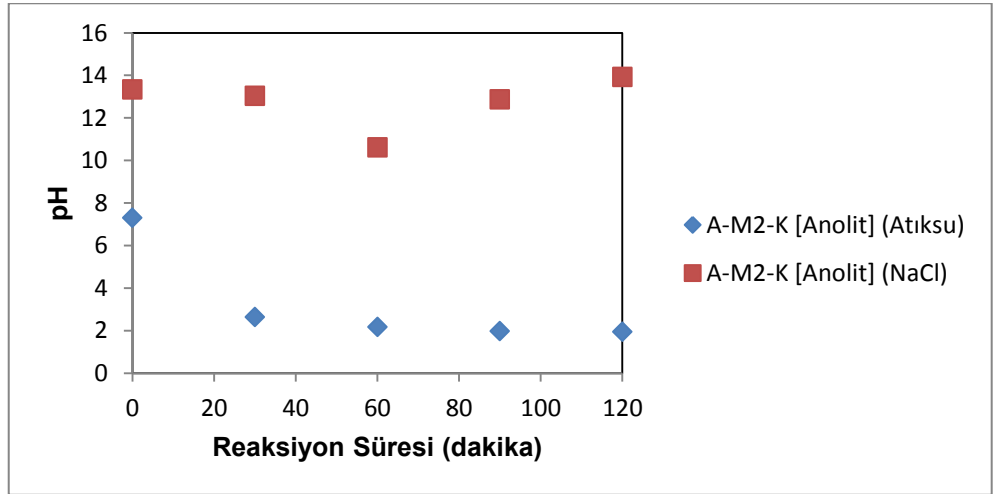
Atıksu ile yapılan çalışmalarda iletkenlik değerinin genellikle daha yüksek görülmesinin sebebi atıksu ile yapılan çalışmalarda 0,3 A uygulanmış olması, NaCl ile yapılan çalışmalarda 0,15 A akım uygulanmış olmasıdır.

Şekil 4.10’da A-M2-K konfigürasyonunda atıksu ile yapılan çalışmalarda 0,3 A akım uygulanmış, 1500 mg/L NaCl çözeltisi ile yapılan çalışmalarda 0,15 A akım uygulanmış ve zamanla hücre gerilimi değişimleri incelenmiştir. Şekil 4.11’de ise aynı koşullarda zamanla pH değişimleri incelenmiştir.



Şekil 4.10. M2 ile yapılan çalışmalarda atık su ve NaCl varlığında hücre gerilimi değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, $i_{\text{atıksu}}=0,3$ A, $i_{\text{NaCl}}=0,15$ A, $C_{\text{NaCl},0}=1500$ mg/L)

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi atıksu ve NaCl çözeltileriyle yapılan çalışmalarda hücre gerilimi bakımından büyük bir fark gözlemlenmemiştir. NaCl çözeltisi ile oluşturulan sentetik ortam, atıksu ortamına benzer yapıda iyonik özellik gösterdiği için membranın sahip olduğu direnç veya ortama uygulanan güç miktarının yaklaşık olarak eşit olacağı düşünülebilir.



Şekil 4.11. M2 ile yapılan çalışmalarda atıksu ve NaCl ile varlığında anolit kısmındaki pH değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, $i_{\text{atıksu}}=0,3$ A, $i_{\text{NaCl}}=0,15$ A, $C_{\text{NaCl},0}=1500$ mg/L)

Literatürde yapılan çalışmalarla ilgili klor ve klor yapılı bileşiklerin asidik bölgede daha az miktarda üretilebileceği, pH değeri 8'in üzerinde olduğunda daha

fazla dezenfektan üretildiği ve daha hızlı dezenfeksiyon sağlandığı gözlemlenmiştir. Hipoklorit iyonları ile yapılan çalışmalarda pH değeri 7,6'nın üzerinde olduğunda daha fazla hipoklorit iyonu elde edildiği gözlemlenmiştir [Bergman vd., 2008, Cong vd., 2008, Al-Hamaiedeh, 2009].

Atıksu ile yapılan deneylerde pH kontrol edilmemiş, NaCl çözeltisi ile yapılan deneyde ise pH 12'nin üzerinde istemli bir şekilde tutularak daha fazla hipoklorit iyonu eldesi sağlanmıştır. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi atıksu ile yapılan çalışmalarda pH değeri zamanla azalmıştır. Bunun nedeni anot ile etkileşen kısımda oksijen oluşum reaksiyonu sırasında ortamda H⁺ iyonların oluşmasıdır. pH değerinin asidik olması hipoklorit iyonlarının ortamda azalmasına neden olur, bu durum dezenfeksiyon proseslerinde istenmez.

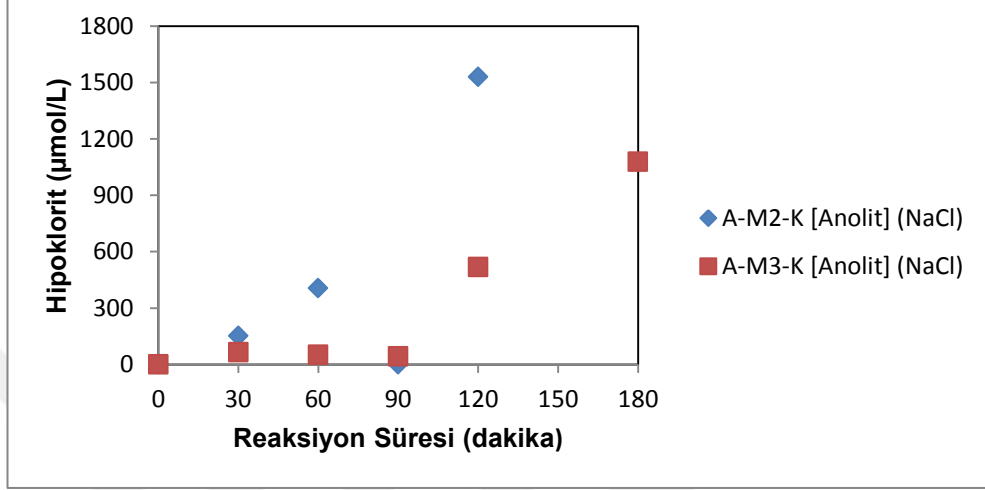
4.2. TiO₂ Katkılı Nafion Membran Kullanılan Sürekli Sistem Elektroliz Hücrelerinde Atıksu Dezenfeksiyonu Çalışmaları

Sentezlendikten sonra hemen aktive edilen Nafion membran ve TiO₂ katkılı Nafion membran kullanılarak sürekli sistem elektroliz hücrelerinde anot-M2-katot ve anot M3-katot konfigürasyonlarında anolit ve katolit kısımları oluşturularak atıksu ve 1500 mg/L NaCl çözeltisi ile karşılaştırma deneyleri yapılmıştır. Atıksu ile yapılan çalışmada 0,3 A uygulanmış, 1500 mg/ L NaCl çözeltisi ile yapılan çalışmalarda 0,15 A akım uygulanmıştır. Bu çalışmada NaCl ile yapılan çalışmaların daha düşük akım değerinde yapılmasının nedeni NaCl ve atıksu ile yapılan çalışmaların arasındaki farkın büyüklüğünü görmek amaçlıdır. NaCl ile yapılan çalışmalarda pH istemli olarak 12'nin üzerinde tutulmuştur.

4.2.1. Sürekli Sistem Elektroliz Hücrelerinde Nafion Membran ve TiO₂ Katkılı Nafion Membran ile Atıksu Dezenfeksiyon Çalışmaları

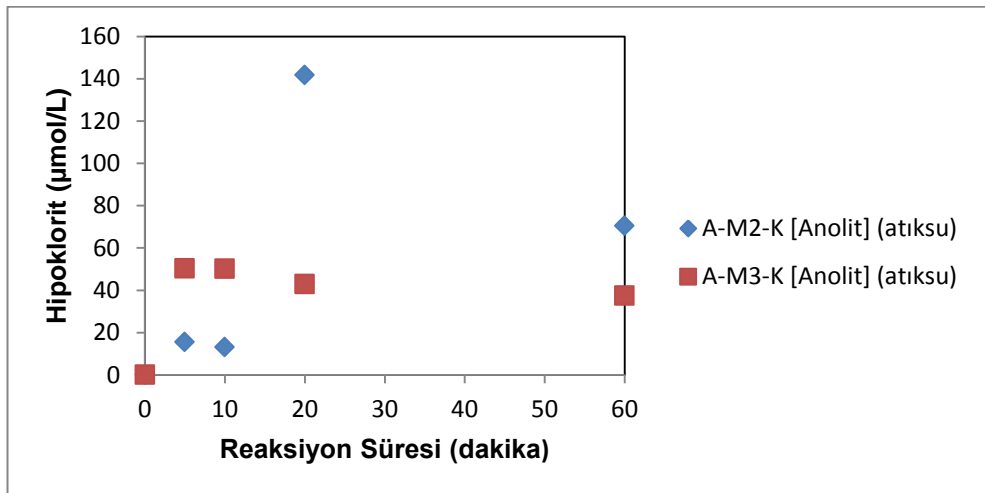
TiO₂ katkılı nafion membranın atıksu içerisinde incelenmesi elektroliz ve elektrodiyaliz sistemleri olmak üzere iki ana kısımda incelenmiştir. Atıksu ile yapılan çalışmalar kendi aralarında, NaCl ile yapılan çalışmalar kendi aralarında ve NaCl çözeltisi ile atıksu çalışmaları birbirleri arasında kıyaslanmış ve dezenfeksiyon için en iyi koşullar belirlenmiştir.

Şekil 4.12’de A-M2-K ve A-M3-K konfigürasyonlarında 1500 mg/ L NaCl çözeltisi ile yapılan çalışmalarda zamanla anolit kısmındaki hipoklorit derişimi değişimi incelenmiştir. Şekil 4.13’de aynı konfigürasyonlardda atıksu ile yapılan çalışmalarda zamanla anolit kısmındaki hipoklorit derişimi değişimi incelenmiştir.



Şekil 4.12. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl varlığında anolit kısmında hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,15$ A, $C_{NaCl,0}=1500$ mg/L)

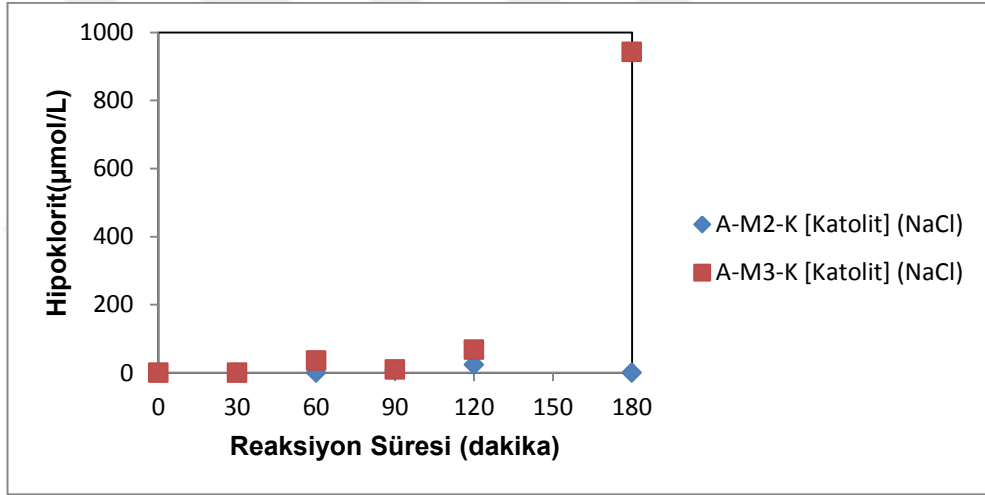
Şekil 4.12’de görüldüğü gibi M2 ile yapılan çalışmada TiO₂ katkılı Nafion membranla yapılan çalışmalara göre anolit kısmında daha fazla hipoklorit oluşumu elde edilmiştir.



Şekil 4.13. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda anolit kısmında hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,3$ A, Atıksu)

Şekil 4.13'de görüldüğü gibi TiO₂ katkılı M3 membranı ile yapılan çalışmalarda hipoklorit üretimi ilk dakikalarda daha hızlı artmıştır. Bu durum M3 membranı ile yapılan deneylerde daha hızlı hipoklorit üretildiğini ve dezenfeksiyon hızının M2 membranı ile yapılan deneylere göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. 60 dakika sonunda hipoklorit derişiminin A-M2-K ile yapılan çalışmada A-M3-K ile yapılan çalışmaya göre daha fazla hipoklorit elde edildiği görülmüştür.

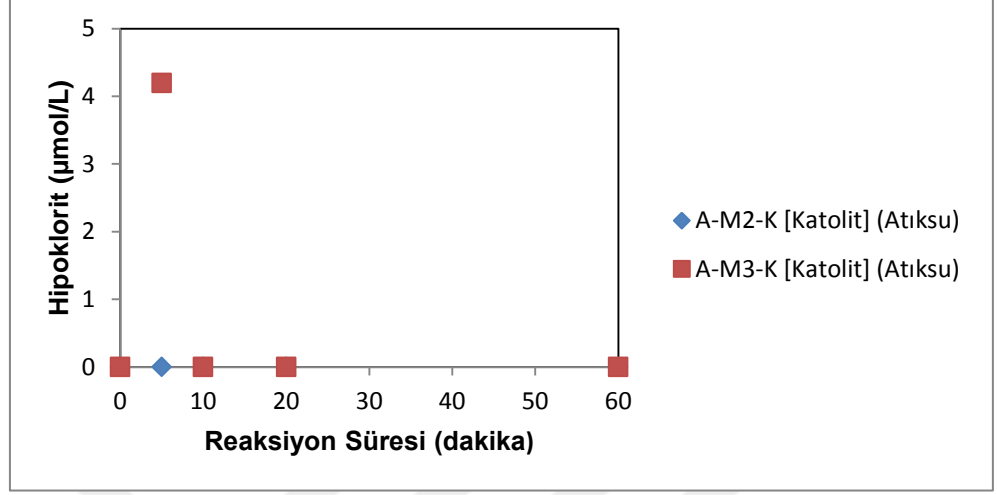
Şekil 4.14'de A-M2-K ve A-M3-K konfigürasyonlarında 1500 mg/ L NaCl çözeltisi ile 0,15 A uygulanarak yapılan çalışmalarda zamanla katolit kısmındaki hipoklorit derişimi değişimi incelenmiştir. Şekil 4.15'de aynı konfigürasyonlardda atıksu ile 0,3 A ile yapılan çalışmalarda zamanla katolit kısmındaki hipoklorit derişimi değişimi incelenmiştir.



Şekil 4.14. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl varlığında katolit kısmında hipoklorit derişimi değişimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K i=0,15 A, C_{NaCl,0}=1500 mg/L)

Şekil 4.14'de görüldüğü gibi TiO₂ katkılı M3 membranı ile yapılan çalışmada katolit kısmında hipoklorit üretilmiş, M2 membranı ile yapılan çalışmada bu değer ya çok düşük derişimde elde edilmiş ya da hiç elde edilememiştir. TiO₂ katkısız membranların katolit kısmında hipoklorit üretimi oldukça zor olduğundan ancak az miktarlarda üretilmiştir.

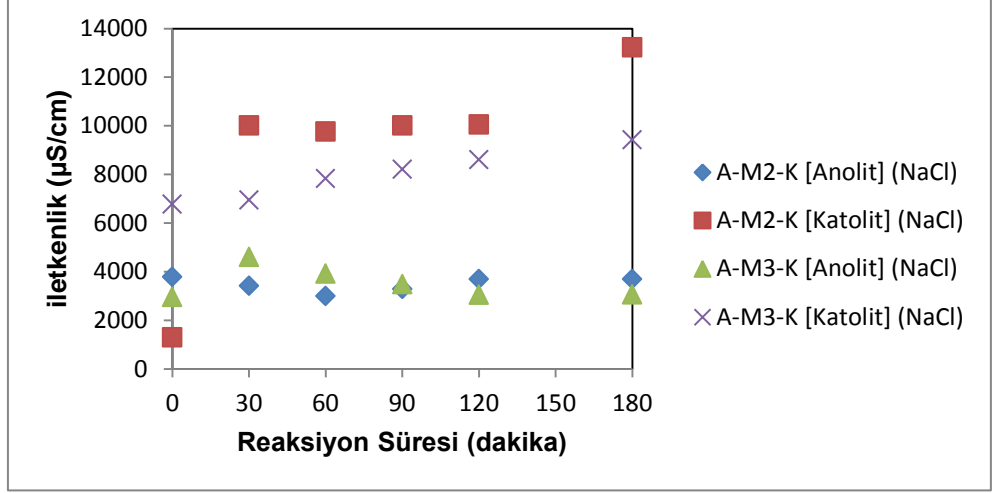
TiO₂ katkılı membranlarla anot ve katottan oluşan iki hücrenin bipolar iki ortam oluşturması sonucunda katolit kısmında da hipoklorit üretimi sağlanabilmektedir.



Şekil 4.15. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında katolit kısmında hipoklorit derişimi değışimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K i=0,3 A, Atıksu)

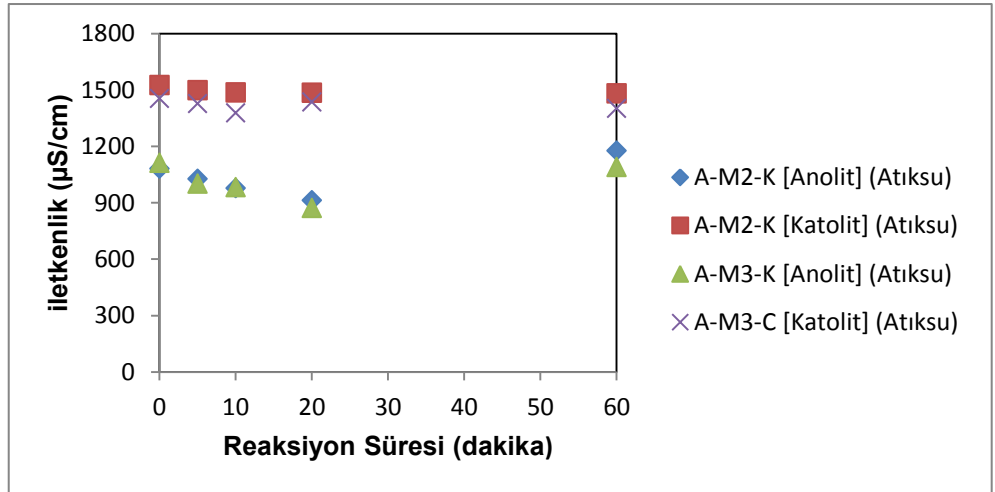
Şekil 4.15’de görüldüğü gibi katolit kısmında atıksu ile yapılan çalışmalarda hipoklorit üretimi zorlukla yapılabilmektedir. Bu durumun başlıca nedeni atıksuyun içerisinde bulunan iyonların(NH₄⁺, SO₃⁻² ve diğerleri) hipoklorit üretimine uygun olmaması olarak açıklanabilir. M3 membranı ile yapılan deneylerde katolit kısmında hipoklorit varlığının M2 membranı ile yapılan deneylerden daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun başlıca nedeninin M3 membranı içerisinde bulunan titanyum partiküllerinin olduğu düşünülmektedir. A-M3-K konfigürasyonu ile yapılan deneyde 10. dakikada görülen hipoklorit derişimi 10. dakikaya kadar hipoklorit üretildiğini ve bu dakikaya kadar üretilen hipokloritin 10. dakika sonrasında atıksu içerisindeki mikroorganizmalarla etkileşerek azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.16’da A-M2-K ve A-M3-K konfigürasyonlarında 1500 mg/ L NaCl çözeltisi ile 0,15 A uygulanarak yapılan çalışmalarda zamanla anolit ve katolit kısımlarındaki iletkenlik değışimi incelenmiştir. Şekil 4.17’de aynı konfigürasyonlarda atıksu ile 0,3 A ile yapılan çalışmalarda zamanla anolit ve katolit kısımlarındaki iletkenlik değışimi incelenmiştir.



Şekil 4.16. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl varlığında anolit ve katolit kısımlarındaki iletkenlik değişimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,15$ A, $C_{NaCl,0}=1500$ mg/L)

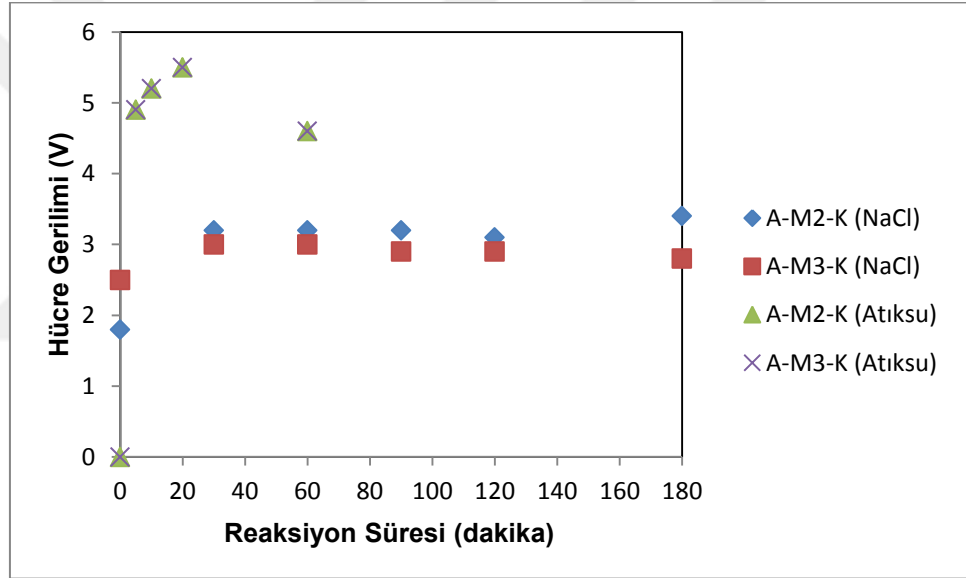
Şekil 4.16’da görüldüğü gibi anolit kısımlarında genellikle iletkenlik zamanla azalma yönünde bir değişim gösterirken, katolit kısımlarında bu değişim artış yönünde olmuştur. Şekilde dalgalanma olarak görülen değişimler, pH değerini 12’nin üzerinde tutmak için zamanla ortama dışarıdan eklenen NaOH etkisidir. Anolit kısmında gerçekleşen reaksiyonlar genellikle asidik bölgeye yönlendiren reaksiyonlar olup katodik kısımda gerçekleşen tepkimeler bazik bölgeye yönlendiren tepkimelerdir.



Şekil 4.17. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında anolit ve katolit kısımlarındaki iletkenlik değişimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,3$ A, Atıksu)

Şekil 4.17’de görüldüğü gibi katolit kısımlarında iletkenlikte zamanla çok küçük azalma gözlenmiş olmakla birlikte, anolit kısmında 20 dakika sonrasında artış görülmüştür. Normal koşullarda sodyum klorür çözeltileriye yapılan deneylerde ortamdaki iyonlar nedeniyle anolit kısmında iletkenliğin zamanla artması katolit kısmında ise iletkenliğin zamanla azalması beklenir. Ancak atıksu ile yapılan çalışmalarda atıksuyun daha az iyon taşıması farklı bileşenleri aynı anda bulundurması ve farklı dinamiklere sahip olması nedeniyle dalgalanmalar gözlemlenmiştir.

Şekil 4.18’ de atıksu ve 1500 mg/L NaCl çözeltileriyle yapılan çalışmalarda zamanla hücre gerilimi değişimleri incelenmiştir.

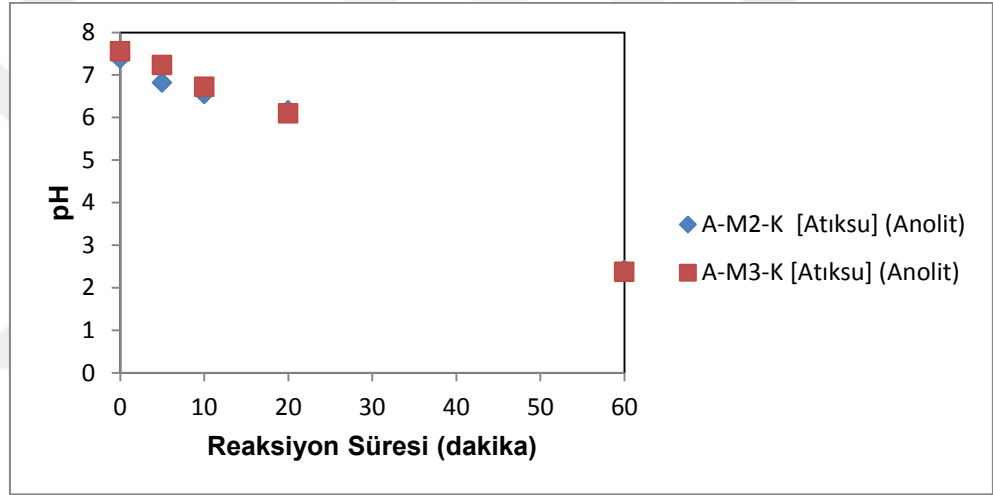


Şekil 4.18. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve Atıksu varlığında hücre gerilimi değişimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i_{atıksu}=0,3A$ Atıksu, $i_{NaCl}=0,15A$ $C_{NaCl,0}=1500$ mg/L)

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi hücre gerilimi değerleri birbirine çok yakın elde edilmiştir. TiO₂ katkılı membranlarda hücre geriliminin düşük olması direncin düşük olduğu anlamına gelmektedir ve direncin düşük olması da dezenfeksiyonu olumlu yönde etkilemektedir. M3 membranı ile yapılan deneylerde potansiyel farkı değerleri 25-30 volt aralığına geldiği zaman membran sistemlerinin zarar görmemesi için sistem kapatılmıştır.

