



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



**DOKTORA TEZİ**

**FARKLI FOTOKATALİTİK REAKTÖRLER İLE İÇME  
SULARININ ARITILMASI VE DETOKSİFİKASYONU**

**Muhammed İberia AYDIN**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Çevre Mühendisliği Programı**

**DANIŞMAN  
Prof. Dr. Hüseyin SELÇUK**

**Aralık, 2017**

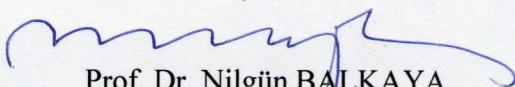
**İSTANBUL**

Bu çalışma, 25.12.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

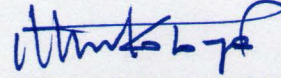
### Tez Jürisi



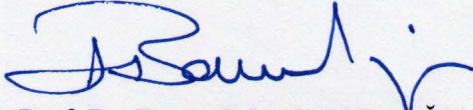
Prof. Dr. Hüseyin SELÇUK(Danışman)  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi



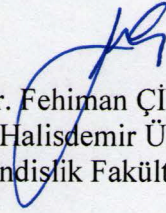
Prof. Dr. Nilgün BALKAYA  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Mehmet KOBYA  
Gebze Teknik Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Recep BONCUKCUOĞLU  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Fehiman ÇİNER  
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi



20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 55897 numaralı projesi ve TÜBİTAK 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı ile desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

Doktora çalışma konusunun belirlenmesinde ve çalışma süreçlerinde bana yardımcı olan, çalışmamın her aşamasında bilgi ve desteği ile yanımda olan saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Hüseyin SELÇUK'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen ve her zaman bana destek olan değerli hocalarım Doç. Dr. Serdar AYDIN, Doç. Dr. Kurtuluş ÖZCAN, Doç. Dr. Atakan ÖNGEN ve Doç. Dr. Emine ELMASLAR'a ve çalışma arkadaşlarım Damla ÖZAKTAÇ ve Nazlıcan KARABAĞ'a teşekkür ederim.

Her zaman bana karşı sabırlı davranan, hayatım boyunca bana yol gösteren ve bugünleri görmemi sağlayan değerli babam Mahmut AYDIN'a ve annem Sevim AYDIN'a minnettarım. Bir insanın hayatında isteyebileceği en güzel şeyin aile olduğunu bana öğrettikleri için ne kadar teşekkür etsem az gelir. Tez sürecinde desteklerini esirgemeyen, hep yanımda olan sevgili yol arkadaşım Merve OKUMUŞ'a müteşekkirim.

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı ile desteklenmiştir. Bilimin ve bilim insanlarına yönelik desteğin çok önemli olduğu bir dönemde desteklerini esirgemedikleri için teşekkür ederim.

Aralık 2017

Muhammed İberia AYDIN

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

|  |           |
|--|-----------|
| ÖNSÖZ .....  | iv        |
| İÇİNDEKİLER.....   | v         |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                      | viii      |
| TABLO LİSTESİ.....                                       | xvi       |
| SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ .....                          | xvii      |
| ÖZET .....   | xix       |
| SUMMARY .....  | xxi       |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                     | <b>1</b>  |
| 1.1. LİTERATÜR ÖZETİ.....                                | 1         |
| 1.2. TEZİN AMACI.....                                    | 2         |
| <b>2. GENEL KISIMLAR.....</b>                            | <b>3</b>  |
| 2.1. ELEKTRODİYALİZ PROSESİ .....                        | 6         |
| 2.1.1. Elektrodializ Prosesi Bileşenleri .....           | 9         |
| 2.1.1.1. Doğru Akım Güç Kaynağı .....                    | 9         |
| 2.1.1.2. İyon Seçici Membranlar .....                    | 9         |
| 2.1.1.3. Elektrotlar.....                                | 10        |
| 2.1.1.4. Elektrolit Solüsyonu.....                       | 11        |
| 2.1.1.5. Diğer bileşenler .....                          | 11        |
| 2.1.2. Elektrodializ Prosesinde Enerji İhtiyacı.....     | 12        |
| 2.1.3. Elektrodializ Hücrelerinde Kütle Taşımını.....    | 13        |
| 2.1.4. Elektrodializde Elektrokimyasal Bağlantılar ..... | 15        |
| 2.1.5. Konsantrasyon Polarizasyonu .....                 | 18        |
| 2.1.6. Elektrodializ Prosesi Tasarım Kriterleri .....    | 18        |
| 2.2. ELEKTRODİYALİZ TÜRLERİ .....                        | 19        |
| 2.2.1. Ters Elektrodializ.....                           | 19        |
| 2.2.2. Bipolar Membranlar ile Elektrodializ (BMED) ..... | 19        |
| 2.3. FOTOKATALİZÖRLER.....                               | 21        |
| 2.4. FOTOKATALİTİK ARITMA .....                          | 23        |
| 2.5. FOTOELEKTROKATALİTİK (FEK) ARITMA.....              | 24        |
| <b>3. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>                         | <b>26</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.1. KULLANILAN CİHAZLAR .....  | 26        |
| 3.1.1. Modern Water Microtox M500.....  | 26        |
| 3.1.2. Dionex ICS-1000 İyon Kromotografi .....  | 26        |
| 3.1.3. Shimadzu TOC-VWP - TOK Analiz Cihazı.....  | 27        |
| 3.2. TiO <sub>2</sub> NANOPARTİKÜLLERİNİN ÜRETİLMESİ.....   | 27        |
| 3.3. TiO <sub>2</sub> NANOFİLM KAPLI ELEKTROTLARIN HAZIRLANMASI .....   | 27        |
| 3.4. SOL-GEL METODU İLE ÜRETİLEN TiO <sub>2</sub> NANOPARTİKÜLLERİN<br>ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ .....  | 28        |
| 3.5. FOTOELEKTROKATALİTİK SİSTEMİN KURULMASI .....  | 28        |
| 3.5.1. Kesikli Döngüsüz Reaktör Tasarımı .....  | 29        |
| 3.5.2. Kesikli Döngülü Reaktör Tasarımı .....   | 32        |
| 3.6. TEZ SIRASINDA İZLENEN ÇALIŞMA PLANI .....  | 35        |
| <b>4. BULGULAR.....</b>   | <b>36</b> |
| 4.1. HAZIRLANAN TiO <sub>2</sub> NP'LERİNİN ÖZELLİKLERİ .....   | 36        |
| 4.2. TiO <sub>2</sub> NP KAPLI FOTOANODUN FOTOAKIM ÖZELLİKLERİ .....  | 37        |
| 4.3. KESİKLİ DÖNGÜSÜZ SİSTEMDE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....  | 38        |
| 4.3.1. Farklı Konsantrasyonlarda Fotoakım Özellikleri.....  | 38        |
| 4.3.2. Sistemde pH Değişimi ve Elektrot Boyutunun Etkisi.....   | 41        |
| 4.3.3. Elektrot Boyutunun Verime Etkisi.....  | 45        |
| 4.3.4. Sistemde İletkenlik Değişimi .....   | 47        |
| 4.4. KESİKLİ DÖNGÜSÜZ SİSTEMDE YAPILAN ARITMA ÇALIŞMALARI.....  | 47        |
| 4.4.1. Kesikli Döngüsüz Sistemde Yapılan NaCl Giderim Çalışmaları .....   | 48        |
| 4.4.1.1. <i>Suntest CPS+ Cihazı ile 1V Gerilim Altında Yapılan Çalışma</i> .....  | 48        |
| 4.4.1.2. <i>Xenon Lamba ile 1V Gerilim Altında Yapılan Çalışma</i> .....  | 50        |
| 4.4.1.3. <i>Xenon Lamba ile 3V Gerilim Altında Yapılan Çalışma</i> .....  | 53        |
| 4.4.1.4. <i>Xenon Lamba ile 5V Gerilim Altında Yapılan Çalışma</i> .....  | 55        |
| 4.4.1.5. <i>Xenon Lamba ile 10V Gerilim Altında Yapılan Çalışma</i> .....   | 57        |
| 4.4.1.6. <i>Farklı Membran Diziliminde NaCl Giderim Verimi</i> .....  | 59        |
| 4.4.1.7. <i>Farklı Gerilimlerde Çalıştırılan Kesikli Döngüsüz Sistemin NaCl<br/>                    Giderimlerinin Karşılaştırılması</i> .....              | 62        |
| 4.4.2. Kesikli Döngüsüz Sistemde Yapılan NaNO <sub>3</sub> Giderim Çalışmaları .....  | 64        |
| 4.4.2.1. <i>Xenon Lamba ile 1V Gerilim Altında Yapılan Çalışma</i> .....  | 64        |
| 4.4.2.2. <i>Xenon Lamba ile 1V Gerilim Altında Farklı Membran Dizilimi ile<br/>                    Yapılan Giderim Çalışması</i> .....                      | 68        |
| 4.4.2.3. <i>Xenon Lamba ile 1V Gerilim Altında Farklı Membran Diziliminde<br/>                    Solüsyon Değişimi ile Yapılan Giderim Çalışması</i> ..... | 69        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.4.2.4. Xenon Lamba ile 5V Gerilim Altında Farklı Membran Dizilimi ile Yapılan Uzun Süreli Giderim Çalışması..... | 74         |
| 4.5. ÇEVİRİMLİ SİSTEMDE NACL GİDERİM VERİMİ.....   | 74         |
| 4.6. PH TAMPONU VARLIĞINDA SİSTEM VERİMİ .....   | 76         |
| 4.7. PH TAMPONU VE KUVVETLİ ASİT VARLIĞINDA SİSTEM VERİMİ.....   | 80         |
| 4.8. ORGANİK MADDE GİDERİMİ .....  | 81         |
| 4.8.1. Kesikli Döngüsüz Sistemde Hümik Asit Giderimi.....  | 81         |
| 4.8.2. Kesikli Döngüsüz Sistemde pH Tamponu Varlığında Hümik Asit Giderimi.....                                    | 84         |
| 4.8.3. Organik Madde Giderim Verimlerinin Karşılaştırılması .....  | 86         |
| 4.9. DETOKSİFİKASYON ÇALIŞMALARI .....   | 87         |
| <b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>  | <b>90</b>  |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>  | <b>93</b>  |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>  | <b>101</b> |

## ŞEKİL LİSTESİ

|  | Sayfa No |
|--|----------|
| Şekil 2.1: Bir FKED reaktörün görünümü.....  | 5        |
| Şekil 2.2: Bir elektrodializ reaktöründe iyonların değişimi.....   | 6        |
| Şekil 2.3: Elektrodializ hücrelerinde konsantrasyon ve elektrik gerilimi gradyanlarının şematik gösterimi (Strathmann, 2004). ....                               | 15       |
| Şekil 2.4: Bipolar membran kullanımı ile birlikte ED sisteminde asit ve baz oluşumu .....  | 20       |
| Şekil 2.5: Bir fotokataliz prosesinde meydana gelen oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonları .....   | 22       |
| Şekil 2.6: Dalgaboyları ve enerji potansiyelleri arasındaki ilişki (Kisch, 2014) .....   | 22       |
| Şekil 2.7: Bir FEK reaktöründe oluşan anot ve katot reaksiyonları.....   | 25       |
| Şekil 3.1: Sol-Gel hazırlama metodu .....  | 28       |
| Şekil 3.2: Kesikli döngüsüz fotokatalitik elektrodializ hücresinin görünümü.....   | 30       |
| Şekil 3.3: Kesikli döngüsüz fotokatalitik elektrodializ hücresi .....  | 31       |
| Şekil 3.4: Kesikli döngüsüz sistemde tasarlanan membran dizilimleri.....   | 32       |
| Şekil 3.5: Kesikli döngülü fotokatalitik elektrodializ hücresinin görünümü .....   | 33       |
| Şekil 3.6: Kesikli döngülü fotokatalitik elektrodializ hücresi.....  | 33       |
| Şekil 3.7: Kesikli döngülü sistemde tasarlanan membran dizilimleri.....  | 34       |
| Şekil 3.8: Tez sırasında izlenen çalışma planının şematik gösterimi.....   | 35       |
| Şekil 4.1: Sol-Gel yöntemi ile sentezlenen TiO <sub>2</sub> NP'lerinin partikül boyut dağılımı.....  | 36       |
| Şekil 4.2: Sol-Gel yöntemi ile sentezlenen TiO <sub>2</sub> NP'leri ve farklı kalınlıklardaki quartz camların farklı dalgaboylarında absorpsiyon değerleri ..... | 36       |
| Şekil 4.3: Saf su ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde uygulanan gerilime karşılık fotoakım oluşumu.....   | 37       |
| Şekil 4.4: Saf su ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde farklı gerilimlerde potansiyometri tarama değerleri .....   | 38       |
| Şekil 4.5: 0,0029 M NaCl ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde uygulanan gerilime karşılık fotoakım oluşumu.....  | 39       |



|  |    |
|--|----|
| <b>Şekil 4.6:</b> 0,00575 M NaCl ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde uygulanan gerilime karşılık fotoakım oluşumu.....  | 39 |
| <b>Şekil 4.7:</b> 0,029 M NaCl ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde farklı gerilimlerde potansiyometri tarama değerleri .....  | 40 |
| <b>Şekil 4.8:</b> 0,00575 M NaCl ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde farklı gerilimlerde potansiyometri tarama değerleri .....  | 40 |
| <b>Şekil 4.9:</b> Farklı konsantrasyonlarda NaCl ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde potansiyometri tarama değerleri .....  | 41 |
| <b>Şekil 4.10:</b> Farklı gerilimler altında çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemin anot hücrelerinde meydana gelen pH değişikliği (0,00575 M NaCl, Kesikli sistem, Elektrot alanı: 25 cm <sup>2</sup> ).....                                  | 42 |
| <b>Şekil 4.11:</b> Farklı gerilimler altında çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemin katot hücrelerinde meydana gelen pH değişikliği (0,00575 M NaCl, Kesikli sistem, Elektrot alanı: 25 cm <sup>2</sup> ).....                                 | 42 |
| <b>Şekil 4.12:</b> Farklı elektrot boyutlarına göre anot ve katot hücrelerinde pH değişimi. (Elektrot I: 25 cm <sup>2</sup> , Elektrot II: 64 cm <sup>2</sup> , Gerilim: 1V, Işık: Xenon Lamba).....   | 43 |
| <b>Şekil 4.13:</b> Fotoanot bölgesi pH=3; Katot bölgesi pH=12 olduğu durumda sistemde süreye bağlı olarak pH değişimi (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ).....                        | 45 |
| <b>Şekil 4.14:</b> Fotoanot bölgesi pH=3; Katot bölgesi pH=12 olduğu durumda gerilim değişimine göre fotoakım oluşumu. ....  | 45 |
| <b>Şekil 4.15:</b> Döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64cm <sup>2</sup> ) .....  | 46 |
| <b>Şekil 4.16:</b> Anot ve katot hücrelerindeki solüsyonlar değiştirildikten sonra döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64cm <sup>2</sup> ).....   | 47 |
| <b>Şekil 4.17:</b> Döngüsüz kesikli sistemde ve solüsyon değişimi yapıldıktan sonra fotakım oluşumu (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Suntest CPS+; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) .....  | 48 |
| <b>Şekil 4.18:</b> Kesikli döngüsüz sistemde anot, katot ve konsantre hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Suntest CPS+; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) .....                            | 49 |
| <b>Şekil 4.19:</b> Döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Suntest CPS+; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ).....  | 49 |
| <b>Şekil 4.20:</b> Anot ve katot hücrelerindeki solüsyonlar değiştirildikten sonra döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Suntest CPS+; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) ..... | 50 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Şekil 4.21:</b> Döngüsüz kesikli sistemde ve solüsyon değişimi yapıldıktan sonra fotokim oluşumu (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon lamba, TiO <sub>2</sub> elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) .....                      | 50 |
| <b>Şekil 4.22:</b> Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) .....                                      | 51 |
| <b>Şekil 4.23:</b> Kesikli döngüsüz sistemde solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ).....           | 51 |
| <b>Şekil 4.24:</b> Döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) .....  | 52 |
| <b>Şekil 4.25:</b> Anot ve katot hücrelerindeki solüsyonlar değiştirildikten sonra döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> )..... | 52 |
| <b>Şekil 4.26:</b> Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 3V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) .....                                      | 53 |
| <b>Şekil 4.27:</b> Kesikli döngüsüz sistemde solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 3V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ).....           | 53 |
| <b>Şekil 4.28:</b> Döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 3V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) .....  | 54 |
| <b>Şekil 4.29:</b> Anot ve katot hücrelerindeki solüsyonlar değiştirildikten sonra döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 3V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> )..... | 54 |
| <b>Şekil 4.30:</b> Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 5V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) .....                                      | 55 |
| <b>Şekil 4.31:</b> Kesikli döngüsüz sistemde solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 5V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ).....           | 55 |
| <b>Şekil 4.32:</b> Döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 5V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) .....  | 56 |
| <b>Şekil 4.33:</b> Anot ve katot hücrelerindeki solüsyonlar değiştirildikten sonra döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 5V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> )..... | 56 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Şekil 4.34:</b> Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 10V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) .....  | 57 |
| <b>Şekil 4.35:</b> Kesikli döngüsüz sistemde solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 10V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ).....                           | 57 |
| <b>Şekil 4.36:</b> Döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 10V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ).....   | 58 |
| <b>Şekil 4.37:</b> Anot ve katot hücrelerindeki solüsyonlar değiştirildikten sonra döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 10V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ).....                 | 58 |
| <b>Şekil 4.38:</b> Anyon ve katyon membranlarının yerleri değiştirildikten sonra kesikli döngüsüz sistemin şeması.....  | 59 |
| <b>Şekil 4.39:</b> Farklı membran dizilimine göre döngüsüz kesikli sistemde ve solüsyon değişimi yapıldıktan sonra fotakım oluşumu (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba, elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ).....                          | 59 |
| <b>Şekil 4.40:</b> Farklı membran dizilimine göre kesikli döngüsüz sistemde anot hücrelerinde meydana gelen pH değişimi (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) .....                                    | 60 |
| <b>Şekil 4.41:</b> Farklı membran dizilimine göre kesikli döngüsüz sistemde solüsyon değişimi yapıldıktan sonra anot hücrelerinde meydana gelen pH değişimi (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> )..... | 60 |
| <b>Şekil 4.42:</b> Farklı membran dizilimine göre kesikli döngüsüz sistemde giderim ve birikim oranları (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) .....  | 61 |
| <b>Şekil 4.43:</b> Farklı membran dizilimine göre kesikli döngüsüz sistemde giderim ve birikim oranları (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) .....  | 61 |
| <b>Şekil 4.44:</b> Farklı membran dizilimine göre kesikli döngüsüz sistemde iletkenlik değişimi (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ) .....  | 62 |
| <b>Şekil 4.45:</b> Farklı membran dizilimine göre kesikli döngüsüz sistemde solüsyon değişimi yapıldıktan sonra iletkenlik değişimi (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm <sup>2</sup> ).....                         | 62 |
| <b>Şekil 4.46:</b> Farklı gerilimlerde çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemin gerilim farkına göre verim değişimi.....  | 63 |
| <b>Şekil 4.47:</b> Farklı çalışmalarda fotoanot hücrelerinde pH değişimleri .....   | 64 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Şekil 4.48:</b> NaNO <sub>3</sub> ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde uygulanan gerilime karşılık fotoakım oluşumu ve aynı şartlar altında NaCl ile çalıştırılan sistemle karşılaştırılması (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; Elektrot Alanı: 25 cm <sup>2</sup> , 64 cm <sup>2</sup> , Gerilim: 1V, Işık: Xenon Lamba).....        | 65 |
| <b>Şekil 4.49:</b> NaNO <sub>3</sub> ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde farklı gerilimlerde potansiyometri tarama değerleri ve aynı şartlar altında NaCl ile çalıştırılan sistemle karşılaştırılması (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; Elektrot Alanı: 25 cm <sup>2</sup> , 64 cm <sup>2</sup> , Gerilim: 1V, Işık: Xenon Lamba)..... | 65 |
| <b>Şekil 4.50:</b> Döngüsüz kesikli sistemde ve solüsyon değişimi yapıldıktan sonra fotoakım oluşumu (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64cm <sup>2</sup> ) .....  | 66 |
| <b>Şekil 4.51:</b> Döngüsüz kesikli sistemde pH değişimi (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64cm <sup>2</sup> ).....   | 66 |
| <b>Şekil 4.52:</b> Döngüsüz kesikli sistemde fotoanot, katot ve konsantre hücrelerinde konsantrasyon değişimi (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64cm <sup>2</sup> ) .....   | 67 |
| <b>Şekil 4.53:</b> Döngüsüz kesikli sistemde solüsyon değişimi yapıldıktan sonra konsantrasyon değişimi (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64cm <sup>2</sup> ) .....   | 67 |
| <b>Şekil 4.54:</b> Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen konsantrasyon değişimleri (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm <sup>2</sup> ) .....  | 68 |
| <b>Şekil 4.55:</b> Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen iletkenlik değişimleri (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm <sup>2</sup> ) .....   | 69 |
| <b>Şekil 4.56:</b> Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen konsantrasyon değişimleri (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm <sup>2</sup> ) .....  | 70 |
| <b>Şekil 4.57:</b> Kesikli döngüsüz sistemde birinci solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen konsantrasyon değişimleri (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm <sup>2</sup> ) .....  | 70 |
| <b>Şekil 4.58:</b> Kesikli döngüsüz sistemde ikinci solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen konsantrasyon değişimleri (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm <sup>2</sup> ).....  | 71 |
| <b>Şekil 4.59:</b> Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm <sup>2</sup> ) .....   | 71 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Şekil 4.60:</b> Kesikli döngüsüz sistemde birinci solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm <sup>2</sup> ) .....   | 72 |
| <b>Şekil 4.61:</b> Kesikli döngüsüz sistemde solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen iletkenlik değişimleri (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm <sup>2</sup> ) .....   | 72 |
| <b>Şekil 4.62:</b> Kesikli döngüsüz sistemde birinci solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen iletkenlik değişimleri (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm <sup>2</sup> ).....  | 73 |
| <b>Şekil 4.63:</b> Kesikli döngüsüz sistemde ikinci solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen iletkenlik değişimleri (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm <sup>2</sup> ) .....  | 73 |
| <b>Şekil 4.64:</b> Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen iletkenlik değişimleri (0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; E= 5V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm <sup>2</sup> ) .....   | 74 |
| <b>Şekil 4.65:</b> Kesikli döngülü sistemde Na <sup>+</sup> konsantrasyon değişimi (0,00525 M NaCl; Elektrot Alanı: 25 cm <sup>2</sup> , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba).....   | 75 |
| <b>Şekil 4.66:</b> Kesikli döngülü sistemde Na <sup>+</sup> konsantrasyon değişimi (0,00525 M NaCl; Elektrot Alanı: 64 cm <sup>2</sup> , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba).....   | 75 |
| <b>Şekil 4.67:</b> Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu varlığında konsantrasyon değişimi (Fotoanot-katot hücresi: 0,0025 M Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ve 0,0064 M NaNO <sub>3</sub> , Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; Elektrot Alanı: 25 cm <sup>2</sup> , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba) .....  | 76 |
| <b>Şekil 4.68:</b> Kesikli döngüsüz sistemde fotoanot-katot solüsyon çevriminden sonra pH tamponu varlığında konsantrasyon değişimi (Fotoanot-katot hücresi: 0,0025 M Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ve 0,0064 M NaNO <sub>3</sub> , Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; Elektrot Alanı: 25 cm <sup>2</sup> , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)..... | 77 |
| <b>Şekil 4.69:</b> Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu varlığında pH değişimi (Fotoanot-katot hücresi: 0,0025 M Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ve 0,0064 M NaNO <sub>3</sub> , Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; Elektrot Alanı: 25 cm <sup>2</sup> , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba).....  | 77 |
| <b>Şekil 4.70:</b> Kesikli döngüsüz sistemde fotoanot-katot solüsyon çevriminden sonra pH tamponu varlığında pH değişimi (Fotoanot-katot hücresi: 0,0025 M Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ve 0,0064 M NaNO <sub>3</sub> , Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; Elektrot Alanı: 25 cm <sup>2</sup> , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba).....            | 78 |
| <b>Şekil 4.71:</b> Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu varlığında iletkenlik değişimi (Fotoanot-katot hücresi: 0,0025 M Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ve 0,0064 M NaNO <sub>3</sub> , Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; Elektrot Alanı: 25 cm <sup>2</sup> , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba) .....   | 79 |

- Şekil 4.72:** Kesikli döngüsüz sistemde fotoanot-katot sölüsyon çevriminden sonra pH tamponu varlığında iletkenlik değışimi (Fotoanot-katot hücresi: 0,0025 M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve 0,0064 M NaNO<sub>3</sub>, Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba).....79
- Şekil 4.73:** Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu varlığında iletkenlik değışimi (Fotoanot hücresi: 0,0025 M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve 0,0064 M NaNO<sub>3</sub>, Katot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> ve 0,0025 M HCl Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba).....80
- Şekil 4.74:** Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu varlığında pH değışimi (Fotoanot hücresi: 0,0025 M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve 0,0064 M NaNO<sub>3</sub>, Katot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> ve 0,0025 M HCl Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba).....81
- Şekil 4.75:** Kesikli döngüsüz sistemde organik madde varlığında iletkenlik değışimi (Fotoanot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> ve 24 mg/L Hümik Asit, Katot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba) .....82
- Şekil 4.76:** Kesikli döngüsüz sistemde organik madde varlığında pH değışimi (Fotoanot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> ve 24 mg/L Hümik Asit, Katot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba) .....82
- Şekil 4.77:** Kesikli döngüsüz sistemde organik madde varlığında absorbands değışimi (Fotoanot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> ve 24 mg/L Hümik Asit, Katot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba) .....83
- Şekil 4.78:** Kesikli döngüsüz sistemde organik madde varlığında TOK değışimi (Fotoanot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> ve 24 mg/L Hümik Asit, Katot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba) .....83
- Şekil 4.79:** Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu ve organik madde varlığında iletkenlik değışimi (Fotoanot hücresi: 0,0025 M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> ve 24 mg/L Hümik Asit; Katot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub>, 0,0025 M; H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba) .....84
- Şekil 4.80:** Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu ve organik madde varlığında pH değışimi (Fotoanot hücresi: 0,0025 M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> ve 24 mg/L Hümik Asit; Katot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub>, 0,0025 M; H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba).....85
- Şekil 4.81:** Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu ve organik madde varlığında absorbands değışimi (Fotoanot hücresi: 0,0025 M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> ve 24 mg/L Hümik Asit; Katot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub>, 0,0025 M; H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Konsantre

|  |    |
|--|----|
| hücresi: 0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; Elektrot Alanı: 25 cm <sup>2</sup> , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba) .....   | 85 |
| <b>Şekil 4.82:</b> Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu ve organik madde varlığında TOK değişimi (Fotoanot hücresi: 0,0025 M Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , 0,0064 M NaNO <sub>3</sub> ve 24 mg/L Hümik Asit; Katot hücresi: 0,0064 M NaNO <sub>3</sub> , 0,0025 M; H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO <sub>3</sub> ; Elektrot Alanı: 25 cm <sup>2</sup> , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba) ..... | 86 |
| <b>Şekil 4.83:</b> Toplam organik karbon giderimlerinin karşılaştırılması .....  | 86 |
| <b>Şekil 4.84:</b> Absorbans değişiminin karşılaştırılması .....   | 87 |
| <b>Şekil 4.85:</b> Hümik asit toksisite sonuçları.....   | 87 |
| <b>Şekil 4.86:</b> Kesikli döngüsüz sistemde 24 mg/L hümik asit ve 0,0064 M NaNO <sub>3</sub> varlığında yapılan toksisite ölçüm sonuçları. (a) 1 sa; (b) 2 sa; (c) 3 sa; (d) 6 sa .....   | 88 |
| <b>Şekil 4.87:</b> Kesikli döngüsüz sistemde 6 saat sonunda 24 mg/L hümik asit, pH tamponu ve 0,0064 M NaNO <sub>3</sub> varlığında yapılan toksisite ölçüm sonuçları. ....  | 89 |

## TABLO LİSTESİ

|   | <b>Sayfa No</b> |
|---|-----------------|
| <b>Tablo 2.1:</b> Son yıllarda yapılan elektrodializ çalışmaları .....  | 7               |
| <b>Tablo 2.2:</b> Elektrodializde kullanılan membran türleri (Strathmann, 2016) .....                               | 10              |
| <b>Tablo 2.3:</b> 298°K’de su içerisinde iyonik hareketlilik (Atkins ve de Paula, 2010).....                        | 14              |
| <b>Tablo 2.4:</b> Literatürde BMED sistemi kullanılarak yapılan çalışmalar .....                                    | 21              |
| <b>Tablo 3.1:</b> Microtox deneyinde yüzde oranlara göre toksisitenin belirlenmesi (Coleman ve Qureshi, 1985) ..... | 26              |
| <b>Tablo 3.2:</b> Tez çalışmasında kullanılan membranların özellikleri.....   | 29              |
| <b>Tablo 4.1:</b> Farklı gerilimler ve ışıklar altında yapılan çalışmaların giderim ve birikim oranları.....        | 63              |



## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

| <b>Simgeler</b> | <b>Açıklama</b>             |
|-----------------|-----------------------------|
| <b>V</b>        | : Elektriksel gerilim, volt |
| <b>I</b>        | : Akım, amper               |
| <b>R</b>        | : Direnç, $\Omega$          |
| $\rho$          | : Materyalin özgül direnci  |
| $\Lambda_{eq}$  | : Ekvivalent iletkenlik     |
| <b>F</b>        | : Faraday sabiti            |

| <b>Kısaltmalar</b>                | <b>Açıklama</b>                |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| <b>FEK</b>                        | : Fotoelektrokatalitik         |
| <b>FK</b>                         | : Fotokatalitik                |
| <b>ED</b>                         | : Elektrodiyaliz               |
| <b>FKED</b>                       | : Fotokatalitik Elektrodiyaliz |
| <b>UV</b>                         | : Ultraviyole                  |
| <b>Na</b>                         | : Sodyum                       |
| <b>Cl</b>                         | : Klorür                       |
| <b>K</b>                          | : Potasyum                     |
| <b>NO<sub>3</sub></b>             | : Nitrat                       |
| <b>NaCl</b>                       | : Sodyum Klorür                |
| <b>NaNO</b>                       | : Sodyum Nitrat                |
| <b>Na</b>                         | : Sodyum                       |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>            | : Titanyum Dioksit             |
| <b>CdS</b>                        | : Kadmiyum Sülfür              |
| <b>F<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | : Demir (III) Oksit            |
| <b>ZnO</b>                        | : Çinko Oksit                  |
| <b>WO<sub>3</sub></b>             | : Tungsten Trioksit            |
| <b>ZnS</b>                        | : Çinko Sülfat                 |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>            | : Silisyum Dioksit             |
| <b>TOK</b>                        | : Toplam Organik Karbon        |
| <b>TTIP</b>                       | : Titanyum (IV) izopropoksit   |

|                        |                              |
|------------------------|------------------------------|
| <b>HNO<sub>3</sub></b> | : Nitrik Asit                |
| <b>DC</b>              | : Doğru Akım                 |
| <b>CEM</b>             | : Katyon Değişim Membranı    |
| <b>AEM</b>             | : Anyon Değişim Membranı     |
| <b>SCE</b>             | : Doygun Kalomel Elektrotu   |
| <b>NP</b>              | : Nanopartikül               |
| <b>LSV</b>             | : Lineer Voltametri Taraması |



## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

#### FARKLI FOTOKATALİTİK REAKTÖRLER İLE İÇME SULARININ ARITILMASI VE DETOKSİFİKASYONU

**Muhammed İberia AYDIN**

**İstanbul Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman : Prof. Dr. Hüseyin SELÇUK**

Küresel su kullanımı nüfusun ekonomik ve sanayi faaliyetlerinin gelişimi ve yaşam tarzına bağlı olarak artmaktadır. Sürdürülebilir çevre politikaları kapsamında alternatif su kaynaklarının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte küresel su kaynakları, insani faaliyetler nedeniyle nitrat, arsenik, pestisitler gibi organik ve inorganik kirlenmeye maruz kalmıştır. Bu kaynakların içme suyu kaynağı olarak kullanılabilmesi için ileri arıtma bir gereksinim haline gelmiştir. İleri arıtma yöntemleri ise yüksek enerji ihtiyacına sahiptir ve arıtma maliyetlerinin düşürülmesi için enerji ihtiyacının düşürülmesi veya yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması önemlidir.

Bu nedenlerle, bu çalışmada ışık altında çalışan yeni fotoelektrokatalitik elektrodializ reaktörleri tasarlanmıştır. Bu reaktörlerde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Sistemler farklı gerilimler, elektrot boyutları, kirleticiler ve membran dizilimlerinde çalıştırılmış ve sistemin arıtma verimleri karşılaştırılarak sistemin geliştirilebilmesi için gerekli olan yaklaşımlar tartışılmıştır.

İlk olarak kesikli döngüsüz reaktör farklı ışıklar altında çalıştırılmış, sistemin ürettiği fotoakım değerleri takip edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda Xenon lambanın en yüksek fotoakım değerini verdiği tespit edilmiştir. Xenon lamba altında farklı gerilimlerde yapılan çalışmalarda arıtma veriminin ve fotoakımın artan gerilim ile birlikte arttığı belirlenmiştir. Sistemin geriliminin artması, elektrodializ prosesinin verimini arttırmakta ve fotoakıma katkı sağlamaktadır. Bu

şekilde yapılan çalışmalarda yüksek gerilimlerde (5-10V) %40'a kadar sodyum giderimi elde edildiği tespit edilmiştir.

İkinci olarak sistemde pH değişimleri takip edilmiştir. Işık altında çalıştırılan sistemde fotoanot hücrelerinde fotokatalitik reaksiyonlar ve elektrodializ prosesinin etkisi ile pH değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Fotoanot bölgesinde meydana gelen pH düşüşünün sistem verimini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Fotoanot bölgesinde düşük pH ile çalıştırılan sistemde %2'lik bir sodyum giderimi gözlemlenmiştir. NaNO<sub>3</sub> ile yapılan çalışmalarda sistemin NaCl gideriminde olduğu gibi benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Kesikli döngülü çalıştırılan sistemde daha yüksek verim elde edilmiştir. Bunun nedeni pH değişiminin kontrol altında tutulabilmesi olduğu düşünülmektedir. Döngüsüz sistemde katot bölgesinde pH yükselirken, fotoanot bölgesinde düştüğü gözlemlenmiştir. Döngülü sistemde katot ve fotoanot hücreleri sürekli karışım halinde olduğu için pH'ta değişim gözlemlenmemiştir. Bu sayede konsantrasyon polarizasyonunun da önüne geçilebildiği düşünülmektedir.

Sistemde organik madde giderimi için hümik asit model kirletici olarak kullanılmış, fotoanot hücrelerinde %56 civarında bir giderim olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte aynı numunede toksisitenin de azaldığı görülmüştür.

Aralık 2017, 125 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** Fotokataliz, elektrodializ, membran, fotoelektrokataliz

## **SUMMARY**

### **Ph.D. THESIS**

#### **DETOXIFICATION AND TREATMENT OF DRINKING WATER WITH DIFFERENT PHOTOCATALYTIC REACTORS**

**Muhammed İberia AYDIN**

**İstanbul University**

**Institute of Graduate Studies in Science and Engineering**

**Department of Environmental Engineering**

**Supervisor : Prof. Dr. Hüseyin SELÇUK**

The global water use is increasing depending on the development of industry, changes in lifestyle, economic and industrial activities due to population growth. In the context of sustainable environmental policies, development of alternative water resources is needed. However, global water resources have been subjected to organic and inorganic pollutants such as nitrate, arsenic, pesticides due to human activities. For these resources to be utilized as a source of drinking water, advanced treatment has become a necessity. Advanced treatment methods have high energy requirements and it is important to reduce energy needs or use renewable energy sources to reduce treatment costs.

For these reasons, novel photoelectrocatalytic electro dialysis reactors designed in this study and the changes in these reactors have been examined. The systems were operated at different potentials, electrode sizes, contaminants and membrane arrays. The treatment efficiencies and the other changes of the system were compared.

Initially, the batch reactor without cycle was operated under different lights, and the photocurrent values produced by the system were monitored. It has been found that the Xenon lamp gives the highest photocurrent value in the obtained results. It has been found that the efficiency of the treatment and photocurrent generation increased with increasing potential

under Xenon lamp illumination. Increasing the potential of the system increases the efficiency of the electro dialysis process and provides a supplement for photocurrent. Studies have shown that sodium uptake of up to 40% is obtained at high potentials (5-10 V).

Secondly, pH changes were monitored in the system. Photocatalytic reactions in the photoanode cell and the effect of the electro dialysis process decrease pH of photoanode cell in the system operated under light. It has been observed that low pH in the photoanode reduces system efficiency. Sodium removal of 2% was observed in the system at low photoanode cell pH values. Studies with  $\text{NaNO}_3$  have shown that the system gives similar results as  $\text{NaCl}$  removal. Higher efficiency has been achieved in the batch reactor with cycled system. In the non-cyclic system, while the pH was rising at the cathode section, it was observed a decrease of pH at the photoanode section. In the cycling system, no change in pH was observed because the cathode and photoanode cells were in a continuous mix. It is found that concentration polarization may be avoided in this respect.

Humic acid was used as a model contaminant for organic matter removal in the system, and it was observed that the photoanode cell had a removal of about 56%. A decrease in toxicity is also observed in the same sample.

December 2017, 125 pages.

**Keywords:** Photocatalysis, electro dialysis, membrane, photoelectro dialysis

# 1. GİRİŞ

## 1.1. LİTERATÜR ÖZETİ

Nanoteknoloji, nanoboyutta atom ve moleküllerin kontrol edilerek mükemmel özelliklere sahip yeni yapıların oluşturulduğu disiplinlerarası bir alandır. Geliştirilen nanopartiküller ve nanofilmler ile fotokatalizörlerin güneş ışığını kullanma kapasitesinin artırılması konuları solar enerji ve solar arıtma alanında üzerinde en çok çalışılan alanlardandır.

Fotoelektrokatalitik (FEK) arıtma, fotokatalitik arıtmaya göre güneş enerjisini 5-20 kat gibi çok daha fazla verimle kullanabilen henüz gelişmeye başlamış bir arıtma sistemidir. FEK sistemleri yapı olarak elektrodializ sistemlerine benzemektedir. FEK sistemi iki elektrot arasında iyon değiştirici membranlar ile ayrılmış hücrelerden oluşur. Elektrotlardan biri fotokatalizör ile kaplıdır, bu sayede güneş ışınları içerisindeki UV ışığı ile elektrik ihtiyacı karşılanır. İyon değişimi yapabilen seçici geçirgen membranlar sayesinde, istenmeyen iyonların su kaynağından ayrılması sağlanmaktadır. Literatürde ağır metaller, azo boyaları ve ilaç atıklarının arıtılması için adsorpsiyon-kemisorpsiyon, elektrokimyasal arıtma, iyon değiştirme, fotokatalitik oksidasyon gibi yöntemler sıkça araştırılmıştır. Fotoelektrokatalitik sistemler ile atıksuların arıtılması konusunda çeşitli çalışmalar olmasına rağmen içme sularının arıtılması konusunda yeterli çalışma bulunmamaktadır.

Elektrodializ (ED) prosesi, elektroliz ve diyaliz proseslerinin birleştirilerek belirli bir elektrik gerilimi altında, anyon ve kation seçici membranlar kullanılarak sudan iyonların ayrılması işlemidir. Endüstride suların tuzsuzlaştırılması, atıksu miktarının azaltılması, saf su üretilmesi ve değerli yan ürünler elde edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Her ne kadar düşük kütleli iyonların ayrılmasında başarılı sonuçlar verse de, enerji maliyeti yüksektir ve suda iyon halinde bulunmayan maddelerin arıtılması konusunda uygulanabilir bir yöntem değildir.

Bu bağlamda fotoelektrokatalitik arıtma ve elektrodializ prosesinin birleştirilerek yeni bir arıtma sisteminin oluşturulması planlanmaktadır. Elektrodializ sistemi özellikle organik maddelerin gideriminde yetersiz kalmaktadır, bununla birlikte fotokatalitik arıtma ile ortaya serbest radikaller çıkmakta ve bu serbest radikaller yardımı ile organik maddelerin parçalanması mümkün hale gelmektedir. İki sistemin birleştirilmesi ile birlikte elektrodializ

prosesi ile giderilemeyen organik maddelerin oksidasyonunun mümkün hale gelebileceği düşünülmektedir. Ayrıca fotokatalitik arıtma ile güneş enerjisi ya da UV ışığı ile fotoakım oluşumu gerçekleşmektedir. Yüksek enerji ihtiyacı olan elektrodializ sisteminin akım ihtiyacının bir kısmının fotokatalitik proses sonucu oluşan fotoakım ile sağlanabileceği ve bu sayede enerji maliyetinin düşürülebileceği düşünülmektedir.

## 1.2. TEZİN AMACI

Bu çalışmada fotokataliz prosesi ile elektrodializ prosesinin bütünleşik bir sistem haline getirilerek bir fotokatalitik elektrodializ (FKED) prosesinin oluşturulması amaçlanmaktadır. Bu sayede elektrodializ prosesinin iyonları ayırabilme özelliği ile fotokataliz prosesinin ortamdaki maddeleri parçalayabilme özelliğinin birleştirilmesi amaçlanmaktadır. Işık ile uyarılan fotokatalizörlerin değerlik bandındaki bir elektronu iletkenlik bandına çıkarabilmesi özelliği sayesinde sisteme ekstradan akım sağlayacağı ve elektrik ihtiyacını azaltacağı düşünülmektedir. Bu sayede düşük gerilimler altında iyon değişimi yapabilen, aynı zamanda da içme sularının içerisinde bulunabilecek olan organik maddeleri daha basit yapılara parçalayabilecek bir sistem olacağı planlanmaktadır.

Kesikli döngülü ve kesikli döngüsüz olarak iki farklı şekilde kurulması planlanan FKED sisteminin solar ışık altında düşük elektrik sarfiyatı ile çalışabileceği, bu sayede su arıtımının daha ucuz ve güvenli bir hale getirebileceği düşünülmektedir.

Çalışmada FKED sisteminin solar arıtma verimine içme suyu bileşenlerinin (iletkenlik, anyonlar, pH, vb.) ve FKED işletme koşullarının (ışık şiddeti, elektrik gerilimi, vb.) etkileri laboratuvar ölçeğinde araştırılacaktır. Çalışmada özellikle yeraltı sularında bulunan NaCl ve NaNO<sub>3</sub> arıtılacak kimyasallar olarak seçilmiştir. Farklı ışıklar, farklı elektrik gerilimleri ve farklı işletme şartlarında sistemin verimliliği ele alınarak sistemin çalışma prensipleri açıklanmaya çalışılacaktır.



## 2. GENEL KISIMLAR

Küresel su kullanımı nüfusa bağlı olarak ekonomik gelişim, yaşam tarzlarındaki değişimler, ticari ve sanayi faaliyetlerin artması gibi sebeplerle artmaktadır. Yaklaşık olarak 1,4-2,1 milyar insanın Afrika, Akdeniz bölgesi, Orta Doğu, Yakın Doğu, Güney Asya, Kuzey Çin, Avustralya, ABD, Meksika gibi kuraklık riski bulunan bölgelerde yaşadığı tahmin edilmektedir (Arnell, 2004, Vorosmarty ve diğ., 2000). Bununla birlikte küresel iklim değişikliği nedeniyle 3,2 milyara kadar kişinin 2100 yılına kadar kuraklık sıkıntısı yaşayacağı düşünülmektedir (Carmo-Silva ve diğ., 2009). Su sıkıntısı özellikle Türkiye, İspanya, Portekiz, İtalya, Fransa, Yunanistan, İngiltere gibi Avrupa ülkeleri için de kritik bir sorun haline gelmektedir. Değişen iklim, artan nüfus, azalan kaynaklar ve artan su ve enerji ihtiyaçları ile mücadele edebilmek için yeni enerji ve düşük maliyetli arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi sürdürülebilir gelişme yaklaşımı için zaruridir.

Alternatif su kaynaklarının geliştirilmesi bütünleşik su kaynağı yönetimi kapsamında en belirgin yöntemlerden biridir. Fakat zaman içerisinde su kaynakları nitrat, arsenik, pestisitler gibi organik ve inorganik kirlenmeye maruz kalmıştır. Bu nedenle ileri arıtma yöntemleri gerekli hale gelmektedir. Fakat neredeyse bütün ileri arıtma yöntemleri yüksek enerji ihtiyacına sahiptir, bu durum arıtma maliyetinin düşürülmesini önemli hale getirmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş enerjisi arıtma maliyetini düşürerek ekonomiye katkı sağlama ve çevresel etkileri düşürme potansiyeline sahiptir (Quteishat ve Abu-Arabi, 2006). Güneş enerjisi güneş havuzlarında termal enerji kaynağı, fotovoltaik hücrelerde elektrik üretimi gibi alanlarda kullanılabilir. Ayrıca, suların tuzsuzlaştırılması konusunda doğrudan ya da dolaylı olarak kullanılabilmesi mümkündür. Güneş enerjisi santralleri dolaylı olarak çok aşamalı ani distilasyon (Khoshrou ve diğ., 2017), membran distilasyonu (Rahaoui ve diğ., 2017), evaporasyon (Sharan ve Bandyopadhyay, 2017), ters ozmos (Muñoz ve Becerril, 2014) ve elektrodializ (Gonzalez ve diğ., 2017, Fernandez-Gonzalez ve diğ., 2015) proseslerinde kullanılabilir. Güneş panellerinin verimliliği bölgeden bölgeye değişmekte, artan sıcaklıkla birlikte enerji üretim verimliliği azalabilmektedir. Aynı zamanda fotovoltaik hücrelerin üretiminde Cd, Pb, Ni gibi yüksek toksisiteye sahip maddeler kullanılabilir, son yıllarda çevre kurumları tarafından bu maddemelerin kullanımına kısıtlamalar getirilmiştir.

Doğrudan çalışan solar sistemler, güneş enerjisi santrallerinden bağımsız olarak çalışırlar. Geçtiğimiz yıllarda solar buharlaştırma, solar distilasyon, fotokatalitik arıtma gibi arıtma teknolojileri doğrudan güneş ışığı altında çalışabilecek şekilde pilot ve tam ölçekli olarak geliştirilmiştir (Zhang ve diğ., 2018, Onotri ve diğ., 2017, Dhatshanamurthi ve diğ., 2017). Güneş enerjisi ile çalışan sistemler, aynı zamanda güneş ışınlarının belirli bir kısmını oluşturan UV ışınları sayesinde pek çok toksik organik maddeyi yan ürün oluşturmadan daha basit ve zararsız formlara oksidize edebildiği için güvenli olarak nitelendirilse de, bazı zararlı yan ürünler oluşturabileceğine dair çalışmalar bulunmaktadır (Vasilache ve diğ., 2013). Arsenik, ağır metaller, nitrat gibi inorganik kirleticilerin arıtımında elektrodializ prosesi kullanılabilir (Onorato ve diğ., 2017). Bununla birlikte hem inorganik hem de organik kirleticilerin giderilebildiği bütünleşik bir sisteme ihtiyaç duyulmaktadır (Bacher ve diğ., 2017).

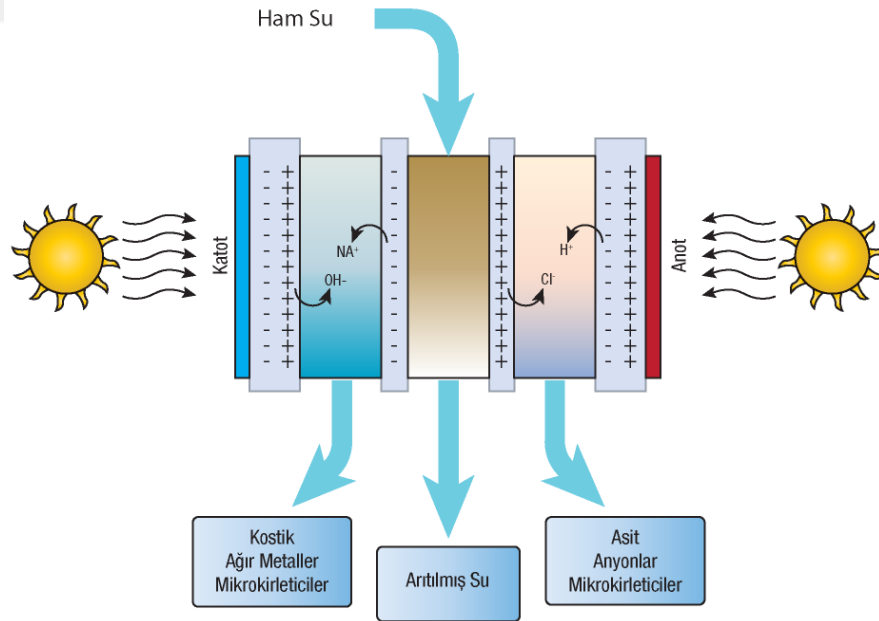
Nanoteknoloji malzeme bilimi, elektronik, optik, ilaç, plastik, enerji ve çevre gibi pek çok alanda uygulama ve yeni özellikler sağlayan en az 1 nm boyutundaki atom ve molekülleri kontrol eden disiplinler arası bir teknolojidir (Qian ve Hinestroza, 2004, Zhou ve diğ., 2012). Dünyadaki fosil yakıtlarının sınırlı olması nedeniyle alternatif enerjilerin geliştirilmesi üzerine çok yoğun çalışmalar yapılmıştır. Alternatif enerjiler içerisinde çevresel kirlilik problemleri açısından en temiz ve en ucuzu güneş enerjisidir.

Yarı iletken maddeler arasında titanyum dioksit ( $TiO_2$ ), ucuz, uygun bant aralığına sahip olması, kararlı olması ve sudaki zararlı organik bileşikleri UV ışınlaması altında oksijen, su ve  $CO_2$  gibi zararsız bileşiklere dönüştürmesi nedeniyle en çok kullanılan katalizördür (Gaya, 2013). Günümüzde  $TiO_2$  gibi yarı iletken katalizörlerin kullanıldığı fotokatalitik sistemler güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi (Lianos, 2011, Watanabe ve diğ., 1999), hava (Watanabe ve diğ., 1999) ve su arıtımından (Chong ve diğ., 2010, Bahnemann, 2004, Lee ve diğ., 2016) kendi kendini temizleyen ekolojik malzemelerin üretimine kadar pek çok alanda kullanılmaya başlanmıştır (Doganli ve diğ., 2016, Bedford ve Steckl, 2010).

$TiO_2$ 'nin su arıtımında uygulanabilmesi için son 20 yıldan beri yukarıda sıralanan üç problem üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalardan en önemlisi çeşitli nanofilm kaplama metotlarının geliştirilmesidir (Gupta ve Tripathi, 2011, Butterfield ve diğ., 1997, Hosono ve diğ., 2007). Günümüzde spreycaplama (Fujihara ve diğ., 2007), sputtering kaplama (Cahill ve Allen, 1994), elektroforetik kaplama (Lin ve diğ., 2003), spin kaplama (Firdaus ve diğ., 2012), kimyasal buhar kaplama (Yeung ve Lam, 1983) gibi çok çeşitli

kaplama teknikleri geliştirilmiştir. Nanofilm kaplama ile birlikte  $TiO_2$  çeşitli yüzeylere tutturularak  $TiO_2$  nanopartiküllerinin sudan ayrılması problemi büyük ölçüde çözülmüştür. Güneş ışığının yaklaşık %6.3'ü UV ve %93.6'ü görünür ışıktır. Dolayısı ile  $TiO_2$ 'in UV ışınlarının yanı sıra görünür dalga boyundaki güneş ışıklarını da kullanabilmesi için  $TiO_2$  çok çeşitli metal ve metal olmayan doping işlemleri çalışmaları çok yoğun bir şekilde devam etmektedir (Selcuk ve diğ., 2004b, Rahmani ve diğ., 2011, Akpan ve Hameed, 2010).

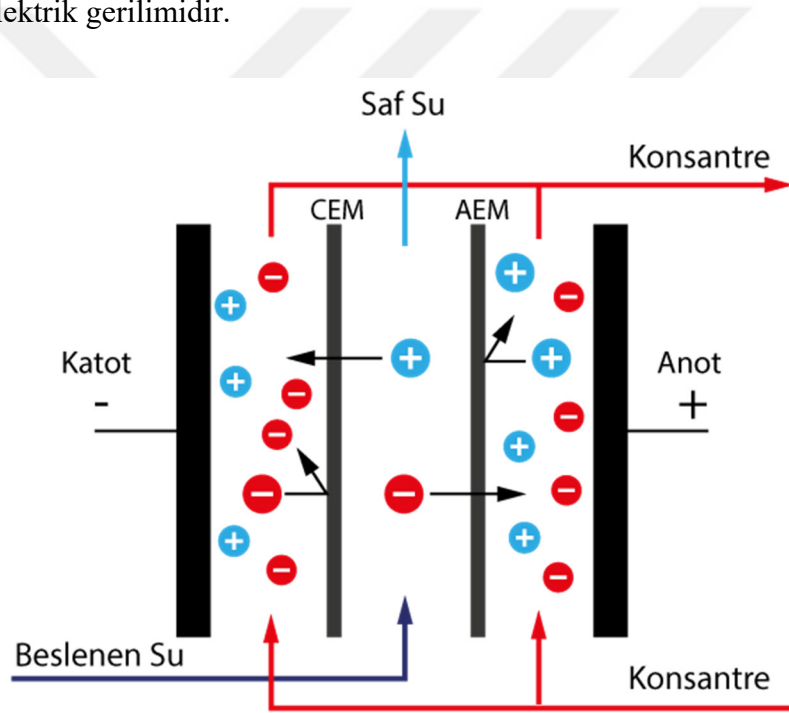
Literatürde  $TiO_2$  gerek adsorpsiyon gerekse fotokatalizör olarak su arıtımı için yaygın olarak araştırılmıştır (Lee ve diğ., 2001, Ryu ve Choi, 2007, Selcuk ve diğ., 2004a, Selcuk ve diğ., 2003, Selcuk ve diğ., 2004c, Tanaka ve diğ., 1996, Zhang ve diğ., 2009, Zhong ve diğ., 2006).  $TiO_2$  nanotüpleri ile azo boyalarının toksik özelliklerinin giderilebildiği bildirilmiştir (Ferraz ve diğ., 2013). Literatürde elektrokimyasal (Kobyva ve diğ., 2003, Kobyva ve diğ., 2009), iyon değiştirme (Rengaraj ve diğ., 2001), adsorpsiyon-kemisorpsiyon (Faust ve Aly, 2013), fotokatalitik oksidasyon (Chong ve diğ., 2010, Lee ve diğ., 2016) gibi yöntemler su arıtımında kullanılmıştır.  $TiO_2$  nanopartiküllerinin yüzeylere nanofilm olarak kaplanması ve fotokatalitik arıtma amacıyla kullanılması son yıllarda geliştirilmiş bir tekniktir.



Şekil 2.1: Bir FKED reaktörünün görünümü

## 2.1. ELEKTRODİYALİZ PROSESİ

Elektrodiyaliz ünitesi üzerinden bir gerilim geçen anyon ve katyon elektrotların arasında bulunan anyon ve katyon seçici membranlardan oluşur (Şekil 2.2). Anyon ve katyon seçici membranların arasında kalan bölüme hücre adı verilmektedir. Anot ve katot arasında oluşturulan gerilim ile pozitif yüklü iyonların katoda, negatif yüklü iyonların ise anoda hareket etmeleri sağlanır. Katyonlar negatif yüklü katyon seçici membranlardan geçebilirken, pozitif yüklü anyon seçici membranlar tarafından tutulur. Anyonlar için de tam tersi söz konusudur. Sonuç olarak bazı hücrelerde iyon birikimi meydana gelirken, bazılarında da iyon miktarında azalma meydana gelir. Elektrodiyaliz ünitesinde iyonların hareketini sağlayan sürücü kuvvet ise uygulanan elektrik gerilimidir.



Şekil 2.2: Bir elektrodiyaliz reaktöründe iyonların değişimi.

Elektrodiyaliz prosesi endüstride tuzlu suların tuzsuzlaştırılmasında sıkça kullanılmaktadır (Mei ve Tang, 2018). Bunun dışında acı suyun içme suyu haline getirilmesi (Malek ve diğ., 2016) ve kimyasal üretiminde kullanımı da mümkündür (Tablo 2.1). Ticari elektrodiyaliz sistemleri 200'e kadar hücreden oluşabilmektedir. Her ne kadar çoklu hücre kullanımının avantajları olsa da, ilk kurulum, işletme ve elektrik maliyetleri dezavantajlı yanlarındandır (Pirsahab ve diğ., 2016).

**Tablo 2.1:** Son yıllarda yapılan elektrodializ çalışmaları

| Uygulama  | Proses Türü         |                             |
|---|---------------------|-----------------------------|
| Kanalizasyon atıksularından tarımsal ihtiyaçlara yönelik su elde edilmesi   | Büyük ölçekli       | (Abou-Shady, 2017)          |
| Çinko kaplama sanayisinden ürün geri kazanımı   | Laboratuvar ölçekli | (Bittencourt ve diğ., 2017) |
| Endüstriyel kimyasal üretimi atıksularının arıtımı  | Laboratuvar ölçekli | (Wei ve diğ., 2017)         |
| Atıksu çamurlarından fosfor geri kazanımı   | Pilot ölçekli       | (Červenková ve diğ., 2017)  |
| Elektrokaplama endüstrisi atıksularından ürün geri kazanımı   | Endüstriyel ölçekli | (Benvenuti ve diğ., 2017)   |
| Badem endüstrisi atıksularının arıtılması   | Laboratuvar ölçekli | (Valero ve diğ., 2015)      |
| Tuzsuzlaştırma endüstrisi atıksularından enerji elde edilmesi   | Laboratuvar ölçekli | (Tedesco ve diğ., 2015)     |
| Fermentasyon atıklarından amonyum sülfat geri kazanımı  | Laboratuvar ölçekli | (Lee ve diğ., 2003)         |
| Düşük enerjili desalinasyon ve sıfır atık yaklaşımı ile minimize edilmiş sıvı deşarjı için elektrodializin kullanılması | Pilot ölçekli       | (Tufa ve diğ., 2015)        |

Elektrodializ prosesi basınç sürücülü membran sistemleri ile karşılaştırıldığında membran tıkanması ters elektrodializ uygulaması sayesinde asgari seviyelere indirilebilmektedir. Gerilimin ters olarak uygulandığı ters elektrodializ (EDR) prosesinde, arıtma işlemi tersine çevrilerek membran üzerindeki birikim azaltılabilmektedir. Bununla birlikte yüksek konsantrasyonlarda çalışıldığında membrandan iyonların sızması istenmeyen bir durumdur. Ayrıca elektrodializ prosesinde sadece iyonların ayrılması mümkündür. Her ne kadar organik maddelerin iyon yapısındaki maddelerden ayrılması mümkün olsa da, organik madde giderimi gerçekleştirilememektedir, bu nedenle bazı durumlarda oksidasyon ve ayırma verimlerinin yükseltilebilmesi için ön arıtma uygulanması gerekebilmektedir (Yan ve diğ., 2015). Elektrodializ prosesinin avantajları ve dezavantajları şu şekilde sıralanabilir (Asano, 2007);

#### Avantajlar:

- Ön arıtma gereksinimi diğer membran proseslerine göre daha azdır. Genel olarak kaba filtreleme yeterli olmaktadır,
- Düşük basınçta çalıştırılabilmektedir,
- EDR prosesi ile birlikte membran ömrü uzatılabilmektedir, aynı zamanda bakım aralıkları daha uzundur,
- Membran temizliğinde antiskalant ihtiyacı olmamaktadır,
- Yüksek iyon konsantrasyonuna sahip suların arıtımında kullanılabilirliktedir,
- Bipolar membranların kullanılması ile birlikte atıksulardan asit ve baz elde edilmesi mümkündür (Tongwen, 2002),
- EDR sistemleri 1 ppm'e kadar serbest bakiye klor konsantrasyonu varlığında çalıştırılabilmektedir (Pilat, 2001).
- EDR membranları, ters ozmos membranlarıyla karşılaştırıldığında daha uzun membran ömrüne sahiptir (EDR membranları: 7-10 sene, ters ozmos membranları: 5-7 sene) (Pilat, 2001).

#### Dezavantajlar:

- Düşük çözünürlüğe sahip tuzların membran yüzeyinde birikerek tıkanmaya neden olabilmektedir,
- Membranlarda organik maddeler nedeniyle tıkanma problemi oluşabilmektedir,
- Mikroorganizmaların ve organik kirleticilerin ayrımında verimli değildir,
- Enerji maliyeti yüksek olabilmektedir,
- Deneyimli personel ihtiyacı daha fazladır.

Elektrodiyaliz, uzun süredir laboratuvar ve ticari ölçekli olarak araştırılmaktadır. Bununla birlikte proseste karşılaşılabilen temel problemlerin çözülebilmesi ve uygulanabilirliğinin artırılması için araştırma yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle daha yüksek iyon değiştirme kapasitesine ve düşük elektrik direncine sahip membranların geliştirilmesi gerekmekte, aynı zamanda membranların kimyasal ve termal stabilitelerinin artırılması gerekmektedir (Strathmann, 2010). Proses maliyetini etkileyen durumlardan biri olan membran maliyetinin de azaltılması gerekmektedir.

### **2.1.1. Elektrodializ Prosesi Bileşenleri**

Elektrodializ prosesinin çalıştırılabilmesi için iyon seçici membranlar, doğru akım kaynağı, elektrotlar ve elektrolit sıvılarına ihtiyaç duyulmaktadır.

#### **2.1.1.1. Doğru Akım Güç Kaynağı**

Elektrodializ sisteminde sürücü kuvvet iki elektrot arasında oluşturulan gerilim ile sağlanmaktadır. Bu gerilimin sağlanabilmesi için, elektrotlara bir doğru akım güç kaynağı ile elektrik gerilimi uygulanması gerekmektedir. Doğru akım kaynakları farklı volt ve amperlerde çalışabilen sistemlerdir.

#### **2.1.1.2. İyon Seçici Membranlar**

Elektrodializ prosesinde iyon seçici membranlar anyon ve katyonların taşınımı için kullanılmaktadır. Bu membranlar türlerine göre sınıflandırılabilceği gibi, çalışma prensiplerine göre de tasnif edilebilmektedirler. Bu membranlar genel olarak hidrokarbon ya da kısmen halojenli hidrokarbonlardan, perfluorokarbon polimerlerinden veya inorganik malzemelerden elde edilebilmektedir. İyon değiştirici membranların genel özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir. Genel olarak elektrodializ membranlarında aranan başlıca özellikler şöyledir (Strathmann, 2016);

- Yüksek seçicilik, bir iyon seçici membran karşıt iyonları yüksek oranda geçirirken, yapısıyla aynı değeriğe sahip iyonların geçişine izin vermemelidir,
- Düşük elektrik direnci
- Yüksek mukavemet ve stabilite
- Yüksek kimyasal stabilite
- Düşük maliyet

İyon değiştirici membranların tarihsel gelişimi incelendiğinde, genel olarak bu özelliklerin hepsinin sağlanması oldukça zordur. Çoğu zaman farklı özellikleri belirleyen parametreler, diğer özelliklerin etkilerini azaltır ya da yok eder.

**Tablo 2.2:** Elektrodializde kullanılan membran türleri (Strathmann, 2016)

| Membran Türü                          | Yapısı   | Membran İçeriği   |
|---------------------------------------|--|---|
| Katyon Değiştirici                    | Anyon yapısında, katyon geçişine izin verirken anyonları itme özelliğine sahip sabit iyonlar   | SO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>COO <sup>-</sup><br>PO <sub>3</sub> <sup>2-</sup><br>PHO <sub>2</sub> <sup>-</sup><br>AsO <sub>3</sub> <sup>2-</sup><br>SeO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
| Anyon Değiştirici                     | Katyon yapısında, anyon geçişine izin verirken katyonları itme özelliğine sahip sabit iyonlar  | <sup>+</sup> NH <sub>2</sub> R<br><sup>+</sup> NH R <sub>2</sub><br><sup>+</sup> N R <sub>3</sub><br><sup>+</sup> P R <sub>3</sub><br><sup>+</sup> S R <sub>2</sub>                   |
| Amfoterik İyon Değiştirici Membranlar | Negatif ve pozitif yüklü iyonlar rastgele dağıtılarak sabitlenir   |   |
| Bipolar Membran                       | Anyon ve katyon seçici membranların birbirine yapıştırılması ile elde edilir   |   |
| Mozaik iyon değiştirici membran       | Makroskopik polimer yapıları üzerine sabitlenmiş negatif yüklü iyonlar ve nötr polimer matriks üzerine rastgele dizilmiş pozitif yüklü iyonlar | Cr(OH) <sub>3</sub><br>Fe(OH) <sub>3</sub><br>-NR <sub>2</sub><br>R-PO <sub>3</sub> H   |

### 2.1.1.3. Elektrotlar

Elektrodializ sisteminde elektrotlar, sistemde iyonların hareketini sağlayabilmek için kullanılır. Sistemde elektrotlar doğru akım kaynağına bağlı olarak çalıştırılmaktadır. Elektrodializ sistemi içerisindeki elektrot, bağlı olduğu akım yönüne göre pozitif ya da negatif yüklenerek iyonları kendisine çeker ya da iter.

Elektrodializ sistemlerinde elektrot seçimi önemlidir, zira sistem içerisinde oluşabilecek tepkimelere ve ortaya çıkan ürünlere karşı fiziksel ve mekanik olarak mukavemet gösterebilmesi gerekmektedir. Elektrodializ hücresinde ideal şartların elde edilebilmesi için kullanılacak elektrotların özellikleri aşağıdaki gibidir (İlhan, 2012):

- Yüksek mekanik direnç,
- Kimyasal ve elektrokimyasal stabilite,
- Yüksek elektriksel iletkenlik,
- Farklı reaktör tasarımlarında kullanılabilmesi için kolay şekillendirilebilir olması,



- Uygun redoks reaksiyonlarının oluşması,
- Kullanım ömrünün uzun olması,
- Toksikite ya da kirlilik oluşturmaması,
- Maliyetinin düşük olması,
- Kolay elde edilebilmesi.

Anot bölmesinde genel olarak korozif yapıda ürünler meydana geldiği için, elektrotlar platin ya da titanyum gibi malzemelerden yapılır (Bernardes ve diğ., 2013). Bunun dışında ticari olarak, grafit ya da işlenmiş karbon türevleri, nikel, alüminyum, TiO<sub>2</sub>, iletken seramik gibi pek çok elektrot tipi kullanılmaktadır (Pletcher, 2013).

Son yıllarda karbon bazlı elektrotların geliştirilmesi konusunda önemli çalışmalar yapılmıştır. Özellikle deiyonizasyon uygulamalarında kullanılan karbon bazlı elektrotlar, mezoporoz karbon elektrotları, polimer kompozit yapıdaki karbon elektrotlar, karbon levha elektrotları gibi karbonun farklı allotropları kullanılarak üretilmektedir (Thamilselvan ve diğ., 2016).

#### **2.1.1.4. Elektrolit Solüsyonu**

Membran hücrelerinde elektrot ve membranlar arasında kalan bölmede iletkenliğin ve iyon geçişlerinin sağlanabilmesi amacıyla elektrolit solüsyonu kullanılır. Elektrolit solüsyonunun içeriği çalışılacak olan su türü ve elde edilmek istenen ürüne göre değişiklik gösterebilmektedir. Elektrolit solüsyonunun yapısına göre katot bölgesinde OH<sup>-</sup>, hidrojen gazı, anot bölgesinde ise H<sup>+</sup>, oksijen ve serbest klorür gazı meydana gelebilmektedir (Nayar ve diğ., 2017).

#### **2.1.1.5. Diğer bileşenler**

Genel olarak endüstriyel ya da laboratuvar ölçekli çalışmalarda bölmelerin birbirinden ayrılmasını sağlamak, elektrotların membranlara ya da membranların birbirleri ile olan temasını engelleyebilmek ve membranları sabit tutabilmek için ayırıcı (spacer) yapılar kullanılmaktadır. Bu yapılar genel olarak yalıtkan malzemelerden üretilir, yukarıda sayılan özelliklerinin yanında iki membran arasında kalan bölgede solüsyonun eşit bir şekilde dağılmasını sağlar. Paralel olarak dizilen elektrodializ hücrelerinde konsantre/ürün akılarının doğru hücreye yönlendirilebilmesi için de kullanılabilir (PCA, 2018).