Şekil 4.18'de görüldüğü gibi hücre gerilimi genellikle 5 V değeri civarında seyretmiştir. Hücre geriliminin 5 V civarında seyretmesi membranın verimli çalışması için uygun bir değerdir. Membranın verimli çalışabilmesi ve özelliğini yitirmeden uzun süre kullanılabilmesi için 25 V ve üzeri hücre gerilimi değerlerinde çalışılmaması önemlidir. Yüksek hücre gerilimi değerlerinde membran sistemleri zarar görebilmektedir.

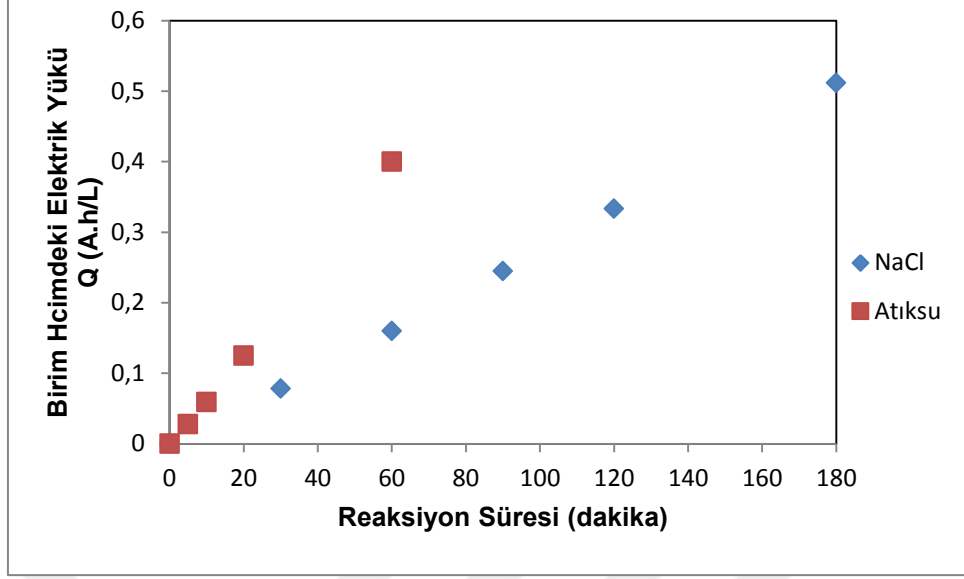
Şekil 4.19'da A-M2-K ve A-M3-K konfigürasyonlarında atıksu ile yapılan çalışmalarda 0,3 A akımda zamanla anolit kısımlarındaki pH değişimi incelenmiştir.



Şekil 4.19. M2 ve M3 membranları kullanıldığında atıksu ile yapılan çalışmalarda anolitteki pH değişimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,3$ A, Atıksu)

Şekil 4.19'da görüldüğü gibi pH değeri kontrol edilmediği durumda anolit kısmında anotta gerçekleşen reaksiyonlar nedeniyle pH değerinin zamanla azaldığı gözlemlenmiştir. Ortamda klor ve klorlu yapıların derişimi arttıkça reaksiyonlar artar ve pH değerindeki azalma daha keskin olarak gözlemlenir.

Şekil 4.20'de A-M2-K ve A-M3-K konfigürasyonlarında atıksu ve NaCl çözeltisi ile yapılan çalışmalarda atıksu için 0,3 A, NaCl için 0,15A akım uygulandığında zamanla birim hacimdeki elektrik yükü değişimi incelenmiştir.

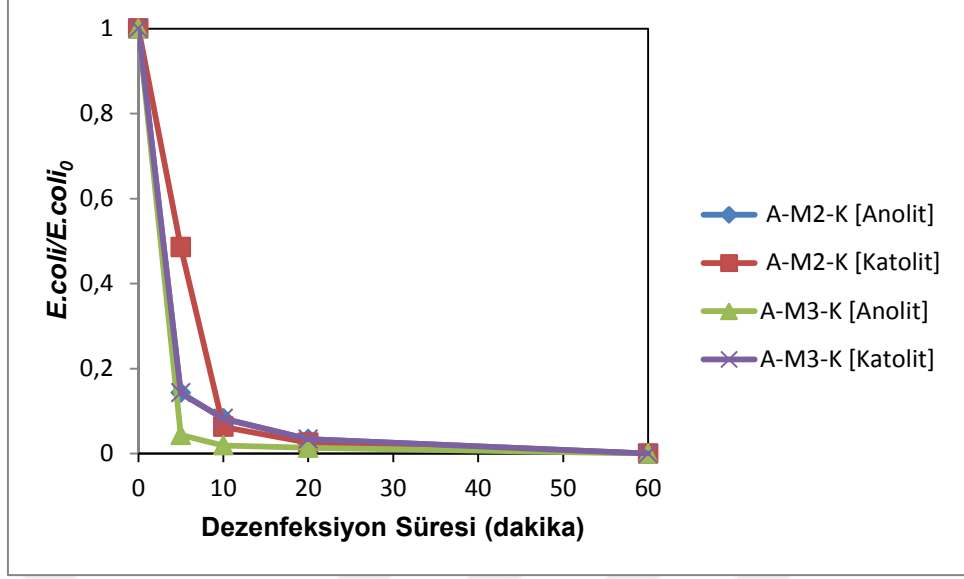


Şekil 4.20. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve Atıksu varlığında birim hacimdeki elektriksel yük değişimi(Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i_{atıksu}=0,3$ A-Atıksu, $i_{NaCl}=0,15$ A- $C_{NaCl,0}= 1500$ mg/L)

Şekil 4.20’de görüldüğü gibi elektrot olarak NaCl kullanıldığında zamanla birim hacim başına düşen elektriksel yük miktarının arttığı ve M2 ve M3 membran sistemleri için eşit olduğu belirlenmiştir. Elektrot olarak atıksu kullanıldığında M2 ve M3 membran sistemleri için birim hacim başına düşen elektriksel yük miktarı eşit olup zamanla arttığı gözlemlenmiştir. Atıksu ile yapılan çalışmalarda birim hacim başına düşen elektriksel yük miktarının daha fazla olmasının nedeni uygulanan akım değerinin daha yüksek olmasıdır.

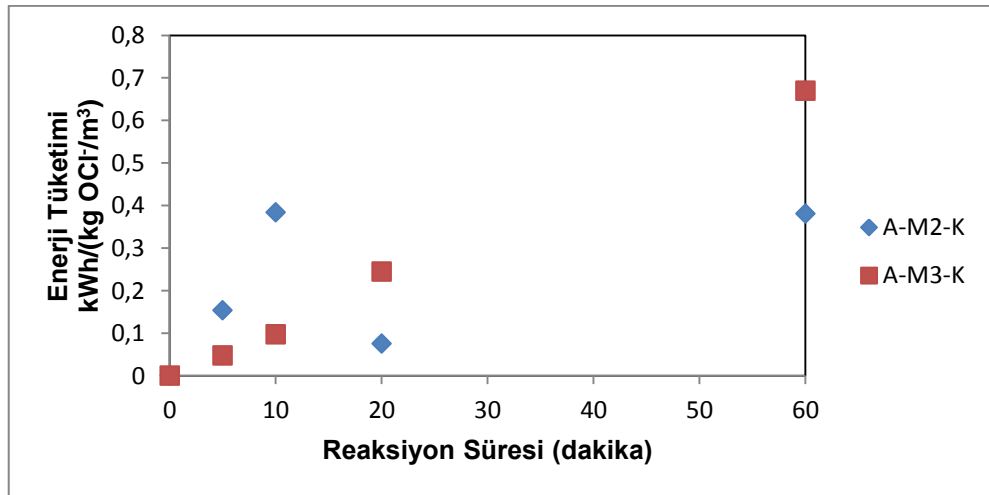
Şekil 4.21’de atıksu varlığında A-M2-K ve A-M3-K konfigürasyonlarında zamanla anolit ve katolit kısımlarındaki *Escherichia coli* bakterisinin dezenfeksiyonu incelenmiştir.

Şekil 4.22’de 1 m³ çözeltilerde 1 kg hipoklorit üretimi için gerekli enerji tüketiminin zamanla değişimi incelenmiştir. Şekil 4.23’de ise *Escherichia coli* bakterisinin dezenfeksiyonu için gerekli enerji tüketimini değişimi zamanla incelenmiştir.



Şekil 4.21. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında anolit ve katolit kısımlarındaki *Escherichia coli* miktarının değişimi (Konfigurasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,3$ A, Atıksu)

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi en kısa zamanda *Escherichia coli* koloni sayısındaki en hızlı azalma anot-M3-katot konfigurasyonundaki anolit kısmında, daha sonra anot-M3-katot konfigurasyonundaki katolit kısmında görülmüştür. Bu durum TiO₂ katkılı membranla yapılan çalışmaların daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Her iki konfigurasyonda da zamanla anolit kısmında katolit kısmına göre daha hızlı bir düşüş görülmektedir.



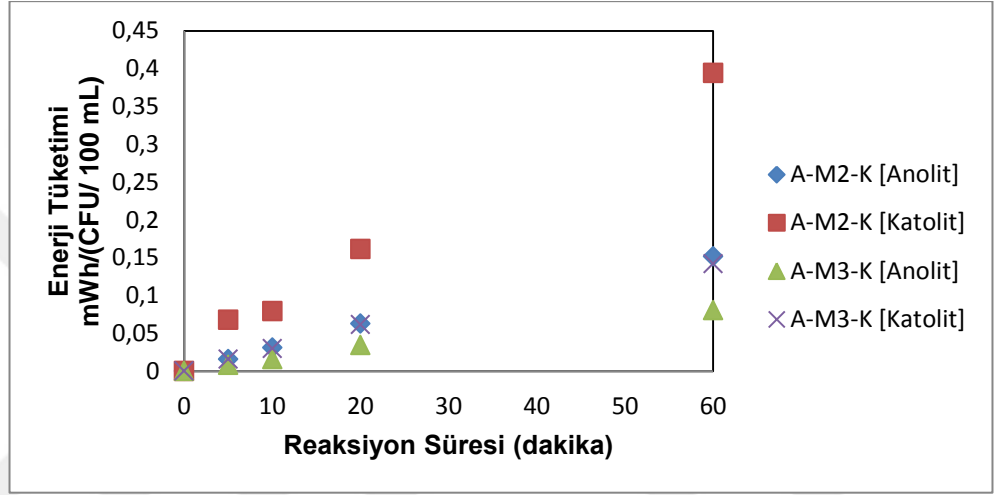
Şekil 4.22. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl varlığında enerji tüketimi değişimi (Konfigurasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,15$ A, $C_{NaCl,0}= 1500$ mg/L)

Şekil 4.22’de görüldüğü gibi M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl varlığında enerji tüketimi zamanla artmıştır. M3 ile yapılan çalışmalarda enerji tüketiminin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Enerji tüketimi hesaplanırken Eşitlik 4.1 ve 4.2 kullanılmıştır.

$$\text{Enerji tüketimi kWh/(kg OCl}^{-}\text{/m}^3) = i V_t \Delta_t / (\text{ClO}_0^{-} - \text{ClO}_t^{-}) \quad (4.1)$$

$$\text{Enerji tüketimi mWh/(cfu/100mL)} = i V_t \Delta_t / (E.coli_0 - E.coli_t) \quad (4.2)$$



Şekil 4.23. M2 ve M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında anolit ve katolit kısımlarındaki enerji tüketimi değişimi (Konfigürasyon: A-M2-K, A-M3-K $i=0,3$ A, Atıksu)

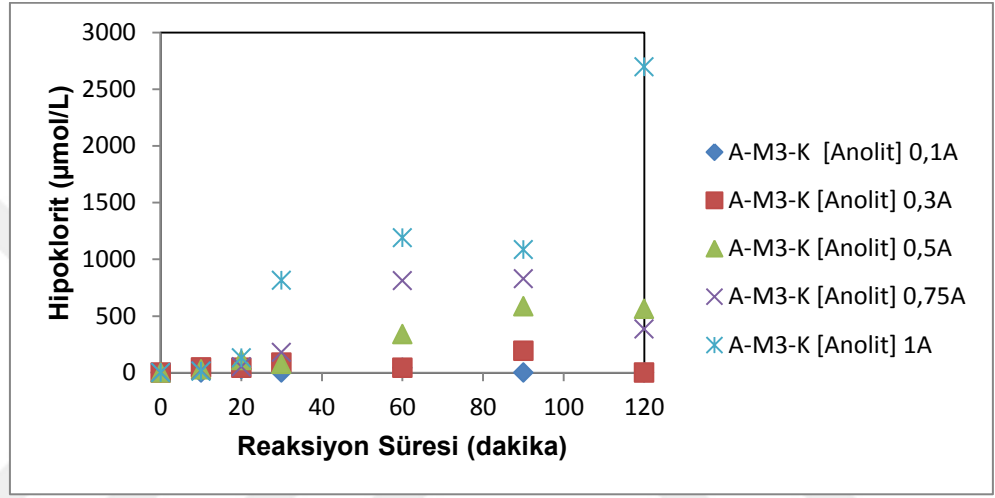
Şekil 4.23’de görüldüğü gibi 100 mL’deki *Escherichia coli* mikroorganizma kolonilerinin yıkımı için gerekli enerji tüketimi zamanla artmıştır. Katolit kısımlarında daha zor hipoklorit üretilip daha uzun zamanda *E.coli* yıkımı gerçekleştiği için daha fazla enerji harcandığı gözlemlenmiştir.

4.2.2. TiO₂ Katkılı Nafion Membranlar ile Farklı Akım Değerlerinde Yapılan Atıksu Dezenfeksiyon Çalışmaları

Elektroliz hücresinde akımın etkisinin incelenmesi amacıyla, anot-M3-katot konfigürasyonunda anolit ve katolit kısımları oluşturularak atıksu ile yapılan çalışmalarda beş farklı akım uygulanmıştır. Yapılan deneyler ile anolit kısmında hipoklorit üretimi, anolit ve katolit kısımlarında iletkenlik değişimi, hücre gerilimi

değişimi, pH değişimi, birim hacim başına düşen elektrik yükü değişimi, anolit ve katolit kısımlarında *E.coli* giderimi ve enerji tüketimi incelenmiştir.

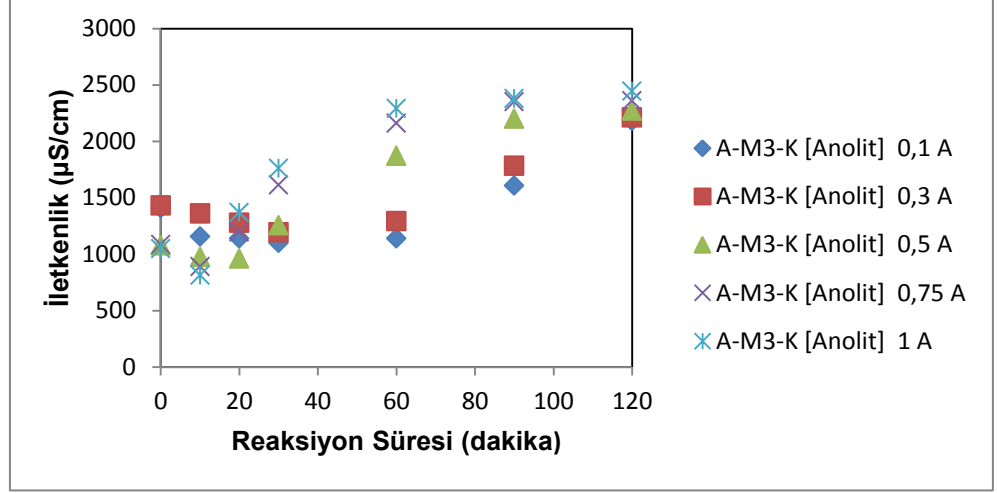
Şekil 4.24'de A-M3-K konfigürasyonunda atıksu ile yapılan çalışmalarda farklı akım değerleri uygulandığında anolit kısımlarında zamanla hipoklorit derişimi değişimi, 4.25'de aynı koşullarda anolit kısmındaki iletkenliğin zamanla değişimi incelenirken Şekil 4.26'da katolit kısmındaki iletkenliğin zamanla değişimi incelenmiştir.



Şekil 4.24. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda anolit kısmındaki hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu)

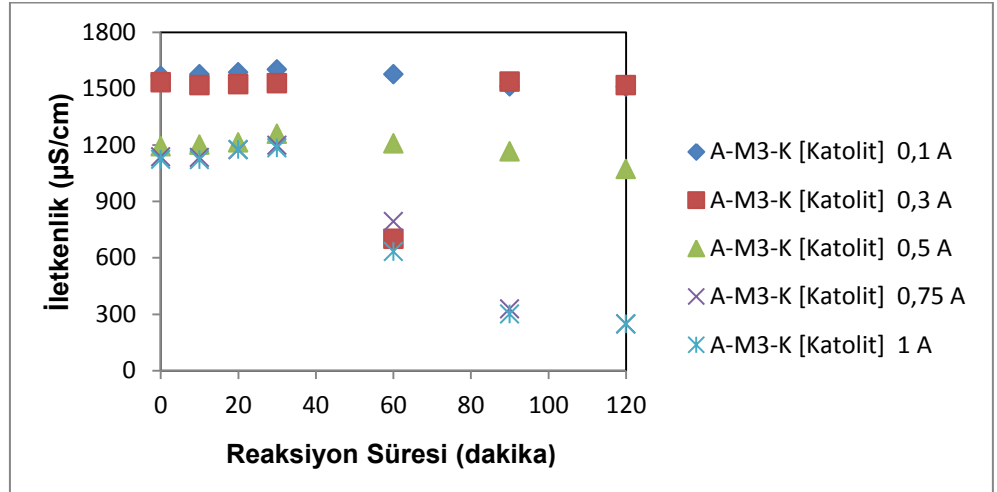
Cong vd. [2008] yaptıkları çalışmalarda PbO₂ elektrotlarla farklı akım yoğunluklarında (7 mA/cm²- 5 mA/cm² – 2 mA/cm²) coliform dezenfeksiyonunu incelemiş ve akım yoğunluğunun artmasıyla ortamda elde edilen dezenfektan (Cl⁻) miktarının arttığını en fazla dezenfektanın 250 mg/L ile 7 mA/cm² değerinde elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Dezenfektan derişiminin artmasıyla dezenfeksiyonun daha hızlı gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir.

Şekil 4.24'de görüldüğü gibi en yüksek hipoklorit derişimi en yüksek akım değeri (1 A) uygulandığında görülmüştür. Akım değeri arttıkça genellikle anolit kısmındaki hipoklorit derişiminin de arttığı belirlenmiştir. Atıksu içerisinde bulunan iyonların derişimi düşük olduğu için 0,3 A değerinden daha yüksek değerlerde çalışıldığında hipoklorit derişiminin gözlemlenmesi daha kolay olmuştur.



Şekil 4.25. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda anolit kısmındaki iletkenlik değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu)

Şekil 4.25'de görüldüğü gibi yapılan tüm çalışmalarda anolit kısmında iletkenliğin zamanla arttığı görülmüştür. En hızlı artış uygulanan en yüksek akım değeri olan 1 A ile yapılan çalışmada gözlemlenmiştir. Akım değerinin artmasıyla anolit kısmındaki iletkenliğin artması anotta gerçekleşen reaksiyonlarla doğrudan ilişkilidir. Anotta gerçekleşen tepkimeler sonucu oluşan iyonların etkisiyle iletkenlik değerinde artış görülmüştür.

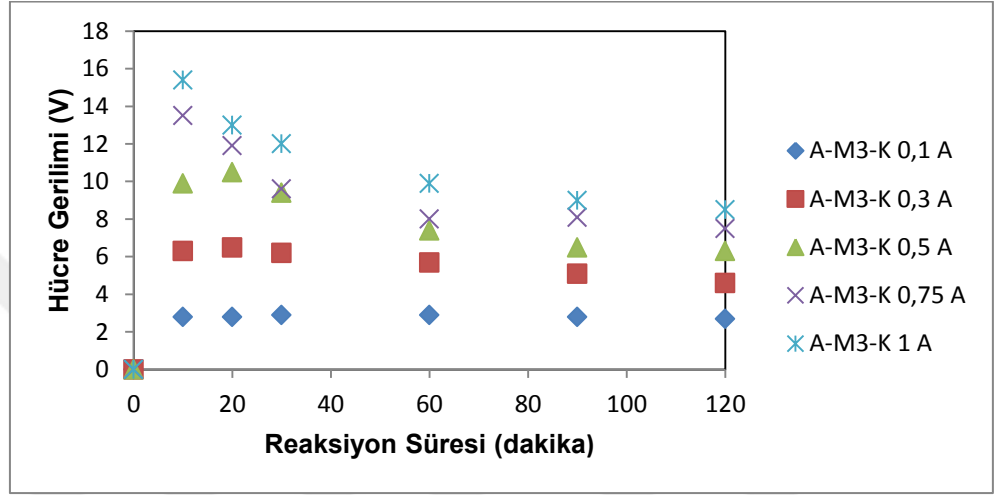


Şekil 4.26. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda katolit kısmındaki iletkenlik değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu)

Şekil 4.26'da görüldüğü gibi farklı akım değerlerinde yapılan tüm çalışmalarda katolit kısmında iletkenlik değerinin zamanla azaldığı gözlemlenmiştir.

Bu durum katotta gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda ortamda bulunan ve iletkenliği arttıran iyonların derişiminin azalması ile açıklanabilir.

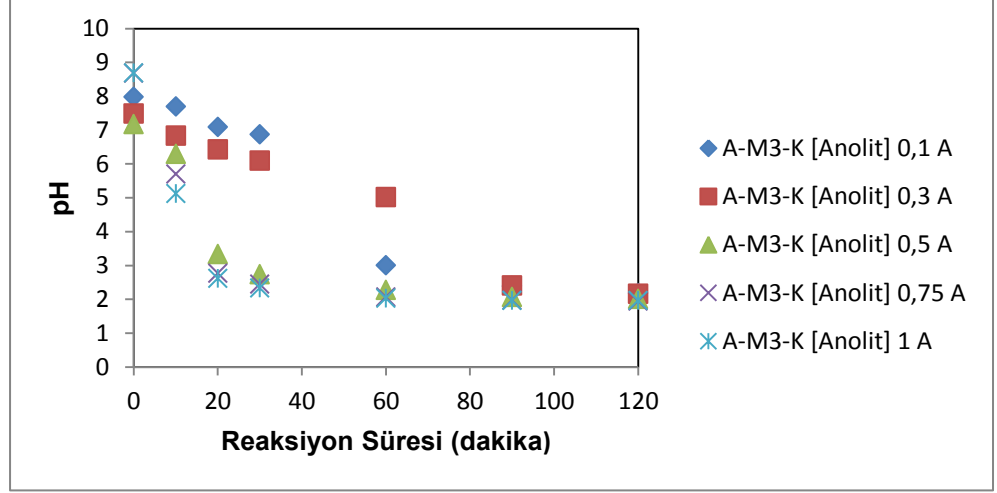
Şekil 4.27’de A-M3-K konfigürasyonunda atıksu ile yapılan çalışmalarda farklı akım değerleri uygulandığında zamanla hücre geriliminin değişimi incelenmiştir. Şekil 4.28’de aynı koşullarda anolit kısmındaki pH değişimi, 4.29’da zamanla birim hacimdeki elektrik yükü değişimi incelenmiştir.



Şekil 4.27. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda hücre gerilimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu)

Şekil 4.27’de görüldüğü gibi hücre gerilimi değerlerinde düşük akımlarda fazla değişkenlik gözlemlenmemiştir. Akım değeri arttırıldığında hücre gerilimi değerinin zamanla azaldığı belirlenmiştir.

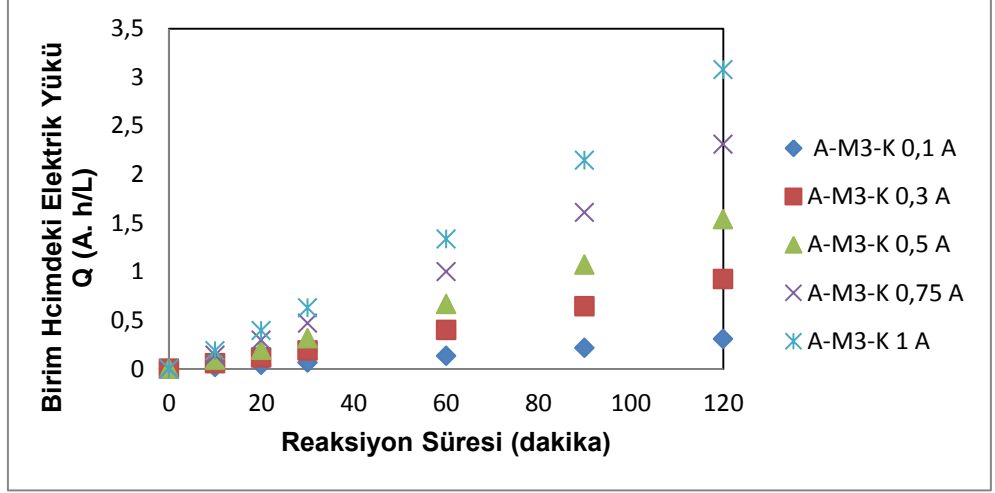
Akım değerinin artırılmasıyla aynı membran sistemleri için direncin fazla değişiklik göstermemesi nedeniyle hücre gerilimi değerinin yüksek olması akım değerinin yüksek olmasıyla ilişkilendirilebilir.



Şekil 4.28. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda anolit kısmındaki pH değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu)

Cong vd. [2008] PbO₂ elektrotlarla farklı akım yoğunluklarında coliform dezenfeksiyonunu elektrokimyasal yöntemle araştırmışlar, araştırmaları sırasında pH değeri 5 – 9 aralığında seyretmiş ve yüksek pH değerlerinde dezenfeksiyonun daha hızlı gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir.