Ana bileşenler dışında elektrodializ prosesinde ürün/konsantre pompaları, basınçölçer, akım ölçer gibi ekipmanlar kullanılabilir.

### 2.1.2. Elektrodializ Prosesinde Enerji İhtiyacı

Elektrodializ ünitesinde iki ana kaynaktan enerji ihtiyacı oluşmaktadır:

- İyonların hareketinin sağlanabilmesi için uygulanması gereken gerilim
- Hücre içerisinde istenen akımın sağlanabilmesi için kullanılan pompalardan kaynaklanan enerji sarfıyatı

Farklı elektrodializ uygulamaları ile farklı sarfıyatlar oluşabileceği gibi, genel olarak sistemin enerji ihtiyacı bu iki ana kaynaktan meydana gelmektedir. Solüsyon içerisindeki iyonların hareketinin ve membranlardan geçişinin sağlanabilmesi için asgari miktarda bir enerji uygulanması gereklidir. Gibbs fonksiyonu ile açıklanabilen bu asgari enerji ihtiyacı, ideal şartlar düşünülerek hesaplanabilmektedir. Bununla birlikte herhangi bir ölçekte çalıştırılan elektrodializ prosesinde ideal şartları sağlamak oldukça zordur. Sistemde iyon transferi sırasında meydana gelen sürtünme ile verilen enerjinin bir kısmı ısı olarak kaybedilecektir. Bu iki ana unsur dışında ayrıca elektrot üzerinde meydana gelen reaksiyonlarda da bir miktar enerji harcanmaktadır.

Besleme solüsyonundan konsantreye iyon taşınımının sağlanabilmesi için gerekli olan toplam enerji ihtiyacı, zamana bağlı olarak sisteme uygulanan akım ile gerilimdeki düşüş ile ifade edilebilir.

$$E = I_{st}U_{st}t \quad (2.1)$$

Besleme solüsyonundan konsantreye iyon transferinin sağlanabilmesi için gereken enerji (E), sisteme uygulanan akım ( $I_{st}$ ), sisteme uygulanan elektrik geriliminin düşüşü ( $U_{st}$ ) ve zamanın bir fonksiyonudur.

Elektrik geriliminin düşüşü, elektrodializ içerisinde oluşan dirençlerin ve farklı konsantrasyonlardaki solüsyonlar arasında oluşan gerilim olarak ifade edilebilir. Sistem içerisinde oluşan direnç ile meydana gelen enerji kaybı, sistemde oluşabilecek diğer enerji kayıplarından daha yüksektir (Strathmann, 2016). Membran seçimi yapılırken, elektriksel direnci daha düşük olan membranların tercih edilmesinin nedeni bu enerji kayıplarını asgari

seviyeye indirebilmektir. Bununla birlikte, membranların birbirlerine yakın olarak konumlandırılması solüsyondan kaynaklı direncin azaltılması için oldukça önemlidir. Ayrıca sınır tabakadaki iyonların azalması ile sonuçlanan konsantrasyon polarizasyonu da sistemdeki gerilim düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle sistem içerisinde uygun hidrodinamik şartların sağlanması büyük bir önem taşımaktadır.

Toplam gerilim düşüşü, sistem içerisinde üç kısımda meydana gelmektedir (Strathmann, 2004):

1. Diluat ve konsantre solüsyonları arasında bulunan membranlar ve sınır tabakaları ile solüsyon arasında,
2. Solüsyonların dirençleri nedeniyle,
3. Membranların dirençleri nedeniyle.

Bu nedenle elektrodializ sistemleri tasarlanırken, oluşabilecek dirençler hesaba katılarak toplam gerilim düşüşü asgari seviyeye indirilmelidir. Membran dirençleri mümkün olduğunca düşük olmalı, sistemde konsantrasyon polarizasyonunun ve su hidrolizinin gerçekleşmemesi için uygun şartlar sağlanmalı ve sistemin fiziki tasarımı bu bilgiler ışığında yapılmalıdır.

### **2.1.3. Elektrodializ Hücresinde Kütle Taşınımı**

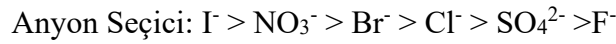
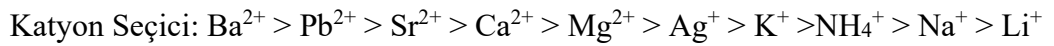
$H^+$  ve  $OH^-$  iyonları haricinde, su içerisinde farklı iyonların hareketliliği birbirine çok yakındır (Tablo 2.3). Elektrotlara bir gerilim uygulandığında, iki elektrot arasında normal şartlarda rastgele hareket eden iyonlar elektrik alanı şiddetine maruz kalır.  $H^+$  iyonunun yüksek mobilitesi, su dipolleri ile elektriksel yükler arasında meydana gelen moleküler etkileşimler sonucu protonlar hidronyum ( $H_3O^+$ ) iyonlarını oluşturur. Hidronyum iyonunda oksijene bağlı olan her bir H atomu, eşit seviyede pozitif yük taşır. Tuz iyonlarından farklı olarak proton, tünel mekanizması adı verilen bir mekanizma ile bir hidronyumdan diğerine hareket eder (Strathmann, 2016).

**Tablo 2.3:** 298°K'de su içerisinde iyonik hareketlilik (Atkins ve de Paula, 2010)

| <i>Kasyonlar</i>             | $u/(10^{-8}m^2s^{-1}V^{-1})$ | <i>Anyonlar</i>               | $u/(10^{-8}m^2s^{-1}V^{-1})$ |
|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| H <sup>+</sup>               | 36,23                        | OH <sup>-</sup>               | 20,64                        |
| Na <sup>+</sup>              | 5,19                         | Cl <sup>-</sup>               | 7,91                         |
| K <sup>+</sup>               | 7,62                         | Br <sup>-</sup>               | 8,09                         |
| Zn <sup>2+</sup>             | 5,47                         | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 8,29                         |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 7,63                         | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 7,40                         |

Bu durum H<sup>+</sup> iyonlarının su içerisindeki yüksek hareket kapasitesini açıkladığı gibi, anyon değiştirici membran içerisindeki yüksek hareketliliğini de anlaşılabilir kılmaktadır. Buna karşın, anyon değiştirici membranlar içerisinde tuz iyonlarının hareket kapasitesi oldukça düşüktür. Elektrodializ hücresi içerisinde suyun parçalanmasının istenmeme nedenlerinden biri de bu yüksek hareket kapasitesidir. Bu taşıma mekanizmasının bir benzeri OH<sup>-</sup> iyonları için de geçerlidir, iyon hareketliliğinin diğer tuz iyonlarına göre daha yüksek olduğu Tablo 2.3'de görülmektedir.

Kasyon ve anyon seçici membran içerisinde karşı iyon değişim sıraları aşağıdaki gibidir (Strathmann, 2016):



Elektrodializ sistemi birbirine benzeyen hücrelerden oluşmaktadır. Her hücrenin geometrik yapısı ve giren debi birbirinin aynısıdır. Böylece hücreler arasındaki hidrodinamik şartların aynı olması sağlanır. Ticari elektrodializ sistemleri genel olarak bu prensip üzerine inşa edilse de, farklı kullanım örnekleri de mevcut olabilmektedir. Diluat ve konsantr hücrelerinin aynı özelliklerde inşa edilmesi, yük kayıplarını ve hücreler arasında farklı basınçların oluşmasını engeller. Hücreler arasında farklı basınçların oluşması, solüsyonların membranda bulunabilecek açıklıklardan yan hücrelere sızmasına neden olabilmektedir. Özellikle konsantr hücrendeki solüsyonun diluat hücresine sızması istenmeyen bir durumdur.



membranlardan geçebilirken, bazılarında tutulur. Elektrolit içerisinde iyonların hareketi elektrik yüklerinin de hareketi anlamına gelir, yani sistemde bir akım oluşumu söz konusudur. Bu durum bir iletken içerisindeki elektronların hareketine benzer bir şekilde tanımlanabilir. Metal iletkenlerde elektronların hareketini tanımlamak için Ohm kanunu kullanılabilir.

Metal iletkenlerde kütle transferi, elektronların çok küçük kütlelere sahip olması nedeniyle yok sayılabilecek mertebededir. Bununla birlikte elektrolit içerisinde iyonların hareketi daima kütle transferi ile birlikte gerçekleşmektedir. Bu nedenle metal iletkenlerdeki iletkenliğin elektrolitlere göre 3-5 kat daha fazla olmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, metal iletkenlerde iletkenlik sıcaklık artışı ile azalmaktayken, elektrolit içerisinde artmaktadır (Strathmann, 2004). Bu farklılık dışında, her iki sistemdeki gerilim ve akım arasındaki ilişki Ohm yasası ile açıklanabilir.

$$V = R \cdot I \quad (2.2)$$

Bu denklemde V (Volt) iki elektrot arasındaki gerilimi, I (Amper) iki elektrot arasında oluşan akımı ve R ise sistemin elektrik potansiyeline karşı gösterdiği direnci ( $\Omega$ ) göstermektedir. Sistemin direnci gerilimin uygulandığı materyaller, elektrotlar arası mesafe ve uygulanan materyalin alanına göre değişmektedir.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{q} \quad (2.3)$$

Bu formülde direnç R, materyalin özgül direnci  $\rho$ , materyalin uzunluğu l, iletken materyalin yüzey alanı ise q ile gösterilmektedir.

Elektrodiyaliz prosesinde uygulanan gerilimin bir kısmı elektrolit üzerinden geçmektedir. Sıvılarda iletkenlik, sıvı içerisinde bulunan anyon ve katyonların konsantrasyonları ve değerliklerine göre belirlenebilir (Snoeyink ve Jenkins, 1980, Strathmann, 2004). İçerisinde bir elektrolit bulunan solüsyonun iletkenliği bu şekilde hesaplanabilmektedir.

$$\Lambda_{eq} = \frac{\kappa}{C(z_a v_a + z_c v_c)} \quad (2.4)$$

Bu formülde ekivalent iletkenlik  $\Lambda_{eq}$ , molar konsantrasyon  $C$ , anyon ya da kation değerlikleri  $z$ , anyon ve kationun stokiyometrik katsayıları  $v$ , spesifik iletkenlik  $\kappa$  ile gösterilmektedir. Ekivalent iletkenlik, aynı zamanda anyon ve kationların ekivalent iletkenliklerinin toplamıdır.

$$\Lambda_{eq} = \Lambda_a + \Lambda_c \quad (2.5)$$

Sisteme uygulanan elektrik gerilimi elektrolit üzerinden geçerken oluşan akım, solüsyondaki iyonların konsantrasyonu, anyon ve kationların stokiyometrik katsayıları, iyonların değerlikleri, hareket potansiyelleri gibi kavramlar ile doğru orantılıdır. Gerilim uygulanan sistemde belirli bir  $A$  alanından geçen elektrik yükleri bu sayede hesaplanabilir.

$$V_c = \sum_i z_i u_i v_i C e N_a (\Delta\varphi) \quad (2.6)$$

Bu formülde  $u$ , iyonun hareket potansiyelini göstermektedir. Elektron yükü  $e$ , avogadro sayısı ise  $N_a$ , elektrik gerilimi  $\varphi$  ile gösterilmektedir.

Denklem (2.2), (2.4) ve (2.6) arasındaki bağlantı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{\kappa A \Delta\varphi}{l} = \frac{\sum_i z_i u_i v_i C e N_a (\Delta\varphi)}{l} \quad (2.7)$$

Denklem (2.7)'dan elektrolit konsantrasyonu hesaplanabilir;

$$\kappa = \sum_i z_i u_i v_i C F \quad (2.8)$$

Bir iyonun ekivalent iletkenliği iyonun hareket potansiyeli ve Faraday sabiti kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\lambda_i = u_i F \quad (2.9)$$

Bir iyon değiştirici membran gerilim uygulanan elektrolit içerisine batırıldığında membran üzerine sabitlenmiş iyonlar bir elektrik alanı oluşturarak ortamdaki ters yüklü iyonları çekerek membran yüzeyinde ters yüklü iyonların konsantrasyonunun artmasına neden olur (**Şekil 2.3**).

Bu durumda elektrolit içerisinde bulunan iyon değiştirici membran kapasitör görevi görür. Kapasitörler, içerisinde elektrik yükü barındırabilen sistemlerdir.

### **2.1.5. Konsantrasyon Polarizasyonu**

Bir elektrodializ hücresinde elektrik akımı solüsyon içerisinde iyonlar ile taşınır. Fakat iyon değiştirici membranlarda sabit iyonlar olduğu için durum daha farklıdır. Akım temel olarak karşıtyionlar ile taşınır ve genellikle membranlardaki iyon taşıma sayısı bire yakındır. Elektrodializ içerisindeki ayırım işlemi solüsyon ve iyon değiştirici membranlar içerisinde bulunan iyonların iyon taşıma sayılarındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Arıtma işlemi gerçekleştirilirken dilüatın bulunduğu hücrede konsantrasyon azalır, konsantre hücrede ise artar. Bu durumda bir iyon değiştirici membranın dilüat ile temas ettiği noktada iyon miktarı azalırken, konsantre ile temas ettiği noktada artacaktır. Eğer akımın membran üzerinden taşıyabileceğinden daha fazla iyon konsantre hücreye geçerse, iki tabaka arasında bir konsantrasyon gradyanı oluşur. Bu durumda difüzyona bağlı olarak elektrolit taşınımı meydana gelir. Böylece membrandan solüsyona doğru bir tuz akışı meydana gelir. Bu duruma konsantrasyon polarizasyonu denmektedir ve membran proseslerinde verimliliği düşüren bir durumdur. Konsantrasyon polarizasyonu sonucunda konsantre hücresindeki tuz konsantrasyonu çözünürlük limitinin üstüne çıkar ve tuz tabakalaşması oluşabilir. Bununla birlikte dilüat tabakasında tuz konsantrasyonu sıfıra yaklaşacağından sistemin elektrik ihtiyacı artar. Bu durum suyun iyonlarına ayrılmasına neden olur ve sistemde ani pH değişimleri gerçekleşir. pH'ın yükselmesi sistemde yüksek değerlikli iyonların çökmesine neden olabilmektedir (Al-Amoudi, 2010).

Konsantrasyon polarizasyonu sonucunda oluşan etkilerin azaltılabilmesi için akım yoğunluğunu sınırlamak ya da membranların etrafında oluşan laminer tabaka kalınlığını düşürmek gerekmektedir. Laminer tabakanın kalınlığı sistemin hidrodinamik şartlarına bağlı olarak değişmektedir.

### **2.1.6. Elektrodializ Prosesi Tasarım Kriterleri**

Elektrodializ tesislerinin işletilmesinde membran dizilimi, güç kaynağı, pompalar gibi pek çok ekipman kullanılmaktadır. Elektrodializ tesisinin tasarlanabilmesi için pek çok işletme parametresi hesaba katılmalı ve kontrol edilmelidir. Beslenen solüsyonun konsantrasyonu, istenilen ürünün özelliği ve konsantre konsantrasyonu önemli parametrelerdir. Genellikle



istenilen verim değerlerine tek bir ünite ile ulaşmak zordur. Bu yüzden birden fazla membran ünitesi seri olarak bağlanabilmektedir. Yüksek saflıkta ürün elde edilmek isteniyorsa, konsantrenin bir kısmı ünite içerisinde tekrar döndürülebilmektedir.

## **2.2. ELEKTRODİYALİZ TÜRLERİ**

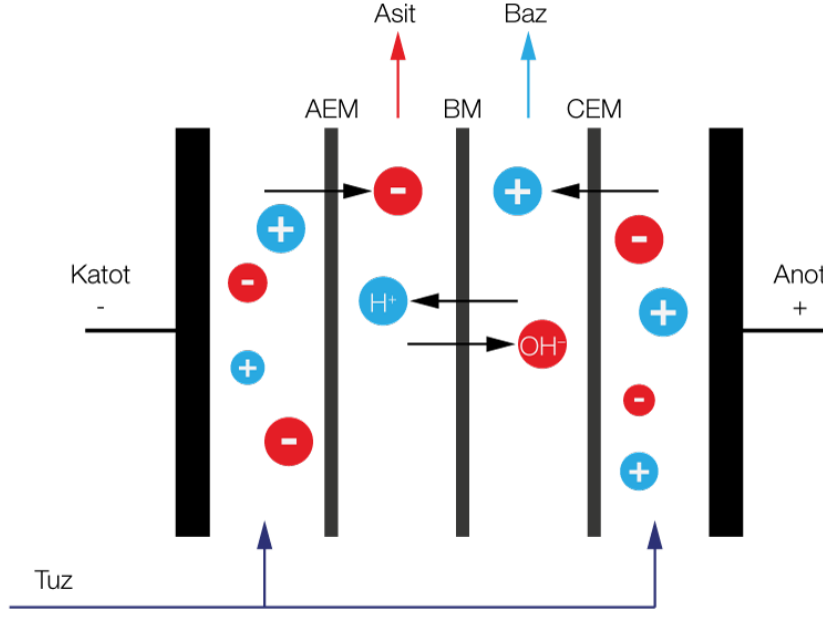
### **2.2.1. Ters Elektrodiyaliz**

Ters elektrodiyaliz prosesi, elektrodiyaliz ile benzer bir yapıya sahiptir. Elektrodiyalizden farklı olarak konsantre ve diluat hücreleri aynı yapıdadır ve doğru akım kutupları belirli aralıklarla değiştirilerek sistemin kendi kendini temizlemesi sağlanır. Membran üzerinde meydana gelen kirlenme ya da birikim doğru akım tersine çevrildiğinde temizlenerek, membran üzerindeki birikimlerin konsantre akısına katılması sağlanır.

Ters elektrodiyaliz prosesi, tuzlu sulardan içme suyu elde edilmesi, atıksu arıtımı, yiyecek ürünlerinin deminerilizasyonu, tuz üretimi gibi alanlarda ticari olarak kullanılmaktadır (Strathmann, 2010).

### **2.2.2. Bipolar Membranlar ile Elektrodiyaliz (BMED)**

Bipolar membran, bir anyon seçici ve bir katyon seçici membranın birbirine yapıştırılması ile elde edilmektedir. Bipolar membranlar klasik elektrodiyaliz sistemlerinde kullanılabilir. Anyon-katyon seçici membranlar ile birlikte bipolar membranların seriler halinde dizilmesi ile BMED prosesi elde edilmektedir. Bipolar membranlar doğru akım gerilimi altında,  $H^+$  ve  $OH^-$  iyonlarının geçişine izin verir, bu sayede proses içerisinde asit ve baz üretimi sağlanır (Şekil 2.4) (Strathmann, 2016).



**Şekil 2.4:** Bipolar membran kullanımı ile birlikte ED sisteminde asit ve baz oluşumu

İki iyon seçici membran arasındaki bütün tuz iyonları ayrıldığında, elektrik yükünün transferi sadece protonlar ve hidroksit iyonları tarafından gerçekleştirilebilir. Bu durumda anyon ve kation seçici membranlar arasındaki fazdan ayrılan protonlar ve hidroksit iyonları suyun iyonlarına ayrılması ile yenilenir. Eğer kation ve anyon seçici membranlar üst üste yapıştırılırsa bipolar membranı elde edilir. İki iyon seçici membran arasında kalan bölge çok incedir ve suyun iyonlarına ayrılması bu bölgede gerçekleşir (Strathmann, 2016). BMED prosesi, özellikle sıfır atık yaklaşımı ve sürdürülebilir çevre politikaları doğrultusunda büyük bir potansiyele sahiptir. Özellikle ters ozmos gibi yüksek tuzluluğa sahip atıkların çıkabildiği proseslerde ve tuzlu sularda asit ve baz üretimine olanak sağlamaktadır. Her ne kadar büyük bir potansiyele sahip olsa da, üretilen asit/baz içeriğinin uygun saflıkta olmaması gibi nedenlerle ticari olarak kullanımı henüz yaygınlaşmamıştır (Strathmann, 2016). Literatürde rastlanan bazı çalışmalar Tablo 2.4’de sunulmuştur.

**Tablo 2.4:** Literatürde BMED sistemi kullanılarak yapılan çalışmalar

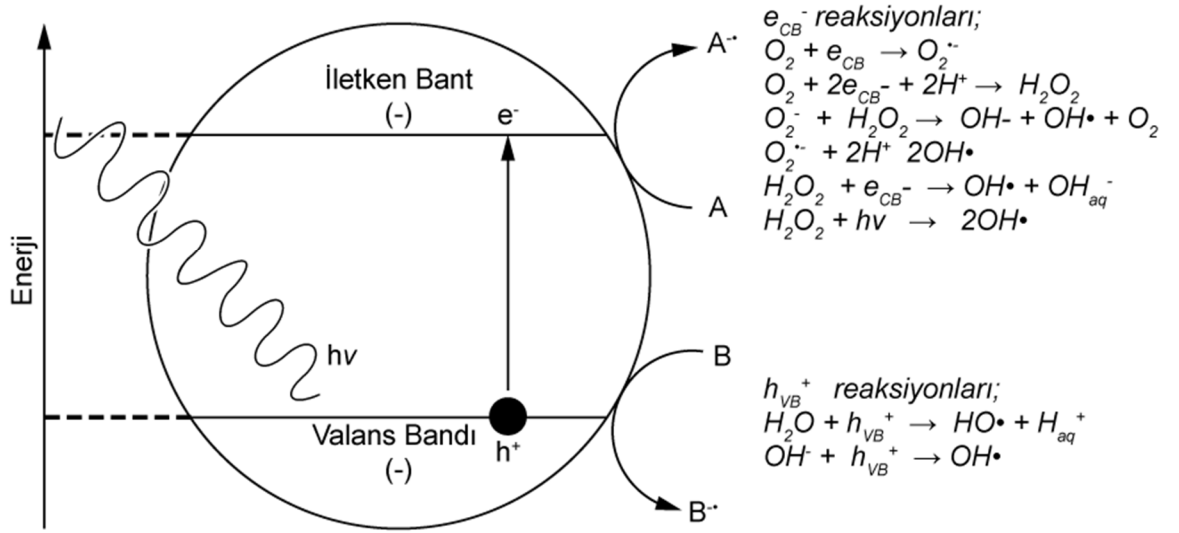
| Uygulama  | Proses Türü         | Avantajları  | Dezavantajları   |  |
|---|---------------------|--|--|--|
| Tuzlardan mineral asit ve baz üretimi                               | Laboratuvar ölçekli | Düşük enerji tüketimi  | Proses maliyeti üzerine ek çalışma gerekmektedir   | (Wei ve diğ., 2012, Wei ve diğ., 2013)   |
| Tekstil atıksuyundan boya ayrıştırılması, asit ve baz rejenerasyonu | Laboratuvar ölçekli | Entegre NF ile çalışılan sistemde boya/tuz solüsyonundan boya, asit ve baz elde edilebilmektedir | Bipolar membran maliyeti   | (Lin ve diğ., 2015, Yao ve diğ., 2016)   |
| Yakıt gazı desülfürizasyon kimyasallarının geri kazanılması         | Laboratuvar ölçekli | Uygulanabilir kimyasal geri kazanımı   | Bipolar membran maliyeti   | (Huang ve diğ., 2007, Huang ve Xu, 2006) |
| Ters ozmos atıklarından asit ve baz geri kazanımı                   | Laboratuvar ölçekli | Ters ozmos atıklarından ürün elde edilmesi   | Ön arıtma ihtiyacı Akım verimliliğinin optimize edilmesi gerekmektedir                   | (Ibáñez ve diğ., 2013)                   |
| Asetaldehit içeren atıksulardan asetik asit geri kazanımı           | Laboratuvar ölçekli | Düşük enerji tüketimi ve yüksek akım verimliliği   | Endüstriyel ölçekte kullanım için optimizasyon gereklidir                                | (Zhang ve diğ., 2011)                    |
| Lityum ve bor geri kazanımı   | Laboratuvar ölçekli | Verimli ürün geri kazanımı   | Özel katyon seçici membranlar katyon geri kazanımı veriminin artırılması için gereklidir | (Bunani ve diğ., 2017)                   |

### 2.3. FOTOKATALİZÖRLER

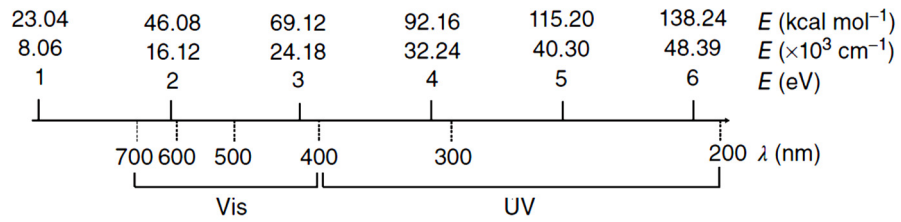
Fotokataliz prosesinin temelinde yarı iletken materyallerin ışığı absorblama özelliğini kullanarak su veya solüsyonlar içerisindeki reaksiyonların artırılması yatmaktadır (Nowotny ve Nowotny, 2010). Fotokataliz reaksiyonları, ultraviyole ışığı, görünür ışık ya da kızılötesi ışık altında gerçekleşen katalitik reaksiyonlardır. Temelde fotokataliz, yarı iletken bir materyalin belirli bir dalga boyundaki ışık altında aktif hale gelmesidir. Fotokatalizörler uygun ışık altında aktif hale geçerek değerlik bandında bulunan bir elektronu iletkenlik bandına fırlatır (Şekil 2.5). Böylece değerlik bandında pozitif bir elektron holü oluşur. İletkenlik bandındaki elektrot indirgeme reaksiyonlarını gerçekleştirirken, değerlik bandındaki hol yükseltgenme reaksiyonlarını gerçekleştirir. Oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonlarının gerçekleşebilmesi ortamdaki maddelerin ve fotokatalizörün redoks seviyesine bağlıdır. Ortamda bulunan herhangi

bir bileşenin redoks seviyesi iletkenlik bandından düşükse redüksiyon, değerlik bandından yüksekse oksidasyon gerçekleşir.

CdS, F<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO, WO<sub>3</sub>, ZnS, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> gibi yarı iletken materyaller ve bunların inorganik ya da organik maddelerle dopinglenmiş varyantları literatürde en sık rastlanılabilecek fotokatalizörlerdir (Wenderich ve Mul, 2016). Günümüzde fotokatalizörler (El-Morsi ve diğ., 2000), fenoller (Long ve diğ., 2006), pestisitler (Konstantinou ve Albanis, 2003) gibi organik kirleticilerin arıtılmasında ve tamamen parçalanmasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte Cr(VI), Hg(II), Cu(II), Ag(I) gibi ağır metallerin indirgenmesine yönelik çalışmalar da literatürde bulunmaktadır (Kabra ve diğ., 2004).



Şekil 2.5: Bir fotokataliz prosesinde meydana gelen oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonları



Şekil 2.6: Dalgaboyları ve enerji potansiyelleri arasındaki ilişki (Kisch, 2014)

Bir molekül ışığı absorbe ettiğinde uyarılmış hale geçer. Molekülün yapısına bağlı olarak, uyarılmış hal pikosaniye ile mikrosaniye arasında değişen bir sürede sona erer. Işık spektrumunda ultraviyole ışığı 200-400 nm, görünür ışık ise 400-700 nm arasında yer almaktadır. Bu dalga boylarında UV 70-270, görünür ışık ise 40-70 kcal/mol kadar bir enerji ortaya çıkarabilir (Kisch, 2014). Bu değerler C-N, C-C ve alifatik bağların parçalanma enerjileri ile benzer seviyededirler (Şekil 2.6).

TiO<sub>2</sub> toksik olmayan yapısı, kimyasal olarak kararlı olması, çevreye zarar vermemesi, yüksek oksitleme kapasitesine sahip olması, asidik ve bazik şartlara dayanıklılığı ve nispeten ucuz olması nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir (Lan ve diğ., 2013). TiO<sub>2</sub> anataz, rutil ve brokit olmak üzere üç farklı kristal yapısında bulunabilmektedir. Genel olarak fotokataliz özelliğinin daha etkili olması nedeniyle anataz yapıdaki TiO<sub>2</sub> tercih edilmektedir (Hachisu ve diğ., 2016). Yüksek oksitleyici özelliği, ortamda bulunan organik ve inorganik maddeler düşük konsantrasyonlara sahip olsa bile verimli bir şekilde arıtılmasını sağlar.

Güneş enerjisi, çevresel kaynakların korunabilmesi amacı ile tercih edilebilecek sınırsız bir enerji kaynağıdır. Fotokatalizörlerin güneş enerjisi ile verimli bir şekilde çalışabilir hale getirilmesi antibakteriyel, kendi kendini temizleyen, kendi kendini steril hale getiren materyallerin üretiminin gerçekleşmesini sağlar.

#### 2.4. FOTOKATALİTİK ARITMA

Fotokatalitik sistemleri fotokatalizör, UV ışık kaynağı ve O<sub>2</sub>'den oluşmaktadır. Verimli, kullanımı kolay ve ekonomik fotokatalizörlerin geliştirilmesi halen geniş bir araştırma konusudur. Arıtma proseslerinde fotokatalizör olarak kullanılacak malzemelerin belirli özelliklere sahip olması gerekir (Kisch, 2014):

- 1) Uzun ömürlülük
- 2) Düşük maliyet
- 3) Uygun iletkenlik/değerlik bandı özelliklerine sahip olması
- 4) Yük transferinin verimli olması
- 5) Güneş ışığı soğurumunun verimli olması

Uygun şartlar sağlandığında fotokatalitik arıtma sonucunda organik yapıdaki zararlı bileşenler mineral asitleri, karbondioksit ve su üretiminde kullanılabilir. Titanyum dioksit,

fotokatalitik uygulamalarda en sık kullanılan fotokatalizörlerden biridir fakat TiO<sub>2</sub> kullanımı konusunda halen bazı sıkıntılar bulunmaktadır (Shephard ve diğ., 2002). TiO<sub>2</sub>, elektron-hol birleşimi hızlı bir şekilde gerçekleştiğinden düşük quantum verimliliğine sahiptir. Bununla birlikte güneş ışığının sadece %5'lik bir kısmı ile aktif hale gelebilmektedir (Tomkiewicz, 2000). Bu nedenle TiO<sub>2</sub>'nin görünür ışık altında verimli bir şekilde çalışabilmesi için literatürde çeşitli dopingleme çalışmaları bulunmaktadır (Momeni ve diğ., 2015, Akple ve diğ., 2015, Zhang ve diğ., 2016).

Elektron vericileri ya da alıcılarının bulunmadığı ortamlarda elektron-hol çiftlerinin ( $e^-_{CB}/h^+_{VB}$ ) ömrü birkaç nanosaniye kadar olmaktadır (Sui ve diğ., 2012). Bu nedenle elektronların terk ettikleri hollere geri dönüşlerinin yavaşlatılması gerekmektedir. Bu çalışmada TiO<sub>2</sub> NP'leri ile kaplı bir elektrota akım uygulanarak elektronların hollere geri dönüşünün yavaşlatılması amaçlanmaktadır.

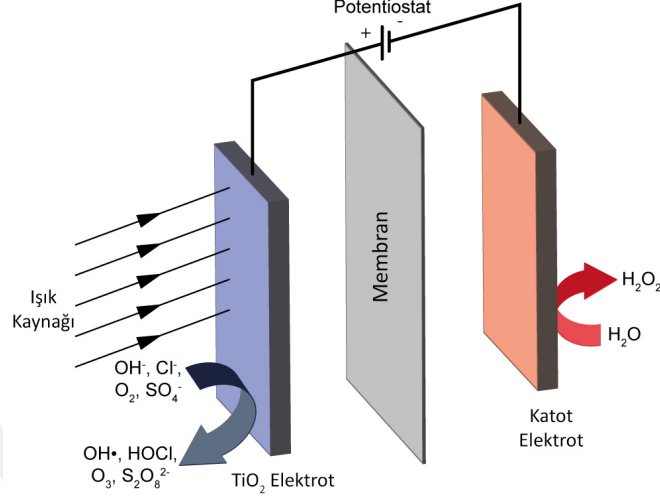
## 2.5. FOTOELEKTROKATALİTİK (FEK) ARITMA

Katalizör, UV ışığı ve O<sub>2</sub> fotoelektrokatalitik sistemlerin temelini oluşturmaktadır. Uygun koşullar altında organik kirleticilerin mineral asitlerine, CO<sub>2</sub> ve suya mineralizasyonu FK sistemleri ile mümkün hale gelmektedir. Ayrıca toksisitesi yüksek metal iyonlarının daha az zararlı türlere dönüşümü mümkündür.

Işık ile uyarılan fotokatalizörler, redox reaksiyonlarında rol alırlar (Şekil 2.5). Işık altında elektronun iletkenlik bandına çıkması ile birlikte, elektron vericileri değerlik bandında boşalan hol ile tepkimeye girerek serbest OH• radikallerini oluşturur (Şekil 2.7). Serbest radikaller oksidasyon reaksiyonlarında önemli rol oynayan güçlü türlerdir. Sisteme dışarıdan gerilim uygulanması, elektron ve holün yeniden birleşmesi olasılığını azaltır (Kim ve Anderson, 1994).

TiO<sub>2</sub>'in fotokatalitik verimini artırmak için yapılan diğer önemli çalışma alanı ise güneş enerjisi ile serbest hale geçen hol-elektron çiftlerinin tekrar birleşmelerinin engellenmesi üzerine yapılmaktadır (Pongwan ve diğ., 2016, Selcuk ve diğ., 2003, Selcuk ve diğ., 2004c, Morgado Jr ve diğ., 2007, Waldner ve diğ., 2003). TiO<sub>2</sub> bazlı arıtma teknolojilerinin geliştirilmesinde en önemli adımlardan olan bu yöntemde TiO<sub>2</sub> kaplı elektrotlar bir elektrokimyasal sistem içerisinde çok düşük elektrik gerilimi altında kullanılarak ışınlama sırasında TiO<sub>2</sub> yüzeyinde oluşan hol-elektron çiftinin tekrar birleşmeleri engellenmiştir. Böylelikle daha çok elektron ve

OH radikali oluşturularak  $\text{TiO}_2$ 'in enerji dönüştürme veya su-atıksu arıtma verimi çok yüksek oranda arttırılmıştır (Zanoni ve diğ., 2004, Guaraldo ve diğ., 2011, Daghrir ve diğ., 2012).