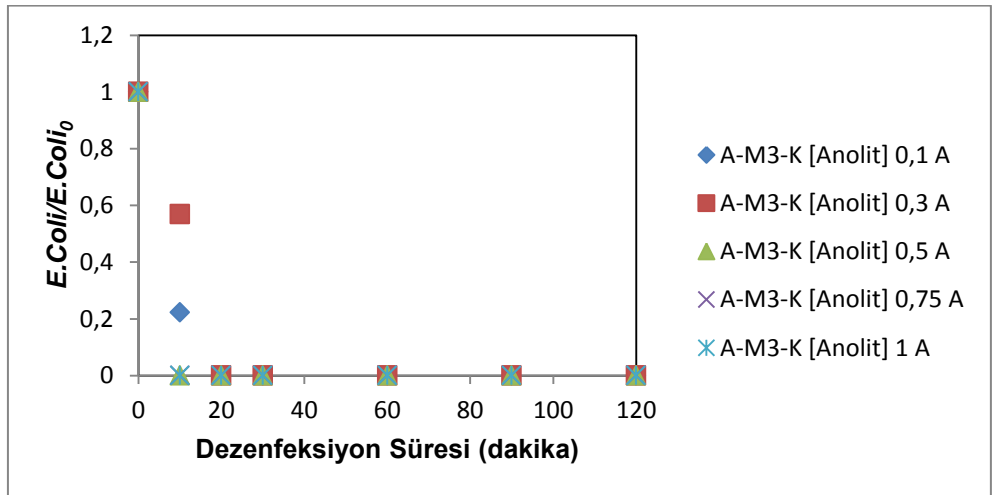
Şekil 4.28’de görüldüğü gibi anolit kısmında pH değerleri anotta gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda zamanla azalmaktadır. Klor ve klorlu bileşenlerin anot yüzeyinde reaksiyona girmesi sonucu oluşan asit türevleri pH değerinin düşmesine ve asidik bölgeye geçmesine neden olmaktadır. Hipoklorit iyonu oluşum reaksiyonu yüksek pH değerlerinde gerçekleştiği için pH değerinin asidik ortama geçmesi bir süre sonra sınırlayıcı etken olmaktadır. Normal koşullarda NaOH çözeltisi ortama eklenerek ortamın pH değeri artırılarak bu sınırlayıcı etkiden kaçınılabilir, ancak atıksu ile yapılan deneylerde ortamda başka iyonların da bulunması ve kullanılan çözeltinin o iyonlarla reaksiyon verebilecek olması ihtimali göz önünde bulundurularak ortamda pH kontrolü yapılmamıştır.



Şekil 4.29. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda birim hacimdeki elektrik yükünün değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu)

Şekil 4.29’da görüldüğü gibi uygulanan akım değeri arttıkça birim hacimdeki elektrik yükü değeri artmaktadır. Yapılan deneylerde aynı zaman aralıklarında eşit miktarda örnek alındığı için birim hacimdeki elektrik yükü hesaplamalarında değişiklik gösteren tek parametre akım değeridir.

Şekil 4.30’da A-M3-K konfigürasyonunda atıksu varlığında farklı akım değerlerinde anolit kısmındaki zamanla *Escherichia coli* bakterisinin dezenfeksiyonu, Şekil 4.31’de aynı koşullarda katolit kısmında zamanla *Escherichia coli* bakterisinin dezenfeksiyonu incelenmiştir.

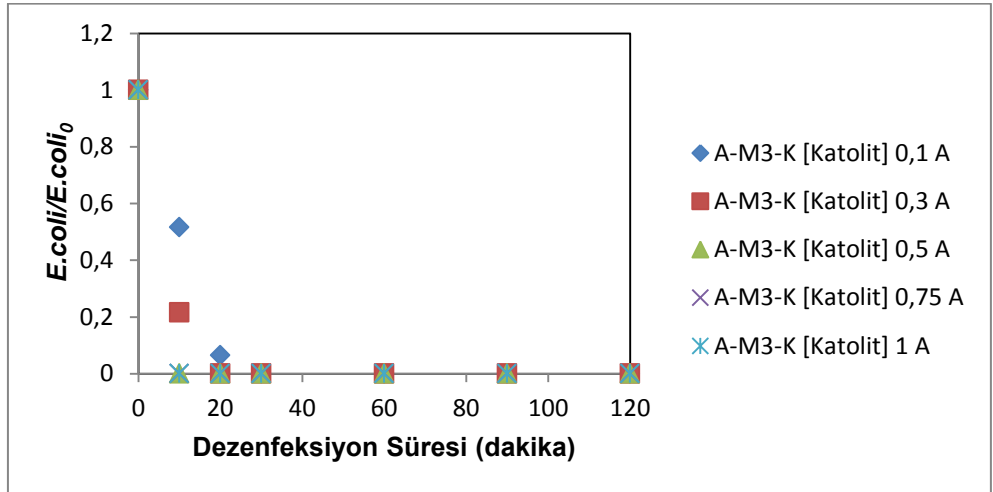


Şekil 4.30. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda anolit kısmındaki *Escherichia coli* miktarının değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu)

Kerwick vd. [2005] TiO₂ kaplı anot ve çelik katotlarla sabit 5 V potansiyel farkında 32 mA/ cm², 14 mA/ cm² ve 2,5 mA/ cm² akım yoğunluklarında *Escherichia coli* bakterisinin dezenfeksiyonunu incelemiş, 32 mA/ cm² akım yoğunluğu uygulandığında 10⁴ cfu *E. coli*'nin 120 dakikada dezenfekte edildiğini, akım yoğunluğunun artmasıyla dezenfeksiyon hızının arttığını gözlemlemişlerdir [Kerwick vd., 2005]. Ninomiya vd. [2013] TiO₂ anot ve Pt katot ile 10⁸ cfu *E. coli* dezenfeksiyonunu 60 dakikada sağlamışlardır [Ninomiya vd., 2013].

Cano vd. [2012] bor doplanmış elmas anot ve paslanmaz çelik katot ile 1,3 A/m², 3,9 A/m², 6,5 A/m², 9,1 A/m² ve 13 A/m² akım yoğunluklarıyla başlangıç *E. coli* sayısı 100000 olan sistemde *E. coli* dezenfeksiyonunu incelemişlerdir. 13 A/m² akım yoğunluğunda 100000 cfu *E. coli*'nin tamamı 30 dakikada dezenfekte edilirken, 1,3 A/m² akım yoğunluğunda 180 dakikada 90000 cfu *E. coli* dezenfekte edilmiştir [Cano vd., 2012].

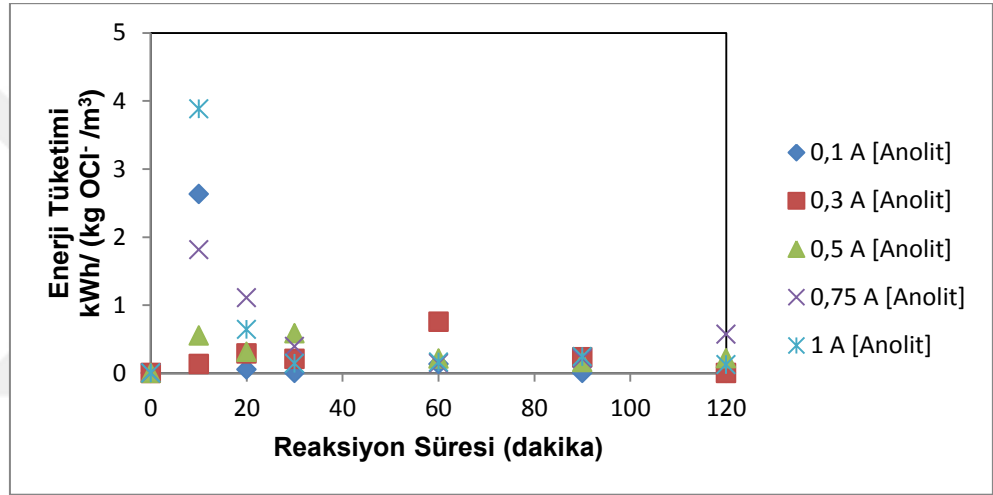
Şekil 4.30'da görüldüğü gibi yaklaşık 20 dakikada beş akım değerinde de *Escherichia coli* mikroorganizmaları dezenfekte edilmiştir. Anolit kısmında dezenfeksiyon ortamında oluşturulan dezenfektan özellikli bileşenlerle ve anot yüzeyindeki oksidasyon sonucunda dezenfeksiyon gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.31. M3 ile yapılan çalışmada atıksu varlığında farklı akımlarda katolit kısmındaki *Escherichia coli* miktarının değişimi (Konfigurasyon: A-M3-K, atıksu)

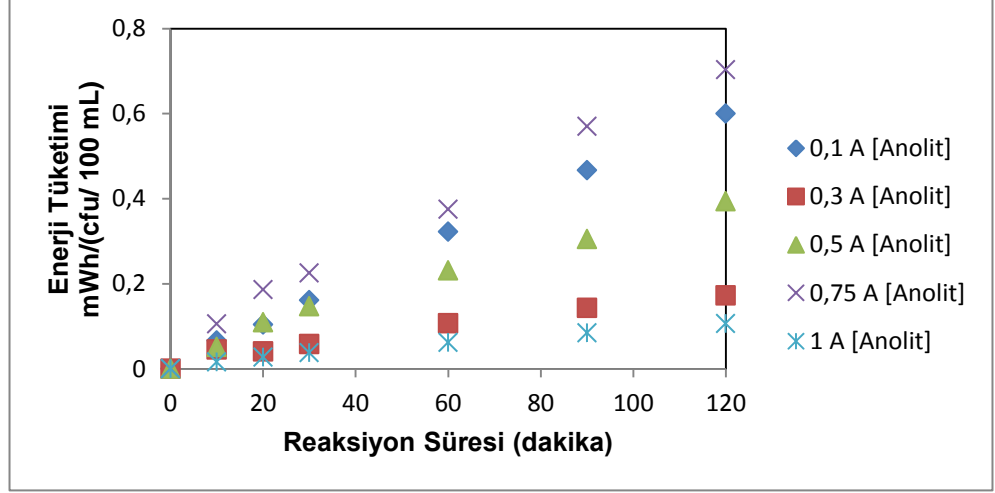
Şekil 4.31'de görüldüğü gibi 20-25 dakika aralığında, çalışılan tüm farklı akım değerlerinde *Escherichia coli* kolonilerinin tamamı dezenfekte edilmiştir. En hızlı dezenfeksiyon en yüksek akım değerinde gözlemlenmiş, akım değeri azaldıkça *Escherichia coli* mikroorganizmalarının dezenfekte edilmesi için gereken sürenin uzadığı belirlenmiştir.

Şekil 4.32'de A-M3-K konfigürasyonunda atıksu varlığında 1 m³ çözeltide 1 kg hipoklorit üretimi için gerekli enerji tüketiminin zamanla değişimi, şekil 4.33'de aynı koşullarda *Escherichia coli* bakterisinin dezenfeksiyonu için gerekli enerji tüketiminin zamanla değişimi incelenmiştir.



Şekil 4.32. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda anolit kısmında hipoklorit üretimi için zamanla enerji tüketimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu)

Şekil 4.32'de görüldüğü gibi enerji tüketimi aynı zamanda üretilen hipokloritin derişiminin *E.coli* mikroorganizmalarını yıkması sonucu azalması sonucu zaman içerisinde dalgalanma göstermiştir.



Şekil 4.33. M3 ile yapılan çalışmalarda atıksu varlığında farklı akımlarda anolit kısmında zamanla *E.coli* yıkımı için gerekli enerji tüketimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-K, atıksu)

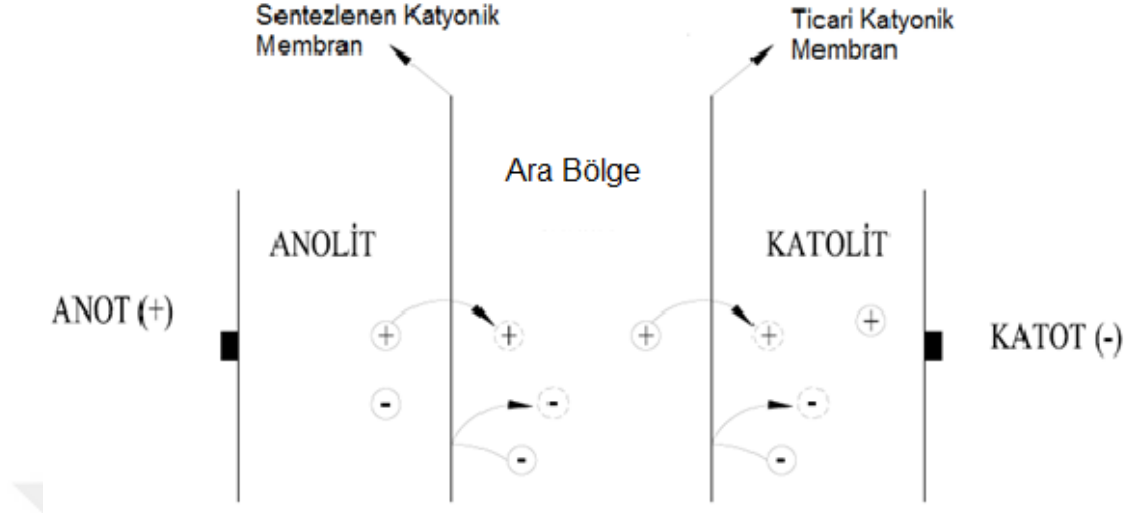
Şekil 4.33’de görüldüğü gibi *E.coli* mikroorganizmalarının yıkımı için gerekli enerji akım arttıkça zamanla artmıştır.

4.3. TiO₂ Katkılı Nafion Membran Kullanılan Sürekli Sistem Elektrodializ Hücrelerinde Atıksu Dezenfeksiyonu Çalışmaları

Şekil 4.34’de elektrodializ çalışmalarında kullanılan anot-sentezlenen katyonik membran-ticari katyonik membran-katot (A-M3-C-K) sistemi görülmektedir.

Şekil 4.34’de görüldüğü gibi ard arda yerleştirilen iki katyonik membran arasında sadece negatif yüklü iyonların kalacağı bir bölge oluşturulmuş ve bu bölge “ara bölge” olarak tanımlanmıştır. Ara bölgenin bir tarafında anolit diğer tarafında katolit bulunmaktadır.

Sentetik çözelti hazırlanarak yapılan dezenfeksiyon çalışmalarında NaCl ile hipoklorit iyonları üretilmeye çalışılmış, atıksu ile yapılan dezenfeksiyon çalışmalarında hipoklorit NaCl kullanılmadan atıksu içerisinde üretilmiştir. Ara bölgede ise membran sistemlerinin etkisiyle ortamda hipoklorit iyonlarının oluşturulup oluşturulamayacağı incelenmiştir. Ara bölgenin oluşturulması için kullanılan iki membran da partikül katkılı membran olarak seçildiğinde katolit kısmında üretilen hipoklorit miktarının da arttığı belirlenmiştir.

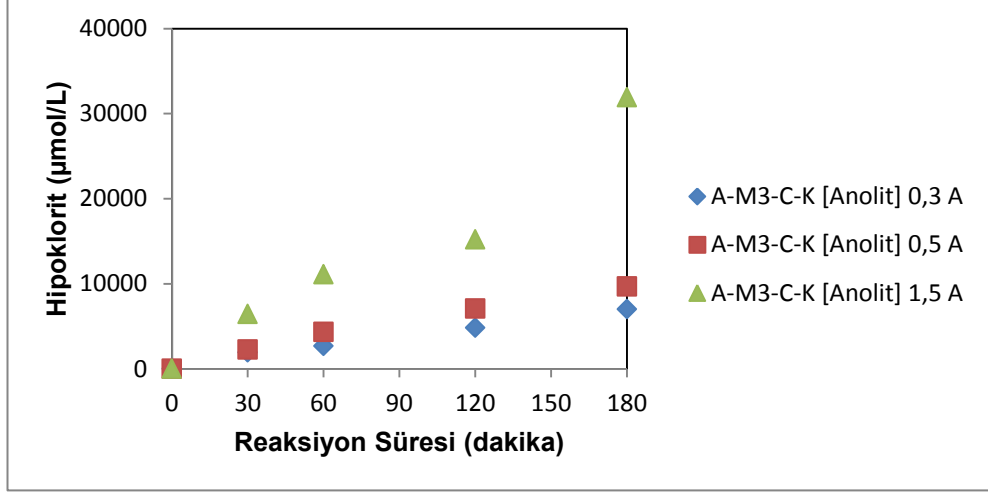


Şekil 4.34. Elektrodiyaliz çalışmalarında kullanılan A-M3-C-K konfigürasyonu

Sentezlendikten sonra hemen aktive edilen TiO₂ katkılı Nafion membran kullanılarak sürekli sistem elektrodiyaliz hücresinde anot-M3-katyonik membran-katot konfigürasyonunda anolit-ara bölge- katolit kısımları oluşturularak atıksu ve 1500 mg/L NaCl çözeltisi ile karşılaştırma deneyleri yapılmıştır. 1500 mg/L NaCl ile yapılan çalışmalarda pH istemli olarak 12'nin üzerinde, atıksu ile yapılan çalışmalarda 7,5'in üzerinde tutulmuştur. Elektrodiyaliz hücresinde akımın etkisinin incelenmesi amacıyla 1500 mg/L NaCl çözeltisi ile yapılan deneylerde üç farklı akım uygulanmış, atıksu ile yapılan deneylerde akım 0,3 A olarak sabit tutulmuştur.

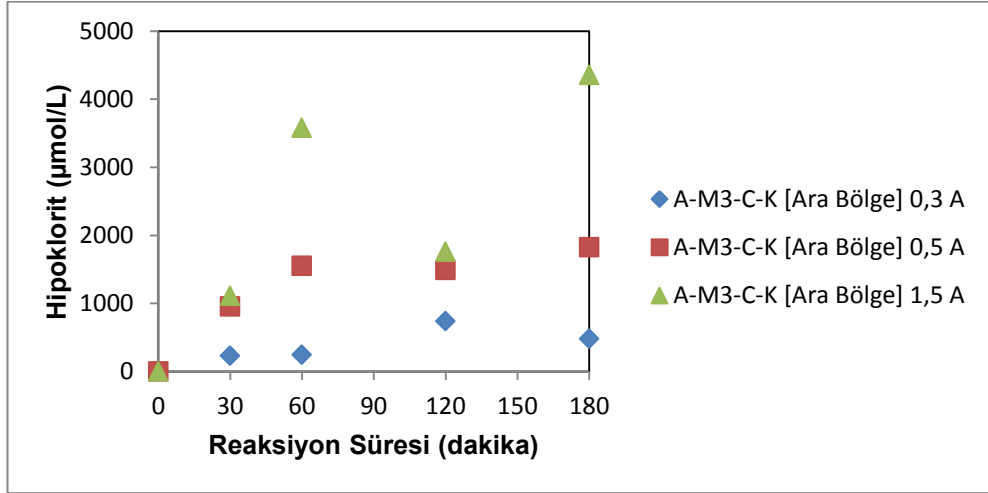
Anot-M3-katyonik membran-katot konfigürasyonunda anolit kısmında ve ara bölgede hipoklorit derişiminin değişimi, iletkenlik değişimi, hücre geriliminin değişimi, birim hacim başına düşen elektrik yükü değişimi, enerji tüketimi ve *E.coli* giderimi incelenmiştir.

Şekil 4.35'de 1500 mg/ L NaCl çözeltisi ile A-M3-C-K konfigürasyonu ile ara bölge oluşturularak yapılan elektrodiyaliz sisteminde farklı akım değerlerinde anolit kısmındaki hipoklorit derişiminin zamanla değişimi incelenmiştir. Şekil 4.36'da aynı sistemde ara bölge kısmındaki hipoklorit derişiminin zamanla değişimi incelenmiştir.



Şekil 4.35. M3 ile yapılan çalışmalarda ara bölge oluşturulduğunda, NaCl varlığında farklı akım değerlerinde anolit kısmındaki hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, C_{NaCl,0}= 1500 mg/L)

Şekil 4.35’de görüldüğü gibi uygulanan akım değeri arttıkça anolit kısmında hipoklorit derişiminin de arttığı gözlemlenmiştir. Akımın artmasıyla anolit kısmında hipoklorit derişiminin artması beklenen bir durumdur. Membran konfigürasyonu ile ara bölge oluşturulması sonucunda anolit kısmında üretilen hipoklorit derişiminin diğer konfigürasyonlara göre daha fazla olduğu belirlenmiştir.



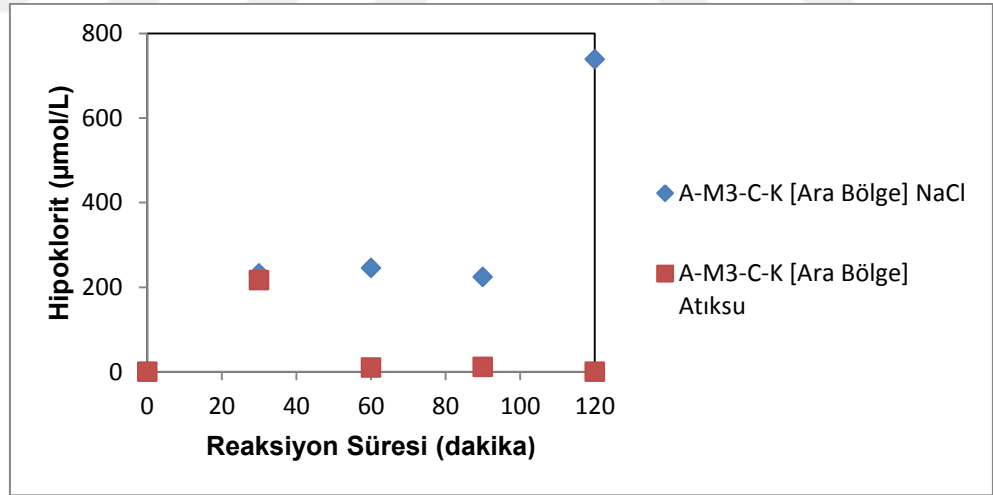
Şekil 4.36. M3 ile yapılan çalışmalarda ara bölge oluşturulduğunda, NaCl varlığında farklı akım değerlerinde ara bölge kısmındaki hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, C_{NaCl,0}= 1500 mg/L)

Şekil 4.36'da görüldüğü gibi anot-M3-katyonik membran-katot membran konfigürasyonu ile ara bölge oluşturulması sonucunda ara bölgede hipoklorit üretiminin sağlandığı gözlemlenmiştir.

Ara bölge oluşturulmasının amacı membrana içerisine yerleştirilen TiO₂ ile membrana bipolar özellik sağlayarak anot yüzeyi görevi görüp görmediğinin incelenmesi ve ara bölgede (-) yüklü iyonların tutularak pozitif iyonların geçişinin sağlanması ile sadece ara bölgede üretilen hipoklorit iyonlarının derişiminin incelenmesi istenmesidir.

Hipoklorit, ara bölgede uygulanan akım ve membranlar sayesinde üretilmiştir. Ara bölge oluşturulan konfigürasyonlarda, ara bölge oluşturulmamış konfigürasyonlara göre daha yüksek hipoklorit üretim verimi sağlanmıştır.

Şekil 4.37'de 1500 mg/L NaCl çözeltisi ve atıksu ile yapılan çalışmalarda A-M3-C-K konfigürasyonu ile ara bölge oluşturularak yapılan elektrodiyaliz sisteminde farklı akım değerlerinde ara bölge kısmındaki hipoklorit derişiminin zamanla değişimi incelenmiştir.

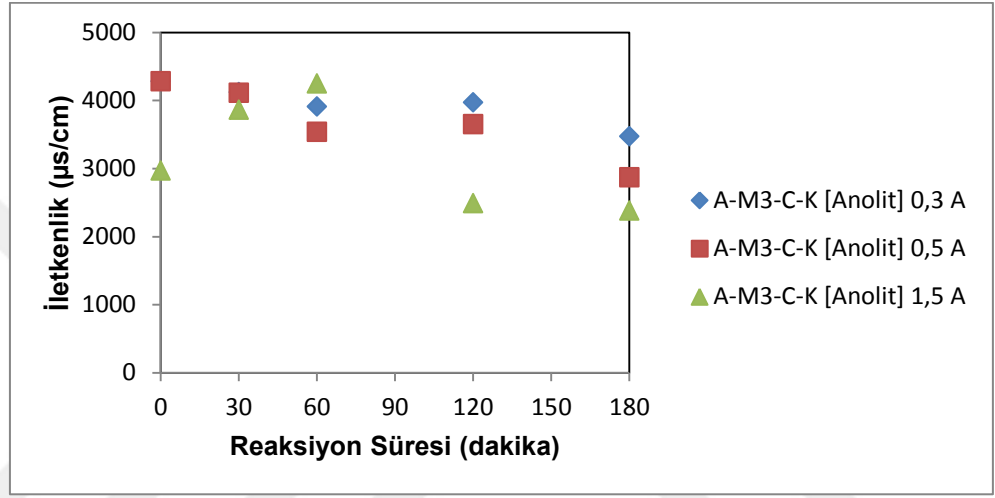


Şekil 4.37. M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve atık su varlığında ara bölgedeki hipoklorit derişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, $i=0,3A$ $C_{NaCl,0}= 1500$ mg/L, Atıksu)

Şekil 4.37'de görüldüğü gibi ara bölgede hipoklorit derişimi NaCl çözeltisi varlığında daha kolay elde edilmiş ve atıksu ile yapılan çalışmalara göre hipoklorit derişiminin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Klor ve klorlu bileşiklerin membran yüzeyindeki TiO₂ partikülleri ile etkileşmesi sonucunda hipoklorit iyonu oluşturması

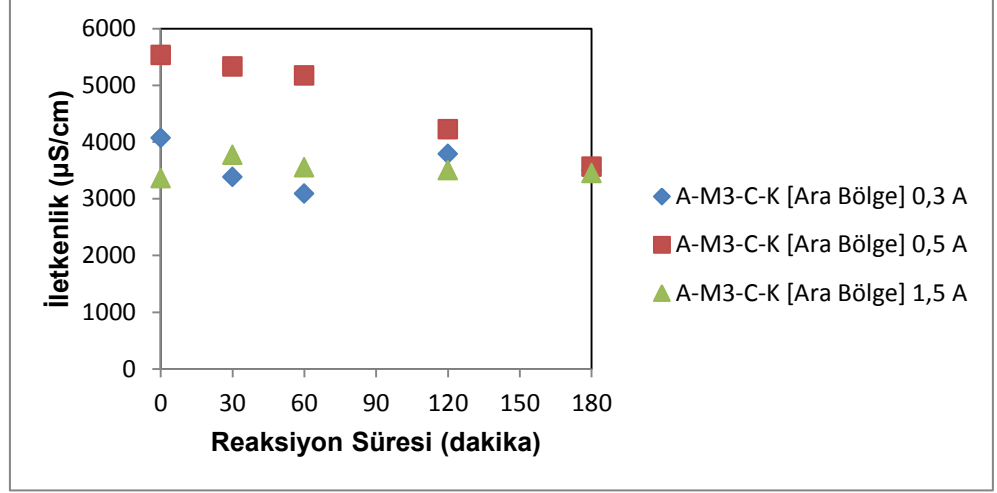
beklenmektedir. NaCl çözeltisi ile ortama klor iyonları sağlanırken atıksu içerisinde klor iyonları derişimi daha düşüktür.