**Şekil 2.7:** Bir FEK reaktöründe oluşan anot ve katot reaksiyonları

Fotoelektrokatalitik (FEK) proses olarak adlandırılan bu proseste anot ve katot hücrelerinin ayrılması ile hol ve elektron reaksiyonlarının birbiri ile reaksiyonu engellenmiş ve fotokatalitik arıtma verimi 5-20 kat gibi çok yüksek oranda arttırılmıştır (Selcuk ve Bekbolet, 2008, Selcuk, 2010). Diğer taraftan yapılan çalışmalar FEK arıtma sisteminde, sadece  $\text{TiO}_2$ 'in arıtma verimi artmamış, artan oksidasyon potansiyeli ile arıtma sırasında fotokatalitik arıtmada karşılaşılmayan klorlu-bromlu ara ürünlerin oluştuğu gözlenmiştir (Selcuk ve diğ., 2004b, Selcuk ve diğ., 2004c, Selcuk ve Anderson, 2005). Fotokatalitik sistemlerinin gelişmesi ile su arıtımı sırasında oluşan hollerin arıtma, elektronların ise enerji amacıyla kullanılması fikrinin yakın gelecekte uygulamaya geçebileceği tahmin edilmektedir.

Fotoelektrokatalitik ve elektrodializ arıtma sistemlerinin birleştirilmesi teoride desalinasyon ve oksidasyon süreçlerinin aynı reaktör içerisinde uygulanabilmesini mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte fotokatalizör yardımı ile oluşturulan fotoakımın elektrodializ prosesi için yeterli olup olmayacağı cevaplanması gereken sorulardan biridir. Ayrıca sistem içerisinde meydana gelen fotokatalitik reaksiyonlar sonucunda meydana gelen değişimlerin izlenmesi gerekmektedir. Özellikle fotokatalitik reaksiyonlar sonucu oluşan  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{OH}\cdot$ , serbest klorür gibi bileşenlerin sistemdeki oksidasyon verimine ve yan ürün oluşumuna olan etkisinin geniş bir şekilde araştırılması gerekmektedir.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. KULLANILAN CİHAZLAR

Deneilerin yürütülebilmesi için Shimadzu TOC-VWP toplam organik karbon ölçüm cihazı, Malvern Zetasizer Nano ZS partikül boyutu ve zeta ölçüm cihazı, Dionex ICS-1000 iyon kromatografi cihazı, ModernWater Microtox M500 toksisite ölçüm cihazı, Hach Lange DR5000 spektrofotometre, Atlas Suntest CPS+ güneş simülatörü, hassas terazi, kül fırını, etüv, multimetre ölçüm düzenekleri kullanılmıştır.

##### 3.1.1. Modern Water Microtox M500

Microtox deneyi, biyoışırma yapan *vibrio fischeri* bakterilerinin sıvı ortamda yaptığı ışımının ölçülmesi ile yapılmaktadır. *Vibrio fischeri*, deniz ortamında yaşayan ve patojen özellik göstermeyen bir bakteridir. Toksik maddeye maruz bırakıldığında biyoışırma süreci azalır. Microtox M500 fotometre cihazı bakterilerin ışımını ölçerek, meydana gelen azalmaya göre akut toksisite tayini yapmaktadır. Cihaz Modern Water tarafından sağlanan reconstitution ve seyreltme solüsyonu ile cihazın yazılımında verilen talimatlara göre çalıştırılarak, numunelerin biyoışımaları Microtox M500 fotometre cihazı ile okunmuştur.

**Tablo 3.1:** Microtox deneyinde yüzde oranlara göre toksisitenin belirlenmesi (Coleman ve Qureshi, 1985)

| EC50 Değeri     | Sınıfı                |
|-----------------|-----------------------|
| < %25           | Çok Zehirli           |
| %25-50          | Orta Seviyede Zehirli |
| %51-75          | Zehirli               |
| >%75            | Az Seviyede Zehirli   |
| Toksik Etki Yok | Zehirli Değil         |

##### 3.1.2. Dionex ICS-1000 İyon Kromatografi

Dionex ICS-1000 iyon kromatografi cihazı baskılanmış ya da baskılanmamış iletkenlik ölçümü ile iyon analizi yapmaktadır. Bir iyon kromatografi sistemi, solvent ayırıcı sıvı, yüksek basınçlı pompa, numune enjektörü, ayırım kolonu, iletkenlik hücresi ve kimyasal baskılayıcıdan



oluşmaktadır. Sistemde ölçüm yapılmadan önce Dionex tarafından sağlanan standart solüsyonlar ile sistem kalibre edilmektedir. Numune analizlerinden elde edilen ölçüm sonuçları, cihaz yazılımı tarafından standart solüsyon değerleri ile karşılaştırılarak elde edilir. Sistem iletkenlik verilerini pikler halinde okumaktadır, yazılım ise bu pikleri konsantrasyon değerlerine çevirmektedir.

### **3.1.3. Shimadzu TOC-VWP - TOK Analiz Cihazı**

Shimadzu TOK analiz cihazı, toplam ve inorganik karbon ölçümleri yapabilen bir cihazdır. TOK değeri, toplam karbon değerinden inorganik karbon değerinin çıkarılması ile elde edilmektedir. Toplam karbonun belirlenebilmesi için, numune içerisine deney prosedürlerinde belirlenmiş miktarda fosforik asit ve oksitleyici eklenerek UV ışığı altında ısıtılır. Numune içerisindeki karbon içeriğinin karbon dioksit'e dönüştürülmesi sağlanarak ölçüm yapılır. İnorganik karbonun belirlenebilmesi için numuneye fosforik asit eklenerek karbon dioksit çıkışı analiz edilir.

### **3.2. TiO<sub>2</sub> NANOPARTİKÜLLERİNİN ÜRETİLMESİ**

Titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) nanopartiküllerinin elde edilmesi için sol-gel metodu kullanılmıştır (Şekil 3.1). 25 ml TTIP (Aldrich; %97) ve 5 ml asetik asit 500 ml distile suya eklenir. Daha sonra 3,5 ml HNO<sub>3</sub> eklenerek elde edilen karışım 80°C' de 30 dakika ısıtılır (Yuranova ve diğ., 2006).

### **3.3. TiO<sub>2</sub> NANOFİLM KAPLI ELEKTROTLARIN HAZIRLANMASI**

Belirli boyutlarda kesilen GoodFellow titanyum plakaların yüzeyi distile su ve etil alkol ile temizlenir. Hazırlanan plakaların kaplama işlemi daldırma çekme cihazı yardımı ile TiO<sub>2</sub> solüne daldırılarak hazırlanır. Kaplanmış plakalar 400°C de kalsinasyon işlemine tabi tutularak fotoaktif nanofilm kaplı yüzeyler elde edilir. Isıl işlem sonrası TiO<sub>2</sub> kaplanmış olan plakalar fotokatalitik arıtmada nanofilm, FEK arıtmada ise fotoanot olarak kullanılabilir.



Şekil 3.1: Sol-Gel hazırlama metodu

### 3.4. SOL-GEL METODU İLE ÜRETİLEN $TiO_2$ NANOPARTİKÜLLERİN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Sol-gel metodu ile hazırlanmış soldeki  $TiO_2$  nanopartiküllerin zeta potansiyeli ve partikül boyutları NanoZeta sizer ölçüm cihazı (ZS90 Malvern Zeta Sizer) ile yapılmıştır.  $TiO_2$  kaplama işlemlerinden sonra yüzeydeki nanofilmin fazları (anataz, rutil) ve morfolojik özellikleri X-Ray Diffraction (XRD) ile ölçülmüştür. Hazırlanan nanofilmin optik özelliği UV-Vis geçirgen şeffaf lamel (Quartz camı) üzerine daldırma çekme cihazı ile kaplama yapıp, oda sıcaklığında kurutulduktan sonra 200-900 nm dalga boyu aralığında UV-Vis Spektrofotometre (Hach Lange DR5000) ile absorbans ölçümü ile belirlenmiştir.

### 3.5. FOTOELEKTROKATALİTİK SİSTEMİN KURULMASI

Planlanan FKED arıtma sistemi bilgisayar kontrollü potansiyometre, nanofilm kaplı fotoanot elektrot ve titanyum katot elektrot içeren hücreler ile iyonların toplandığı bir konsantrasyon hücresinden oluşmaktadır. Fotoanot hücresi UV ışığının fotoanota ulaşabilmesi için quartz cam ile dış ortamdan ayrılmıştır. Hücrelerin arasında anyon ve katyon seçici membranlar iyon

geçişini sağlamaktadır. Fotokataliz reaksiyonlarının devam edebilmesi ve hücre içerisinde karışımın sağlanabilmesi için fotoanot bölmesi havalandırılmaktadır.

Sistemde PCA marka PC-SK ve PC-SA kation ve anyon seçici membranlar kullanılacaktır (Tablo 3.2).

**Tablo 3.2:** Tez çalışmasında kullanılan membranların özellikleri

|   | <i>PC SK</i>                  | <i>PC SA</i>            |
|---|-------------------------------|-------------------------|
| Genel Kullanım Alanı                                | Standart                      | Standart                |
|   | Tuzsuzlaştırma                | Tuzsuzlaştırma          |
| Membran Türü  | Kuvvetli Asidik Sülfonik Asit | Kuvvetli Alkali Amonyum |
| Geçirgenlik sayısı KCl (0.1 / 0.5 N) Asit (0.7/3 N) | >0,95                         | >0,95                   |
| Direnç / $\Omega\text{cm}^2$                        | ~ 2.5                         | ~ 1.8                   |
| Su Muhtevası (wt%)                                  | ~ 9                           | ~ 14                    |
| Yırtılma Mukavemeti /kg-<br>cm <sup>-2</sup>        | 4-5                           | 4-5                     |
| Maksimum Çalışma Sıcaklığı / °C                     | 50                            | 60                      |
| Kalınlık / $\mu\text{m}$                            | 160-200                       | 180-220                 |
| Destek Tabakası                                     | Polyester                     | Polyester               |

Anot bölmesi bir UV ışık kaynağı ile aydınlatılmaktadır. Aynı zamanda dış bölmelerde bulunan fotoanot ve katot elektrotları bir doğru akım (DC) kaynağı ile bağlanmıştır. Fotokatalitik reaksiyonlar anot bölgesinde gerçekleşmekte olup, membranların dizilimine ortadaki bölmede ise elektrodializ süreci sonucunda iyon birikimi ya da giderimi meydana gelmektedir.

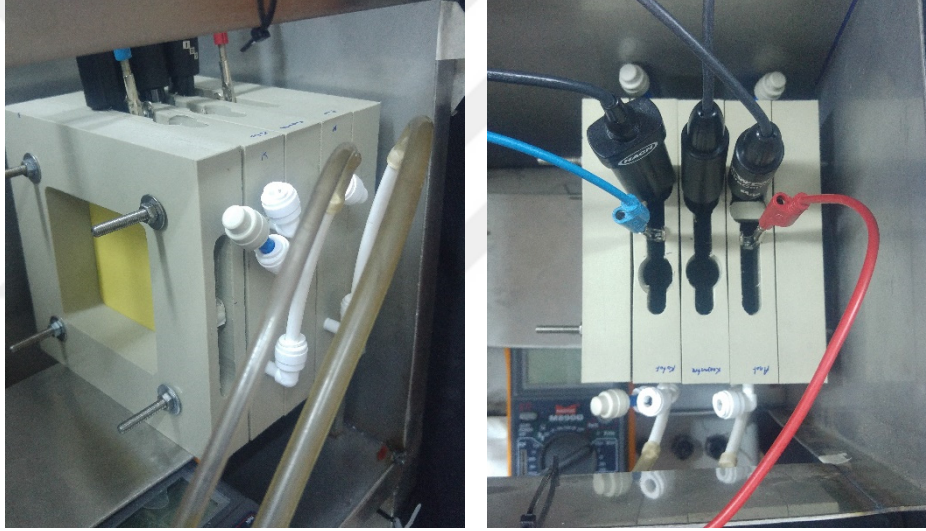
Tasarlanan FEK ünitesi döngülü kesikli ya da döngüsüz kesikli olarak çalıştırılacaktır. Bu nedenle iki adet reaktör tasarlanmıştır. FEK arıtma sisteminde her iki hücre ham su ile doldurularak elektrik gerilimi yüklü (-0.5-+1 V vs. SCE) anot elektrotu üzerine güneş simülatörü ile ışınlama yapılacaktır. Işınlama ile oluşan elektronlar katot hücresine transfer edilirken oluşan elektrik akımı fotoakım olarak potansiyometre ile ölçülecektir. Reaktörde farklı zamanlarda numune alınarak ölçümler yapılacaktır.

### 3.5.1. Kesikli Döngüsüz Reaktör Tasarımı

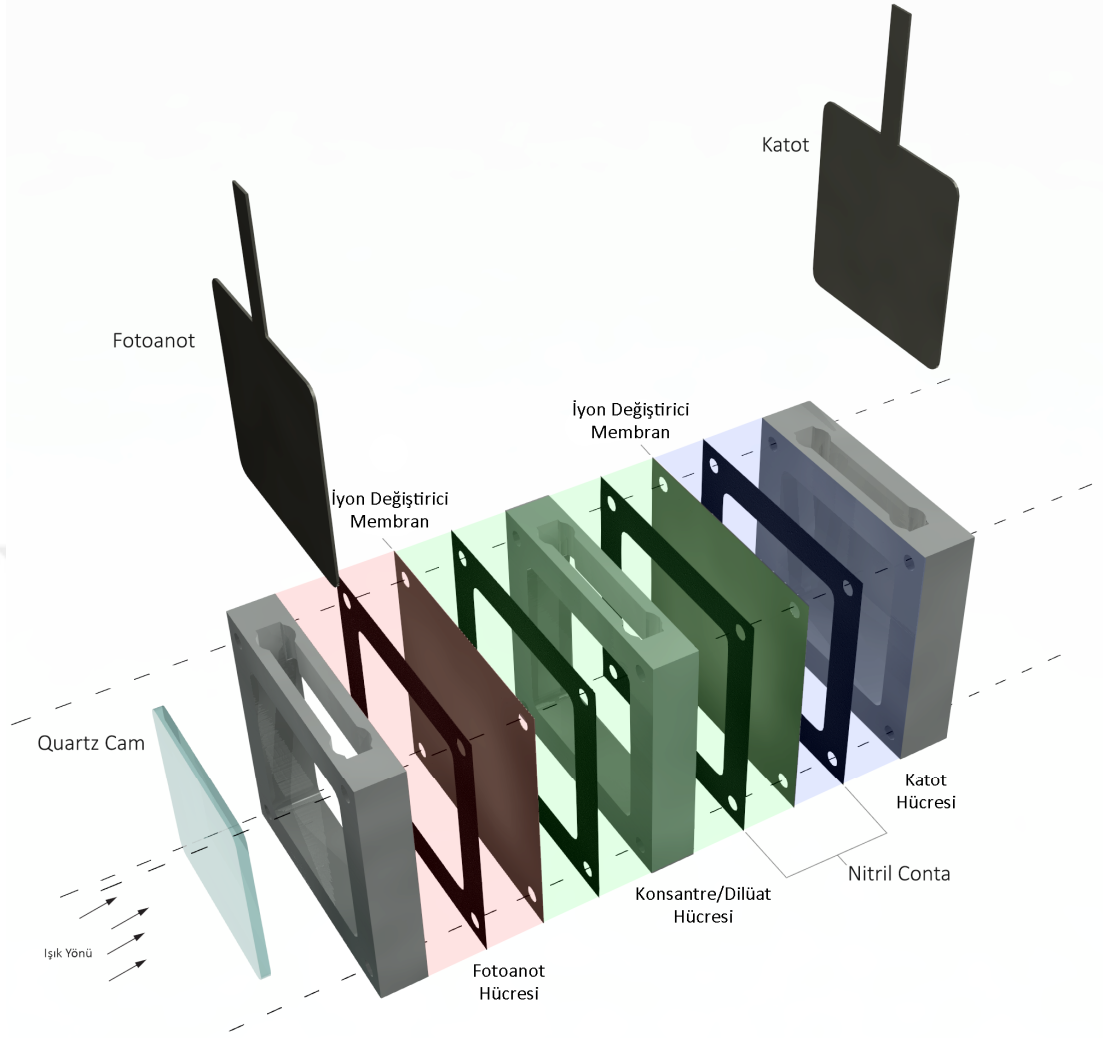
Kesikli döngüsüz reaktör, fotoanot, katot ve konsantre/diluat hücrelerinden oluşmaktadır. Fotoanot ve katot hücreleri solüsyonun karıştırılması ve solüsyona oksijen kazandırılması için

havalandırılmaktadır. Her bir hücredeki solüsyonlar sabit olup, hücreler arasındaki geçiş iyon seçici membranlar ile engellenmektedir (Şekil 3.3).

Kesikli döngüsüz olarak çalıştırılacak olan I. Tip reaktörde, arıtılmak istenen sıvı fotoanot ve katot bölmesine konulur. Organik kirleticilerin ve mikroorganizmaların giderimi fotoanot bölmesinde meydana gelmektedir. Bu sistemde iyon seçici membranların görevi pozitif ve negatif yüklü iyonları ayırarak anyon ve katyon seçici membranların arasında kalan konsantrasyon bölmesine taşımaktır. Ayrıca oluşan  $\text{OH}^\bullet$  radikallerinin membranların üzerinde oluşabilecek madde birikimlerini engelleyeceği düşünülmektedir. Sistem döngüsüz olarak çalıştırıldığı için verim takip edilerek, verimin düştüğü noktada anot ve katot hücrelerindeki sıvılar yer değiştirilecektir.



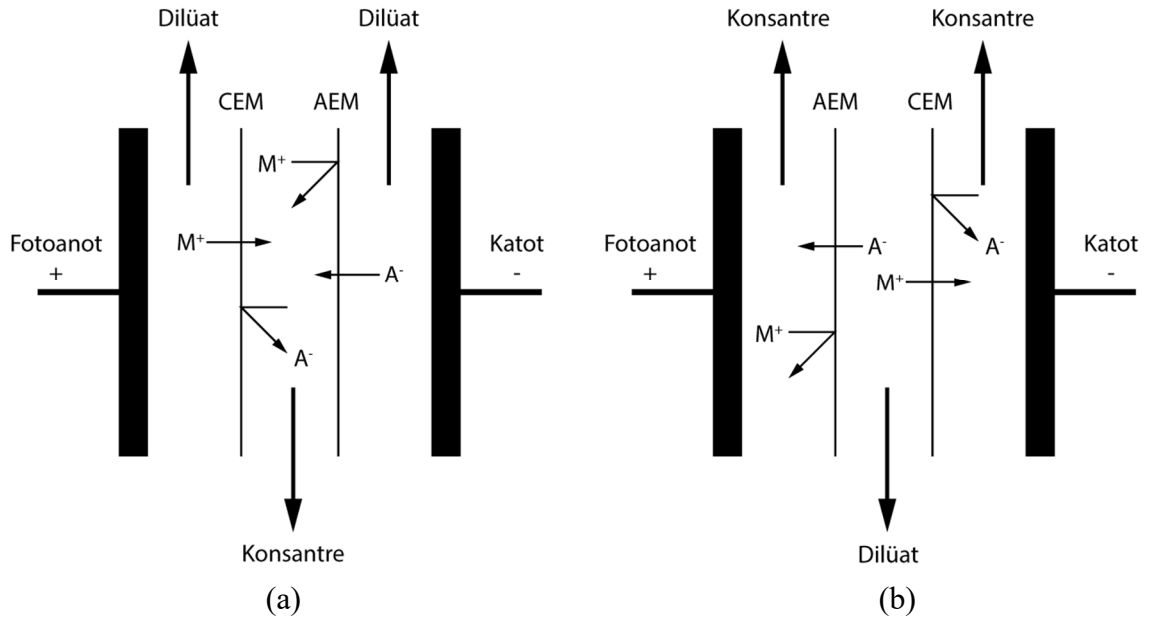
Şekil 3.2: Kesikli döngüsüz fotokatalitik elektrodializ hücresinin görünümü



**Şekil 3.3:** Kesikli döngüsüz fotokatalitik elektrodializ hücresi

Tasarlanan reaktörde membran dizilimleri değiştirildiğinde farklı sonuçlar alınabilmektedir. Kesikli döngüsüz sistemde fotoanot hücresi ve konsantre hücresini bir katyon seçici membran ayırmaktadır (Şekil 3.4-a). Bu durumda pozitif yüklü iyonların orta hücreye geçişi mümkün olmaktadır. Bununla birlikte fotoanot hücresinde fotokataliz reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan hidrojen iyonu ile negatif yüklü iyonların reaksiyona girmesi ve hücrenin pH'ının düşmesi beklenmektedir. Katot hücresinde herhangi bir fotokataliz reaksiyonu olmamakla birlikte katyon konsantrasyonu artacak, anyonlar ise orta bölmeğe geçecektir. Bu membran diziliminde ortadaki hücre konsantre hücresi görevi görmektedir. İyon taşınımı nedeniyle konsantre hücresine fotoanot hücresinden katyon, katot hücresinden anyon girişi olacağı için hücrede iletkenlik artacaktır.

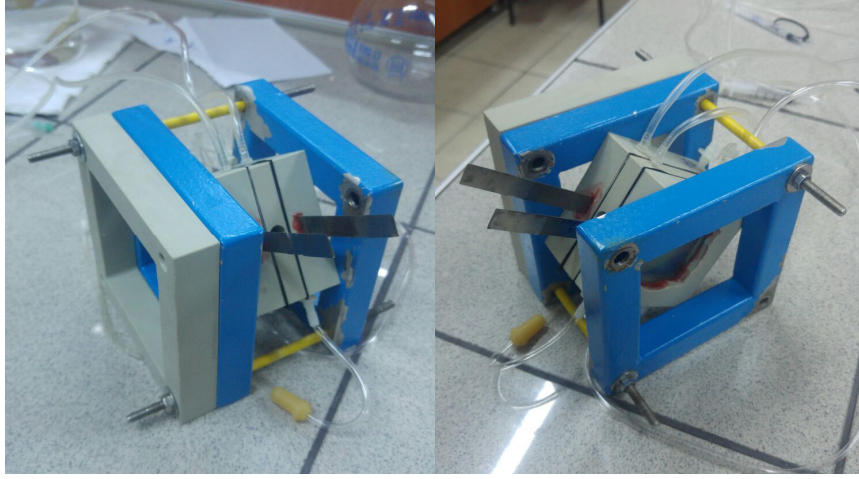
Kesikli döngüsüz sistemde anyon ve katyon seçici membran dizilimi değiştirildiğinde Şekil 3.4-a'da belirtilen taşınım mekanizması ters çalışmaktadır (Şekil 3.4-b). Orta hücrede bulunan anyonlar, anoda doğru hareket ederken anyon seçici membran sayesinde fotoanot hücreesine geçiş yapabileceklerdir. Bununla birlikte fotoanot hücreesinde yer alan katyonların diluat hücreesine taşınımı anyon seçici membran ile engellenecektir. Benzer bir durum katot hücreesi için de geçerlidir. Negatif yüklü olan katot hücreesi, pozitif yüklü iyonları kendine çekecektir. Diluat hücreesi ile katot hücreesi arasında yer alan katyon seçici membran, diluat hücreesindeki katyonların katot hücreesine geçişini sağlarken, katot tarafından itilen anyonların diluat hücreesine geçişini engelleyecektir.



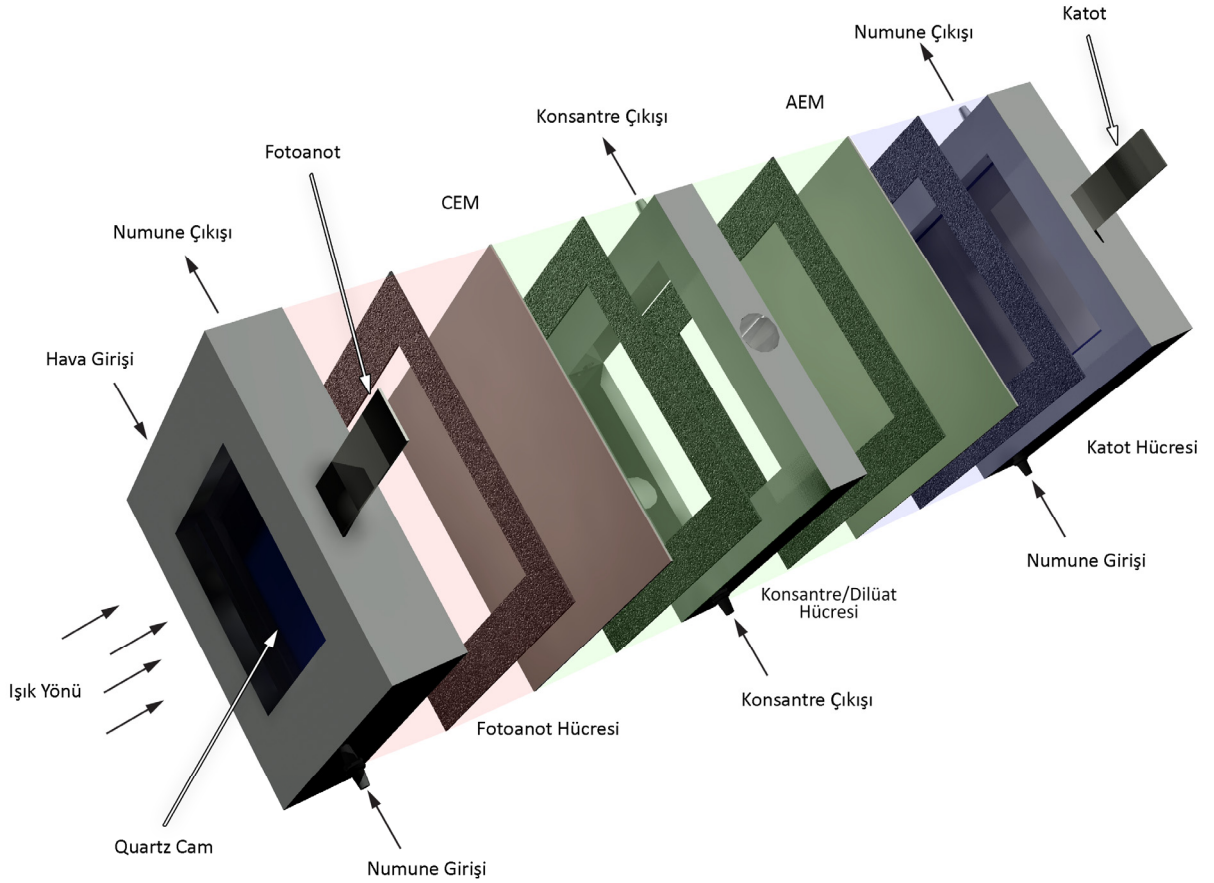
Şekil 3.4: Kesikli döngüsüz sistemde tasarlanan membran dizilimleri

### 3.5.2. Kesikli Döngülü Reaktör Tasarımı

Kesikli döngülü olarak tasarlanan II. Tip reaktör, döngüsüz sisteme ek olarak fotoanot ve katot hücreleri arasında sıvı döngüsü yapacak şekilde dizayn edilmiştir. Fotoanot ve katot hücreleri birbirlerine borular yardımı ile bağlıdır ve bir peristaltik pompayardımları ile iki hücre arasında sürekli bir sıvı döngüsü oluşturulmuştur. Fotoanot ve katot hücreesinde oksijen miktarının artırılabilmesi için havalandırma yapılmaktadır. Hücrelerin içerisinde hava birikimini engelleyebilmek için sistem 45° açıyla çalıştırılmaktadır. Bu sayede fotoanot ve katot hücrelerindeki numune çıkış noktalarından havanın tahliye edilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.5: Kesikli döngülü fotokatalitik elektrodiyaliz hücresinin görünümü

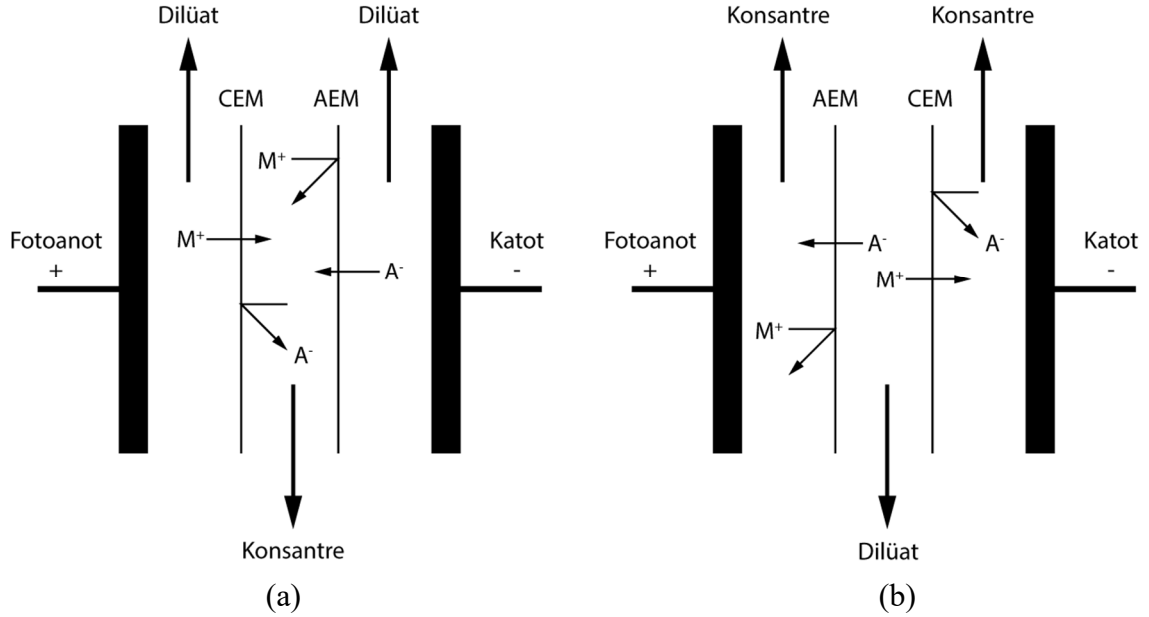


Şekil 3.6: Kesikli döngülü fotokatalitik elektrodiyaliz hücresi

Kesikli döngülü sistemin kurulmasının amacı, hücrelerde biriken iyonların daha verimli bir şekilde arıtılmasının sağlanmasıdır. Prensipde kesikli döngüsüz sistemle aynı şekilde

çalışmasına rağmen, fotoanot ve katot hücrelerinde meydana gelebilecek iyon birikimlerinin önüne geçilmesi planlanmaktadır.

Döngülü sistemde de, döngüsüz sistemde olduğu gibi membran dizilimleri değiştirildiğinde sistemin çalışma şekli değişmektedir (Şekil 12). Fotoanot hücre ve orta hücre arasında katyon değiştirici membran yerleştirildiğinde fotoanot hücrendeki katyonların orta hücreye geçişine izin verilmektedir. Benzer bir şekilde katot hücre ile orta hücre arasında yer alan anyon değiştirici membran, katot hücrende yer alan anyonların orta hücreye geçişine izin verir. Bununla birlikte orta hücreden fotoanot ve katot hücrelerine geçiş, iyon seçici membranlar tarafından engellenmektedir. Bu durumda ortadaki hücre konsantre hücre görevi görmektedir (Şekil 3.7-a). Membran dizilimleri değiştirildiğinde fotoanot ve katot hücrelerinden orta hücreye iyon geçişi engellenir, bununla birlikte ortadaki hücreden fotoanot hücrene anyon, katot hücrene ise katyon geçişi sağlanır. Bu durumda orta hücre dilüat hücre görevi görmektedir (Şekil 3.7-b).



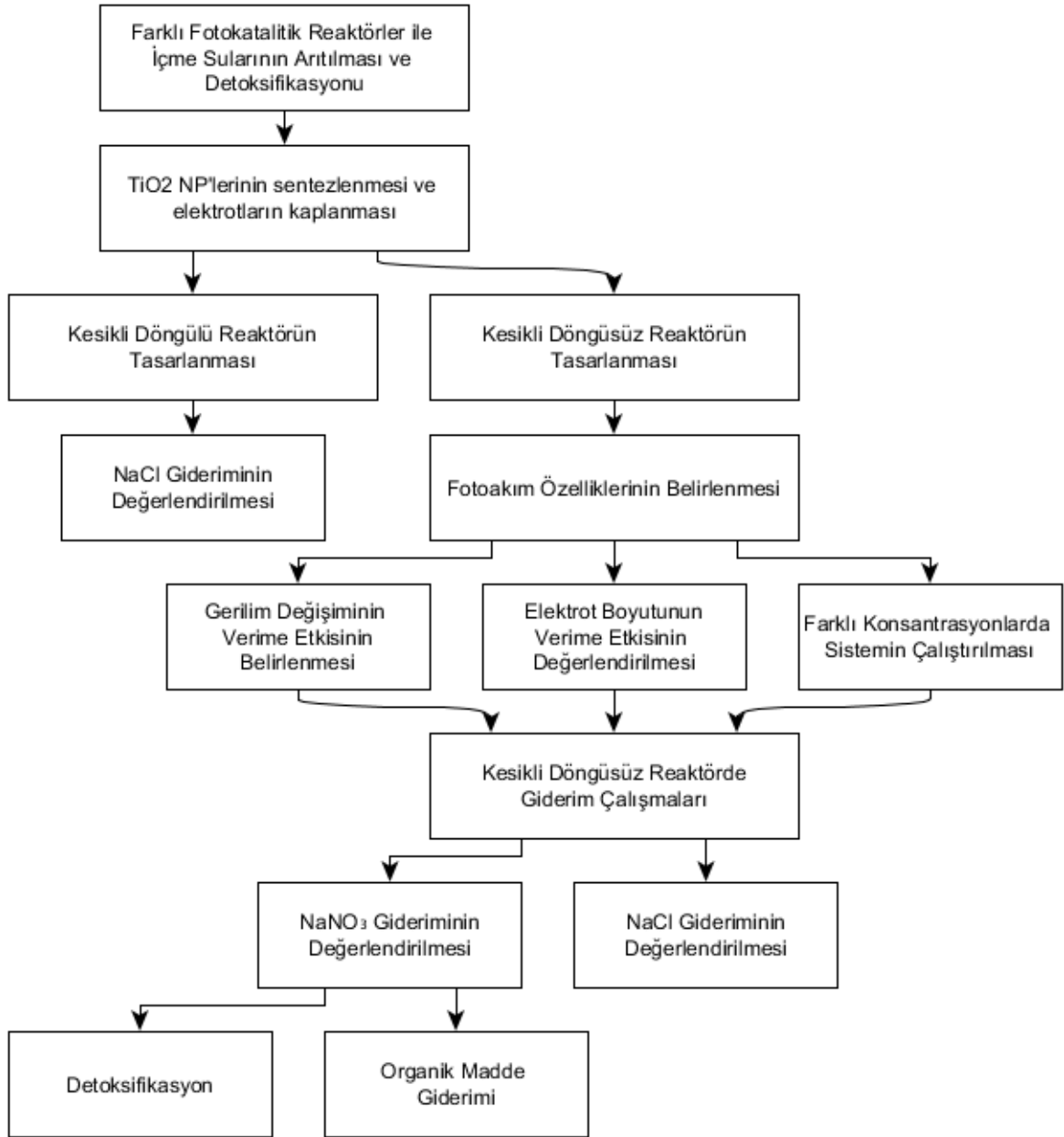
Şekil 3.7: Kesikli döngülü sistemde tasarlanan membran dizilimleri

Orta hücrenin dilüat hücre olarak çalıştırılması ile birlikte arıtılacak suyun bu hücreye beslenmesi gerekmektedir. Bu durumda fotoanot reaksiyonlarından faydalanılamamaktadır. Bu nedenle bu membran diziliminin sadece elektrodializ verimliliğini arttırabilmek amacıyla kullanılması düşünülmektedir.



### 3.6. TEZ SIRASINDA İZLENEN ÇALIŞMA PLANI

Deney sırasında izlenen çalışma planı Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

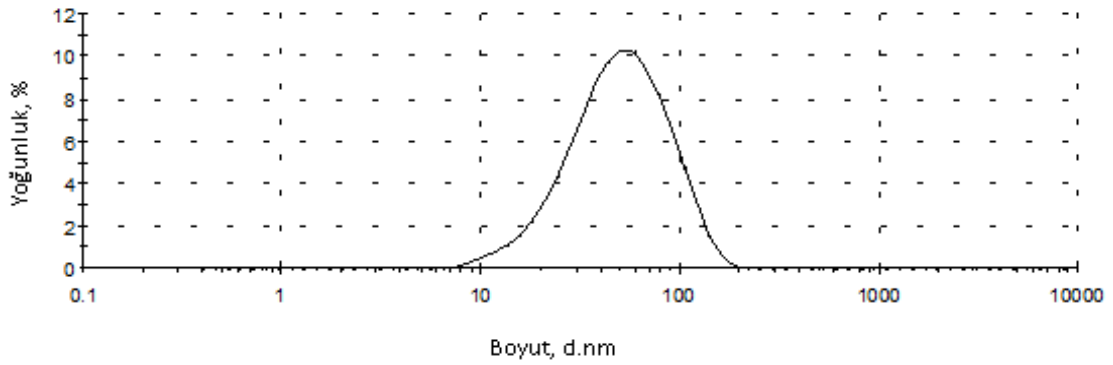


Şekil 3.8: Tez sırasında izlenen çalışma planının şematik gösterimi

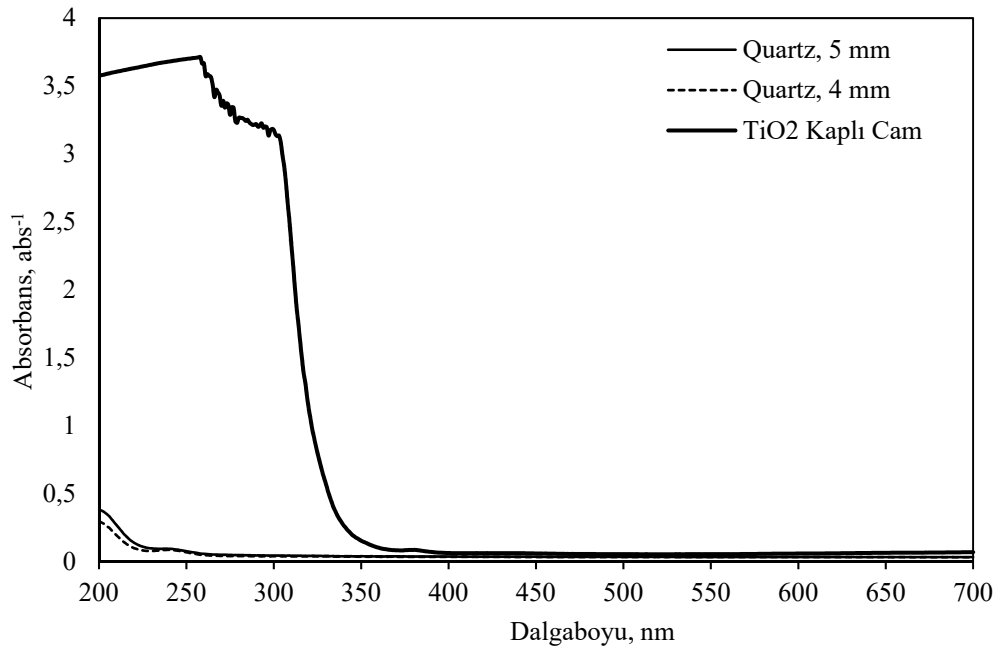
## 4. BULGULAR

### 4.1. HAZIRLANAN TiO<sub>2</sub> NP'LERİNİN ÖZELLİKLERİ

Sol-gel metodu ile sentezlenmiş olan TiO<sub>2</sub> nanopartiküllerinin partikül boyut dağılımı Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Ortalama partikül boyutu 42,49 nm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.1: Sol-Gel yöntemi ile sentezlenen TiO<sub>2</sub> NP'lerinin partikül boyut dağılımı

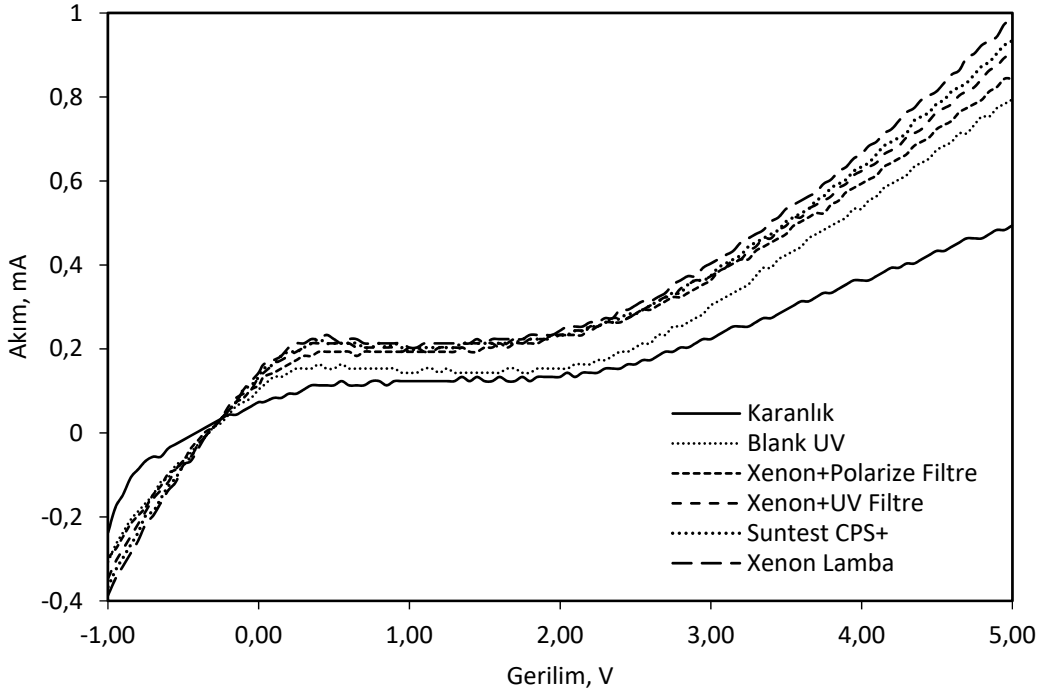


Şekil 4.2: Sol-Gel yöntemi ile sentezlenen TiO<sub>2</sub> NP'leri ve farklı kalınlıklardaki quartz camların farklı dalgalı boylarında absorbanans değerleri

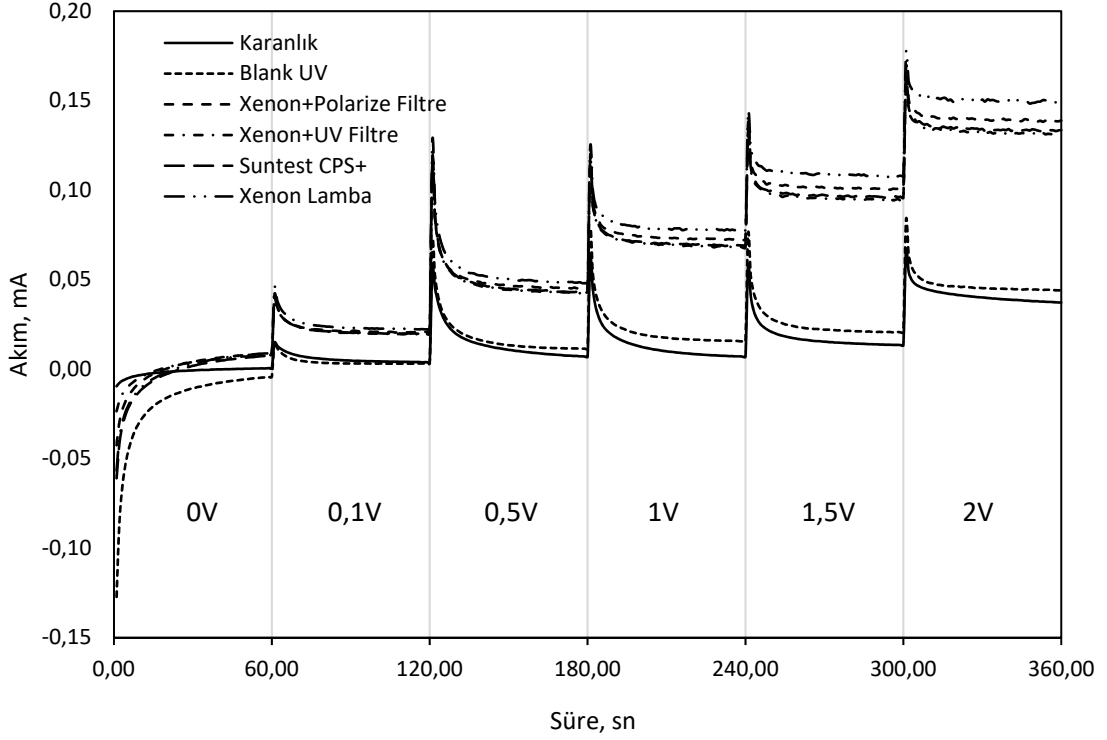
UV-Vis aborbans ölçümlerinde hazırlanan NP'lerin 320 nm dalgaboyunun altında ışığı absorbe ettiği görülmektedir (Şekil 4.2). Yapılan XRD ölçümlerinde TiO<sub>2</sub> NP'lerinin anataz formunda olduğu tespit edilmiştir.

#### 4.2. TiO<sub>2</sub> NP KAPLI FOTOANODUN FOTOAKIM ÖZELLİKLERİ

Fotoanotun fotoakım özelliklerinin belirlenebilmesi için fotoanot, katot ve konsantre hücrelerine eşit miktarda saf su konularak Blank UV, Xenon lamba ve Atlas Suntest CPS güneş simülatörü ile potansiyostatik taraması, lineer voltametri taraması (LSV) ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular karanlık ortamda elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Saf su ve farklı lambalarla yapılan çalışmalarda Xenon lambanın en yüksek fotoakım değerini verdiği belirlenmiştir (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4).



**Şekil 4.3:** Saf su ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde uygulanan gerilime karşılık fotoakım oluşumu. Farklı gerilimlerde 60 saniyelik periyotlarda zaman karşı yapılan potansiyostatik ölçümlerde, karanlık ortamda ve blank UV ışığı altında sistemin birbirine yakın bir fotoakımda çalıştığı görülmektedir. Zamana karşı yapılan ölçümlerde de Xenon lamba sistemde 0,15 mA'lık bir akım oluşturmuştur. Sistem bu akımda ortalama 6,67 mΩ direnç göstermektedir (Şekil 4.4).



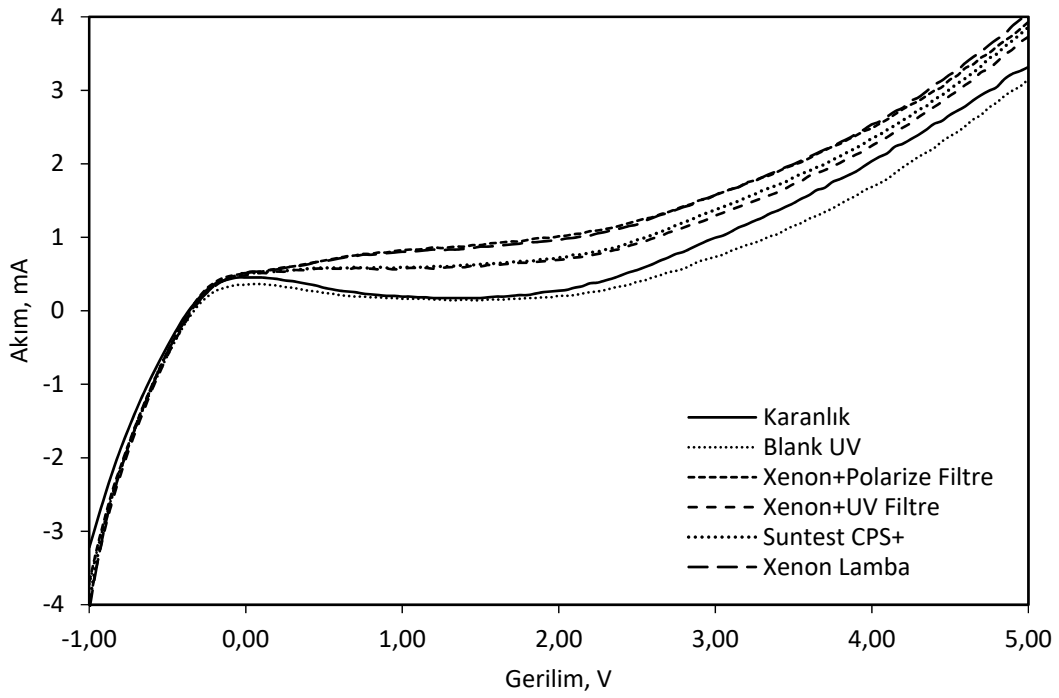
**Şekil 4.4:** Saf su ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde farklı gerilimlerde potansiyometri tarama değerleri

### 4.3. KESİKLİ DÖNGÜSÜZ SİSTEMDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

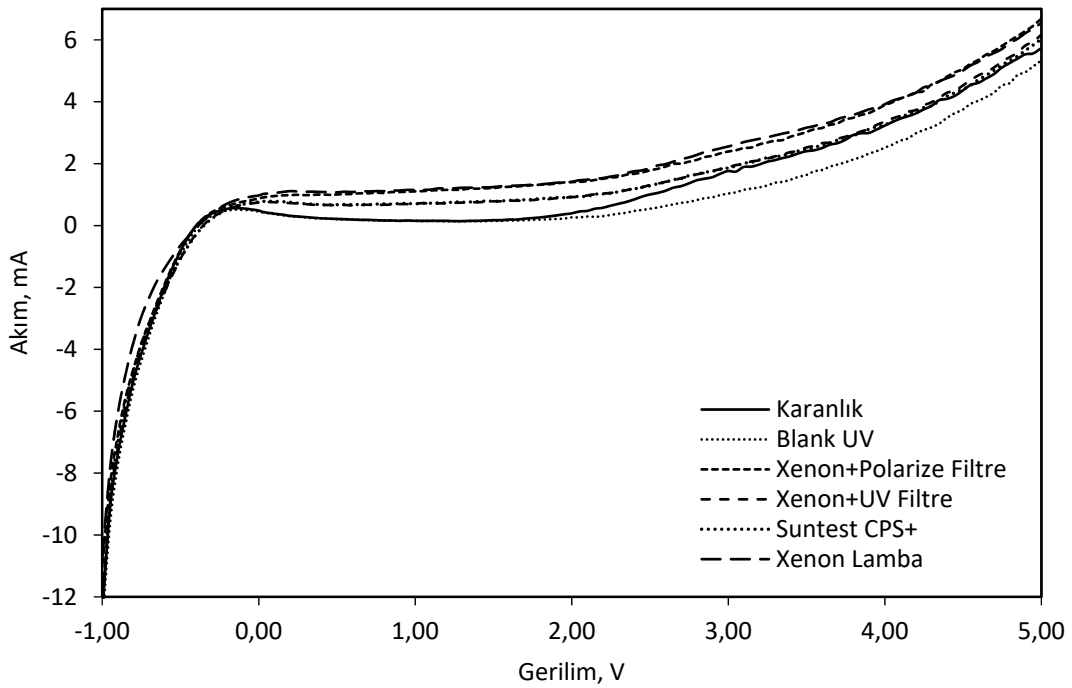
#### 4.3.1. Farklı Konsantrasyonlarda Fotoakım Özellikleri

Fotoanotun belirli konsantrasyonlar altında fotoakım özelliklerinin belirlenebilmesi için fotoanot, katot ve konsantre hücreleri belirlenen konsantrasyonlarda eşit hacimde NaCl ile doldurularak Blank UV, Xenon lamba ve Atlas Suntest CPS güneş simülatörü ile potansiyostatik taraması, LSV ölçümleri yapılarak karanlık ortamda yapılan ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Saf su ile çalıştırılan sistemdekine benzer bir şekilde Xenon lambanın en yüksek fotoakım değerini gösterdiği görülmektedir (Şekil 4.5-4.10). İletkenliğin artması ile birlikte 0,0029 M NaCl (~500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ve 0,00575 M NaCl (~1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde ortalama direnç sırasıyla 4,63 m $\Omega$  ve 0,94 m $\Omega$  olarak hesaplanmıştır.

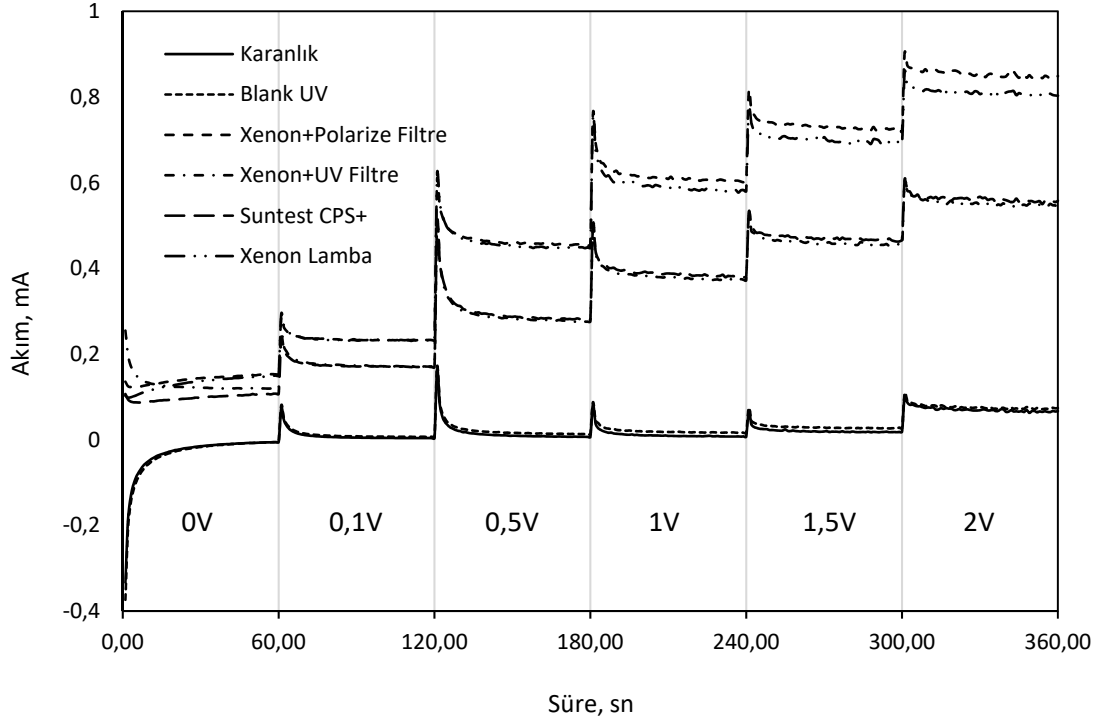
Sürelili yapılan potansiyometri taramalarında ise zamana karşı gerilim değişiminin konsantrasyon ile arttığı görülmektedir (Şekil 4.7-4.12).



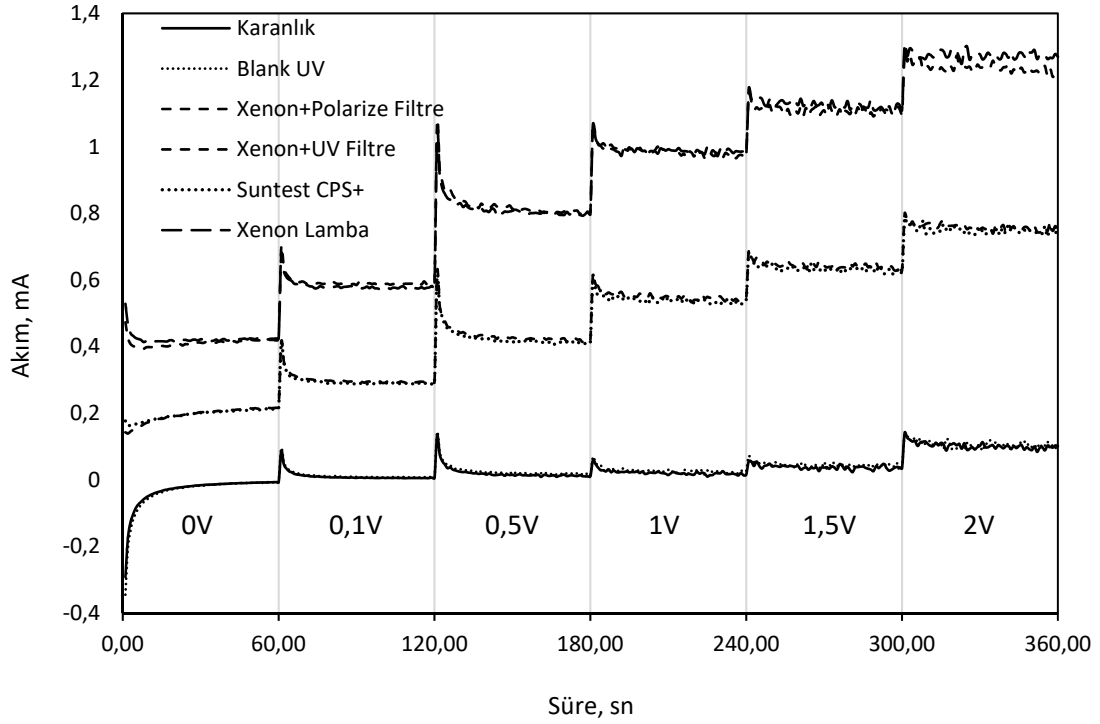
Şekil 4.5: 0,0029 M NaCl ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde uygulanan gerilime karşılık fotoakım oluşumu



Şekil 4.6: 0,00575 M NaCl ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde uygulanan gerilime karşılık fotoakım oluşumu

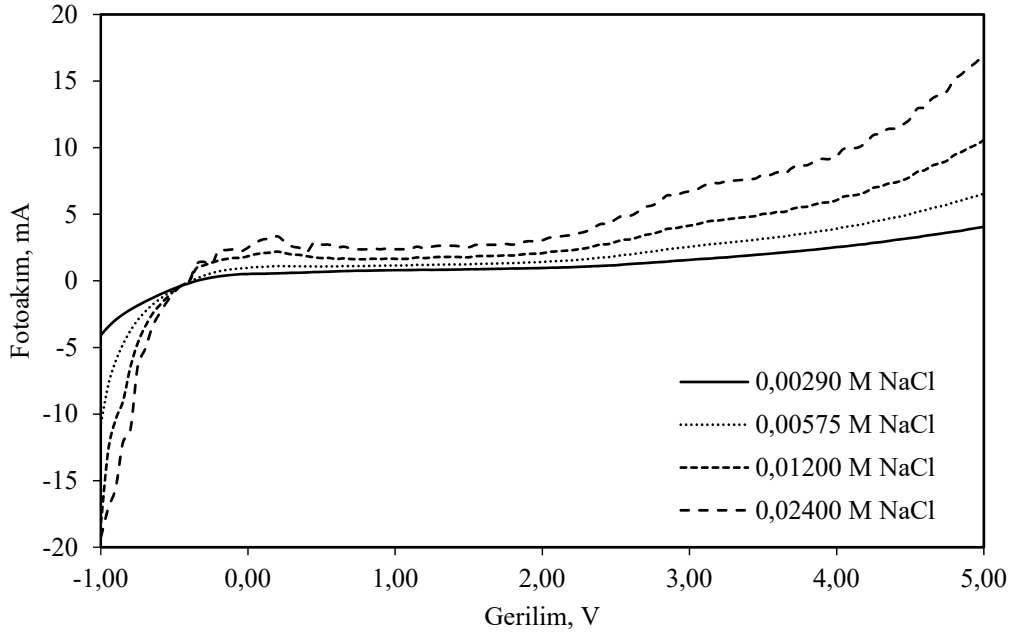


Şekil 4.7: 0,029 M NaCl ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde farklı gerilimlerde potansiyometri tarama değerleri



Şekil 4.8: 0,00575 M NaCl ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde farklı gerilimlerde potansiyometri tarama değerleri

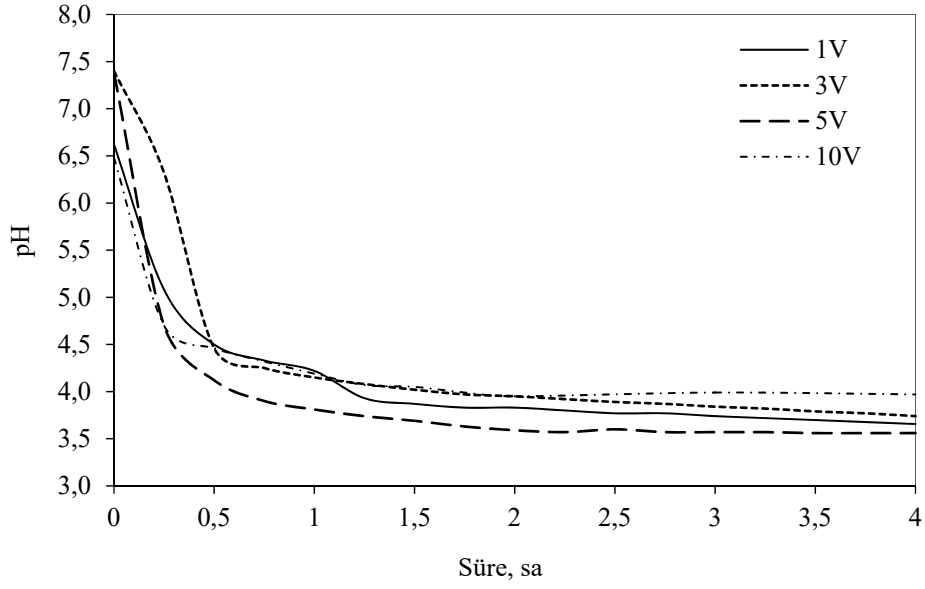
İletkenliğin artması ile birlikte sistemde oluşan fotoakım değişimlerinin belirlenebilmesi için 0,0029 M NaCl (~500  $\mu\text{S/cm}$ ), 0,00575 M NaCl (~1000  $\mu\text{S/cm}$ ), 0,0120 M NaCl (~2000  $\mu\text{S/cm}$ ) ve 0,0240M NaCl (~4000  $\mu\text{S/cm}$ ) solüsyonları hazırlanarak kesikli döngüsüz sistemde farklı gerilimlerde fotoakım değerleri ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde iletkenliğin artması ile birlikte fotoakım oluşumunun arttığı görülmektedir (Şekil 4.9). İyon miktarının artması ile birlikte sistemin direnci düşmektedir, bu elektrodializ prosesi ile karşılaştırıldığında beklenen bir durumdur.



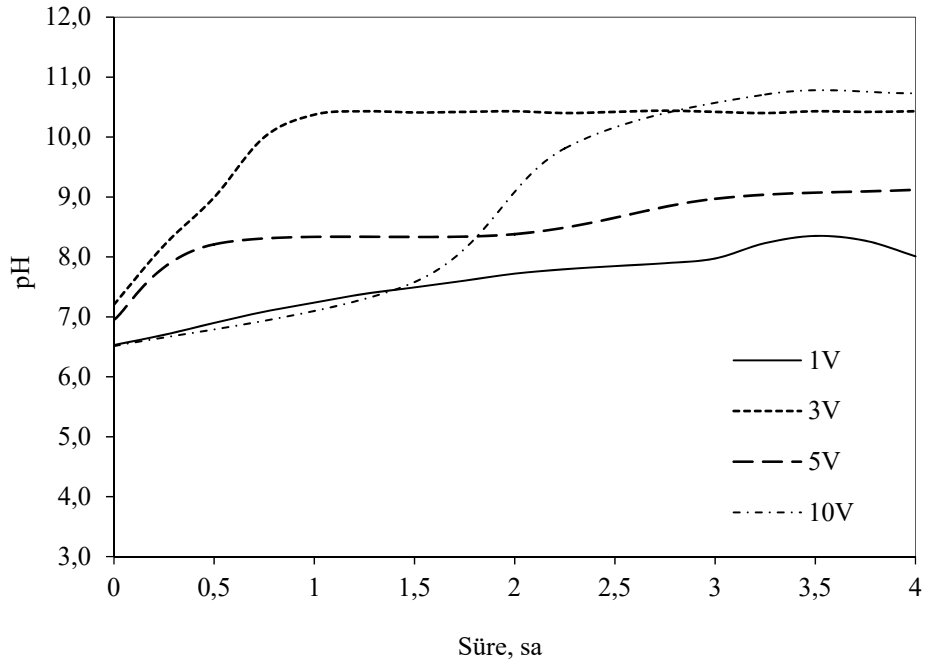
**Şekil 4.9:** Farklı konsantrasyonlarda NaCl ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde potansiyometri tarama değerleri

#### 4.3.2. Sistemde pH Değişimi ve Elektrot Boyutunun Etkisi

Katot ve fotoanot hücrelerindeki pH değişimi incelendiğinde; fotoanot hücresinde pH'ın hızlı bir şekilde düştüğü, katot hücresinde ise fotoanot hücresi ile karşılaştırıldığında daha yavaş bir şekilde yükseldiği görülmektedir (Şekil 4.10-4.15).