Şekil 4.38’de A-M3-C-K konfigürasyonunda 1500 mg/L NaCl çözeltisi varığında farklı akım değerlerinde anolit kısmındaki iletkenlik değişimi incelenmiştir. Şekil 4.39’da aynı koşullarda ara bölge kısmındaki iletkenlik değişimi incelenmiştir. Şekil 4.40’da aynı konfigürasyonda 0,3 A akım uygulandığında NaCl çözeltisi ve atıksu varlığında ara bölge kısmındaki iletkenlik değişimi incelenmiştir.



Şekil 4.38. M3 ile yapılan çalışmalarda ara bölge oluşturulduğunda, NaCl varlığında farklı akım değerlerinde anolit kısmındaki iletkenlik değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, C_{NaCl,0}= 1500 mg/L)

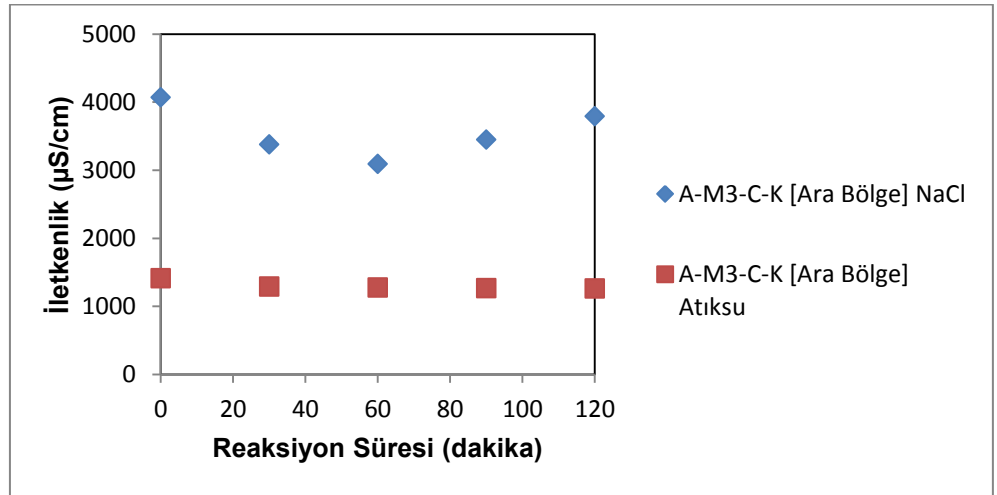
Şekil 4.38’de görüldüğü gibi anot-M3-katyonik membran-katot membran konfigürasyonu ile ara bölge oluşturulduğunda anolit kısmında iletkenlik beklendiği gibi zamanla azalma göstermiştir. Yüksek akım değerlerinde anot yüzeyinde gerçekleşen reaksiyonların verimi arttığı için en hızlı azalma uygulanan en yüksek akım değeri olan 1,5 A’de gözlemlenmiştir.



Şekil 4.39. M3 ile yapılan çalışmalarda ara bölge oluşturulduğunda, NaCl varlığında farklı akım değerlerinde ara bölge kısmındaki iletkenlik değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, $C_{NaCl,0} = 1500$ mg/L)

Şekil 4.39'da görüldüğü gibi M3 membranı ile ara bölge oluşturulduğunda ara bölgenin anolit kısmına benzer özellikler göstermesi ve bu bölgede iletkenliğin zamanla azalması beklenmektedir. Ancak ara bölgede sadece pozitif yüklü iyonların geçişleri sağlandığı için Şekil 4.39'deki gibi değişimler gözlemlenebilmektedir.

Şekil 4.39'da görüldüğü gibi son durumda en düşük iletkenlik değeri çalışılan en yüksek akım değeri olan 1,5 A'de belirlenmiştir.

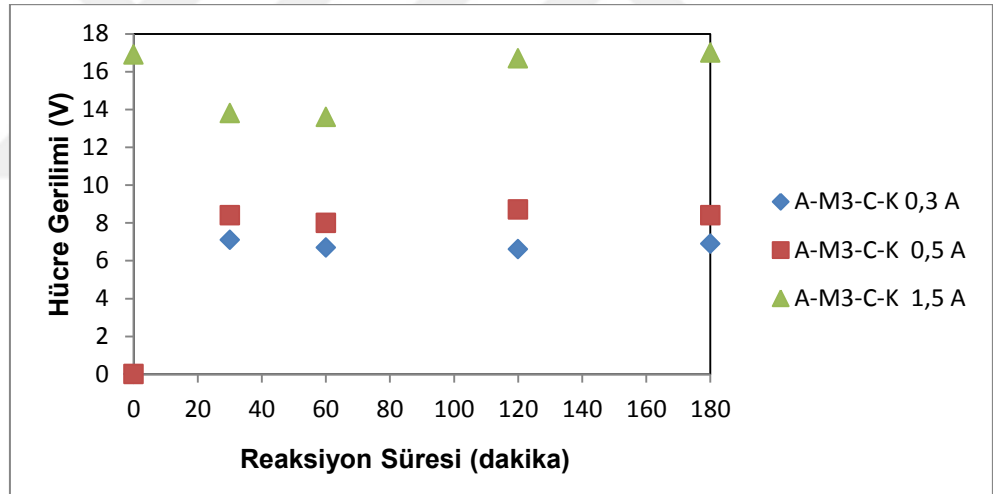


Şekil 4.40. M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve atık su varlığında ara bölgedeki iletkenlik değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, $i=0,3A$, $C_{NaCl,0} = 1500$ mg/L, Atıksu)

Şekil 4.40'da görüldüğü gibi ara bölgede atıksu kullanıldığında atıksu içerisinde bulunan klor iyonları derişiminin NaCl çözeltisinin sağladığından daha az olduğı ve atıksu içerisinde iletkenliğı etkileyecek farklı bileşenlerin bulunması nedeniyle iletkenliğin NaCl çözeltisine göre daha düşük olduğı gözlemlenmiştir.

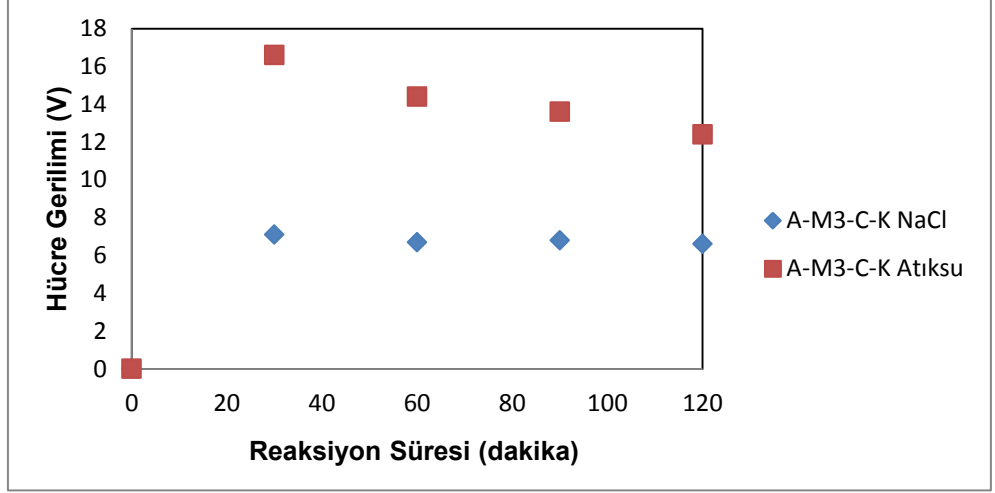
NaCl çözeltisi ile yapılan çalışmada iletkenliğin artmasının nedeni ara bölge oluşumunda membranlar arasında pozitif yüklü iyonların hareket etmesi ve negatif yüklü iyonların ara bölgede tutulması olarak düşünülebilir.

Şekil 4.41 de A-M3-C-K konfigürasyonunda 1500 mg / L NaCl çözeltisi varlığında farklı akım değerlerinde zamanla hücre gerilimi değışimi incelenmiştir. Şekil 4.42'de aynı konfigürasyonda 0,3 A akım uygulandığında 1500 mg / L NaCl çözeltisi ve atıksu varlığında zamanla hücre gerilimi değışimi incelenmiştir.



Şekil 4.41. M3 ile yapılan çalışmalarda ara bölge oluşturulduğunda, NaCl varlığında farklı akım değerlerinde hücre gerilimi değışimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, C_{NaCl,0}= 1500 mg/L)

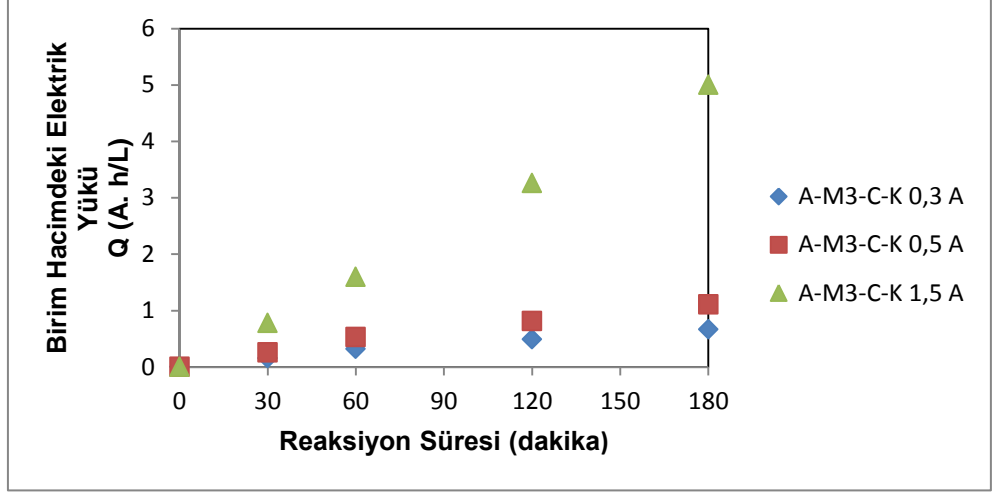
Membran sistemlerinin gösterdiği dirençler eşit olarak düşünülduğünde hücre gerilimi değerinin artması beklenir. Şekil 4.41'de görüldüğü gibi akım değerinin artmasıyla hücre geriliminin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.42. M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve atık su varlığında hücre gerilimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, $i=0,3A$ $C_{NaCl,0}= 1500$ mg/L, Atıksu)

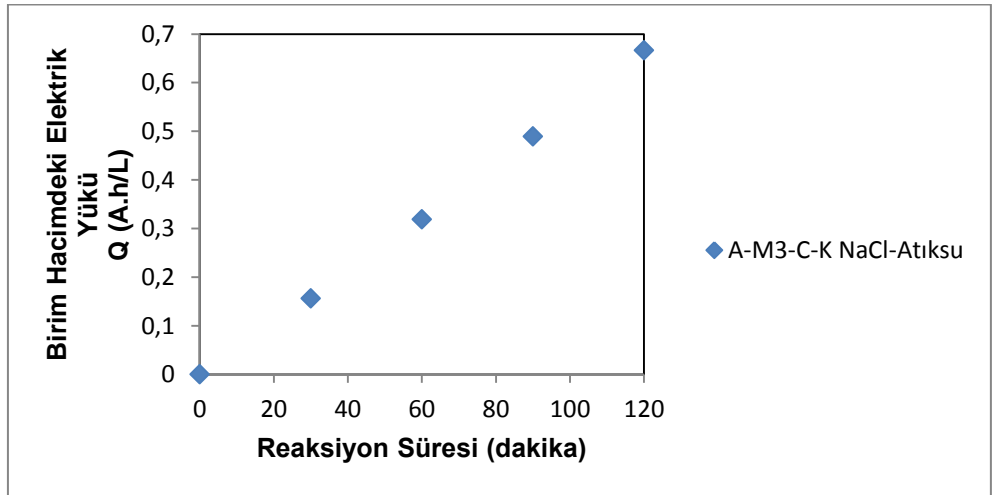
Şekil 4.42’de görüldüğü gibi atıksu ile yapılan çalışmalarda hücre gerilimi değerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni sabit akım değerinde çalışılması ve atıksu içerisinde direnç etkisi gösterecek bileşenlerin varlığı olarak düşünülmektedir.

Şekil 4.43’de A-M3-C-K konfigürasyonunda 1500 mg/ L NaCl varlığında farklı akım değerlerinde zamanla birim hacimdeki elektrik yükü incelenmiştir. Şekil 4.44’de aynı konfigürasyonda 0,3 A akım değerinde yapılan çalışmalarda 1500 mg/ L NaCl ve atıksu varlığında yapılan çalışmalarda zamanla birim hacimdeki elektrik yükü incelenmiştir.



Şekil 4.43. M3 ile yapılan çalışmalarda ara bölge oluşturulduğunda, NaCl varlığında farklı akım değerlerinde birim hacimdeki elektriksel yük değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, $C_{NaCl,0} = 1500$ mg/L)

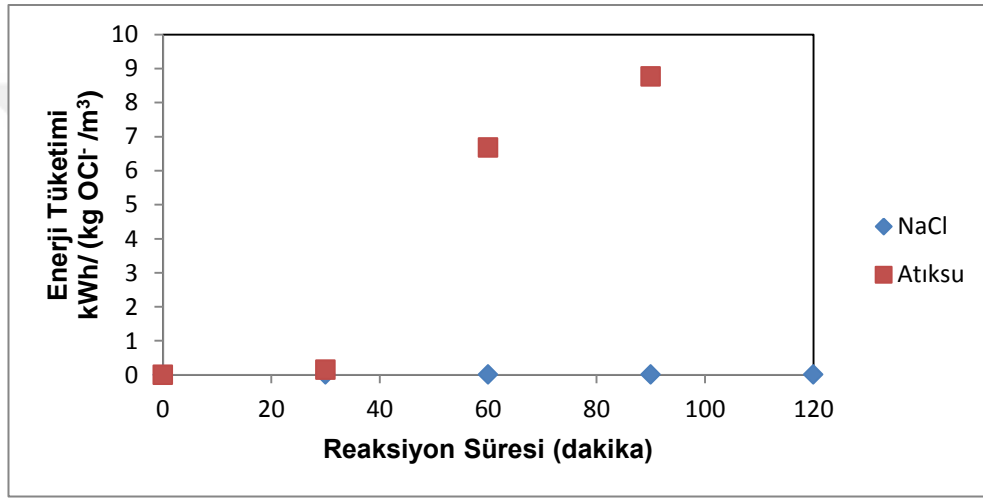
Şekil 4.43’de görüldüğü gibi birim hacimdeki elektrik yükü uygulanan akım değerinin artmasıyla artmıştır. Aynı zaman aralıklarında eşit hacimde örnekler alındığı için aynı deney koşullarında birim hacimdeki elektrik yükünün zamanla arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.44. M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve atıksu varlığında birim hacimdeki elektriksel yük değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, $i = 0,3A$ $C_{NaCl,0} = 1500$ mg/L, Atıksu)

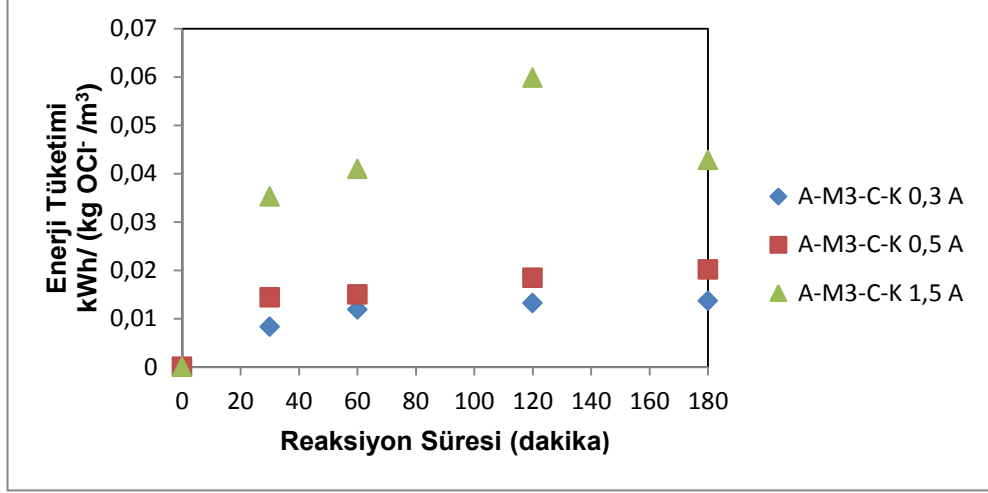
Şekil 4.44'de görüldüğü gibi atıksu ve NaCl çözeltisi ile yapılan çalışmalarda birim hacimdeki elektrik yükü değerinin aynı zaman aralıklarında eşit hacimde örnek alınması ve aynı akım değerinin uygulanması sonucunda eşit olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.45'de A-M3-C-K konfigürasyonunda 0,3 A akım uygulanarak 1500 mg / L NaCl ve atıksu varlığında 1 m³ çözeltide 1 kg hipoklorit iyonu üretilmesi için gerekli enerji tüketimi incelenmiştir. Şekil 4.46'da aynı konfigürasyonda 1500 mg / L NaCl çözeltisi varlığında 1 m³ çözeltide 1 kg hipoklorit iyonu üretilmesi için gerekli enerji tüketimi incelenmiştir.



Şekil 4.45. M3 ile yapılan çalışmalarda NaCl ve atık su varlığında hipoklorit üretimi için enerji tüketimi değişimi (Konfigürasyon: A-M3-C-K, $i=0,3A$ $C_{NaCl,0}= 1500$ mg/L, Atıksu)

Şekil 4.45'de görüldüğü gibi atıksu ile yapılan çalışmalarda keskin bir artış görülürken, NaCl ile yapılan çalışmalarda değişim çok küçüktür. Bu durumun nedeni Şekil 4.37'de de görüldüğü gibi atıksu içerisinde hipoklorit oluşturmak için NaCl çözeltisine göre daha az miktarda klor iyonunun bulunmasıdır.



Şekil 4.46. M3 ile yapılan çalışmalarda ara bölge oluşturulduğunda, NaCl varlığında farklı akım değerlerinde hipoklorit üretimi için enerji tüketimi değişimi (Konfigurasyon: A-M3-C-K, C_{NaCl,0}= 1500 mg/L)

Şekil 4.46'da görüldüğü gibi ara bölge oluşturulduğunda akım değeri arttıkça hipoklorit üretimi için gerekli enerji tüketimi zamanla artmıştır. Aynı akım değerinde de zamanla enerji tüketimi değerinin arttığı görülmüştür.

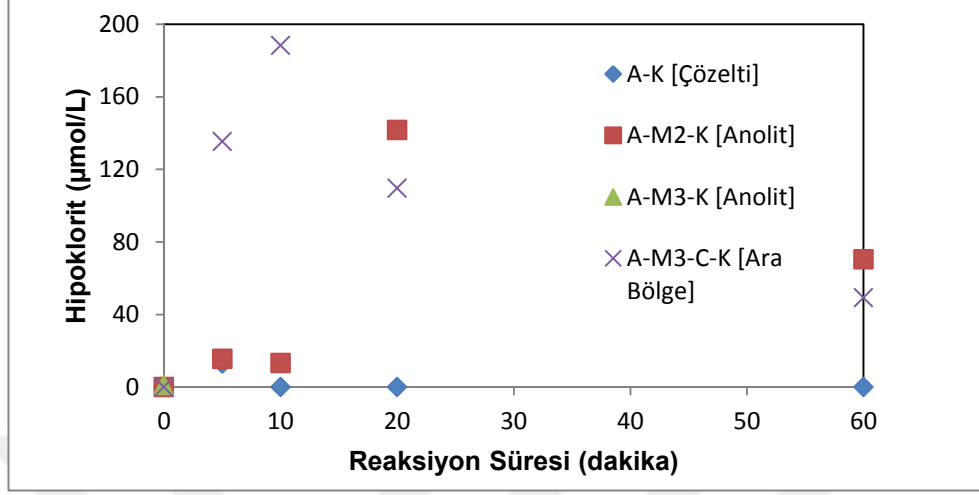
4.4. Atıksu Dezenfeksiyonunda Sürekli Sistem Elektroliz ve Elektrodiyaliz Hücrelerinin Farklı Konfigurasyonlar İçin Karşılaştırılması

Atıksu dezenfeksiyonu için anot-M2-katod, anot-M3-katod, anot-M3-katyonik membran-katod ve anot-katod konfigürasyonlarında 0,3 A akım uygulanarak elektrokimyasal hücrelerin performansları karşılaştırılmıştır. Reaksiyon ortamından alınan örnekler anot-M2-katod ve anot-M3-katod konfigürasyonlarında anolit kısımdan, anot-M3-C-katod konfigürasyonunda ara bölgeden, anot-katod konfigürasyonunda çözelti ortamından sağlanmıştır.

Çalışmada gerçek atıksu kullanılarak hipoklorit değişimi, iletkenlik değişimi, hücre gerilimi değişimi, pH değişimi, birim hacim başına düşen elektrik yükü değişimi ve *E.coli* giderimi incelenmiştir.

Şekil 4.47'de atıksu varlığında farklı konfigürasyonlarda anolit, ara bölge kısımları ve çözeltide hipoklorit derişiminin zamanla değişimi incelenmiştir. Şekil 4.48'de aynı koşullarda aynı kısımlardaki zamanla iletkenlik değişimi, 4.49'da aynı şartlarda

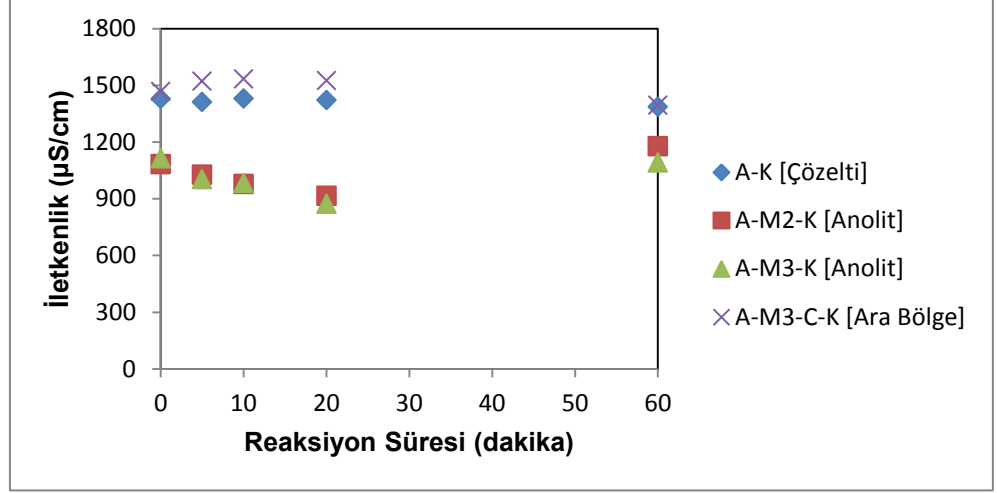
zamanla hücre gerilimi değişimi 4.50'de zamanla pH değişimi ve 4.51'de zamanla birim hacimdeki elektrik yükü değişimi incelenmiştir.