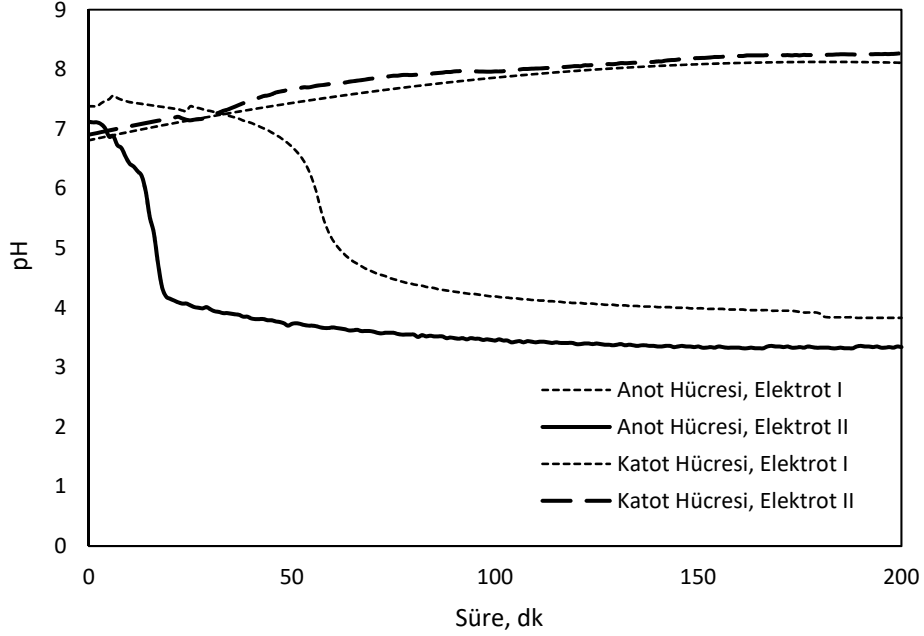


**Şekil 4.10:** Farklı gerilimler altında çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemin anot hücresinde meydana gelen pH değişikliği (0,00575 M NaCl, Kesikli sistem, Elektrot alanı: 25 cm<sup>2</sup>)



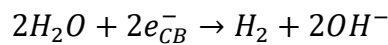
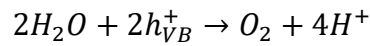
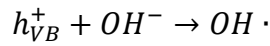
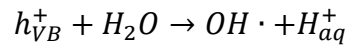
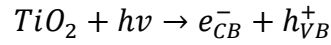
**Şekil 4.11:** Farklı gerilimler altında çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemin katot hücresinde meydana gelen pH değişikliği (0,00575 M NaCl, Kesikli sistem, Elektrot alanı: 25 cm<sup>2</sup>)





**Şekil 4.12:** Farklı elektrot boyutlarına göre anot ve katot hücrelerinde pH değişimi. (Elektrot I: 25 cm<sup>2</sup>, Elektrot II: 64 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V, Işık: Xenon Lamba)

Farklı elektrot boyutlarına göre pH değişimi incelendiğinde, fotoanot hücresindeki ani pH değişiminin fotokataliz reaksiyonları sonucunda olduğu görülmektedir (Şekil 4.12). Elektrot alanının büyümesi, uyarılarak iletkenlik bandına çıkan elektronların sayısını artırır. Bu durum, hücredeki fotokatalitik reaksiyonların etkinliğinin artmasını sağlar. TiO<sub>2</sub> ışık ile aydınlatıldığında oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonları meydana gelmektedir:

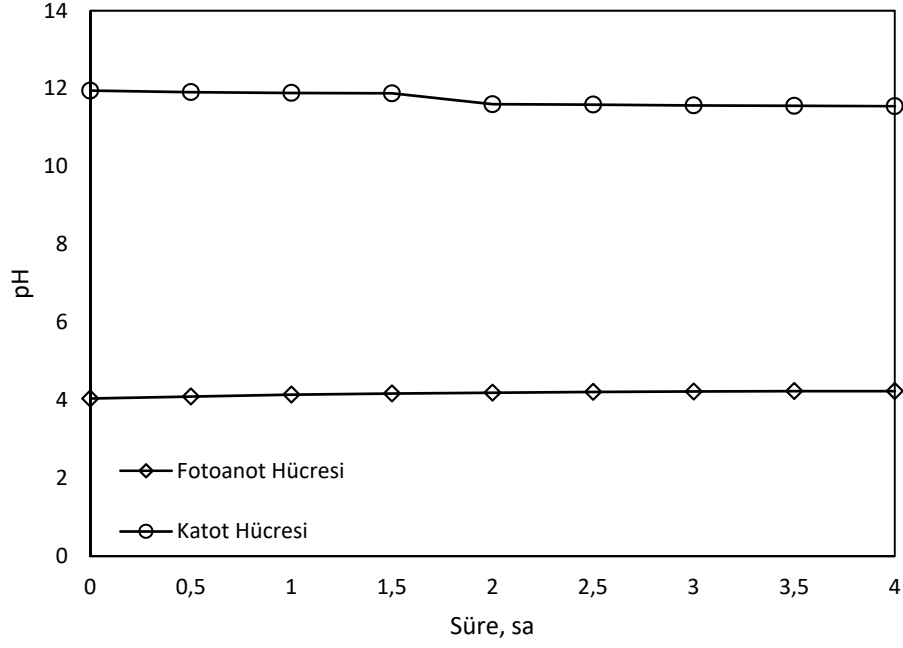


Işıkla uyarılan fotoanotun değerlik bandından kopan elektronların, katota doğru yöneleceği varsayılabilir. Bu durumda fotoanotun yüzeyindeki elektron holleri boşta kalır ve fotoanot

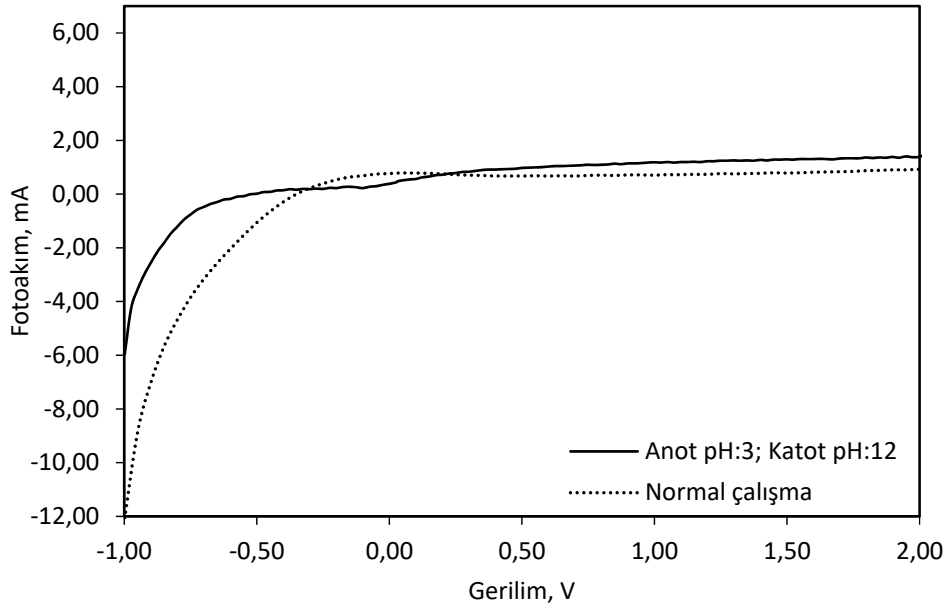
hücresinde pH değeri düşer. Katot bölmesini incelediğimizde ise bu hücredeki pH artışının sistemin üretmiş olduğu fotoakım ile iyonların hareket etmesi olduğu görülmektedir. Katot bölmesi ve konsantre bölmesini bir adet anyon seçici membran ayırmaktadır, bu bölme içerisindeki sodyum iyonları anyon seçici membran tarafından tutulurken klorür iyonları konsantre bölmesine hareket eder. Katot hücresinde kalan sodyum iyonu ise, OH iyonu ile tepkimeye girip NaOH oluşturur. Bu durum anot hücresinde pH'nın yükselmesine neden olur.

Bu durumun sistemin çalışmasına olan etkisinin anlaşılabilmesi için kesikli döngüsüz sistemde fotoanot hücresine beslenen solüsyonun pH değeri 3'e, katot hücresine beslenen solüsyonun pH'ı ise 11'e çıkartılmıştır. Sistem bu şekilde çalıştırıldığında pH değerlerinde değişim gözlenmemiştir, sistemin çalışma prensibine göre bu beklenen bir durumdur (Şekil 4.13).

Sistemin çalışma verimi incelendiğinde 4 saatlik çalışma sonunda sodyum giderim veriminin %2 olduğu bulunmuştur. Yapılan diğer arıtma çalışmaları ile karşılaştırıldığında fotoanot ve katot hücresindeki pH değerlerinin verimliliği etkilediği görülmektedir. Bu nedenle fotoanot ve katotta pH takibinin yapılması gerektiği, fotoanot hücresinde pH değeri düştüğünde hücrelerdeki solüsyonlarda yer değiştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte kesikli döngülü sistemde fotoanot ve katot hücreleri sürekli döngü halinde olduğu için, sistemin daha verimli çalışacağı düşünülebilir. Fotoakım oluşumu incelendiğinde lineer voltametri taramasında yapılan çalışmanın daha yüksek akım değeri verdiği görülmektedir (Şekil 4.14). Bu durumun pH ayarı yapılırken kullanılan NaOH ve HCl solüsyonlarından gelen iletkenlik nedeniyle olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 4.13:** Fotoanot bölmesi pH=3; Katot bölmesi pH=12 olduğu durumda sistemde süreye bağlı olarak pH değişimi (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)

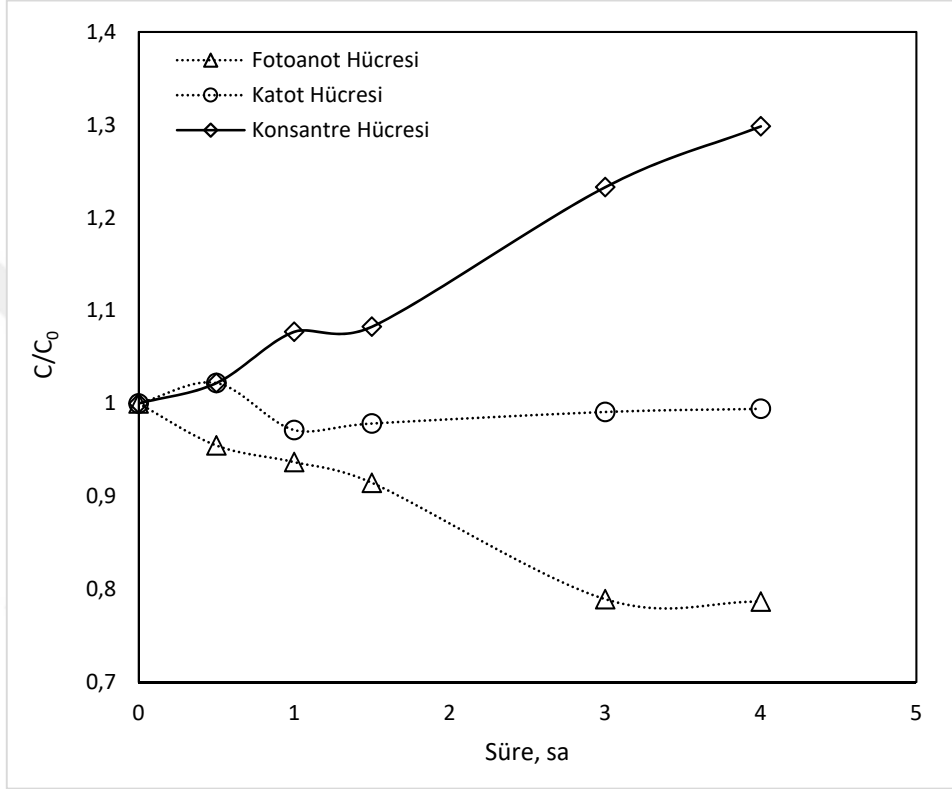


**Şekil 4.14:** Fotoanot bölmesi pH=3; Katot bölmesi pH=12 olduğu durumda gerilim değişimine göre fotoakım oluşumu.

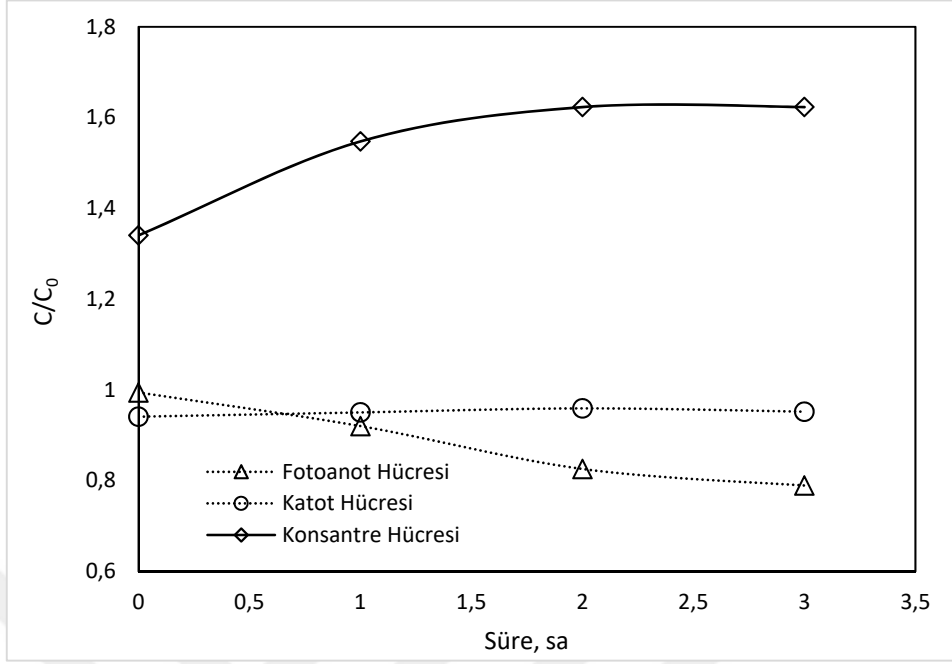
#### 4.3.3. Elektrot Boyutunun Verime Etkisi

Elektrot boyutunun çalışma verimine etkisinin incelenebilmesi için 25 cm<sup>2</sup> ve 64 cm<sup>2</sup> boyutunda elektrotlar kullanılmıştır. Kesikli döngüsüz sistem bu elektrotlarla çalıştırılarak

fotoakım, pH ve sodyum değişimleri incelenmiştir. pH değişimleri Şekil 4.12’de verilmiştir. Sistem verimi incelendiğinde aynı şartlar altında 25 cm<sup>2</sup>’lik elektrot kullanılan sisteme göre daha yüksek verim elde edilmiştir. 25 cm<sup>2</sup>’lik elektrot ile konsantre hücrede %12 oranında birikim elde edilmiştir. Buna karşılık 64 cm<sup>2</sup>’lik elektrot ile birikim %46 mertebesindedir (Tablo 4.1).



**Şekil 4.15:** Döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64cm<sup>2</sup>)



**Şekil 4.16:** Anot ve katot hücrelerindeki solüsyonlar değiştirildikten sonra döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64cm<sup>2</sup>)

#### 4.3.4. Sistemde İletkenlik Değişimi

Gamry PCI4/300 potantiyostat hassas akım ve gerilim ölçümü yapabilmek için gümüş/gümüş klorür elektrotuna ihtiyaç duymaktadır. Bu elektrot fotoanot ve katot arasında yer alan konsantre hücresine yerleştirilmiş ve fotoakım ölçümleri ile arıtma çalışmaları potantiyostat ile yapılmıştır. Kullanılan referans elektrotu, az miktarda da olsa iletkenlik girişimine neden olmaktadır.

Hücrelerdeki iletkenlik değişimleri izlendiğinde, farklı solüsyonlar ile döngüsüz kesikli çalıştırılan sistemde anot ve katot hücrelerinde ciddi bir iletkenlik düşüşü görülmezken konsantre hücresinde iletkenliğin arttığı görülmektedir. Anot ve katot hücrelerinde gözlemlenen durum, iyon transferi sonucunda asit ve baz oluşumunun etkisidir.

#### 4.4. KESİKLİ DÖNGÜSÜZ SİSTEMDE YAPILAN ARITMA ÇALIŞMALARI

Kesikli döngüsüz sistem çalıştırılırken bütün hücelere eşit hacme ve konsantrasyona sahip solüsyonlar konulmuştur. Sistem farklı boyutlarda elektrotlar ve farklı gerilimler altında çalıştırılarak pH, iletkenlik, sodyum, klorür ve nitrat takibi yapılmıştır. Daha önceki çalışmalarda en yüksek fotoakım üretimini sağladığı için çalışmalar Suntest CPS+ ve Xenon

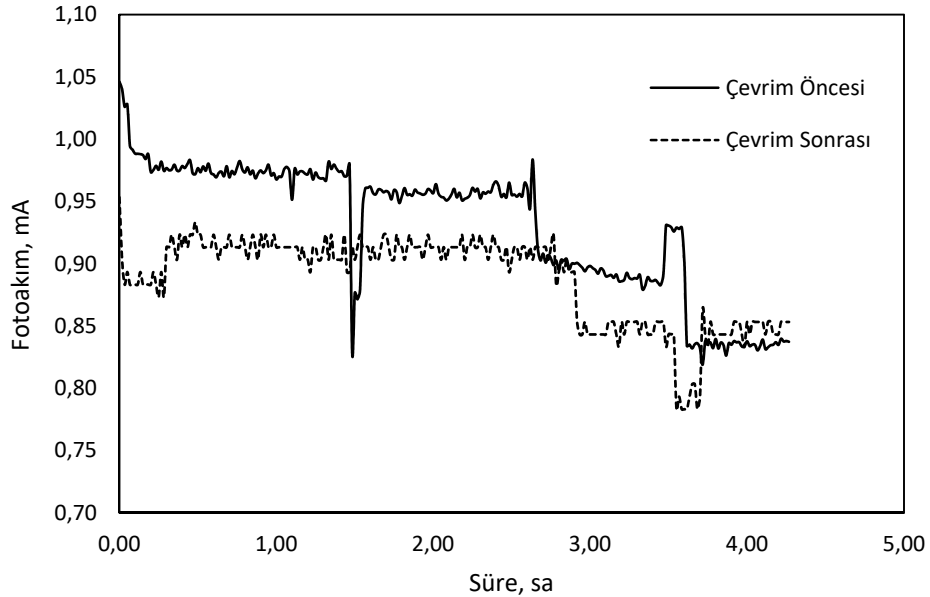
lamba ile yapılmıştır. Sistemin pH değeri takip edilerek pH değişimi azaldığında fotoanot ve katot bölmesindeki solüsyonlar yer değiştirilerek arıtma çalışmasına devam edilmiştir.

#### 4.4.1. Kesikli Döngüsüz Sistemde Yapılan NaCl Giderim Çalışmaları

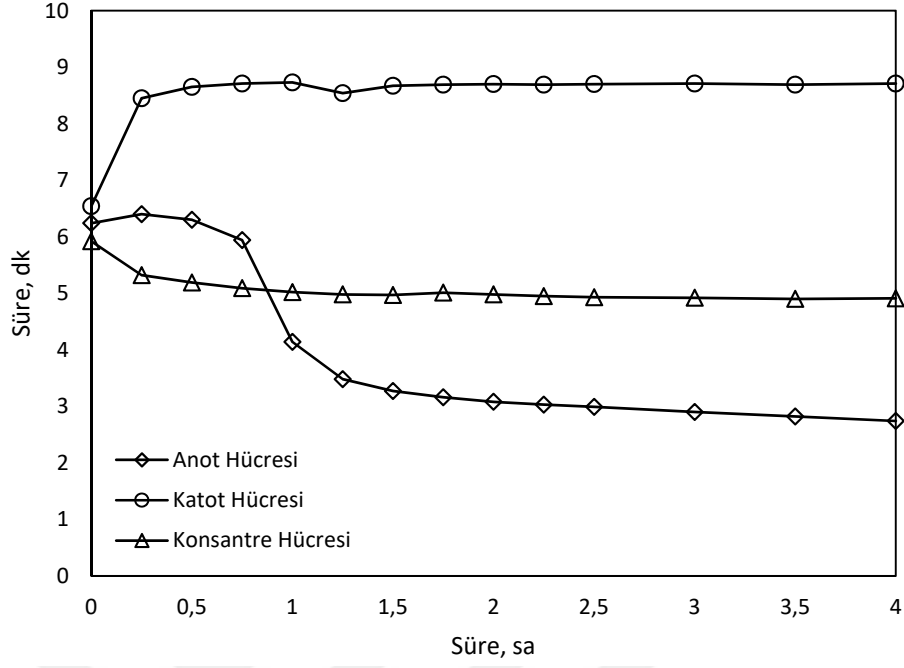
25 cm<sup>2</sup> alana sahip TiO<sub>2</sub> elektrotların kullanıldığı kesikli döngüsüz sistemde 1V, 3V, 5V ve 10V olmak üzere farklı gerilimlerde eşit sürelerde çalıştırılmıştır. Hücrelerin pH ve sodyum değişimleri takip edilerek giderim verimleri belirlenmiştir. Reaktörler ilk önce 4 saat boyunca çalıştırılmış, ardından sistem durdurularak fotoanot ve katot bölmesindeki solüsyonların yerleri değiştirilmiştir. Sistem tekrar çalıştırılıp, zamana karşı pH ve sodyum analizleri yapılmıştır. Çalışma sonunda anyon analizi yapılarak sistemin verimi belirlenmiştir.

##### 4.4.1.1. Suntest CPS+ Cihazı ile 1V Gerilim Altında Yapılan Çalışma

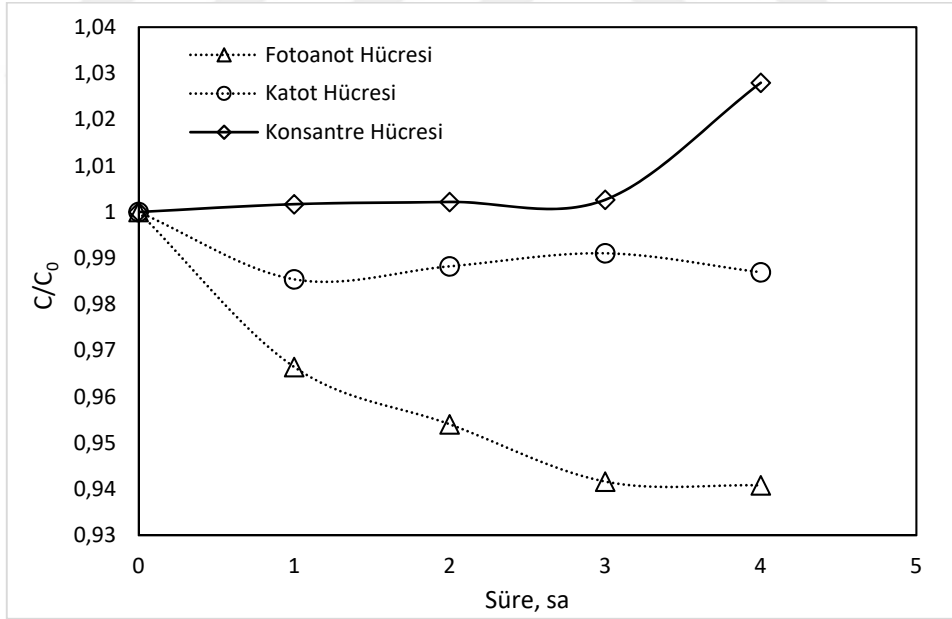
Kesikli döngüsüz sistem Suntest CPS+ güneş simülatörünün ürettiği ışık altında 4 saat boyunca çalıştırılmıştır. Sistemin sodyum giderimi solüsyon değişimi yapılmadan önce %6, sonra ise %10 olarak hesaplanmıştır. Konsantre bölmesinde kümülatif sodyum birikimi %16 seviyesindedir (Şekil 4.17-4.20).



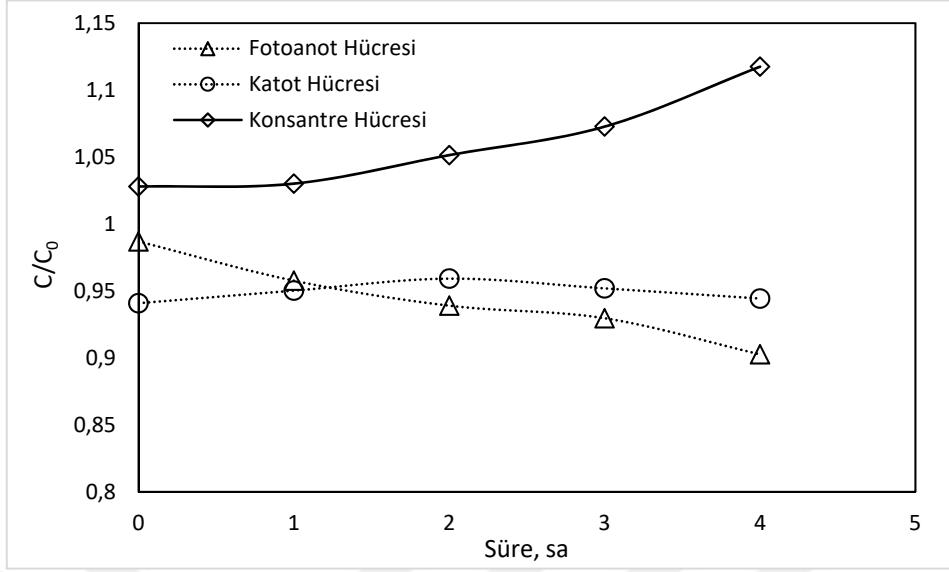
**Şekil 4.17:** Döngüsüz kesikli sistemde ve solüsyon değişimi yapıldıktan sonra fotokim oluşumu (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Suntest CPS+; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



Şekil 4.18: Kesikli döngüsüz sistemde anot, katot ve konsantre hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Suntest CPS+; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



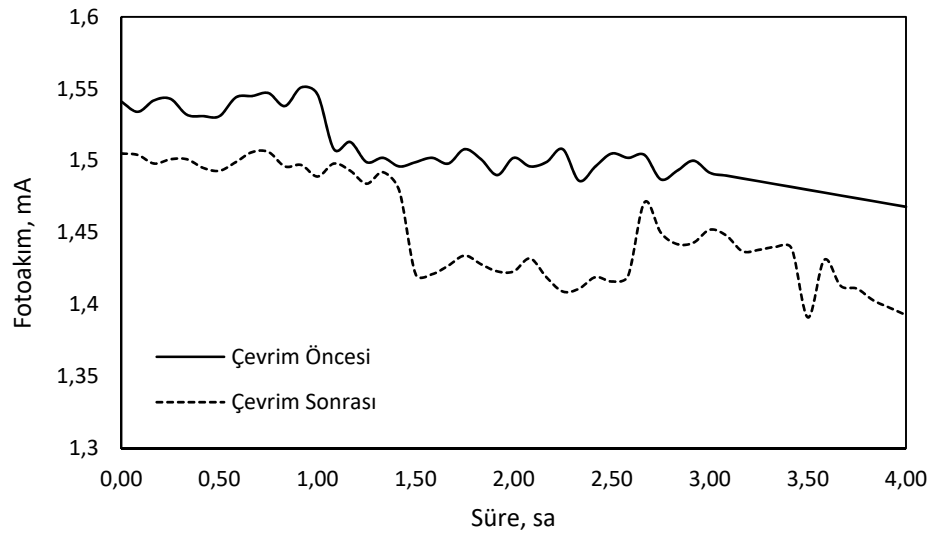
Şekil 4.19: Döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Suntest CPS+; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



**Şekil 4.20:** Anot ve katot hücrelerindeki solüsyonlar değiştirildikten sonra döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Suntest CPS+; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)

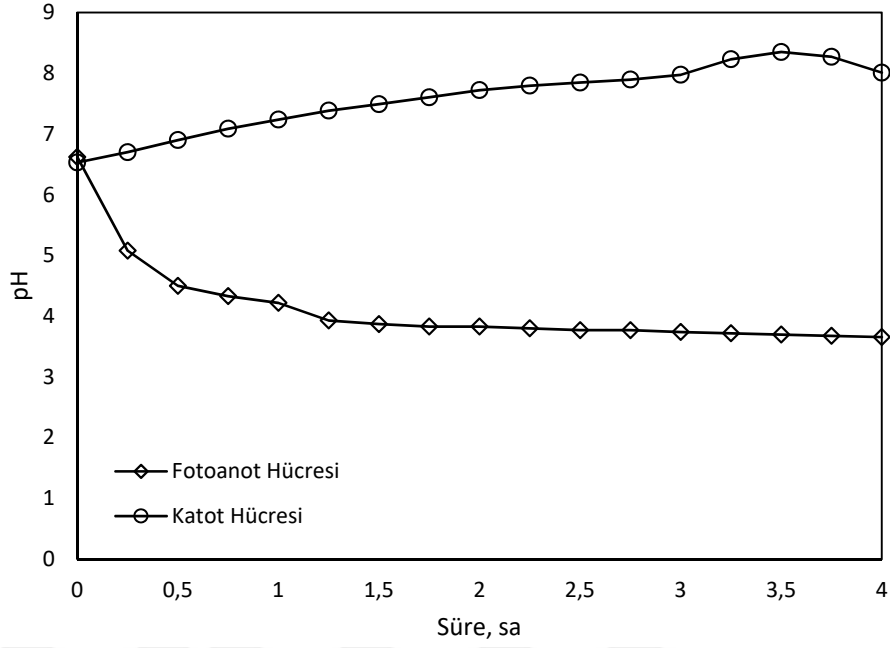
#### 4.4.1.2. Xenon Lamba ile 1V Gerilim Altında Yapılan Çalışma

Kesikli döngüsüz sistem Xenon lamba tarafından üretilen ışık altında 4 saat boyunca çalıştırılmıştır. Sistemin sodyum giderimi solüsyon değişimi yapılmadan önce %9, sonra ise %23 olarak hesaplanmıştır. Konsantre bölmesinde kümülatif sodyum birikimi %32 seviyesindedir (Şekil 4.21-4.25).

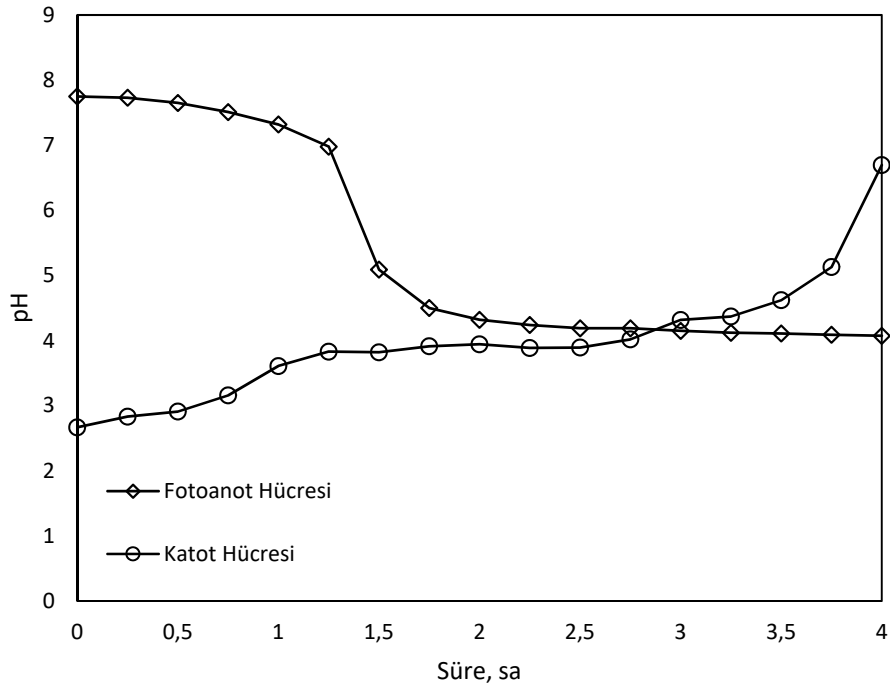


**Şekil 4.21:** Döngüsüz kesikli sistemde ve solüsyon değişimi yapıldıktan sonra fotokim oluşumu (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon lamba, TiO<sub>2</sub> elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)

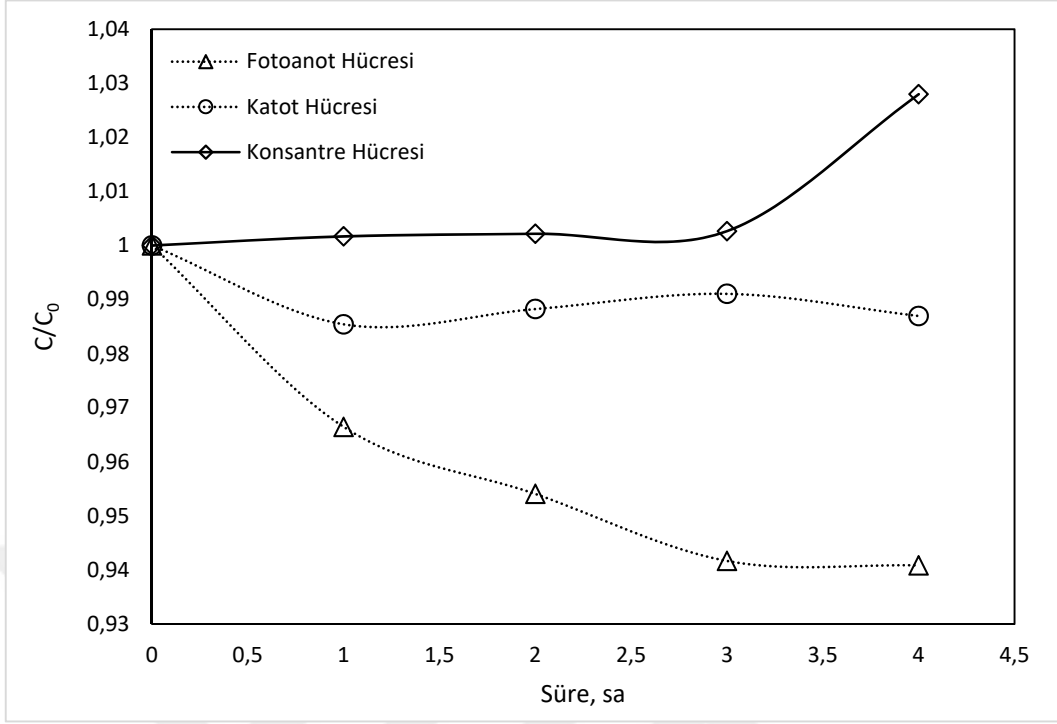




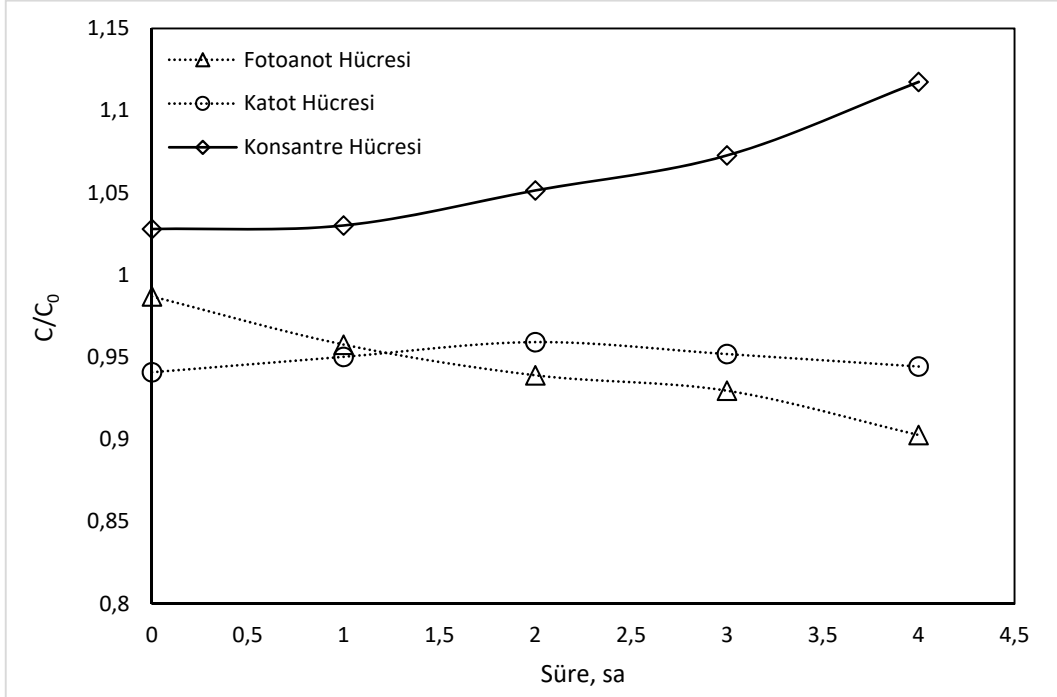
Şekil 4.22: Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



Şekil 4.23: Kesikli döngüsüz sistemde solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



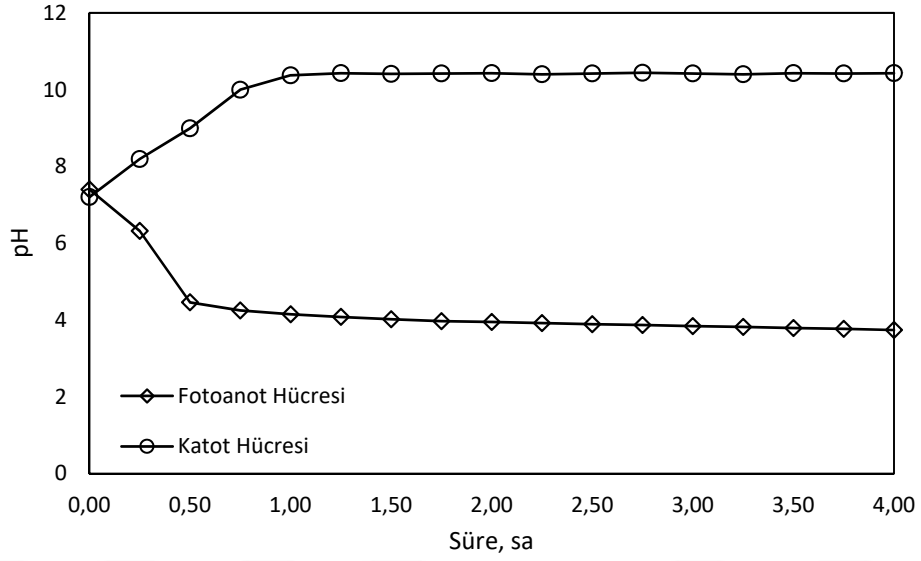
Şekil 4.24: Döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



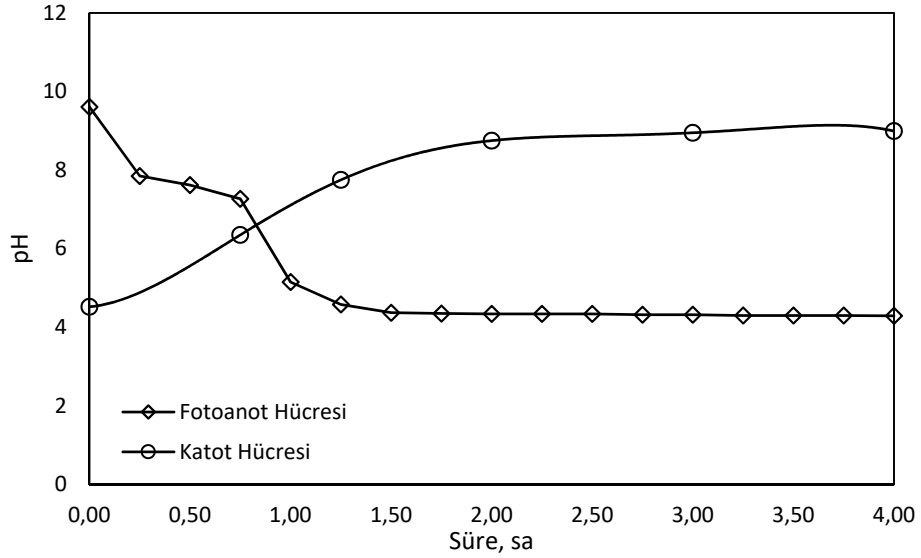
Şekil 4.25: Anot ve katot hücrelerindeki solüsyonlar değiştirildikten sonra döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)

#### 4.4.1.3. Xenon Lamba ile 3V Gerilim Altında Yapılan Çalışma

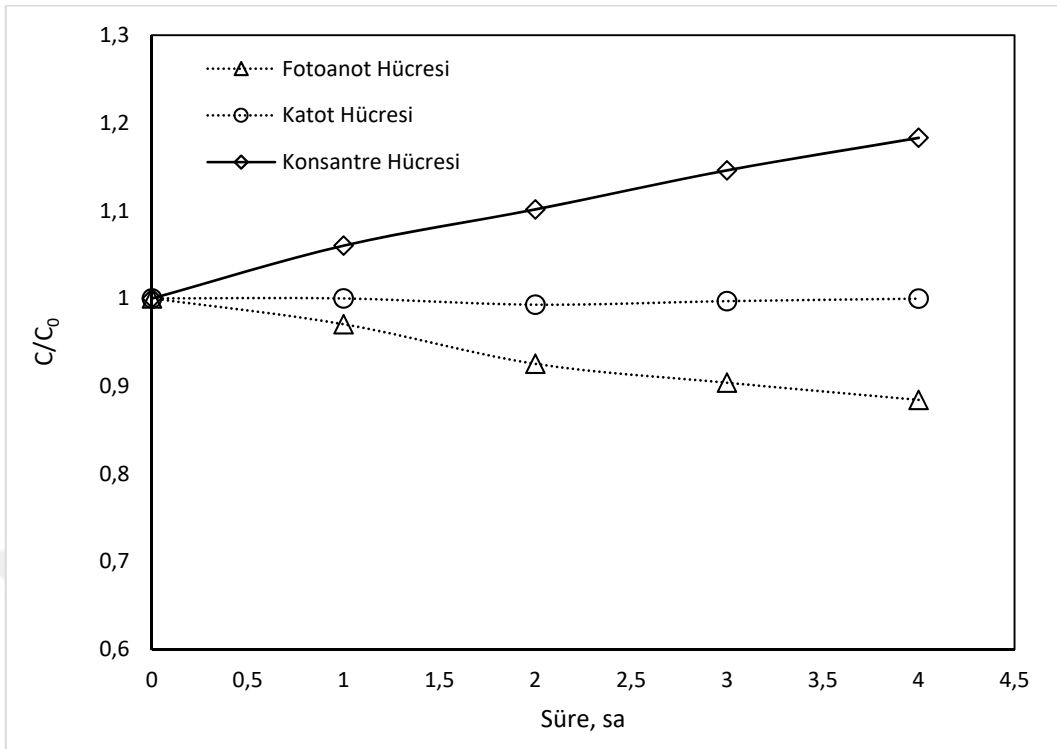
Kesikli döngüsüz sistem Xenon lamba tarafından üretilen ışık altında 4 saat boyunca 3V gerilim altında çalıştırılmıştır. Sistemin sodyum giderimi solüsyon değişimi yapılmadan önce %12, sonra ise %22 olarak hesaplanmıştır. Konsantre bölmesinde kümülatif sodyum birikimi %34 seviyesindedir (Şekil 4.26-4.29).



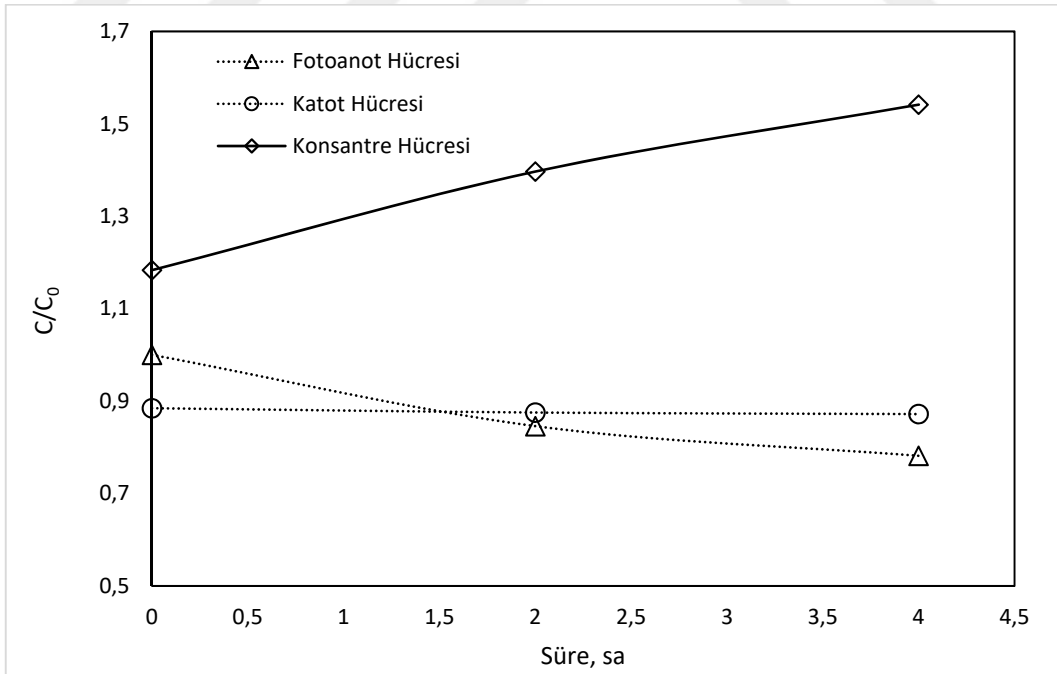
Şekil 4.26: Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 3V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



Şekil 4.27: Kesikli döngüsüz sistemde solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 3V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



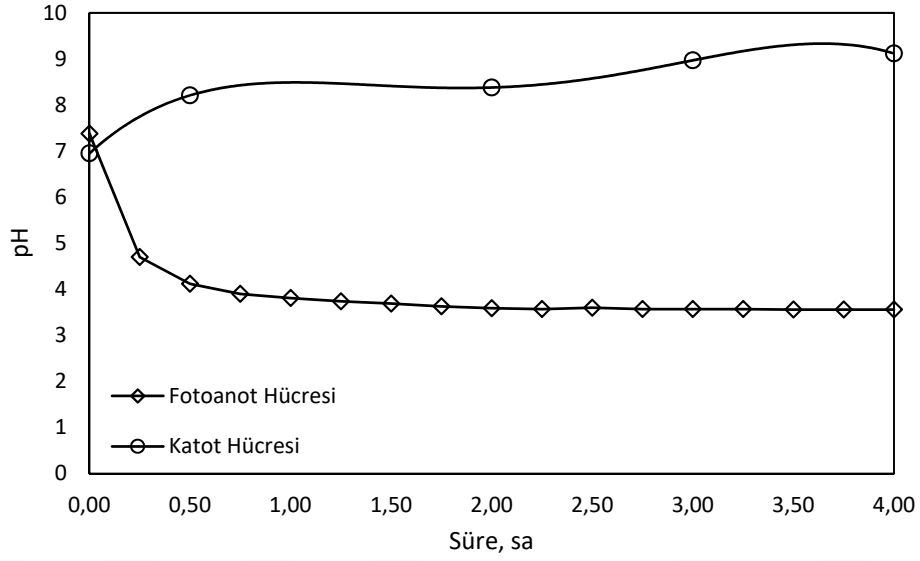
**Şekil 4.28:** Döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 3V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



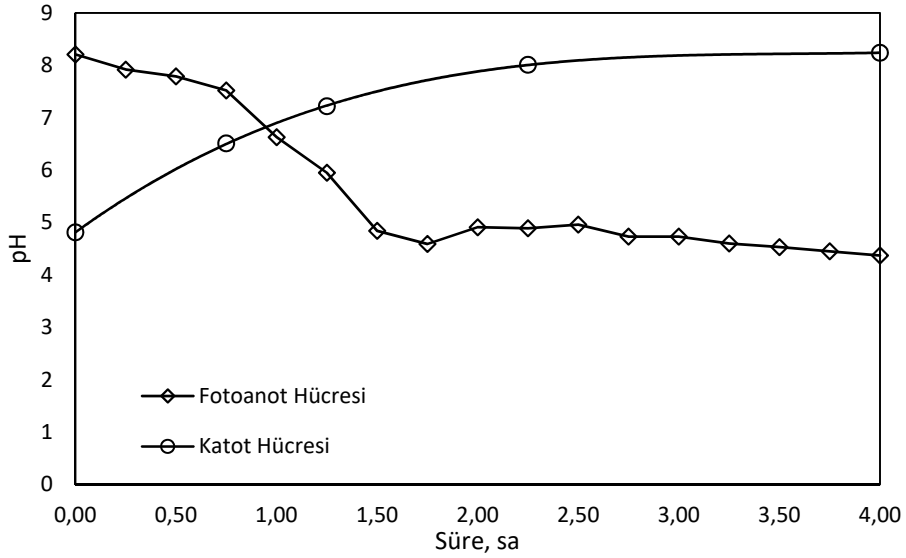
**Şekil 4.29:** Anot ve katot hücrelerindeki solüsyonlar değiştirildikten sonra döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 3V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)

#### 4.4.1.4. Xenon Lamba ile 5V Gerilim Altında Yapılan Çalışma

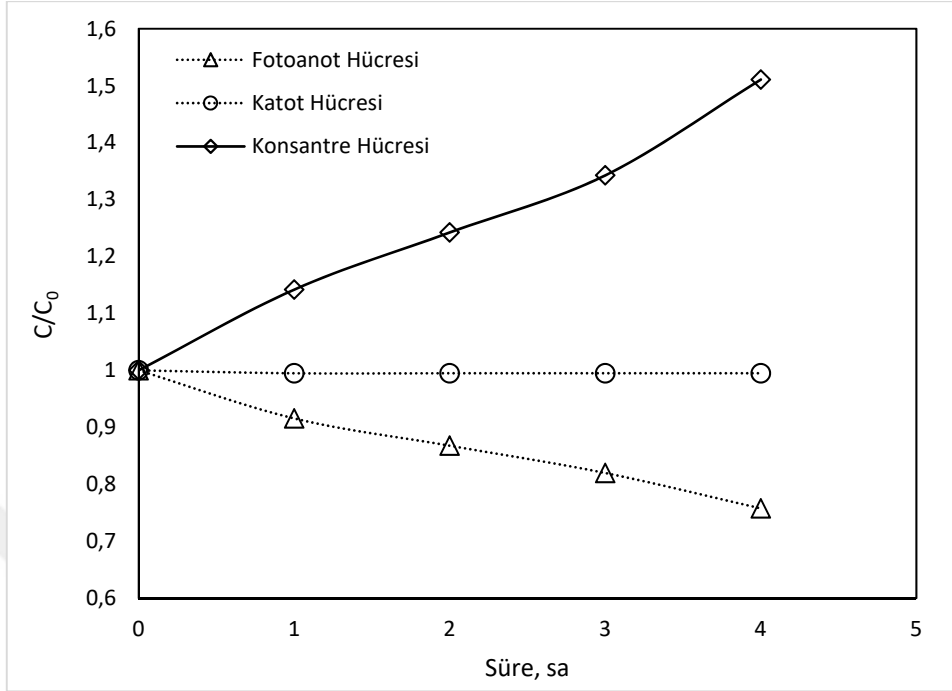
Kesikli döngüsüz sistem 5V gerilim altında Xenon lamba ile aydınlatılarak çalıştırılmıştır. Çalışmanın sonunda ilk 4 saatte anot hücresinde sodyum giderimi %24, solüsyon değişimi yapıldıktan sonra ise %36 olarak tespit edilmiştir. Konsantre hücredeki kümülatif birikim %60 seviyesindedir (Şekil 4.30-4.33).



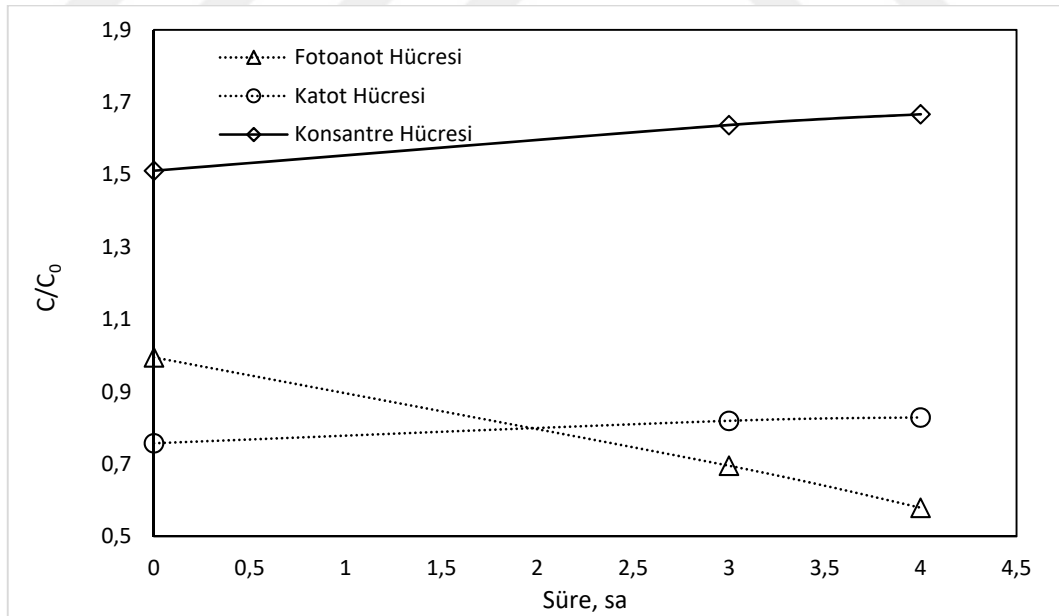
**Şekil 4.30:** Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 5V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



**Şekil 4.31:** Kesikli döngüsüz sistemde solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 5V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



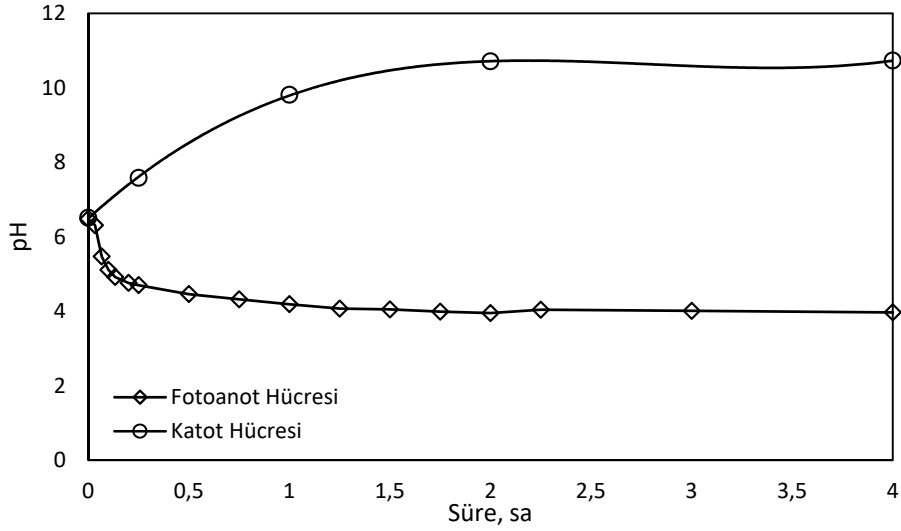
**Şekil 4.32:** Döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 5V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



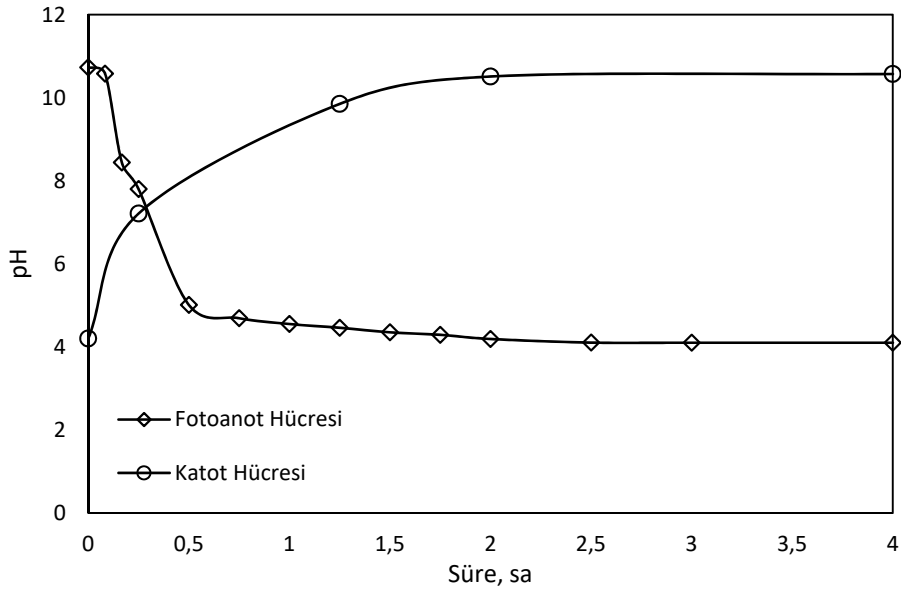
**Şekil 4.33:** Anot ve katot hücrelerindeki solüsyonlar değiştirildikten sonra döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 5V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)

#### 4.4.1.5. Xenon Lamba ile 10V Gerilim Altında Yapılan Çalışma

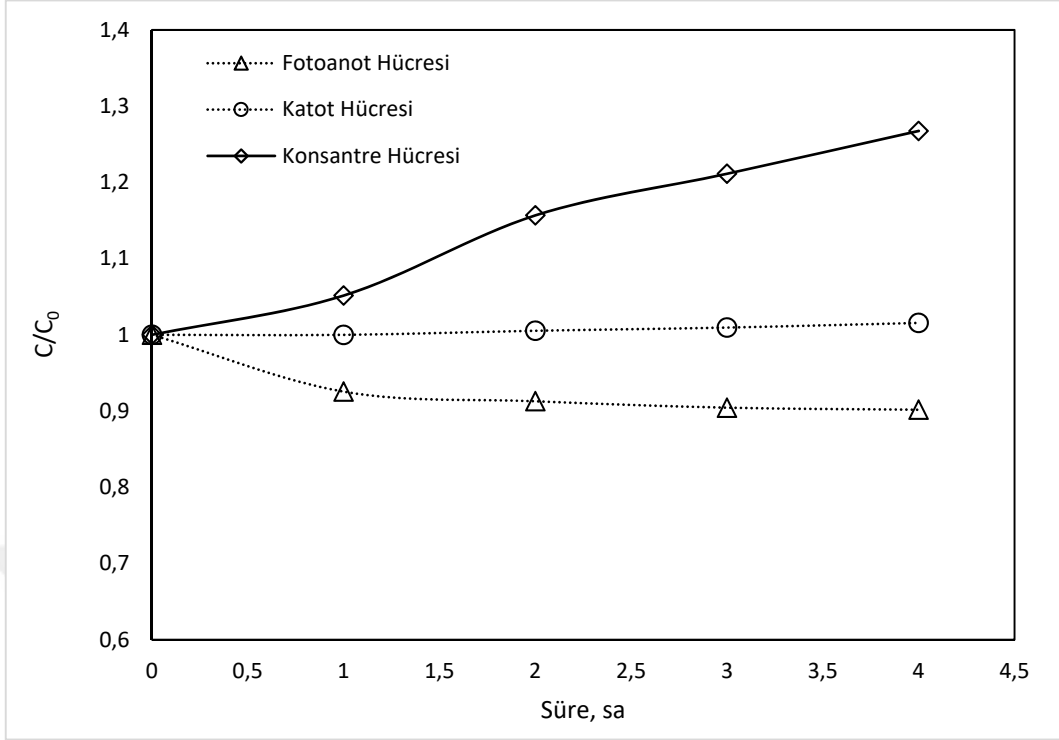
10V gerilim altında Xenon lamba ile aydınlatılarak çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde ilk 4 saatlik soydum giderimi fotoanot hücrelerinde %10, solüsyon değişimi yapıldıktan sonra ise %31 olarak belirlenmiştir. Konsantre hücrelerinde kümülatif sodyum birikimi ise %41 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.34-4.37).



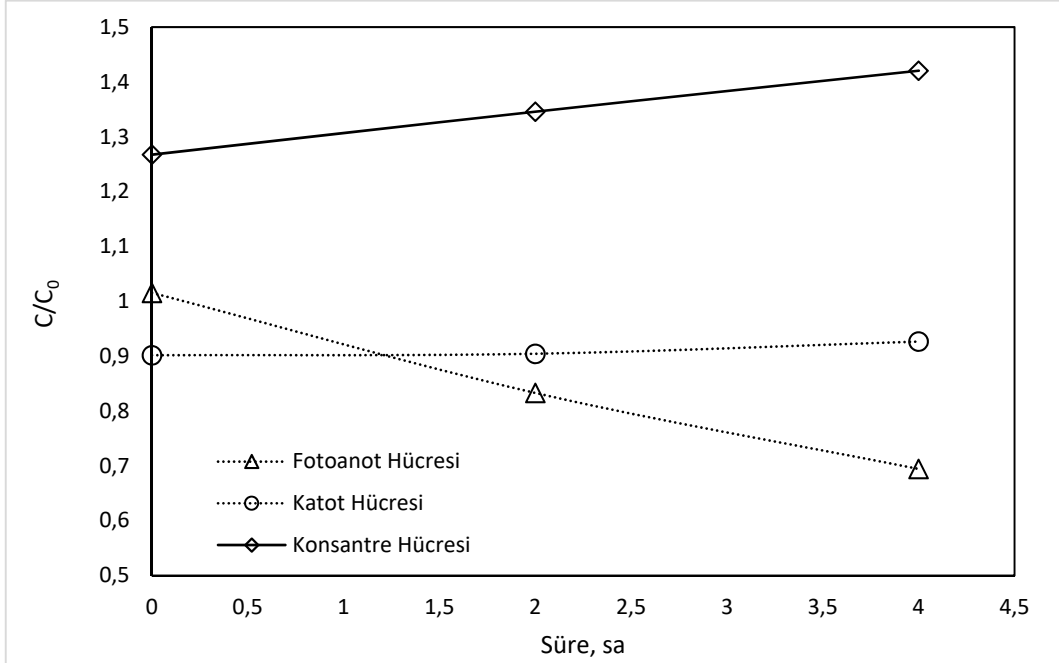
Şekil 4.34: Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 10V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



Şekil 4.35: Kesikli döngüsüz sistemde solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,00575 M NaCl; E= 10V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



Şekil 4.36: Döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 10V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)

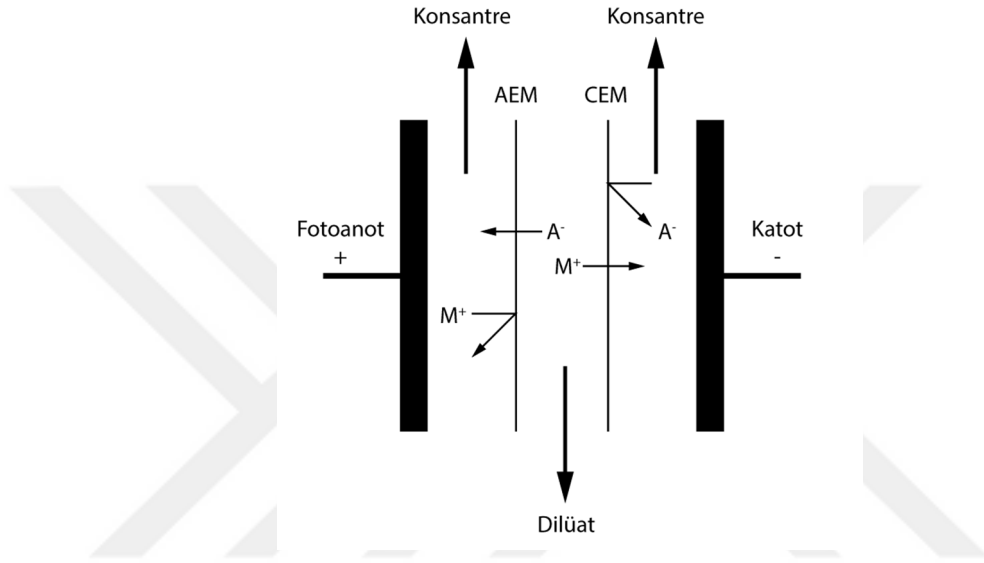


Şekil 4.37: Anot ve katot hücrelerindeki solüsyonlar değiştirildikten sonra döngüsüz kesikli sistemde sodyum giderim ve birikimleri (0,00575 M NaCl; E= 10V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)

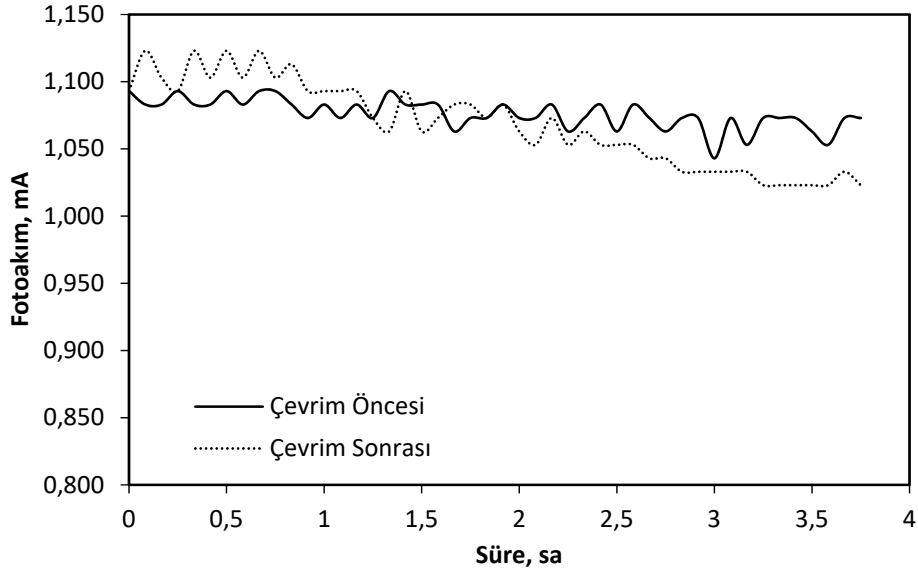


#### 4.4.1.6. Farklı Membran Diziliminde NaCl Giderim Verimi

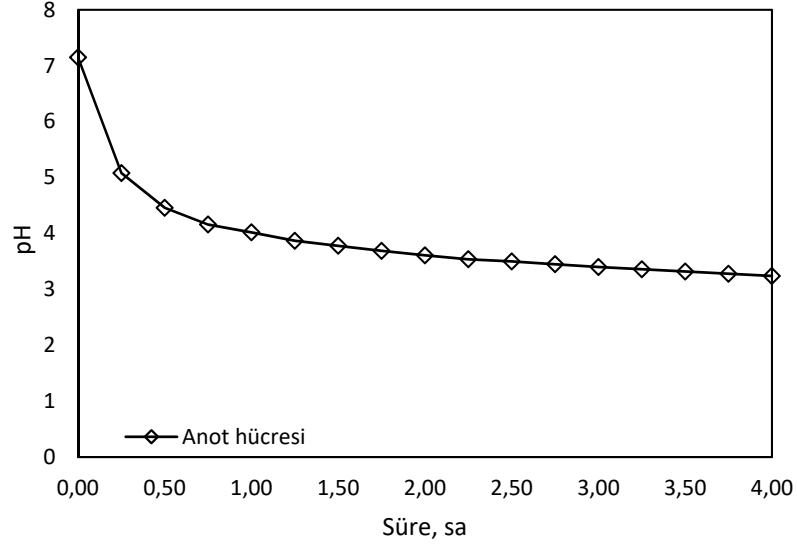
Sistem, anyon ve katyon seçici membranların yerleri değiştirilerek 1V gerilim altında, Xenon lamba ile aydınlatılarak çalıştırılmıştır (Şekil 4.38). Sistemin fotoakım değerleri, pH ve sodyum değişimleri izlenmiştir. Çalışma sonucunda solüsyondan %33 oranında sodyum uzaklaştırılmıştır (Şekil 4.39-4.45).