Şekil 4.47. Farklı konfigürasyonlarında yapılan çalışmalarda atıksu varlığında zamanla hipoklorit derişimi değişimi (Konfigürasyon: A-K, A-M2-K, A-M3-K, A-M3-C-K $i=0,3$ A, Atıksu)

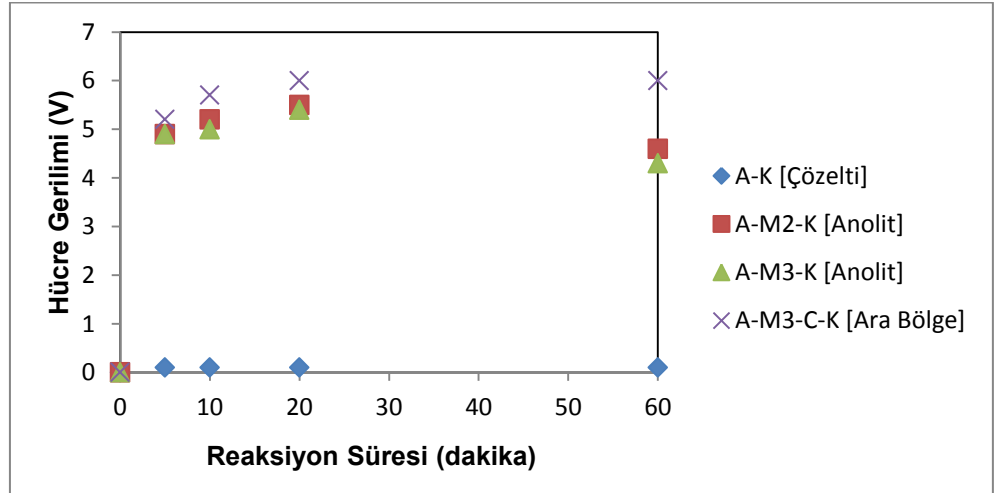
Şekil 4.47'de görüldüğü gibi ara bölgede en hızlı ve en fazla hipoklorit üretiminin sağlandığı ara bölge oluşturulduğu durumda, M3 membranı ile anolit ve katolit oluşturulan konfigürasyondan daha fazla hipoklorit üretiminin sağlandığı ve dezenfeksiyon sistemleri için daha verimli olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.47'de M3 membranı ile ara bölge oluşturulduğunda anot-katod konfigürasyonunda elde edilen hipoklorit miktarından daha fazla hipoklorit elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu durum ara bölge oluşturularak yapılan dezenfeksiyon sistemlerinin anot-katod kullanılarak yapılan basit dezenfeksiyon sistemlerinden daha verimli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.48. Farklı konfigürasyonlarında yapılan çalışmalarda atıksu varlığında zamanla iletkenlik değişimi (Konfigürasyon: A-K, A-M2-K, A-M3-K, A-M3-C-K $i=0,3$ A, Atıksu)

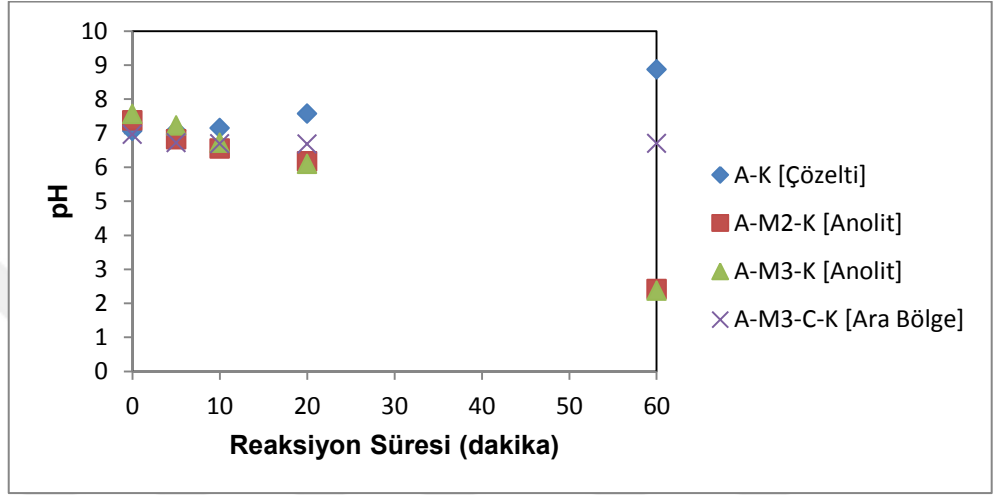
Şekil 4.48'de görüldüğü gibi iletkenlik değerlerinde belirgin değişiklikler gözlenmemiştir. Bununla birlikte iletkenlik değişiminin en fazla olduğu kısmın membran kullanılmayan anot-katot konfigürasyonunda olduğu en az iletkenlik değişiminin ise M3 membranı ile ara bölge oluşturulduğunda meydana geldiği belirlenmiştir.



Şekil 4.49. Farklı konfigürasyonlarında yapılan çalışmalarda atıksu varlığında zamanla hücre gerilimi değişimi (Konfigürasyon: A-K, A-M2-K, A-M3-K, A-M3-C-K $i=0,3$ A, Atıksu)

Şekil 4.49'da görüldüğü gibi sabit akım uygulandığında membran sistemlerine bağlı olarak direnç değerinin en yüksek olduğunun düşünüldüğü M3 membranı ile ara bölgenin oluşturulduğu anot-M3-katyonik membran-katot konfigürasyonunda hücre gerilimi değerinin en yüksek olduğu belirlenmiştir.

Arada direnç olarak sadece çözeltilerin ya da atıksuyun bulunduğu anot-katot konfigürasyonunda hücre gerilimi değerlerinin en düşük olduğu belirlenmiştir.

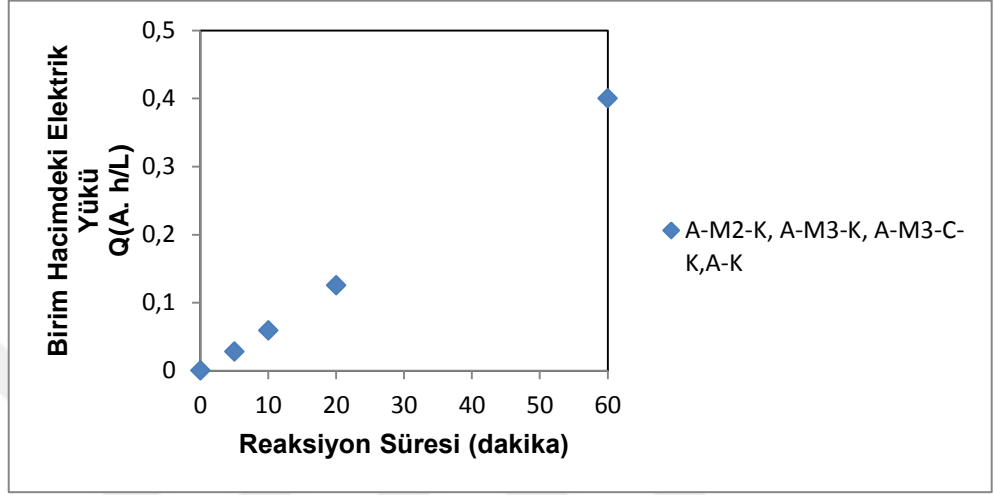


Şekil 4.50. Farklı konfigürasyonlarında yapılan çalışmalarda atıksu varlığında zamanla pH değişimi (Konfigürasyon: A-K, A-M2-K, A-M3-K, A-M3-C-K $i=0,3$ A, Atıksu)

Şekil 4.50'de görüldüğü gibi pH değişiminin en fazla membran kullanılmayan sistemde olmasının nedeni anot ve katottaki reaksiyonların aynı ortamda gerçekleşiyor olmasıdır. Anotta pH değerini düşürücü yönde reaksiyonlar gerçekleşirken katotta pH değerini arttırıcı yönde reaksiyonlar gerçekleşir. Bir süre sonra katotta gerçekleşen reaksiyonlar anotta gerçekleşen tepkimelere baskın gelerek ve pH değeri zamanla daha belirgin bir artış gösterir.

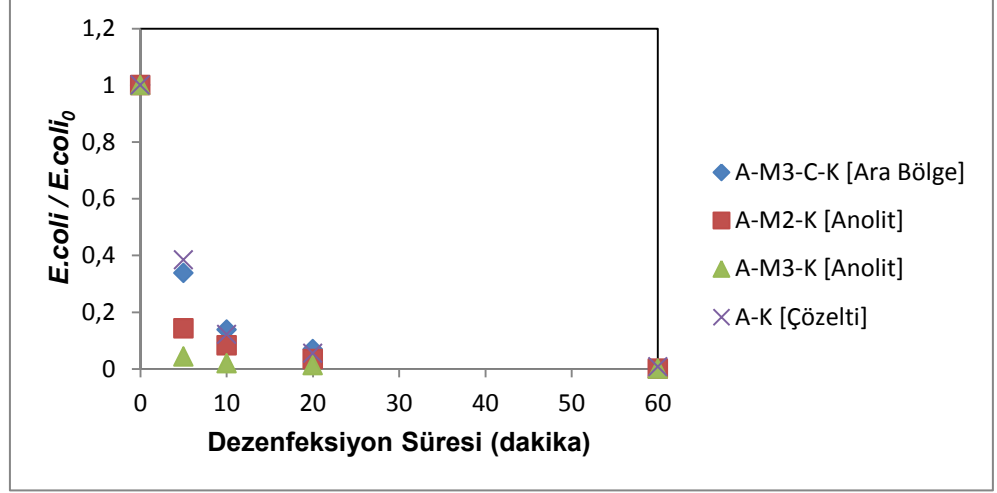
Şekil 4.50'de görüldüğü gibi M2 ve M3 membranları ile anolit ve katolit kısımlarının varlığında anolit kısmının pH değeri zamanla azalmaktadır. pH'de görülen azalma anotta gerçekleşen reaksiyonlarla ilişkilidir.

M3 membranı ile ara bölge oluşturularak yapılan deneylerde ara bölgenin pH değerinde belirgin bir değişim gözlenmemiştir. M3 membranının yüzeyindeki TiO₂ partiküllerinin anot yüzeyi gibi davranması sonucu pH değerini azaltıcı yönde reaksiyonların gerçekleştiği ve ara bölgeye giren diğer bileşenlerle pH değerindeki azalmanın dengelendiği düşünülmektedir.



Şekil 4.51. Farklı konfigürasyonlarında yapılan çalışmalarda atıksu varlığında zamanla birim hacimdeki yük miktarı değişimi (Konfigürasyon: A-K, A-M2-K, A-M3-K, A-M3-C-K $i=0,3$ A, Atıksu)

Şekil 4.51’de görüldüğü gibi aynı akım değer uygulanmış ve aynı zaman aralıklarında eşit miktarlarda örnekler alınmış olduğu için Q (birim hacimdeki elektrik yükü) değerleri tüm konfigürasyonlarda birbirine eşit olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.52. Farklı konfigürasyonlarında yapılan çalışmalarda atıksu varlığında zamanla *E.coli* miktarındaki değişim (Konfigürasyon: A-K, A-M2-K, A-M3-K, A-M3-C-K $i=0,3$ A, Atıksu)

Şekil 4.52’de görüldüğü gibi tüm konfigürasyonlarda yaklaşık 20 dakikada ortamda bulunan *E.coli* mikroorganizma kolonilerinin tamamı dezenfekte edilmiştir.

Mikroorganizmalar dezenfekte edilirken en avantajlı olan yapı M3 membran ile anolit ve katolit oluşturularak kurulan sistemde anolit kısmı olarak gözlemlenmiştir. Daha sonra en verimli yapı ise 5-10 dakikaları arasında en belirgin düşüşün gözlemlendiği M3 membran ile ara bölgenin oluşturulduğu yapı olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.52’de görüldüğü gibi membran sistemleriyle yapılan tüm çalışmaların basit dezenfeksiyon sistemi olarak bilinen anot- katot sistemiyle yapılan çalışmadan verimli olduğu belirlenmiştir.

4.5. Dezenfeksiyon Kinetiğinin Belirlenmesi

Dezenfeksiyon işleminde yıkılan bakteri sayısı dezenfektan derişimi ile doğru orantılıdır. Bu durum Chick yasası ile açıklanır;

$$dN/dt = -k N \quad (4.3)$$

N: herhangi bir zamanda yaşayan bakteri sayısı (cfu/100 mL)

t: zaman

k: dezenfeksiyon hız sabiti (zaman⁻¹)

Sınır koşulları olarak t=0 anında N= N₀ ve t=t anında N=N_t alınır ve eşitliğin integrali alınırsa

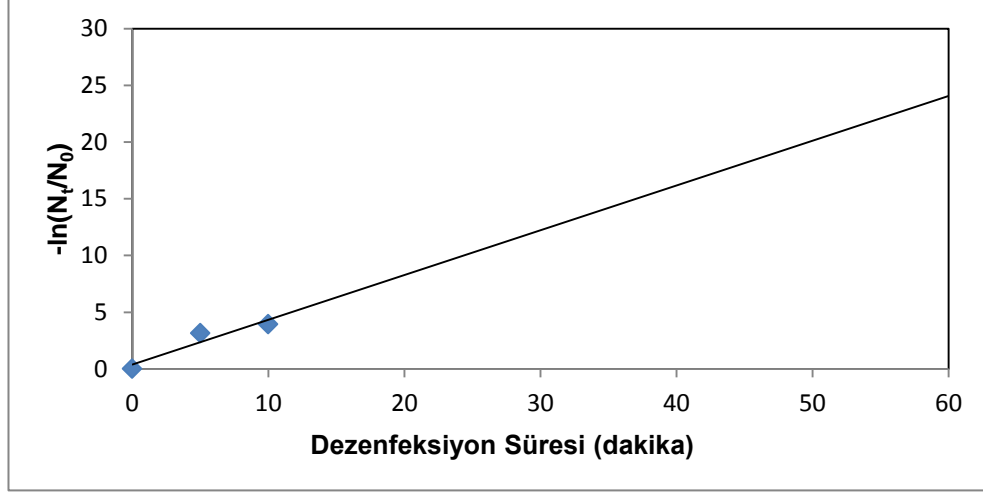
$$\ln(N_t/N_0) = -kt \quad (4.4)$$

eşitliği elde edilir.

t'ye karşı -ln(N_t/N₀) grafiği çizildiğinde eğimi "k" dezenfeksiyon hız sabitine eşit olan bir doğru elde edilir.

4.5.1. Elektroliz Hücrelerinde Dezenfeksiyon Kinetiğinin Belirlenmesi

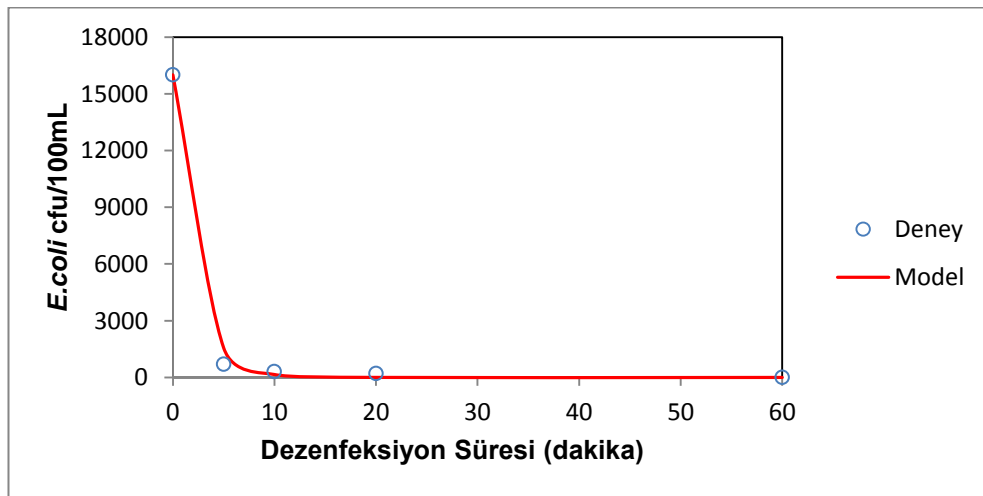
Elektroliz hücrelerinde dezenfeksiyonun Chick yasasına uygunluğunu araştırmak amacı ile t'ye karşı -ln(N_t/N₀) grafiği çizilmiş eğimi değeri "k" olan doğru elde edilmiştir.



Şekil 4.53. *E.coli* gideriminin k sabitinin belirlenmesi

Şekil 4.53’deki grafiğin eğiminden elde edilen 25°C deki k dezenfeksiyon hız sabiti 0,465 dk⁻¹ olarak hesaplanmıştır. k sabiti ve sınır değerleri girilip (*E.coli*_{t=0} 16000 cfu/100mL ve *E.coli*_{t=t} 0 cfu/100mL) “Berkeley Madonna 8.3” yazılımı kullanılarak çözülmesi sonucunda dezenfeksiyon kinetiği modelinin gerçekleştirilen deney verilerine R²= 0,9985 regresyon katsayısı ile iyi bir uyum gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4.54).

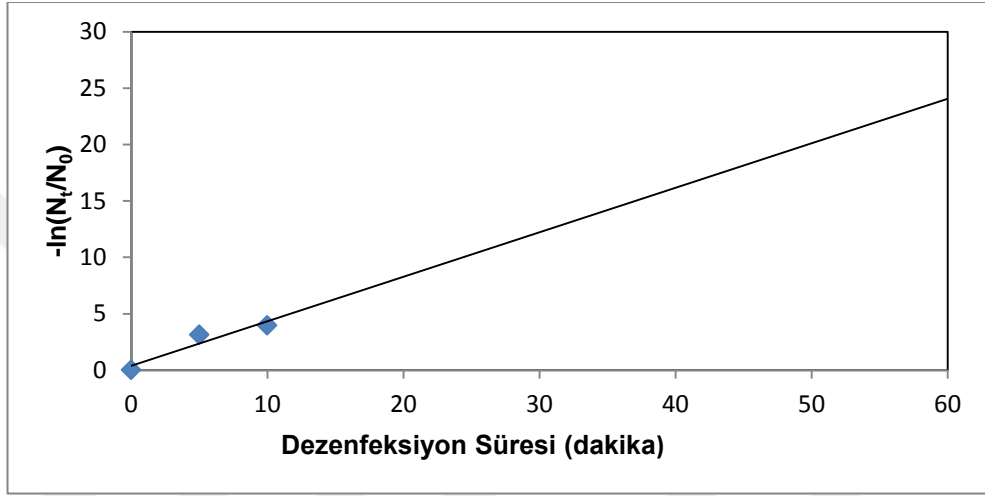
Şekil 4.54’de deneysel veriler ve modelden elde edilen veriler grafik üzerinde gösterilerek uyumu incelenmiştir. Sonuç olarak model verileri ve deneysel veriler birbirleriyle uyum göstermiştir.



Şekil 4.54. *E.coli* giderimi için elde edilen dezenfeksiyon kinetiği modelinin deney verileri ile karşılaştırılması

4.5.2. Elektrodiyaliz Hücresinde Dezenfeksiyon Kinetiğinin Belirlenmesi

Elektrodiyaliz hücresinde dezenfeksiyon hız sabiti belirlenirken de elektroliz hücresindeki gibi Chick yasasından faydalanılmış t'ye karşı $-\ln(N_t/N_0)$ grafiği çizilip eğimden “k” değeri bulunduktan sonra model verileri ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.55. *E.coli* gideriminin k sabitinin belirlenmesi

Şekil 4.55’deki grafiğin eğiminden elde edilen 25°C deki k dezenfeksiyon hız sabiti 0,465 dk⁻¹ olarak hesaplanmıştır. k sabiti ve sınır değerleri girilip (*E.coli*_{t=0} 16000 cfu/100mL ve *E.coli*_{t=t} 0 cfu/100mL) “Berkeley Madonna 8.3” yazılımı kullanılarak çözülmesi sonucunda dezenfeksiyon kinetiği modelinin gerçekleştirilen deney verilerine R²= 0,9958 regresyon katsayısı ile iyi bir uyum gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4.56). Elektroliz ve elektrodiyaliz yöntemlerinde “k” değerleri eşit bulunmuştur.



Şekil 4.56. *E.coli* giderimi için elde edilen dezenfeksiyon kinetiği modelinin deney verileri ile karşılaştırılması

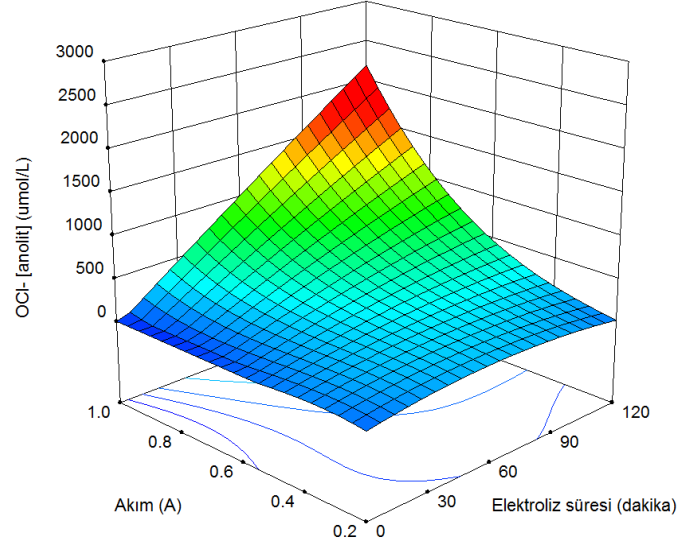
4.6. İşletim Parametrelerinin Cevap Yüzey Yöntemi İle Optimizasyonu

Cevap yüzey yönteminin uygulandığı, Design-Expert® 9.0 istatistiksel tasarım programı kullanılarak elektroliz ve elektrodiyaliz sistemlerinde akım, pH, hipoklorit derişimi, iletkenlik, elektroliz/elektrodiyaliz süresi, hücre gerilimi, enerji tüketimi, atıksu varlığında *E.coli* miktarı işletim parametrelerinin etkileri belirlenmiştir ve farklı konfigürasyonların kıyaslanması yapılmıştır. Optimizasyon çalışmalarında elde edilen modellerin yaklaşım fonksiyonları şekillerle birlikte verilmiştir.

4.6.1. Elektroliz Hücresinde Cevap Yüzey Yöntemi ile Optimizasyon

İşletim parametreleri cevap yüzey yöntemi ile 3 alt başlık altında incelenmiştir. Elektroliz hücresinde, elektrodiyaliz hücresinde ve farklı konfigürasyonlarda işletim parametreleri cevap yüzey yöntemi ile incelenmiş en uygun koşullar belirlenmiştir.

Elektroliz hücresinde cevap yüzey yöntemi ile elektroliz süresi, hipoklorit derişimi, *E.coli* miktarı, pH, hücre gerilimi, iletkenlik, enerji tüketimi



Şekil 4.57. Elektroliz hücrelerinde atıksu ile yapılan çalışmada hipoklorit derişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-K)

Şekil 4.57’de görüldüğü gibi akım değeri arttıkça anolit kısmında üretilen hipoklorit miktarı artacaktır. Elektroliz süresi ve akım yoğunluğunun maksimum olduğu noktalarda hipoklorit miktarı maksimum değerine ulaşmıştır.

Elektroliz hücrelerinde atıksu ile yapılan çalışmada hipoklorit üretimi sırasında hipoklorit derişimi için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.5’de verilmiştir. Modelin kesinlik oranı=18,297’dir.

$$y = - 251.47356 + 6.56418 t + 1989.08589 i - 16.46089 t i - 0.044489 t^2 - 4060.77008 i^2 + 0.035948 t^2 i + 29.73691 t i^2 + 8.30948 * 10^{-6} t^3 + 2256.32976 i^3 \quad (4.5)$$

Şekil 4.58’de görüldüğü gibi elektroliz hücrelerinde akım değerinin artmasıyla anolit kısmındaki iletkenlik genellikle artmıştır. Akım değerinin maksimum, elektroliz süresinin 90 dakika olduğu durumda anolit kısmındaki iletkenlik maksimum değerini alır.

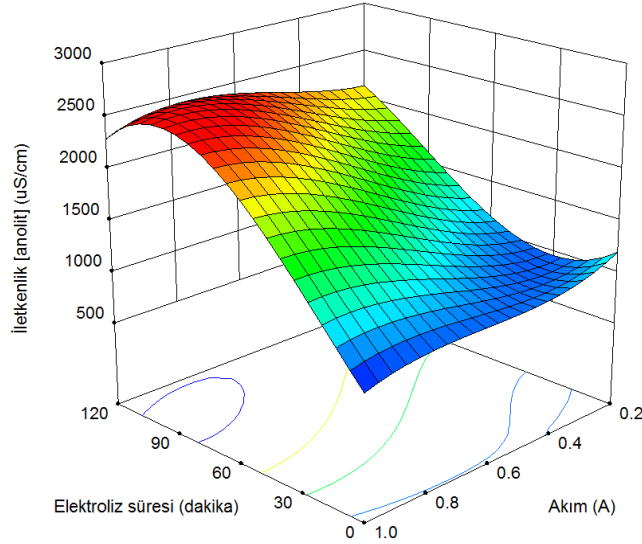
Elektroliz hücrelerinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmındaki iletkenlik için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.6’da verilmiştir. Modelin kesinlik oranı=22,437’dir.

$$y = +1696.83724 - 31.19941 t - 3460.20222 i + 66.94838 t i + 0.47525 t^2 + 5533.34893 i^2 - 0.39976 t^2 i - 11.50003 t i^2 - 1.48180 \cdot 10^{-3} t^3 - 2913.51759 i^3 \quad (4.6)$$

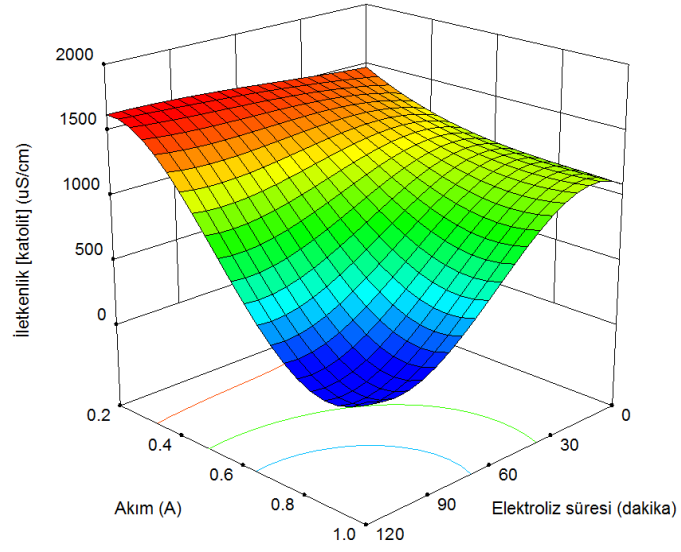
Şekil 4.59'de görüldüğü gibi katolit kısmında akım ve elektroliz zamanının artması ile iletkenlik değeri genellikle artmaktadır.

Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada katolit kısmındaki iletkenlik için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.7'de verilmiştir. Modelin kesinlik oranı = 32,336'dır.

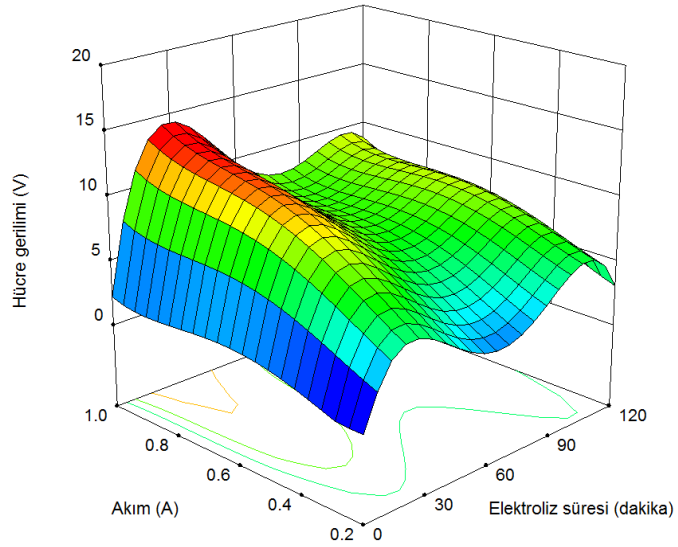
$$y = +1809.25187 - 12.95735 t - 1954.74707 i + 98.59727 t i + 0.15171 t^2 + 1504.57810 i^2 - 0.68484 t^2 i - 160.53376 t i^2 - 8.27316 \cdot 10^{-4} t^3 + 163.38107 i^3 + 0.069863 t^2 i^2 + 3.30063 \cdot 10^{-3} t^3 i + 87.12489 t i^3 + 2.91704 \cdot 10^{-7} t^4 - 422.09281 i^4 \quad (4.7)$$



Şekil 4.58. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmındaki iletkenlik değerinin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-K)



Şekil 4.59. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada katodit kısmındaki iletkenlik değerinin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-K)

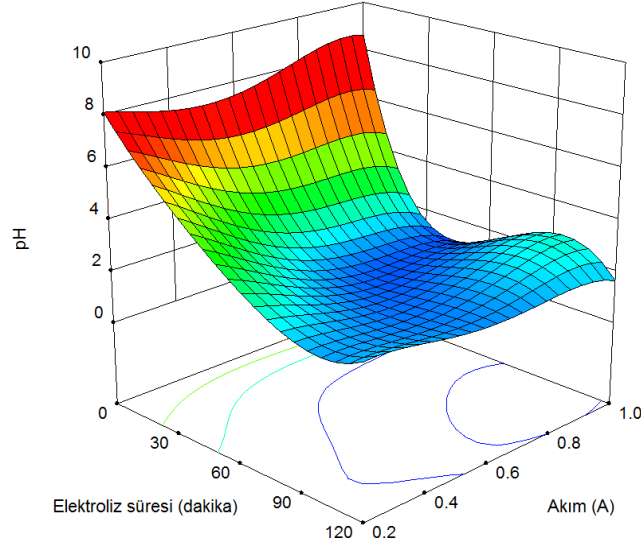


Şekil 4.60. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada hücre geriliminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-K)

Şekil 4.60'da görüldüğü gibi elektroliz hücresinde hücre geriliminde elektroliz süresi boyunca dalgalanmalar meydana gelmiştir. Bu dalgalanmaların nedeni, üretilen hipoklorit miktarının maksimum değere ulaşmasıyla hücre geriliminin azalmaya başlamış olmasıdır. Eğer ortamda atıksu varsa, hücre geriliminin azalmaya başlaması atıksu içerisindeki mikroorganizmaların yıkılmasında bir göstergesidir. Şekilde görüldüğü gibi akım değeri arttıkça genellikle hücre gerilimi değeri artmıştır. Elektroliz süresi 30-60 dakika arasında iken hücre gerilimi en yüksek değerine ulaşmıştır.

Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada hücre gerilimi için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.8'de verilmiştir. Modelin kesinlik oranı = 10,953'tür

$$y = -0.25576 + 0.53955 t - 14.53991 i + 0.69364 t i - 0.022156 t^2 + 88.35859 i^2 - 0.012374 t^2 i - 0.12677 t i^2 + 2.97066 \cdot 10^{-4} t^3 - 132.65191 i^3 + 8.88357 \cdot 10^{-4} t^2 i^2 + 5.67593 \cdot 10^{-5} t^3 i + 0.023067 t i^3 - 1.23391 \cdot 10^{-6} t^4 + 61.33339 i^4 \quad (4.8)$$

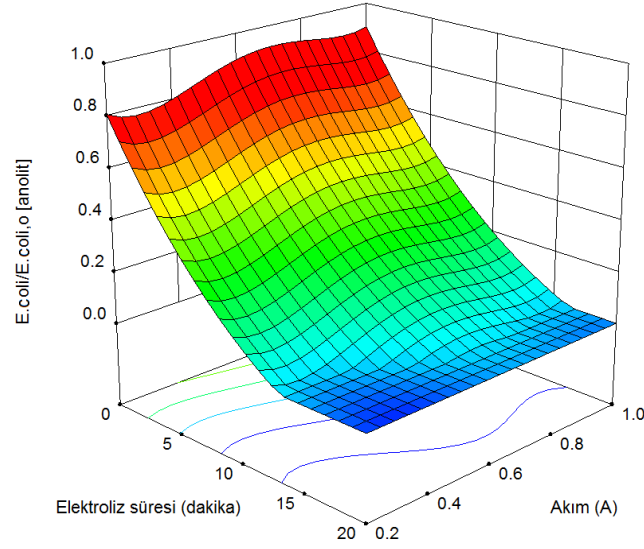


Şekil 4.61. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada pH değerinin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-K)

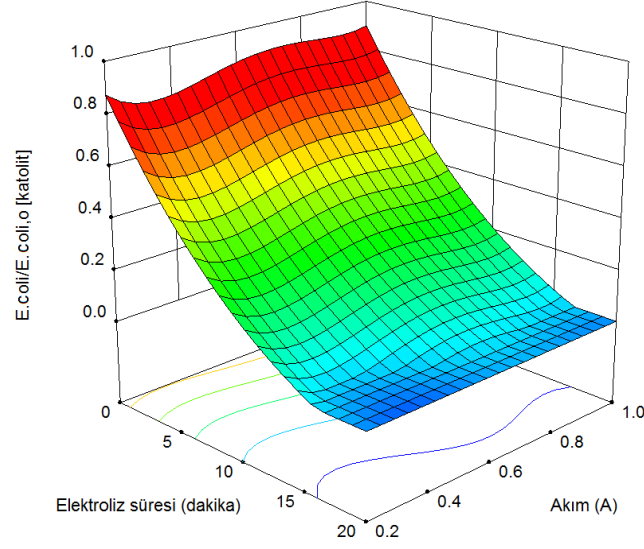
Şekil 3.61’de görüldüğü gibi anolit kısmında zamanla pH değeri azalmaktadır. Bu durumun nedeni anolit kısmında gerçekleşen reaksiyonlardır. Akım değerinin artmasıyla daha keskin düşüşler gerçekleşmiştir.

Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada hipoklorit üretimi sırasında pH için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.9’da verilmiştir. Modelin kesinlik oranı=18,396’dır.

$$y = +7.95584 - 0.027309t + 7.21374 i - 0.37093 t i - 8.68198 \cdot 10^{-4} t^2 - 44.14351 i^2 + 8.35810 \cdot 10^{-3} t^2 i - 0.062258 t i^2 - 7.83161 \cdot 10^{-7} t^3 + 73.06394 i^3 - 6.76598 \cdot 10^{-4} t^2 i^2 - 3.82015 \cdot 10^{-5} t^3 i + 0.061554 t i^3 + 4.89623 \cdot 10^{-8} t^4 - 35.44040 i^4 \quad (4.9)$$



Şekil 4.62. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmında *E.coli* mikroorganizmalarının zamanla değişimi (A-M3-K)



Şekil 4.63. Elektroliz hücresinde katolit kısmında *E.coli* mikroorganizmalarının zamanla değişimi (A-M3-K)

Delaedt vd. [2008] *E.coli* ve *L. pneumophila* bakterileri ile yaptıkları çalışmalarda 0,1 mg / L klor ile ve elektrokimyasal yöntemler ortamdaki dezenfeksiyonunu incelemişler elektrokimyasal yöntemle 10⁴ cfu *E. coli* bakterisi 20 mA akımda 5 dakikada dezenfekte olurken 10⁴ cfu *L. pneumophila* bakterisi 30 mA akımda 10 dakikada dezenfekte edilmiştir. Ortama eklenen 0,1 mg / L klor ile dezenfeksiyon 40 dakika kadar sürebilmektedir [Delaedt vd., 2008].

Şekil 4.62 ve Şekil 4.63’de görüldüğü gibi anolit ve katolit kısımlarında elektroliz süresi arttıkça *E.coli* mikroorganizma sayıları azalmıştır. Anolit kısmında mikroorganizmaların yıkımı daha hızlı gerçekleşmiştir. Elektroliz süresi ve akımın maksimum olduğu değerde *E.coli* mikroorganizmaları minimum değere ulaşmıştır.

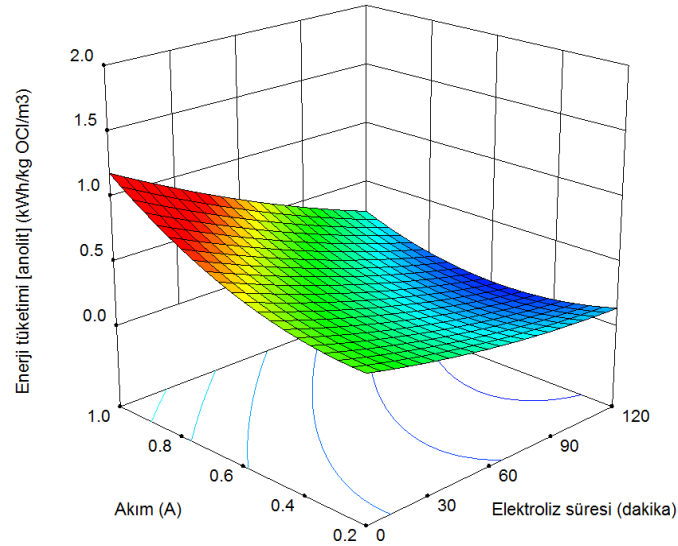
Şekil 4.64’de görüldüğü gibi akım değerinin artmasıyla enerji tüketimi artmıştır. Enerji tüketimi aynı zamana elektroliz süresi ile de doğru orantılı olarak değişmektedir. Anolit kısmında en fazla hipoklorit en yüksek akım değerinde elde edilmektedir. En yüksek akım değerinde ise en fazla enerji tüketimi gözlenmiştir.

Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmında yıkılan *E.coli* için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.10'da verilmiştir. Modelin kesinlik oranı=10,607'dir.

$$y = +1.33736 - 0.094407 t - 5.01069 i + 0.028365 t i + 2.67304 \cdot 10^{-3} t^2 + 15.09015 i^2 - 5.33212 \cdot 10^{-5} t^2 i - 0.050080 t i^2 - 2.94252 \cdot 10^{-5} t^3 - 17.32320 i^3 + 4.43109 \cdot 10^{-5} t^2 i^2 + 5.83494 \cdot 10^{-9} t^3 i + 0.025128 t i^3 + 1.08539 \cdot 10^{-7} t^4 + 6.80976 i^4 \quad (4.10)$$

Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada katolit kısmında yıkılan *E.coli* için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.11'de verilmiştir. Modelin kesinlik oranı=11,843'dür.

$$y = +1.46073 - 0.092299 t - 5.21283 i + 0.036170 t i + 2.48400 \cdot 10^{-3} t^2 + 14.31794 i^2 - 3.11629 \cdot 10^{-5} t^2 i - 0.059452 t i^2 - 2.69758 \cdot 10^{-5} t^3 - 15.61989 i^3 + 7.53275 \cdot 10^{-5} t^2 i^2 - 3.76794 \cdot 10^{-7} t^3 i + 0.027051 t i^3 + 9.93145 \cdot 10^{-8} t^4 + 5.95326 i^4 \quad (4.11)$$

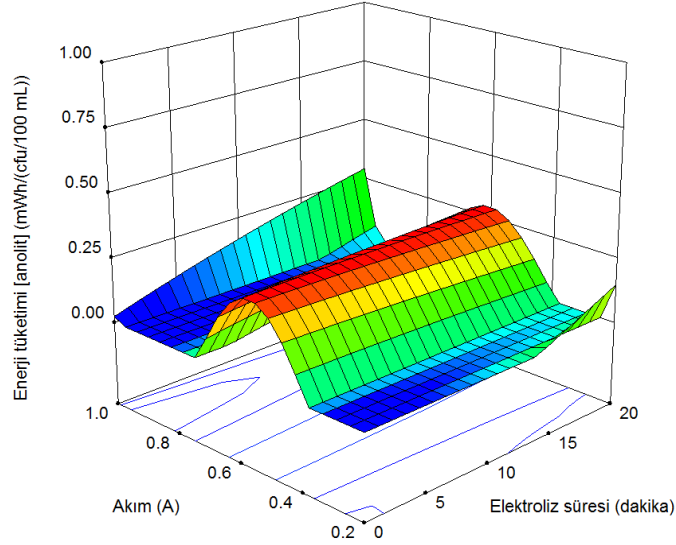


Şekil 4.64. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmında hipoklorit üretimi sırasında enerji tüketimi değişimi (A-M3-K)

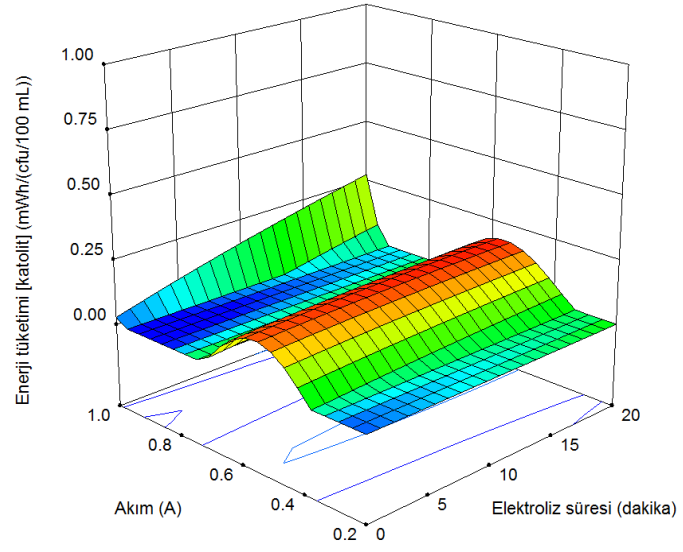
Nayakkara vd. [2012] titanyum elektrotlarla balast suyunun elektrokimyasal dezenfeksiyonunu incelemişler 10⁶ cfu/100 mL *E.coli* bakterisinin dezenfeksiyonu için 0,01 kWh/m³ enerji tüketiminin, 10⁷ cfu/100 mL *E.coli* bakterisinin dezenfeksiyonu için 0,02 kWh/m³ enerji tüketiminin ve 10⁸ cfu/100 mL *E.coli* bakterisinin dezenfeksiyonu için 0,025 kWh/m³ enerji tüketiminin gerekli olduğunu belirlemişlerdir [Nayakkara vd., 2012].

Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmında hipoklorit üretimi sırasındaki enerji tüketimi için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.12'de verilmiştir.

$$y = +0.48644 - 3.14767 \cdot 10^{-3} t - 0.43543 i - 6.65023 \cdot 10^{-3} t i + 1.59836 \cdot 10^{-5} t^2 + 1.14307 i^2 \quad (4.12)$$



Şekil 4.65. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmında *E.coli* mikroorganizmalarının yıkımı sırasındaki enerji tüketimi değişimi (A-M3-K)



Şekil 4.66. Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada katolit kısmında *E.coli* mikroorganizmalarının yıkımı sırasındaki enerji tüketimi değişimi (A-M3-K)

Şekil 4.65 ve Şekil 4.66'da görüldüğü gibi elektroliz hücrelerinde *E.coli* mikroorganizmalarının yıkımı sırasında enerji tüketiminde anolit ve katolit bölgesinde benzer dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Akım 0,6 A değerini aldığı anda ortamda maksimum *E.coli* mikroorganizma değerlerinin bulunduğu görülmüştür.

Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmında *E.coli* dezenfeksiyonu için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.13'de verilmiştir. Modelin kesinlik oranı=48,867'dir.

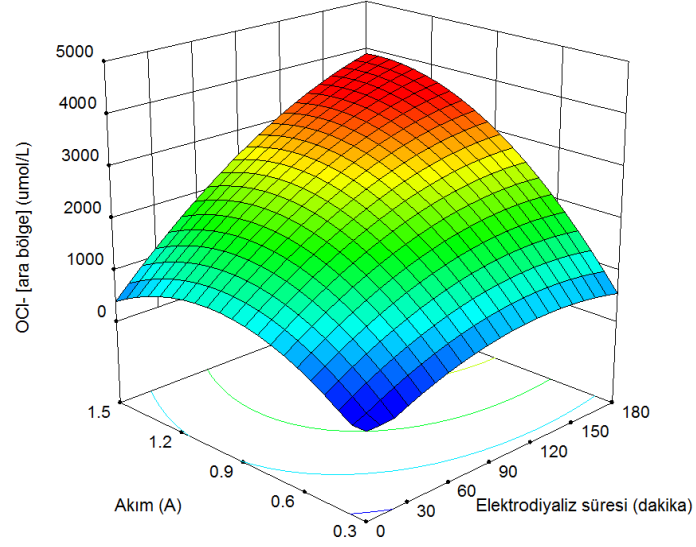
$$y = +1.55259 + 0.094498 t - 21.58810 i - 0.50547 t i - 5.68471 * 10^{-5} t^2 + 82.50471 i^2 + 2.86220 * 10^{-5} t^2 i + 0.82988 t i^2 + 8.60665 * 10^{-7} t^3 - 115.06050 i^3 - 1.86947 * 10^{-4} t^2 i^2 + 1.02436 * 10^{-6} t^3 i - 0.40158 t i^3 - 6.07318 * 10^{-9} t^4 + 52.61494 i^4 \quad (4.13)$$

Elektroliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada katolit kısmında *E.coli* dezenfeksiyonu için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.14'de verilmiştir. Modelin kesinlik oranı=25,921'dir.

$$y = +0.94611 + 0.023444 t - 12.82306 i - 0.093937 t i - 7.47690 * 10^{-5} t^2 + 48.88239 i^2 - 2.43770 * 10^{-5} t^2 i + 0.12274 t i^2 + 1.16915 * 10^{-6} t^3 - 68.51681 i^3 - 7.73355 * 10^{-5} t^2 i^2 + 5.00141 * 10^{-7} t^3 i - 0.036695 t i^3 - 5.80520 * 10^{-9} t^4 + 31.53954 i^4 \quad (4.14)$$

4.6.2. Elektrodiyaliz Hücresinde Cevap Yüzey Yöntemi İle Optimizasyon

Şekil 3.66'da görüldüğü gibi elektrodiyaliz sırasında ara bölgede en fazla hipoklorit iyonu akım ve elektrodiyaliz süresinin maksimum oldukları durumda elde edilir.



Şekil 4.67. Elektrodiyaliz hücrelerinde atıksu ile yapılan çalışmalarda ara bölge kısmında hipoklorit derişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-C-K)

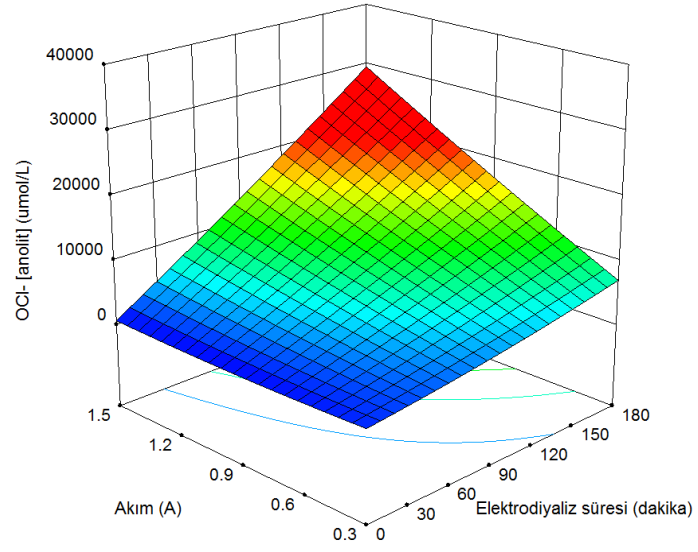
Şekil 4.67’de görüldüğü gibi elektrodiyaliz sisteminde anolit ve ara bölge kısımlarında hipoklorit üretimi benzer özellikler göstermiştir. Maksimum akım ve elektrodiyaliz süresi değerinde hipoklorit üretimi maksimum olarak elde edilmiştir.

Elektrodiyaliz hücrelerinde atıksu ile yapılan çalışmada ara bölge kısmında hipoklorit üretimi için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.15’de verilmiştir. Modelin kesinlik oranı=8,593’tür.

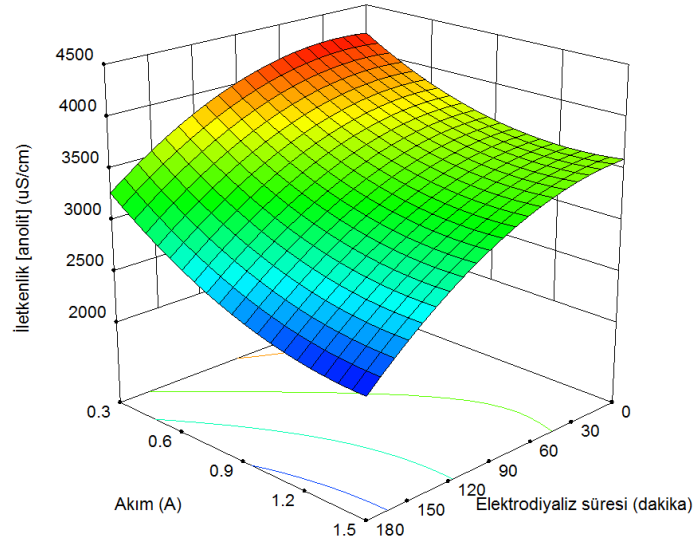
$$y = -1584.26435 + 12.01569 t + 5239.79108 i + 12.55991 t i - 0.062765 t^2 - 2612.05957 i^2 \quad (4.15)$$

Elektrodiyaliz hücrelerinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmında hipoklorit üretimi için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.16’da verilmiştir. Modelin kesinlik oranı=25,046’dır.

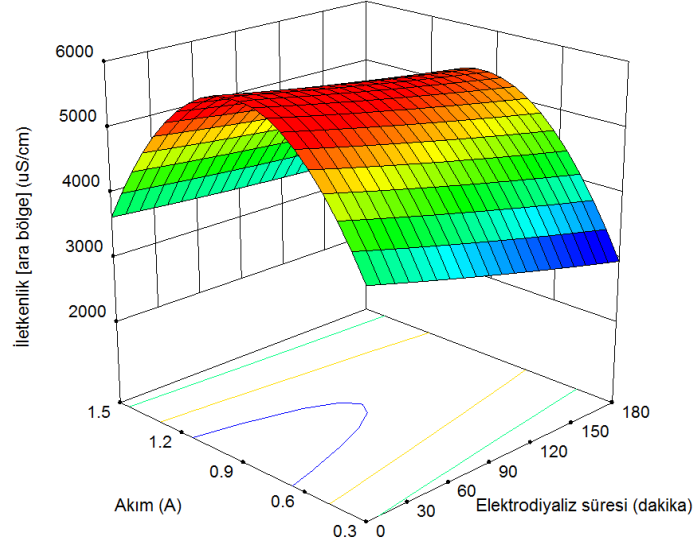
$$y = +1402.96215 - 9.12653 t - 2178.90805 i + 105.84140 t i + 0.065757 t^2 + 1095.16140 i^2 \quad (4.16)$$



Şekil 4.68. Elektrodiyaliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmalarda anolit kısmında hipoklorit derişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-C-K)



Şekil 4.69. Elektrodiyaliz sırasında atıksu ile yapılan çalışmalarda anolit kısmında iletkenlik değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-C-K)



Şekil 4.70. Elektrodiyaliz sırasında atıksu il yapılan çalışmalarda ara bölge kısmında iletkenlik değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-C-K)

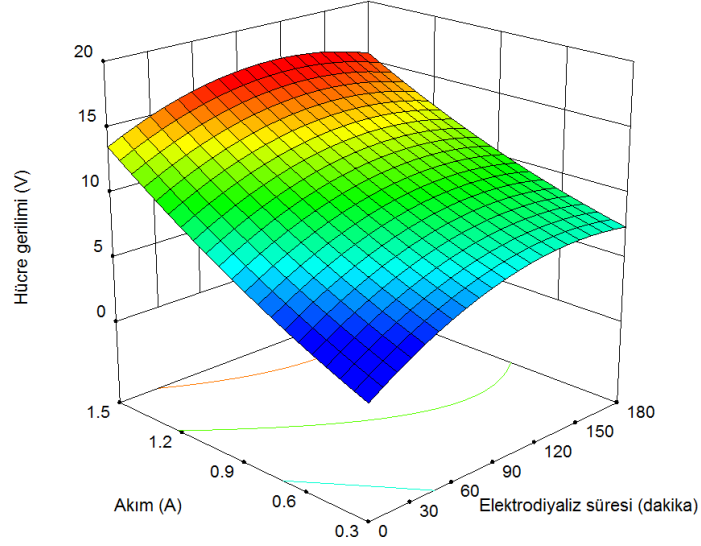
Şekil 4.69’da görüldüğü gibi elektrodiyaliz sırasında anolit kısmındaki iletkenlik değeri akım ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Yüksek akım değerlerinde iletkenlik değeri daha hızlı artış göstermiştir. Ara bölgedeki iletkenlik akım 0,9 A iken maksimum değerine ulaşmıştır (Şekil 4.70).

Elektrodiyaliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmında iletkenlik için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.17’de verilmiştir. Modelin kesinlik oranı=6,712’dir.

$$y = +4656.44871 + 2.22198 t - 1699.93511 i - 1.71023 t i - 0.037989 t^2 + 666.66667 i^2 \quad (4.17)$$

Elektrodiyaliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada ara bölge kısmında iletkenlik için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.18’de verilmiştir. Modelin kesinlik oranı=7,334’dür.

$$y = +1447.94827 - 7.85237 t + 10487.88163 i + 3.88186 t i + 3.36611 * 10^{-3} t^2 - 6013.33333 i^2 \quad (4.18)$$

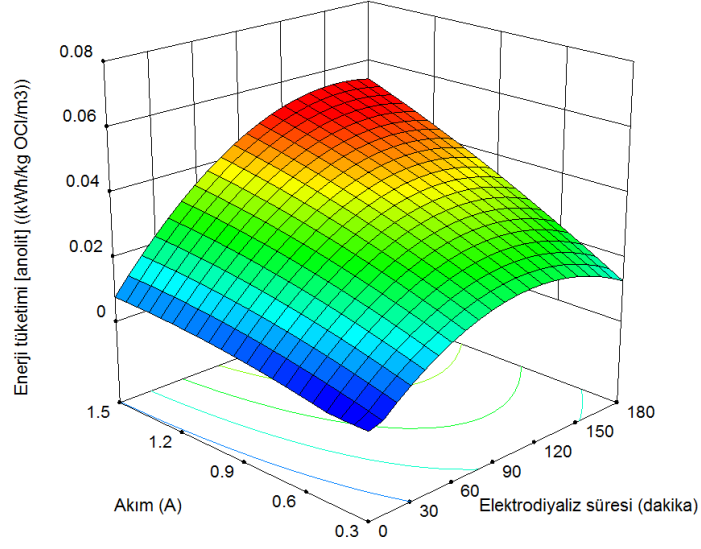


Şekil 4.71. Elektrodiyaliz sırasında atık su ile yapılan çalışmalarda hücre geriliminin değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-C-K)

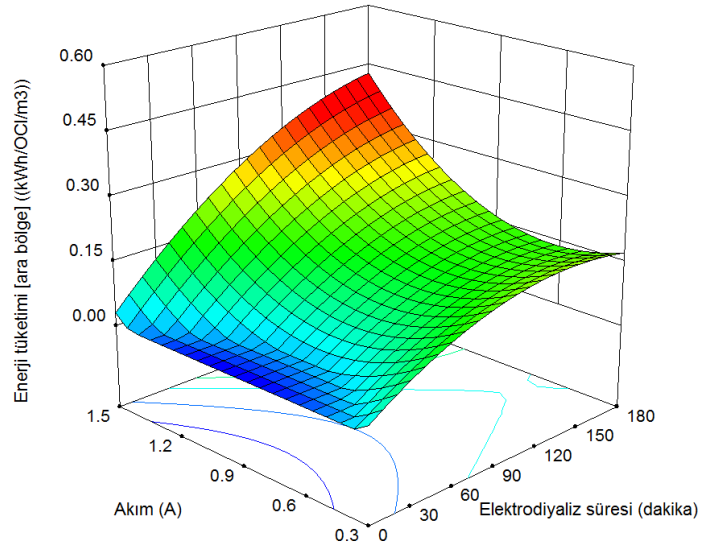
Şekil 4.71’de görüldüğü gibi hücre gerilimi akım ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Elektrodiyaliz sistemlerinde elektrodiyaliz süresince hücre gerilimi genellikle artmaktadır.

Elektrodiyaliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada hücre gerilimi için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.19’da verilmiştir. Modelin kesinlik oranı=9,373’dür.

$$y = +0.14879 + 0.085602 t + 5.61324 i - 0.015554 t i - 2.81509 \cdot 10^{-4} t^2 + 2.25000 i^2 \quad (4.19)$$



Şekil 4.72. Elektrodiyaliz sırasında atıksu ile yapılan çalışmalarda anolit kısmında hipoklorit üretimi sırasındaki enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-C-K)



Şekil 4.73. Elektrodiyaliz sırasında atıksu ile yapılan çalışmalarda ara bölge kısmında hipoklorit üretimi sırasındaki enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi (A-M3-C-K)

Şekil 4.72 ve 4.73’de görüldüğü gibi anolit ve ara bölge kısımlarında akım ve elektrodiyaliz süresinin maksimum olduğu durumda anlık enerji tüketimi maksimum değerine ulaşmıştır.

Elektrodiyaliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada anolit kısmında hipoklorit üretimi için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.20’de verilmiştir. Modelin kesinlik oranı=12,889’dur.

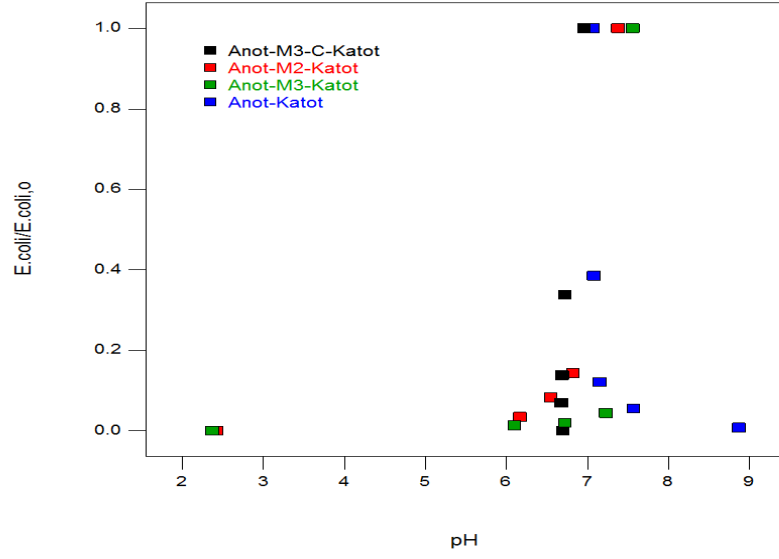
$$y = -8.14889 \cdot 10^{-3} + 4.01699 \cdot 10^{-4} t + 0.020650 i + 1.43555 \cdot 10^{-4} t i - 1.99251 \cdot 10^{-6} t^2 - 6.70115 \cdot 10^{-3} i^2 \quad (4.20)$$

Elektrodiyaliz hücresinde atıksu ile yapılan çalışmada ara bölge kısmında hipoklorit üretimi için elde edilen yaklaşım fonksiyonu eşitlik 4.21’de verilmiştir. Modelin kesinlik oranı=8,084’dür.

$$y = +0.18104 + 2.08314 \cdot 10^{-3} t - 0.64034 i + 1.15577 \cdot 10^{-3} t i - 8.80855 \cdot 10^{-6} t^2 + 0.35963 i^2 \quad (4.21)$$

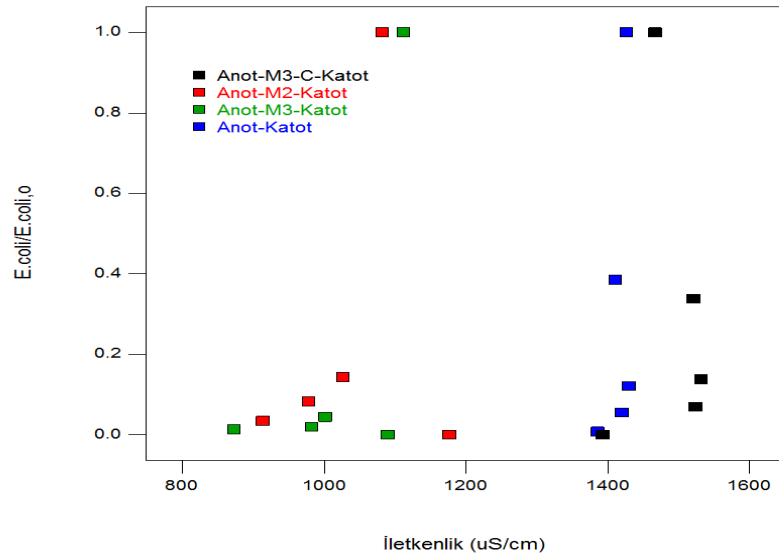
4.6.3.Farklı Konfigürasyonların Cevap Yüzey Yöntemi İle İncelenmesi

Yapılan deneylerde elektroliz ve elektrodiyaliz sistemlerinde farklı membran konfigürasyonları oluşturulmuş ve bu konfigürasyonlarda pH, *E.coli*, iletkenlik, enerji tüketimi, reaksiyon süresi, hipoklorit derişimi, hücre geriliminin birbiri ile ilişkileri cevap yüzey yöntemi ile incelenmiştir.



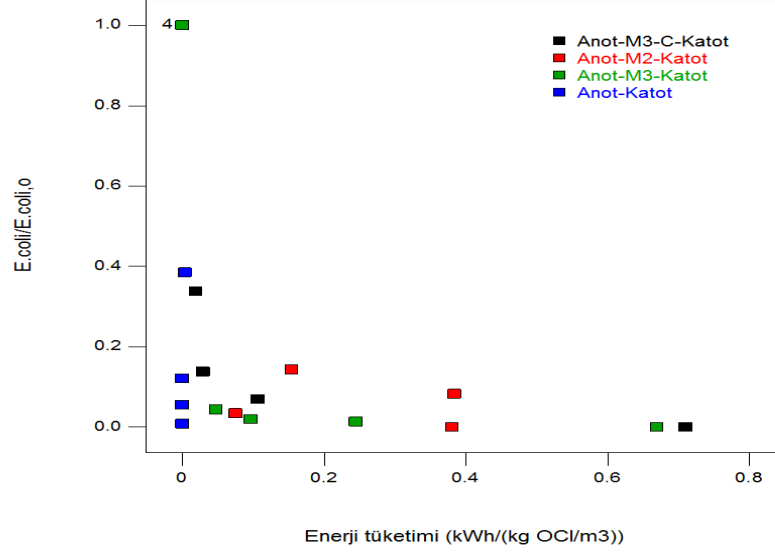
Şekil 4.74. Farklı konfigürasyonlarda pH- *E.coli* değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi

Şekil 4.74'de görüldüğü gibi pH değeri genellikle 6-8 aralığında bulunmaktadır. pH değerinin düşük olduğu durumlarda hipoklorit üretimi zorlaşmaktadır ve *E.coli* mikroorganizmalarının yıkımı daha zor gerçekleşmektedir.



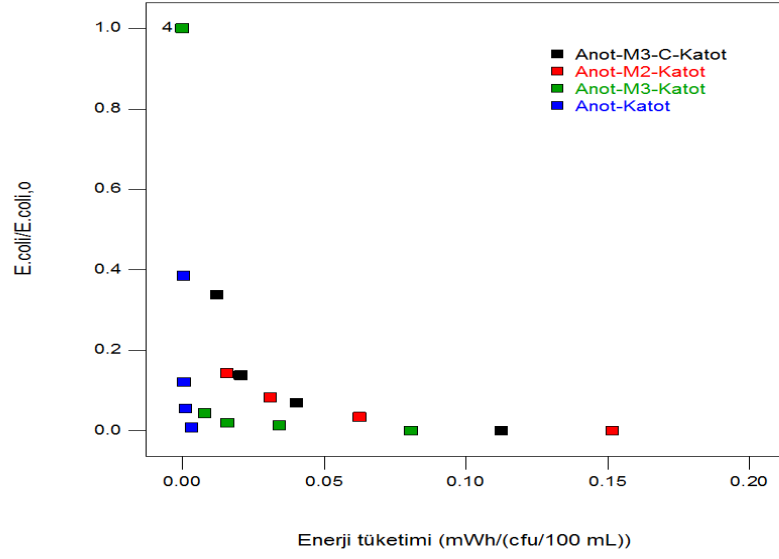
Şekil 4.75. Farklı konfigürasyonlarda iletkenlik-*E.coli* değişiminin cevap yüzeyi yöntemi ile incelenmesi

Şekil 4.75’de görüldüğü gibi minimum *E.coli* mikroorganizmalarının bulunduğu durumda iletkenlik değerleri A-M3-C-K > A-K > A-M2-K > A-M3-K olarak elde edilmiştir.



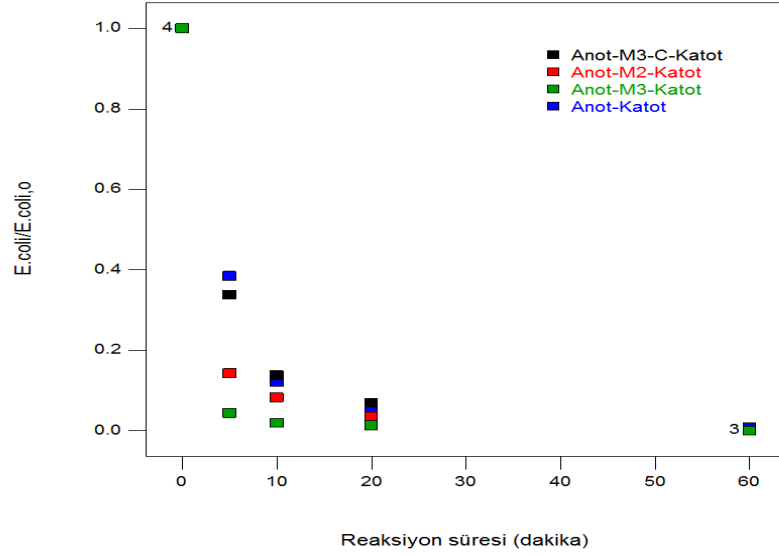
Şekil 4.76. Farklı konfigürasyonlarda enerji tüketimi- *E.coli* değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi

Şekil 4.76’da görüldüğü gibi minimum *E.coli* değeri için enerji tüketimi değerleri A-M3-C-K > A-M3-K > A-M2-K > A-K olarak elde edilmiştir.



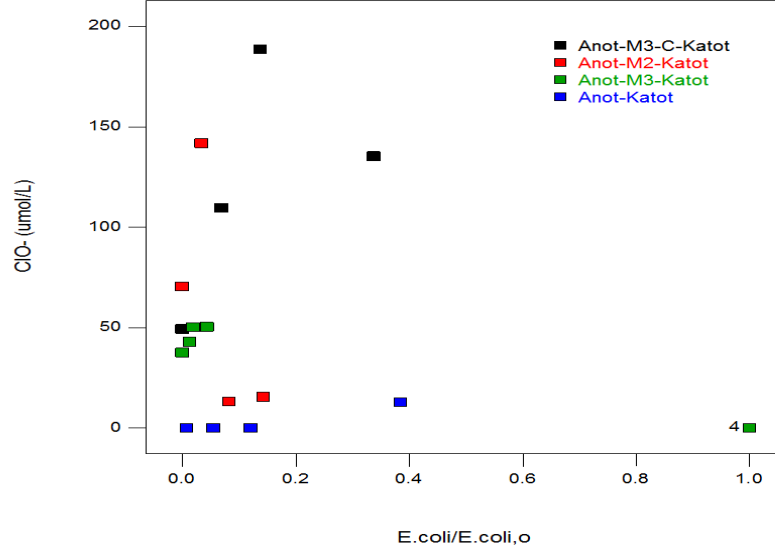
Şekil 4.77. Farklı konfigürasyonlarda *E.coli* tüketimi için gerekli enerji tüketimi-*E.coli* değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi

Şekil 4.77’de görüldüğü gibi sabit bir *E.coli* miktarı belirlendiğinde enerji tüketimi değerleri A-M2-K > A-M3-C-K > A-M3-K > A-K olarak elde edilmiştir.



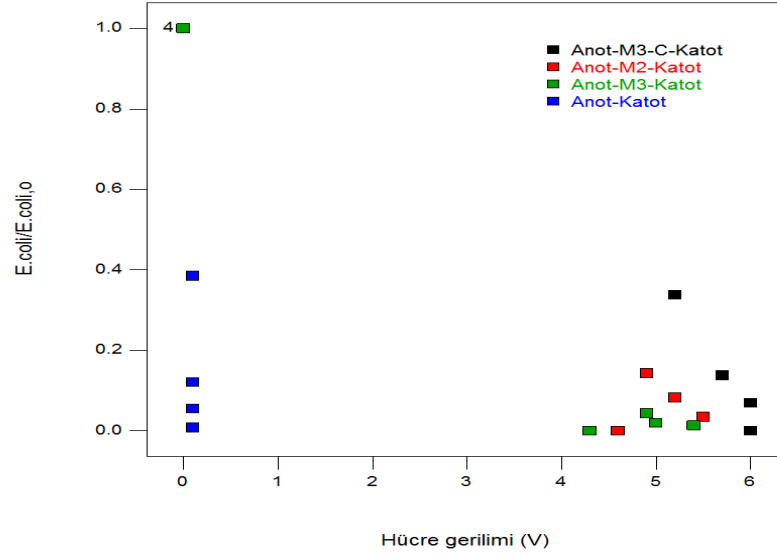
Şekil 4.78. Farklı konfigürasyonlarda reaksiyon süresi-*E.coli* değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi

Şekil 4.78’de görüldüğü gibi *E.coli* mikroorganizmalarının dezenfeksiyon süreleri A-M3-K < A-M2-K < A-M3-C-K < A-K olarak elde edilmiştir.



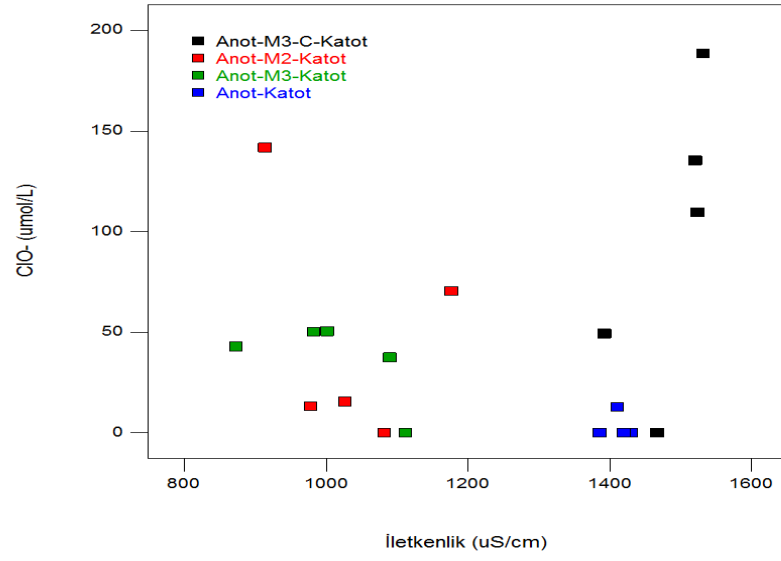
Şekil 4.79. Farklı konfigürasyonlarda *E.coli*- hipoklorit değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi

Şekil 4.79’da görüldüğü gibi farklı konfigürasyonlarda *E.coli* miktarına karşı hipoklorit üretimi incelendiğinde en verimli konfigürasyon maksimum hipoklorit üretilen ve minimum *E.coli* elde edilen konfigürasyondur. Buna göre konfigürasyonların verimi A-M3-C-K > A-M2-K > A-M3-K > A-K olarak elde edilmiştir.



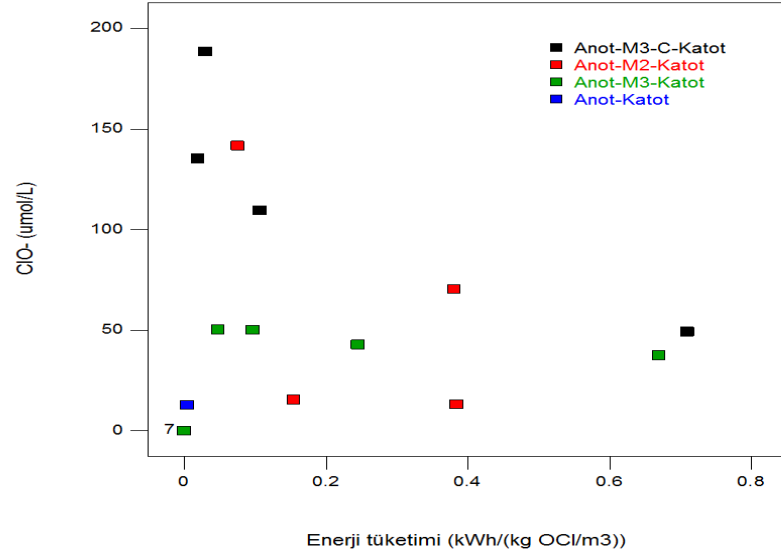
Şekil 4.80. Farklı konfigürasyonlarda *E.coli*-hücre gerilimi değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi

Minimum hücre gerilimi değeri ile maksimum *E.coli*'nin yıkımının sağlandığı konfigürasyon en verimli konfigürasyondur. Şekil 4.80'de görüldüğü gibi konfigürasyonların sıralaması A-K > A-M3-K > A-M2-K > A-M3-C-K olarak elde edilmiştir.

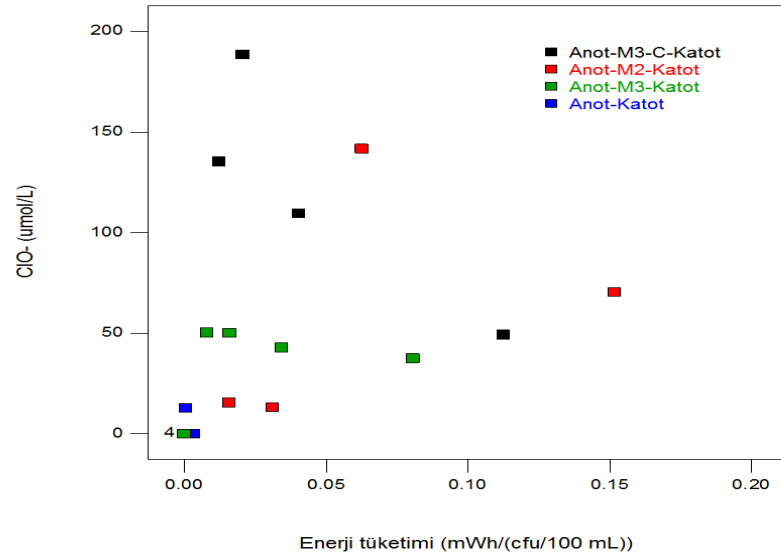


Şekil 4.81. Farklı konfigürasyonlarda iletkenlik- hipoklorit değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi

Hipoklorit üretimi iletkenlik ile incelendiğinde maksimum hipoklorit derişimi ve maksimum iletkenliğin bulunduğu durum ideal olarak düşünülebilir. Buna göre konfigürasyonların verim sıralaması A-M3-C-K > A-M2-K > A-M3-K > A-K olarak elde edilmiştir.



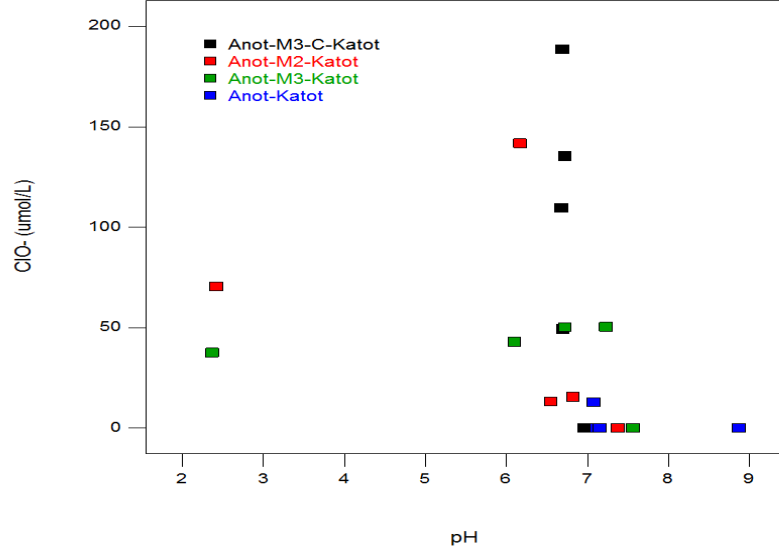
Şekil 4.82. Farklı konfigürasyonlarda hipoklorit üretimi için gerekli enerji tüketimi-hipoklorit değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi



Şekil 4.83. Farklı konfigürasyonlarda *E.coli* tüketimi için gerekli enerji tüketimi-hipoklorit değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi

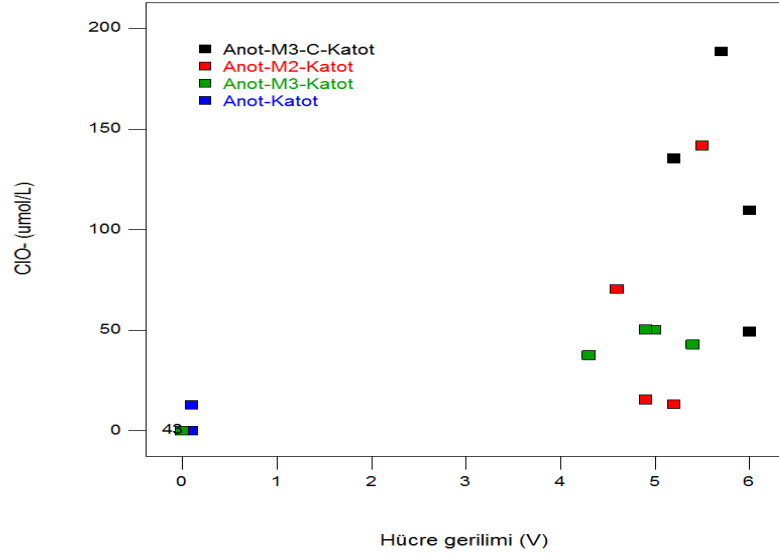
Şekil 4.82 ve Şekil 4.83’de hipoklorit üretimi için gerekli enerji tüketimi ile *E.coli* tüketimi için gerekli enerji tüketimi değişimi benzer özellikler göstermiştir.

Konfigürasyonların verim sıralaması A-M3-C-K > A-M2-K > A-M3-K > A-K olarak elde edilmiştir.



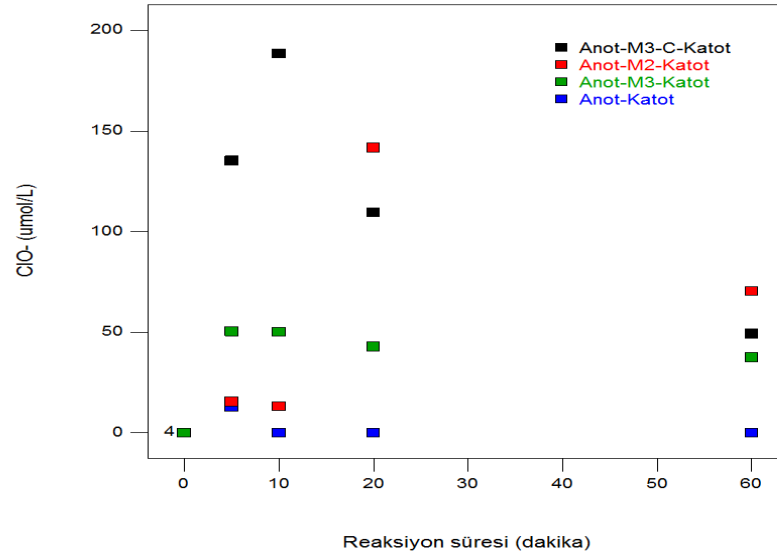
Şekil 4.84. Farklı konfigürasyonlarda pH-hipoklorit değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi

pH değeri 6'nın üzerinde olduğu koşullar hipoklorit üretimi için idealdir. pH bu değer altında olduğunda hipoklorit üretimi zorlaşır. Buna göre Şekil 4.84'e göre konfigürasyonların verim sıralaması A-M3-C-K > A-M3-K > A-M2-K > A-K olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.85. Farklı konfigürasyonlarda hücre gerilimi-hipoklorit değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi

Gerçekleştirilen çalışmalarda minimum hücre gerilimi ile maksimum hipoklorit üretimi sağlanmak istenmiştir. Bu durumda Şekil 4.85'e göre konfigürasyonların verim sıralaması A-K > A-M3-K > A-M2-K > A-M3-C-K olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.86. Farklı konfigürasyonlarda reaksiyon süresi- hipoklorit değişiminin cevap yüzey yöntemi ile incelenmesi

Çalışmalarda minimum reaksiyon süresinde maksimum hipoklorit üretimi amaçlanmıştır. Bu durumda Şekil 4.86'ya göre konfigürasyonların verim sıralaması A-M3-C-K > A-M3-K > A-M2-K > A-K olarak elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada membran sistemleri yardımıyla hipoklorit iyonu üretimi ve *Escherichia coli* kolonilerinin dezenfeksiyonu incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Yapılan çalışmalar sonucunda amaçlandığı gibi TiO₂ katkılı membranlarla elektroliz hücresinde anolit ve katolit kısımlarında, elektrodiyaliz hücresinde anolit ve ara bölge kısımlarında 16000 cfu / 100 mL *E. coli* bakterisinin bertarafı ile 15-20 dakikada atıksuyun dezenfekte edildiği gözlemlenmiştir.
- A-M3-C-K elektrokimyasal diyaliz sisteminde pH 8'in üzerindeyken 1,5 A akım uygulanarak anolit ve ara bölge kısımlarında optimum hipoklorit üretiminin gerçekleştiği gözlemlenmiştir.
- Aynı membran konfigürasyonlarında uygulanan akım değeri arttıkça anolitte ve katolitte üretilen hipoklorit iyonları derişimi artmaktadır.
- Yapılan çalışmalarda hipoklorit iyonlarının üretilmesinde ortamda bulunan klor iyonları ve klorlu bileşikler önemli rol oynadığı belirlenmiştir.
- Yapılan çalışmalarda hipoklorit iyonu derişiminin ortamda artmasıyla ortam pH'si 7'nin altına düşerek asidik bölgeye geçtiği gözlemlenmiştir..
- Oluşturulan membran sistemlerinde anolit kısmında iletkenlik anot ve çevresinde gerçekleşen reaksiyonlara bağlı olarak artmakta, katolit kısmında katot ve çevresinde gerçekleşen reaksiyonlara bağlı olarak azalmaktadır.
- Membran sistemleriyle *Escherichia coli* kolonilerinin elektrokimyasal dezenfeksiyonu işleminde aynı akım değeri uygulandığında basit elektrokimyasal dezenfeksiyon işlemi olarak bilinen anot ve katot sisteminden daha fazla hipoklorit miktarı elde edilmiştir.
- "Anot-katyonik membran-katyonik membran- katot" membran konfigürasyonu ile ara bölge oluşturularak, negatif yüklü iyonların bu bölge sınırları içerisinde tutularak dezenfeksiyon işleminde TiO₂ katkısız membran sistemlerine ve basit dezenfeksiyon sistemlerine göre daha fazla hipoklorit iyonunun üretildiği gözlemlenmiştir.

- Membran sistemlerinde katolit kısmında zor üretilen hipoklorit iyonlarının katyonik membranlara TiO₂ katkısı yapılarak kolayca üretilebildiği gözlemlenmiştir.
- Katyonik membranların kullanımıyla elektrokimyasal dezenfeksiyon işleminde 20-25 dakika aralığında 16000 cfu/100mL mikroorganizma kolonisinin tamamen dezenfekte edildiği gözlemlenmiştir.
- Akım değerinin artmasıyla dezenfeksiyonun daha kısa zamanda gerçekleştiği gözlemlenmiştir.
- Aynı akım değerinde kullanılan membran sayısının artmasıyla direnç değerinin buna bağlı olarak da voltaj değerinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Aynı akım değerinde Q (birim hacimdeki elektrik yükü) değerinin zamanla arttığı gözlemlenmiştir.
- NaCl çözeltileri ile atıksuya göre daha kolay ve daha yüksek derişimde hipoklorit iyonunun üretildiği gözlemlenmiştir.
- Çalışmalar sonunda klorat ve perklorat iyonları analizi yapılmış ve ortamda klorta ve perklorat iyonlarına rastlanmamıştır.
- Membranların kullanılmadan önce aktivasyonunun dezenfeksiyon sistemleri için önemli olduğu belirlenmiştir.
- TiO₂ katkılı katyonik membranlar ile bipolar iki hücre oluşturulmasının dezenfeksiyon işlemlerinde daha etkili olduğu gözlemlenmiştir.
- Elektrokimyasal diyaliz yöntemlerinde membran yapılarının kullanılması ile iyonların farklı bölgelere yönlendirilerek iyon ayrımının yapılabileceği, aynı zamanda istenilen kısımlarda dezenfeksiyon işleminin gerçekleştirilebileceği belirlenmiştir.

Bu çalışmadan sonra yapılacak araştırmalarda;

- Anyonik membran sistemlerine partikül (TiO₂ vb.) katkıları yapılarak dezenfeksiyon sistemleri incelenebilir.
- Yapılan çalışmalarda boyut olarak kararlı elektrotlarla çalışılmış olup, iletken elmas elektrotlar ile hidroksil radikallerinin üretimi sağlanabilir, demir elektrotlar ile fenton reaksiyonları incelenebilir, elektrokimyasal koagülasyon ve dezenfeksiyon işlemleri aynı anda incelenebilir.

- Titanyum katkı malzemelerin foto-katalitik özelliğinden faydalanılarak ultraviyole ışınları uygulanarak elektrokimyasal dezenfeksiyon özellikleri incelenebilir.
- Reaksiyon ortamına elektrolitler eklenerek dezenfeksiyon sistemleri üzerine etkileri incelenebilir.



6. KAYNAKLAR

Al-Hamaiedeh Husam Damen “ Effect of electrolyte components on electrochemical generation and disinfection efficiency of active chlorine”, *Desalination and Water Treatment*, 12: 369-374, (2009).

APHA-AWWA-WPCF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., Washington, DC, (1998).

Arnal, J.M., Fernández, M.S, Verdú G.M, Garcia, J.L, Zafrilla J.M.G, Candela J.I, Peiró I.F, Martínez I.T “Design and construction of a water potabilization membrane facility and its application to the third World countries” *Desalination*, 145: 305-308, (2002).

Bergmann, H., Koparal, A.T., Koparal, A.S., Ehrig F. “ The influence of products and by-products obtained by drinking water electrolysis on microorganisms” *Microchemical Journal*, 89: 98-107, (2008)

Birbir, M., Hacıoğlu H., Birbir Y., Altuğ G., “ Inactivation of *Escherichia coli* by alternative electric current in rivers discharged into sea”, *Journal of Electrostatics*, 67: 640-645, (2009)

Birbir, Y., Birbir, M. “Inactivation of extremely halophilic hide-damaging bacteria via low-level direct electric current”, *Journal of Electrostatics*, 64: 791-795, (2006).

Birbir, Y., Uğur, G., Birbir M. “Inactivation of bacterial population in hide-soak liquors via direct electric current” *Journal of Electrostatics*, 66: 355-360, (2008).

Cano, A., Cañizares P., Barrera-Díaz C., Sáez C., Rodrigo M.A. “Use of conductive-diamond electrochemical-oxidation for the disinfection of several actual treated wastewaters”, *Chemical Engineering Journal*, 211-212: 463-469, (2012).

Chen, Q., Ai S., Li S., Xu J., Yin H., Ma Q., “Facile preparation of PbO₂ electrode for electrochemical inactivation of microorganisms” *Electrochemistry Communications*, 11: 2233-2236, (2009).

Cong, Y., Wu, Z., Li, Y. “Electrochemical inactivation of coliforms by in situ generated hydroxyl radicals” *Korean Journal of Chemical Engineering*, 25(4): 727-731, (2008).

Cotillas, S., Llanos, J., Cañizares, P., Mateo, S., Rodrigo, M. A., “Optimization of an integrated electrodisinfection/electrocoagulation process Al bipolar electrodes for urban wastewater reclamation” *Water Research*, 47: 1741-1750, (2013).

Cotillas, S., Llanos, J., Rodrigo, M. A., Cañizares, P. “Use of carbon felt cathodes for electrochemical reclamation of urban treated wastewaters” *Applied Catalysis B: Environmental*, 162: 252-259, (2015).

Cui, X., Quicksall, A. N., Blake, A. B., Talley, J. W. “Electrochemical disinfection of *Escherichia coli* in the presence and absence of primary sludge particulates” , *Water Research*, 47: 4383 -4390, (2013).

Delaedt, Y., Daneelsa, A., Declercka, P., Behetsa, J., Ryckeboerb, J., Petersc, E., Olleviera, F. “The impact of electrochemical disinfection on *Escherichia coli* and *Legionella pneumophila* in tap water” , *Microbiological Research*, 163: 192—199, (2008).

Design-Expert® User’s Guide, 2011, Response Surface Optimization Tutorial.

Di Zio, A., Prisciandaro M., Barba D. “ Disinfection of surface waters with UF membranes” *Desalination*, 179: 297-305, (2005).

Diao, H.F, Li, X.Y, Gu, J.D, Shi, H.C, Xie, Z.M. “ Electron microscopic investigation of the bactericidal action of electrochemical disinfection in comparison with chlorination, ozonation and fenton reaction” *Process Biochemistry*, 39: 1421-1426, (2004).

El Sayed, A.M., Etoh, B, Yamauchi, A., Yang, W.-K “Effect of anionic and cationic exchange polymeric layers on current-voltage curves and chronopotentiometry of a charged composite membrane” *Desalination*, 229: 109-117, (2008).

Feng, C., Suzuki, K., Zhao, S., Sugiura, N., Shimada, S., Maekawa, T. “Water disinfection by electrochemical treatment” *Bioresource Technology*, 94: 21, (2004).

Gordon, G., Emmert, G, Gauw, R, Bubnis, R “Can ozone and ozon oxidative by-products be formed during telectrolyhe sis of salt brine?” *Ozone Science Engineering*, 20: 239-249, (1998).

Guillou, S. ve Murr, N.E. “Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in solution by low-amperage electric treatment” *Journal of Applied Microbiology*, 92: 860-865, (2002)

Gusmão, I. C. C. P., Moraes, P. B., Bidoia E. D. “ Studies on the electrochemical disinfection of water containing *Escherichia coli* using a dimensionally stable anode” *Brazillian Arhives of Biology and Technology*, 53: 1235-1244, (2010)

Jeong, J., Kim, J. Y., Cho, M., Choi, W., Yoon J. “Inactivation of *Escherichia coli* in the electrochemicaldisinfection process using a Pt anode” *Chemosphere*, 67: 652–659, (2007).

Kerwick, M.I, Reddy, S.M, Chamberlain, A.H.L, Holt D.M., "Electrochemical disinfection, an environmentally acceptable method of drinking water disinfection?" , *Electrochimica Acta*, 50: 5270–5277, (2005).

Kim, H., Hong, H.J., Lee Y.J., Shin, H.J., Yang, J.W., "Degradation of trichloroethylene by zero-valent iron immobilized in cationic exchange membrane" ,*Desalination*, 223: 212-220, (2008).

Kimbrough, D.E, Suffet, I.H., " Electrochemical removal of bromide and reduction of THM formation potential in drinking water", *Water Research*, 36: 4902, (2002).

Körbahti, B.K. "Boya Endüstrisi Su Bazlı Boya Atıksuyu ve Tekstil Endüstrisi Atıksuyunun Elektrokimyasal Olarak Arıtılması İçin Sistem Tasarlanması ve Proses Geliştirilmesi", Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (2003)

Körbahti, B.K. ve Tanyolaç, A., "Electrochemical treatment of simulated textile wastewater with industrial components and Levafix Blue CA reactive dye: optimization through response surface methodology", *Journal of Hazardous Materials*, 151, 422-431,(2008)

Kumon, K. "What is functional water?", *Artif.Organs* 21: 2-4 (1997).

Lacasa E., Cañizares P., Llanos J., Rodrigo M. A. "Removal of nitrates by electrolysis in non-chloride media: Effect of the anode material", *Separation and Purification Technology*, 80: 592-599, (2011).

Lacasa, E., Llanos, J., Canizares, P., Rodrigo, M. A. "Electrochemical denitrification with chlorides using DSA and BDD anodes" *Chemical Engineering Journal*, 184: 66-71, (2012).

Lacasa, E., Tsolaki, E., Sbokou, Z., Rodrigo, M. A., Mantzavinos, D., Diamadopoulos, E. "Electrochemical disinfection of simulated ballast water on conductive diamond electrodes" , *Chemical Engineering Journal*, 223: 516–523, (2013).

Laxman, K., Myint, M. Tay, Z., Al Abri, M., Sathe, P., Dobretsov, S., Dutta, J. "Desalination and disinfection of inland brackish ground water in a capacitive deionization cell using nanoporous activated carbon cloth electrodes", *Desalination*, 362: 126-132, (2015).

Leei, H.J., Choi, J.H., Cho, J, Moon, S.H., "Characterization of anion exchange membranes fouled with humate during electrodialysis", *Journal Membrane Science*, 203: 115-126, (2002).

Li, H., Zhu, X., Ni, J. “Comparison of electrochemical method with ozonation, chlorination and monochloramination in drinking water disinfection” , *Electrochimica Acta*, 56: 9789– 9796, (2011).

Li, X.Y., Diao, H.F., Fan F.X.J., Gu J.D., Ding F., Tong A.S.F., “Electrochemical wastewater disinfection: Identification of its principal germicidal actions”, *Journal of Environmental Engineering*, 130: 1217-1221, (2004).

Liu, F., He, G., Zhao, M., Huang L. and Qu M., “Study on the wastewater disinfection at the boron-doped diamond film electrode”, *Procedia Environmental Sciences*, 12: 116 – 121, (2012).

Liu, L., Liu, Z., Hongwei, B., Darren, D. S., “Concurrent filtration and solar photocatalytic disinfection/degradation using high-performance Ag/TiO₂ nanofiber membrane”, *Water Research*, 46: 1101-1112, (2012).

López-Gálvez F., Posada-Izquierdo, G. D., Selma, M.V., Fernando P.R, Gobet J., Gil M. I., Allende A. “Electrochemical disinfection: An efficient treatment to inactivate *Escherichia coli* O157:H7 in process wash water containing organic matter” , *Food Microbiology*, 30: 146-156, (2012).

Madaeni, S.S., “ The application of membrane technology for water disinfection” , *Water Research*, 33: 301-308, (1999).

Mascia, M., Vacca, A., Palmas, S., “Fixed bed reactors with three dimensional electrodes for electrochemical treatment of waters for disinfection” , *Chemical Engineering Journal*, 211–212: 479–487, (2012).

Meyer, D.E., Wood, K., Bachas, L.G, Bhattacharyya, D., “Degradation of chlorinated organics by membrane-immobilized nanosized metals”, *Environmental Progress and sustainable energy*, 23: 232-242, (2004).

Mezule L., Denisova V., Briedis A., Reimanis M., Ozolins J., Junha T. “Disinfection effect of electrochemically generated chlorine on surface associated *Escherichia coli* in a drinking water system” *Desalination Water Treatment*, 51: 1-6, (2013).

Moraes P.B, Bertazzoli R “Electrodegradation of landfill leachate in a flow electrochemical reactor” *Chemosphere*, 58: 41, (2005).

Myers R.H. ve Montgomery D.C. “Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley ve Sons, New York 2.nd Edition 798s., (2002)

Nakajima N., Nakano T., Harada F., Taniguchi H., Yokoyama I., Hirose J., Daikoku E., Sano K. “Evaluation of disinfective potential of reactivated free chlorine in

pooled tap water by electrolysis" Journal of Microbiological Methods, 57: 163-173, (2004).

Nanayakkara, K.G., Nadeshani, Alam K., A.K.M., Zheng, Y.M., Chen J. P. "A low-energy intensive electrochemical system for the eradication of *Escherichia coli* from ballast water: Process development, disinfection chemistry, and kinetics modeling" , Marine Pollution Bulletin, 64: 1238–1245, (2012).

Nanayakkara, K.G.N., Zheng, Y.M., Alam, A.K.M.K., Zou S., Chen, J. P. "Electrochemical disinfection for ballast water management: Technology development and risk assessment" , Marine Pollution Bulletin, 63: 119–123, (2011).

Natishan, P.M. "The use of composite electrodes for the electrochemical disinfection of recirculating fluids" Faculty of the school of Engineering and Applied Science, University of Virginia, Doktora tezi. (1984)

Ninomiya K., Arakawa M., Ogino C., Shimizu N. "Inactivation of *Escherichia coli* by sonoelectrocatalytic disinfection using TiO₂ as electrode" Ultrasonics Sonochemistry, 20: 762–767, (2013).

Norton-Brandão, D., Scherrenberg S. M., Van Ier J. B " Reclamation of used urban waters for irrigation purposes-A review of treatment Technologies" Journal of Environmental Management, 122: 85-98, (2013).

Okochi, M, Lim T-K, Nakamura, N, Matsunaga T., " Electrochemical disinfection of drinking water using an activated-carbon-fiber reactor capable of monitoring its microbial fouling" Applied Microbiology and Biotechnology, 47: 18-22, (1997).

Oren, Y., Tobias, H., Soffer, A., "Removal of bacteria from water by electrosorption of porous carbon electrodes" Bioelectrochemistry and Bioenergetic, 11: 347-351, (1983).

Patermaraxis, G., and Fountoukidis, E., " Disinfection of water by electrochemical treatment" , Water Research, 24(12): 1491-1496, (1990).

Paugam, L., Delaunay, D., Rabiller-Baudry M. "Cleaning efficiency and impact on production fluxes of oxidising disinfectants on a PES ultrafiltration membrane fouled with proteins" Food Bioprod. Process, 88(4): 425-429, (2010).

Pontiè, M., Rejeb B. S., Legrand J. "Anti-microbial approach onto cationic-exchange membranes" Separation and Purification Technology, 101: 91-97, (2012).

Regula, C., Carretier, E., Wyart, Y., Gèsan-Guiziou, G., Vincent A., Boudot D., Moulin P., "Chemical cleaning/disinfection and ageing of organic UF membranes: A review" , Water Research, 56: 325-365, (2014).

Rivas, B.L., Pereira, E.D., Palencia, M., Sánchez J. "Water-soluble functional polymers in conjunction with membranes to remove pollutant ions from aqueous solutions", *Progress in Polymer Science*, 36: 294-322, (2011).

Särkkä, H., Vepsäläinen, M., Pulliainen, M., Sillanpää, M. "Electrochemical inactivation of paper mill bacteria with mixed metal oxide electrode", *Journal of Hazardous Materials*, 156: 208-213, (2008).

Sata, T, Yoshida, T, Matsusaki, K., "Transport properties of phosphonic acid cation exchange membrane, " *Journal Membrane Science*, 120: 101-110, (1996).

Sata, T., Emori, S.I., Matsusaki, K., "Transport properties of thermally responsive anion exchange membranes containing N-isopropylacrylamide in electrodialysis", *Journal Polymer Science*, 37: 793, (1999).

Schaefer, C. E., Andaya, C., Urtiaga, A. "Assessment of disinfection and by-product formation during electrochemical treatment of surface water using a Ti/IrO₂ anode", *Chemical Engineering Journal*, 264: 411-416, (2015).

Schmalz, V., Dittmar, T., Haaken, D., Worch, E., "Electrochemical disinfection of biologically treated wastewater from small treatment systems by using boron-doped diamond (BDD) electrodes – Contribution for direct reuse of domestic wastewater", *Water Research*, 43: 5260 – 5266, (2009).

Tanaka, T., Shimoda, M., Shionoiri, N., Hosokawa, M., Taguchi, T., Wake, H., and Matsunaga, T., "Electrochemical disinfection of fish pathogens in seawater without the production of a lethal concentration of chlorine using a flow reactor", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 116: 4,(2013)

Tchobanoglous, G., Stensel, H.D., Tsuchihashi, R., Burton, F., "Wastewater Engineering : Treatment and Resource Recovery, 5th ed.", Mc Graw Hill, New York 2018s, (2013).

Telaklı, F. "Sertlik Gideriminde Elektrodializ ve Elektroleiyonizasyon Yöntemlerinin Kullanılması", Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi(2008).

Tsolaki, E., Pitta, P., Diamadopoulou, E. "Electrochemical disinfection of simulated ballast water using *Artemia salina* as indicator", *Chemical Engineering Journal*, 156: 305-312, (2010).

U.S.EPA. "Environmental Pollution Control Alternatives: Drinking Water Treatment for Small Communities" EPA/625/5-90/025, (1990).

Wolfe, R.L. "Ultraviolet disinfection of potable water: current technology and research needs", *Environmental Science Technology*, 24: 768-773, (1990).

Wouters, P, Bos, Ad.P, Ueckert, J., "Membrane permeabilization in relation to inactivation kinetics of Lactobacillus species due to pulsed electric fields", Applied and Environmental Microbiology, 67: 3092-3101, (2001).

Xu, C., Rangaiah, G.P., Zhao X.S., "A computational study of the effect of lamp arrangements on the performance of ultraviolet water disinfection reactors" Chemical Engineering Science, 122: 299-306, (2015),

Xu, W., Li P., Dong B., "Electrochemical disinfection using the gas diffusion electrode system" , Journal of Environmental Sciences, 22(2): 204–210 (2010).



EKLER

EK.1. En Muhtemel sayı yöntemi *E.coli* sayım tablosu

Number of positive tubes			MPN
1 ml	0.1 ml	0.01 ml	per 100 ml
0	0	0	0
0	0	0	20
0	1	0	20
1	0	0	20
1	0	1	40
1	1	0	40
1	2	0	50
2	0	0	40
2	0	1	50
2	1	0	50
2	2	1	70
2	3	0	70
2	3	1	110
3	0	0	70
3	0	1	90
3	1	0	90
3	1	1	130
3	2	0	130
3	2	1	160
3	3	0	160
4	0	0	110
4	0	1	140
4	1	0	160
4	1	1	200
4	2	0	200
4	2	1	250
4	3	0	250
4	3	1	310
4	4	0	320
4	4	1	380
5	0	0	220
5	0	1	290
5	1	0	410
5	1	1	310
5	1	2	430
5	1	3	600
5	2	0	850
5	2	1	500
5	2	2	700
5	2	3	950
5	3	0	1 200
5	3	1	750
5	3	2	1 100
5	3	3	1 400
5	4	0	1 750
5	4	1	2 100
5	4	2	1 300
5	4	3	1 700
5	4	4	2 200
5	4	5	2 800
5	4	6	3 450
5	5	0	2 400
5	5	1	3 500
5	5	2	5 400
5	5	3	9 100
5	5	4	16 000

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Sabri KALKAN

Doğum Tarihi: 01.05.1990

Öğrenim Durumu:

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	Fen Bilimleri	Danışment Gazi Anadolu Lisesi	2004-2008
Lisans	F.E.F Kimya Bölümü	Çukurova Üniversitesi	2008-2010
Lisans	Kimya Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2010-2013
Yüksek Lisans	Kimya Mühendisliği	Mersin Üniversitesi- Universidad de Castilla La Mancha(İspanya)	2013-

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. KALKAN,S., ÜSTÜN,M., KARAER, Ö., ÖZEN, R.,GİZİR, A.M., KÖRBAHTİ, B.K.,“Electrochemical Synthesis and Charcterization of 4-Chlorophenol Polymer” Poster Presentation, 10th International Electrochemistry Meeting- KONYA 2013
2. KALKAN,S., ERDEM M.C., KÖRBAHTİ B.K., LLANOS J., RODRİGO M.A., “Electrochemical Wastewater Disinfection by Electrogenated Hypochlorite using Synthesized TiO₂-Doped Nafion Membrane”, Oral Presentation, 1st International Conference on Green Chemistry and Sustainable Technologies- İZMİR 2015
3. YILDIZ, E., SAMRA, İ.M., KALKAN,S., ERDEM M.C., KÖRBAHTİ, B.K.,“Response Surface Optimization for Electrochemical Degradation of Direct Blue 86 Textile Dye using Iron Electrodes”, Oral Presentation, 1st International Conference on Green Chemistry and Sustainable Technologies- İZMİR 2015

4. SONGÜR T., GÜLBİTTİ E., KALKAN,S., ERDEM, M.C., KÖRBAHTİ, B.K., "Process Optimization for Electrochemical Degradation of Telon Red A2FR Textile Dye Using Iron Electrodes", Oral Presentation, 11th International Electrochemistry Meeting- VAN 2015
5. KALKAN,S., ERDEM M.C., KÖRBAHTİ B.K., LLANOS J., RODRİGO M.A., "Wastewater Disinfection in a Continuous Electrolysis Cell with Nafion Cation-Exchange Membrane", Poster presentation,11th International Electrochemistry Meeting- VAN 2015