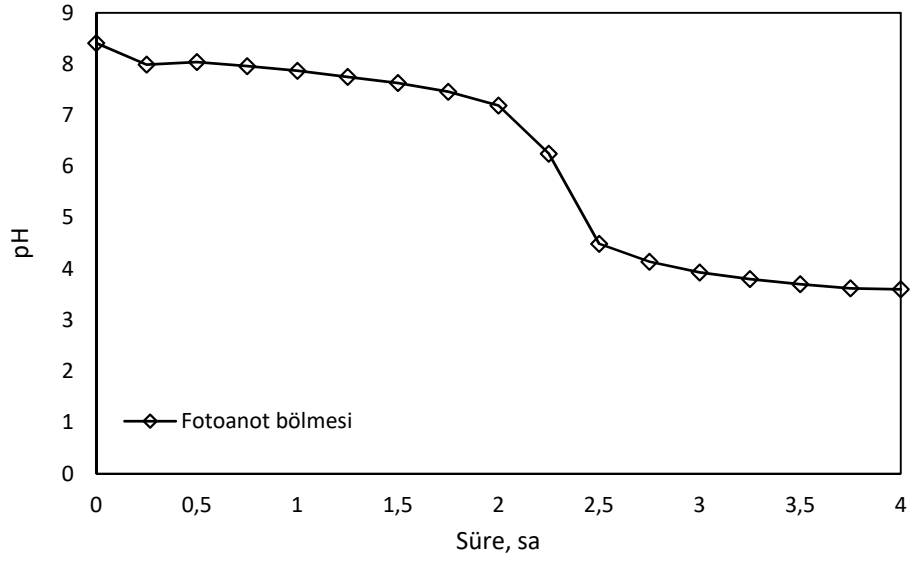
Şekil 4.38: Anyon ve katyon membranlarının yerleri değiştirildikten sonra kesikli döngüsüz sistemin şeması



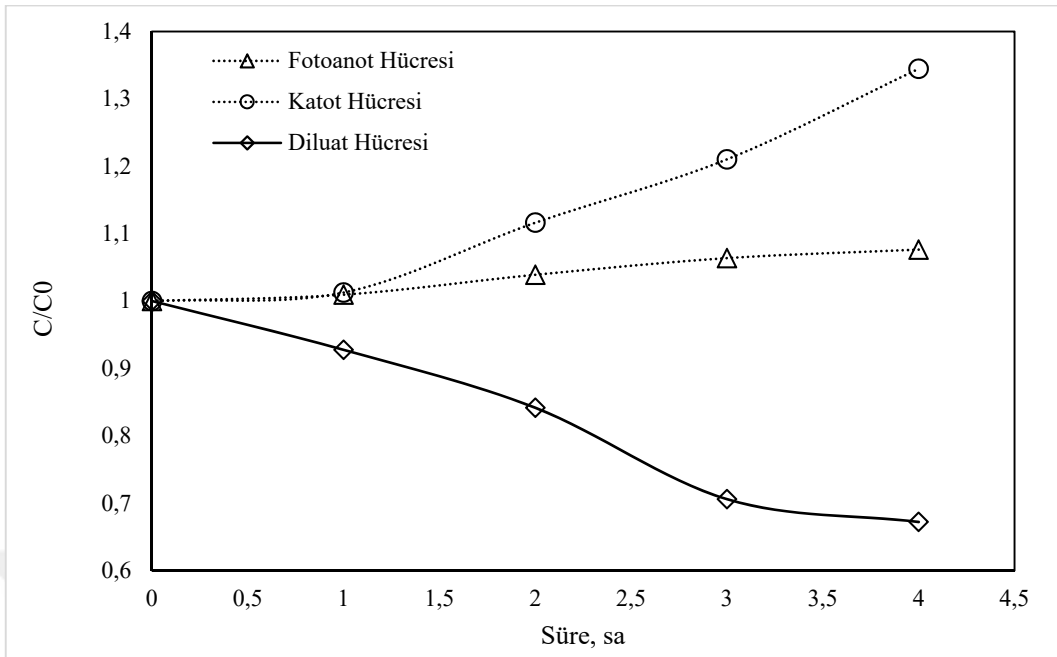
Şekil 4.39: Farklı membran dizilimine göre döngüsüz kesikli sistemde ve solüsyon değişimi yapıldıktan sonra fotokim oluşumu (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba, elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



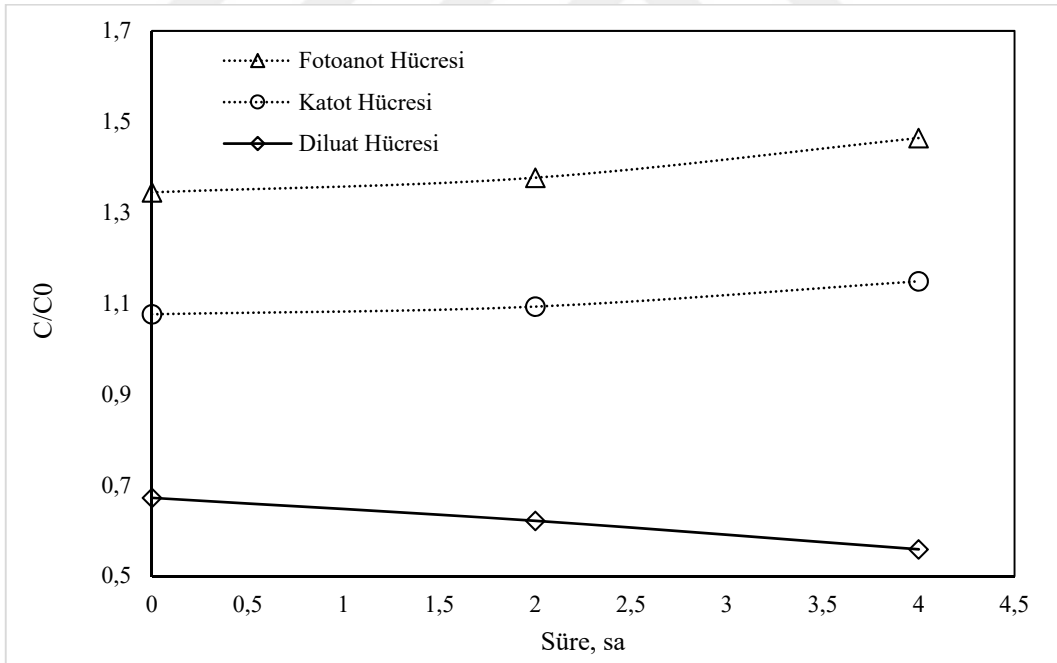
**Şekil 4.40:** Farklı membran dizilimine göre kesikli döngüsüz sistemde anot hücresinde meydana gelen pH değişimi (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



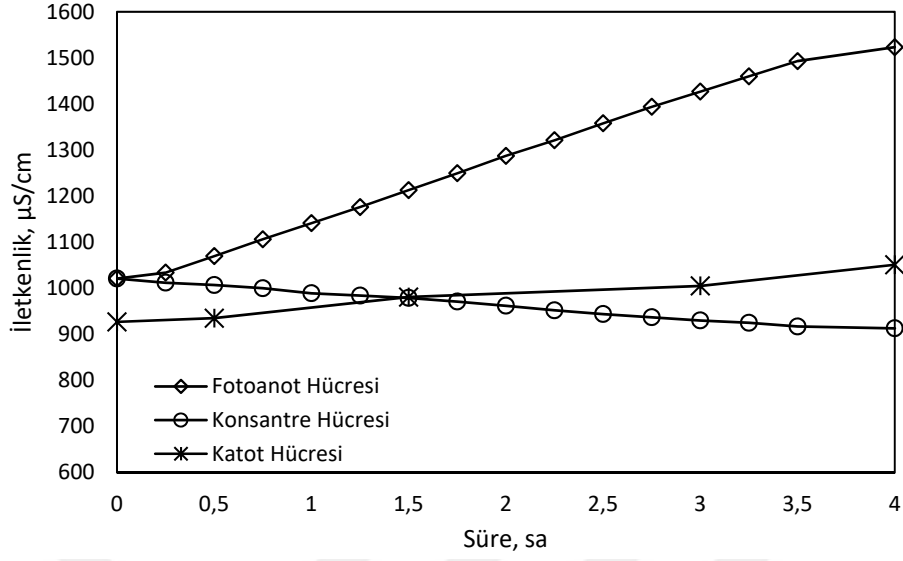
**Şekil 4.41:** Farklı membran dizilimine göre kesikli döngüsüz sistemde solüsyon değişimi yapıldıktan anot hücresinde meydana gelen pH değişimi (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



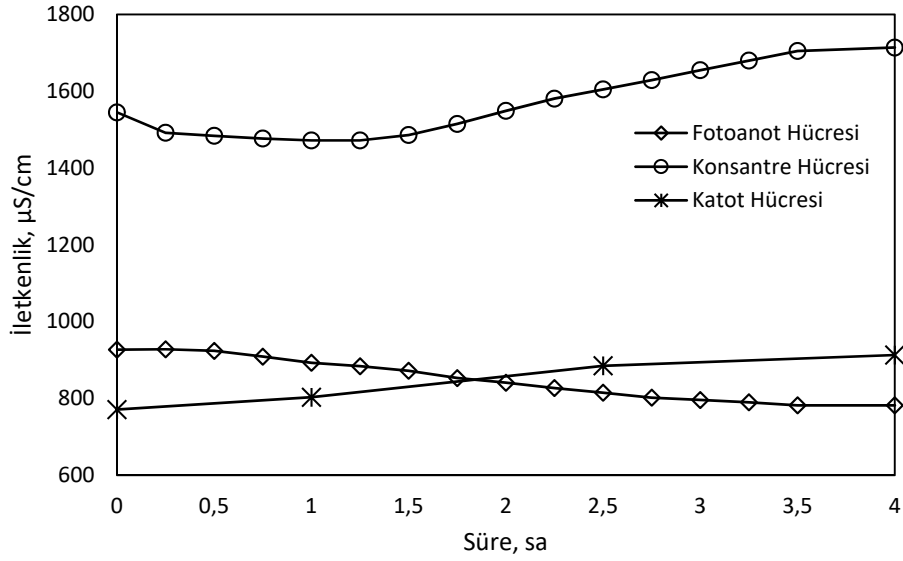
**Şekil 4.42:** Farklı membran dizilimine göre kesikli döngüsüz sistemde giderim ve birikim oranları (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



**Şekil 4.43:** Farklı membran dizilimine göre kesikli döngüsüz sistemde giderim ve birikim oranları (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



**Şekil 4.44:** Farklı membran dizilimine göre kesikli döngüsüz sistemde iletkenlik değişimi (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)



**Şekil 4.45:** Farklı membran dizilimine göre kesikli döngüsüz sistemde solüsyon değişimi yapıldıktan sonra iletkenlik değişimi (0,00575 M NaCl; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=25cm<sup>2</sup>)

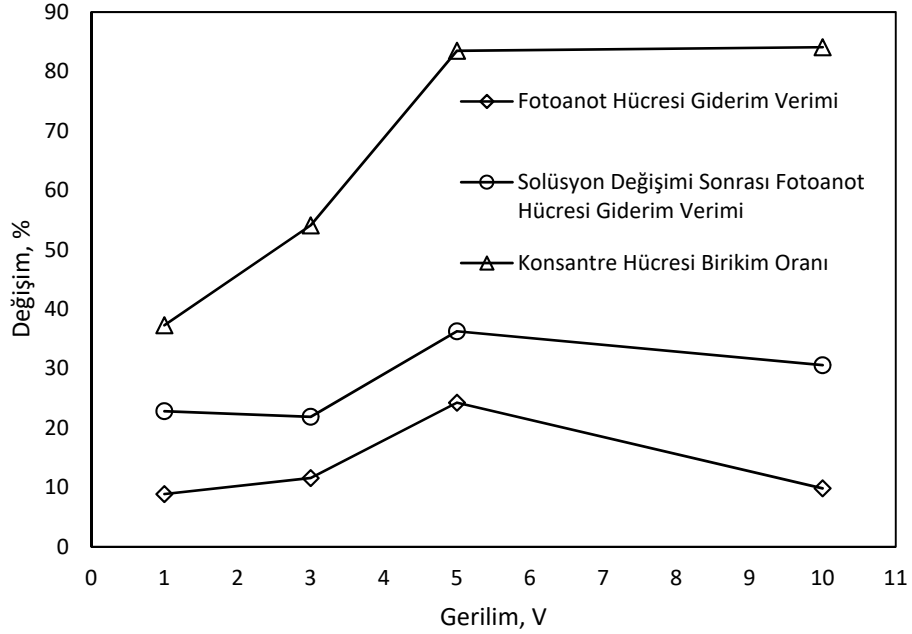
#### 4.4.1.7. Farklı Gerilimlerde Çalıştırılan Kesikli Döngüsüz Sistemin NaCl Giderimlerinin Karşılaştırılması

Sistemde ışık şiddeti, uygulanan gerilim ve elektrot boyutunun artması ile birlikte verimin arttığı görülmektedir. Elektrot boyutu ve ışık şiddeti üretilen fotoakım miktarını arttırmaktadır. Bununla birlikte uygulanan gerilimin artırılması, karanlık ortamda yapılan çalışmalarda da

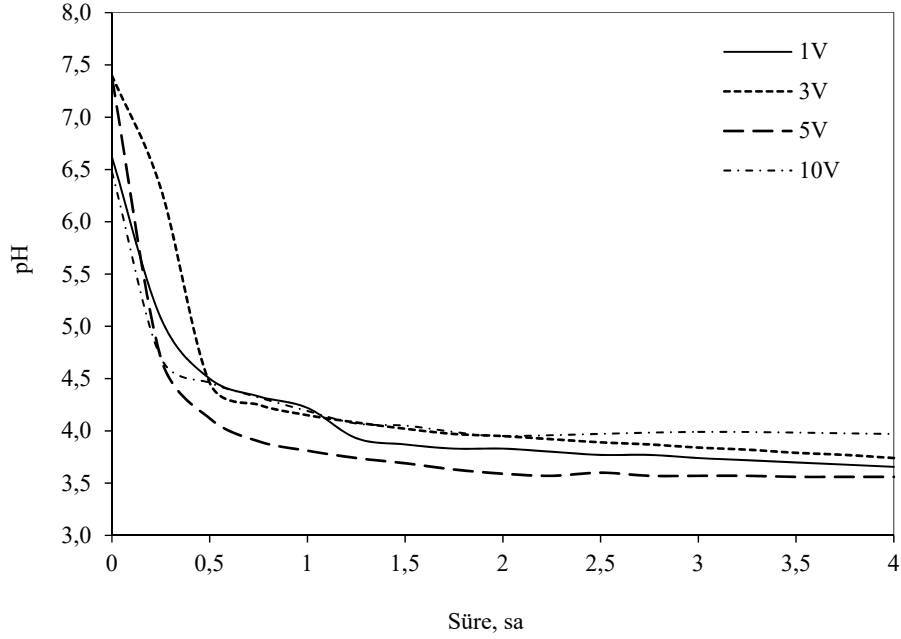
akım şiddetinin artmasını sağlamaktadır. Arttırılan gerilim şiddeti ile birlikte sistemin elektrodializ verimliliği de yükselmektedir (Tablo 4.1). Bununla birlikte farklı gerilimlerde yapılan çalışmalarda 5V ve 10V arasında ciddi bir verim farkına rastlanmamıştır (Şekil 4.46). Artan akımın pH değişiminde gözle görülür bir etkisi gözlemlenmemiştir (Şekil 4.47).

**Tablo 4.1:** Farklı gerilimler ve ışıklar altında yapılan çalışmaların giderim ve birikim oranları

| Gerilim<br>V | Elektrot<br>Alanı<br>cm <sup>2</sup> | Işık Kaynağı | Giderim Verimi<br>% | Solüsyon Değişimi<br>Sonrası Giderim<br>% | Konsantre Hücresi<br>Birikim Oranı<br>% |
|--------------|--------------------------------------|--------------|---------------------|---|---|
| 1V           | 25                                   | Suntest CPS+ | 6                   | 10  | 16                                      |
| 1V           | 64                                   | Xenon Lamba  | 21                  | 21  | 42                                      |
| 1V           | 25                                   | Xenon Lamba  | 9                   | 23  | 32                                      |
| 3V           | 25                                   | Xenon Lamba  | 12                  | 22  | 34                                      |
| 5V           | 25                                   | Xenon Lamba  | 24                  | 36  | 60                                      |
| 10V          | 25                                   | Xenon Lamba  | 10                  | 31  | 41                                      |
| 1V           | 64                                   | Xenon Lamba  | 33                  |   | 33                                      |



**Şekil 4.46:** Farklı gerilimlerde çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemin gerilim farkına göre verim değişimi

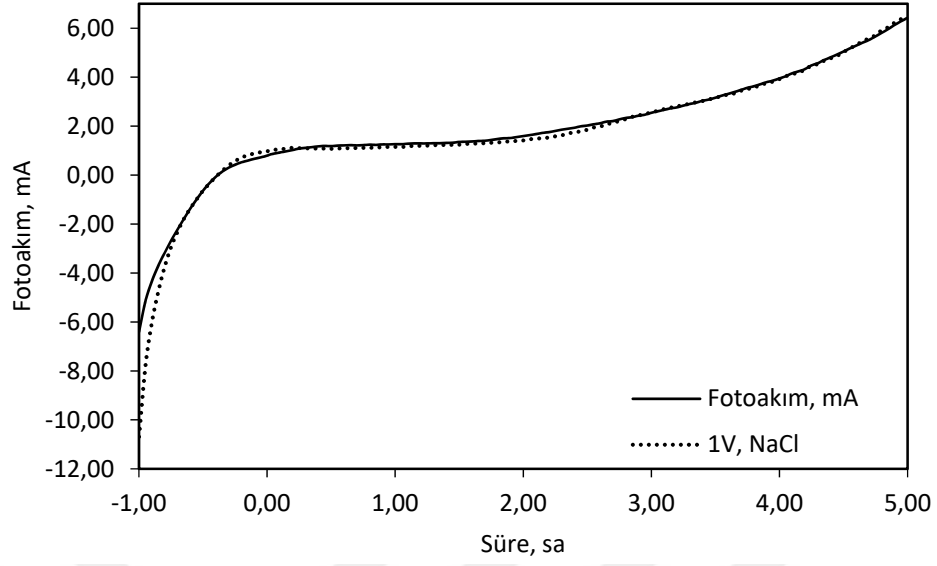


Şekil 4.47: Farklı çalışmalarda fotoanot hücresinde pH değişimleri

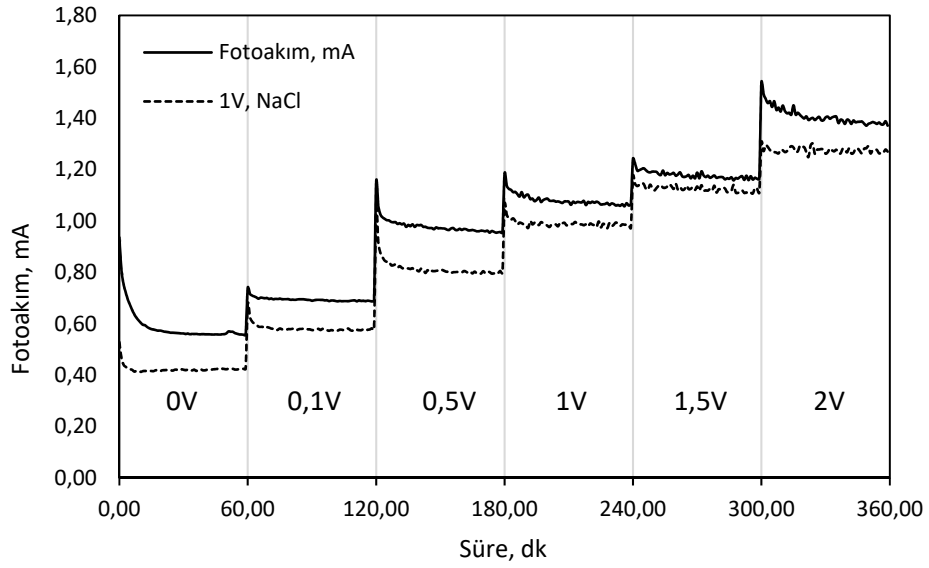
#### 4.4.2. Kesikli Döngüsüz Sistemde Yapılan NaNO<sub>3</sub> Giderim Çalışmaları

##### 4.4.2.1. Xenon Lamba ile 1V Gerilim Altında Yapılan Çalışma

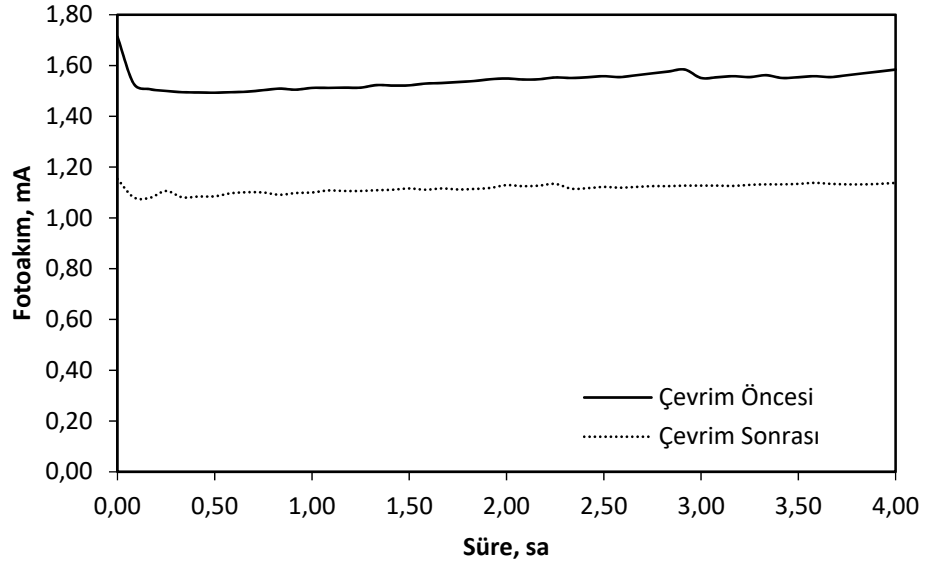
Sistemde nitrat gideriminin incelenmesi için 0,0016 M (~1000  $\mu$ S/cm) NaNO<sub>3</sub> solüsyonu hazırlanmıştır. Hazırlanan solüsyonun 1V gerilim şiddeti altında, Xenon ışıkla aydınlatma yapılırken kesikli döngüsüz sistemde arıtma çalışmaları yapılmış ve konsantrasyon değişimi gözlemlenmiştir (Şekil 4.52-4.57). Lineer voltametri taramaları incelendiğinde NaCl ile aynı şartlarda çalıştırılan sistemle karşılaştırıldığında fotoakım oluşumunda ciddi bir fark gözlemlenmemiştir (Şekil 4.48). Buna karşın zamana karşı yapılan potansiyometri taramalarında daha yüksek fotoakım değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.49). pH değişimleri karşılaştırıldığında solüsyon çevrimi yapıldıktan sonra NaCl ile yapılan çalışmaların aksine fotoanot bölmesinde ciddi bir pH yükselişi gözlemlenmemiştir (Şekil 4.51). Buna karşın çevrim öncesinde fotoanot hücresinde Na giderimi %12, çevrim sonrasında ise %13 olarak bulunmuştur. Konsantre hücresinde birikim %27 oranındadır.



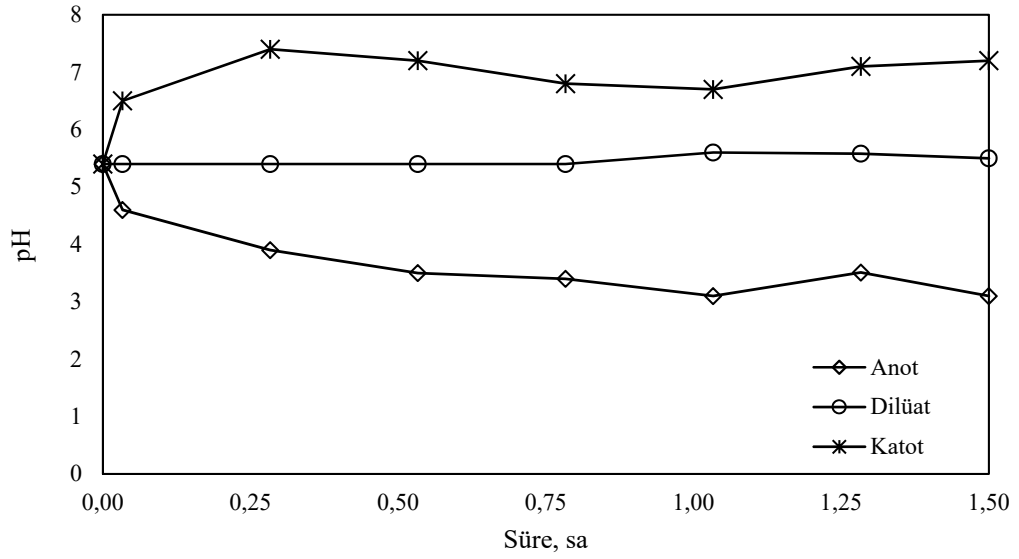
**Şekil 4.48:** NaNO<sub>3</sub> ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde uygulanan gerilime karşılık fotoakım oluşumu ve aynı şartlar altında NaCl ile çalıştırılan sistemle karşılaştırılması (0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, 64 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V, Işık: Xenon Lamba)



**Şekil 4.49:** NaNO<sub>3</sub> ile çalıştırılan kesikli döngüsüz sistemde farklı gerilimlerde potansiyometri tarama değerleri ve aynı şartlar altında NaCl ile çalıştırılan sistemle karşılaştırılması (0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, 64 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V, Işık: Xenon Lamba)

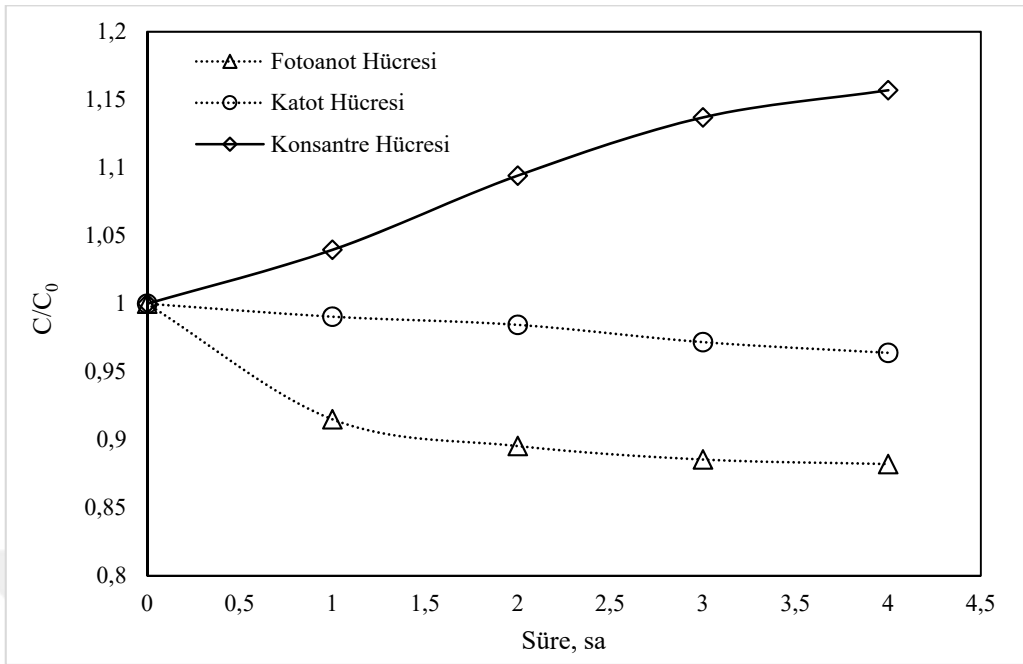


**Şekil 4.50:** Döngüsüz kesikli sistemde ve solüsyon değişimi yapıldıktan sonra fotoakım oluşumu (0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64cm<sup>2</sup>)

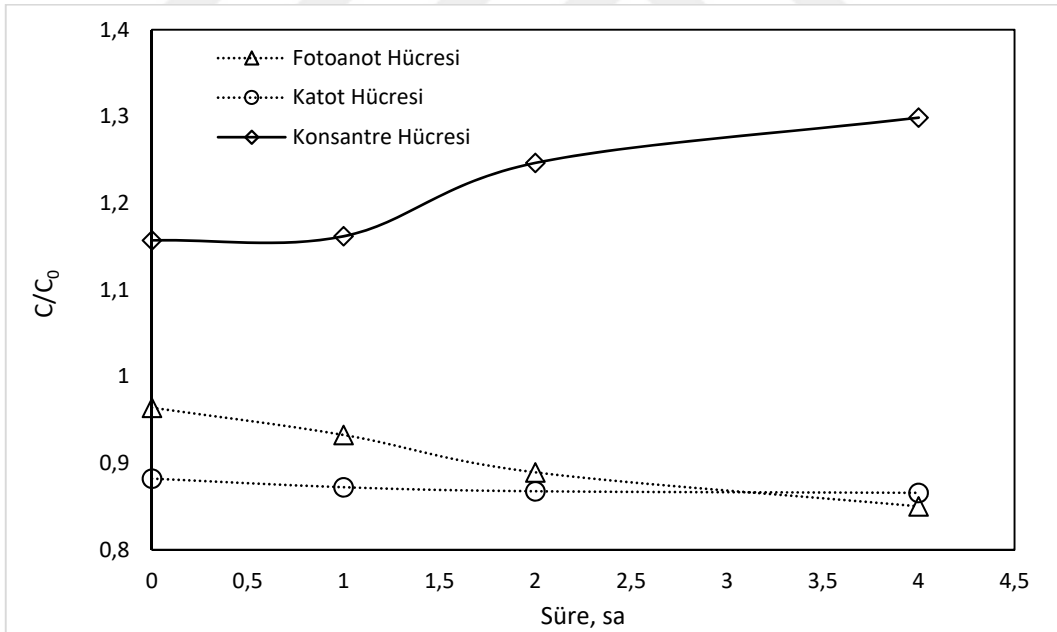


**Şekil 4.51:** Döngüsüz kesikli sistemde pH değişimi (0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64cm<sup>2</sup>)





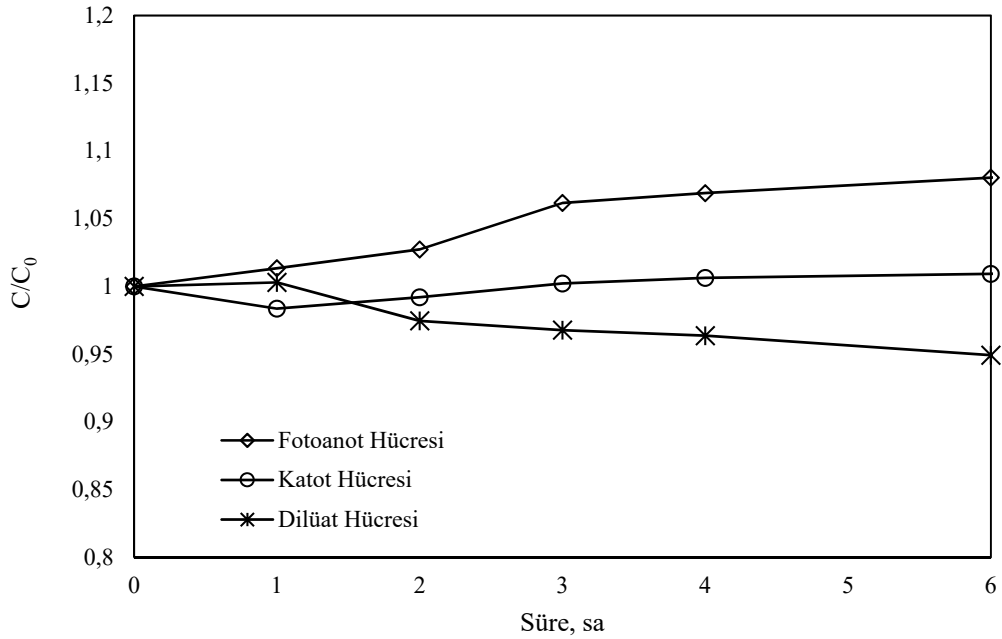
Şekil 4.52: Döngüsüz kesikli sistemde fotoanot, katot ve konsantre hücrelerinde konsantrasyon değişimi (0,0016 M  $\text{NaNO}_3$ ;  $E= 1\text{V vs. SCE}$ ; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı= $64\text{cm}^2$ )



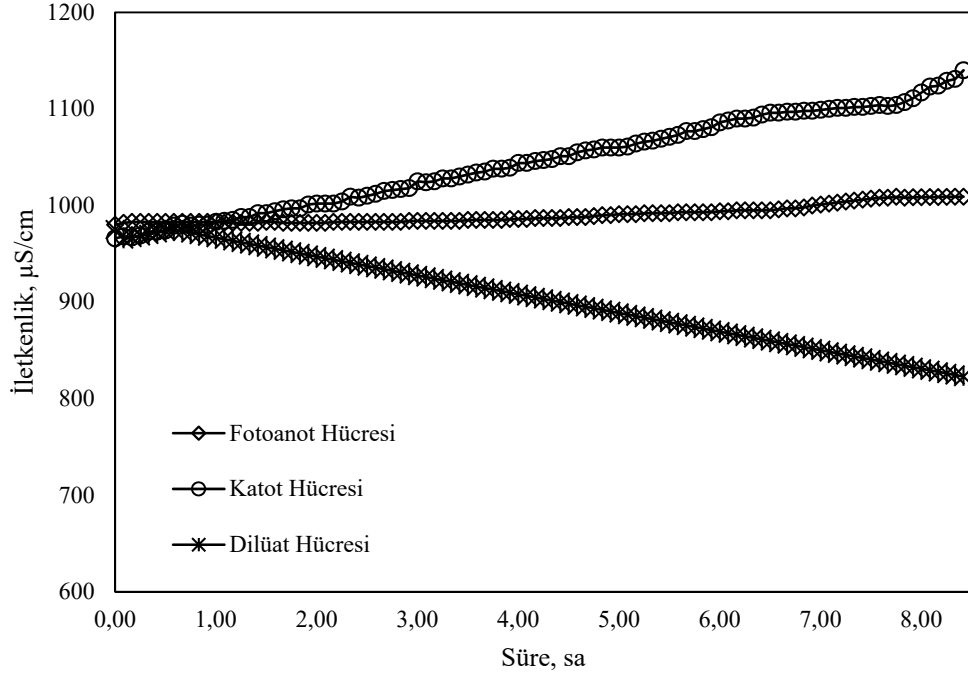
Şekil 4.53: Döngüsüz kesikli sistemde solüsyon değişimi yapıldıktan sonra konsantrasyon değişimi (0,0016 M  $\text{NaNO}_3$ ;  $E= 1\text{V vs. SCE}$ ; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı= $64\text{cm}^2$ )

#### 4.4.2.2. Xenon Lamba ile 1V Gerilim Altında Farklı Membran Dizilimi ile Yapılan Giderim Çalışması

Farklı membran dizilimi ile sistemin nitrat gideriminin belirlenebilmesi için 0,0016 M (~1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )  $\text{NaNO}_3$  solüsyonu ile giderim çalışması yapılmıştır. Hazırlanan solüsyonun 1V gerilim şiddeti altında, Xenon ışıkla aydınlatma yapılırken kesikli döngüsüz sistemde arıtma çalışmaları yapılmış ve konsantrasyon değişimi gözlemlenmiştir (Şekil 4.54). İletkenlik değişimleri karşılaştırıldığında fotoanot hücresinde iletkenliğin arttığı gözlemlenirken, dilüat hücresinde iletkenliğin düştüğü gözlemlenmiştir (Şekil 4.55). Buna karşın katot hücresinde iletkenlik değişiminin oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir. Konsantrasyon değişimi ile karşılaştırıldığında katot hücresindeki bu durum beklenen bir sonuçtur. 8 saatlik çalışma süresinin sonunda Na giderimi %11 civarında gerçekleşmiştir. Sistemde nitrat giderimi %10 mertebesindedir.



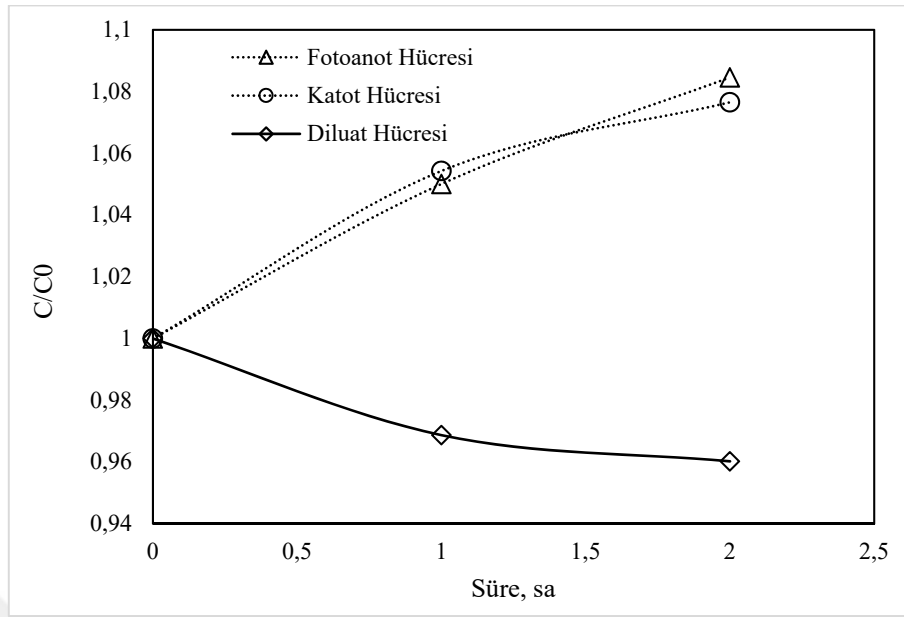
**Şekil 4.54:** Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen konsantrasyon değişimleri (0,0016 M  $\text{NaNO}_3$ ;  $E= 1\text{V vs. SCE}$ ; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı= $64\text{ cm}^2$ )



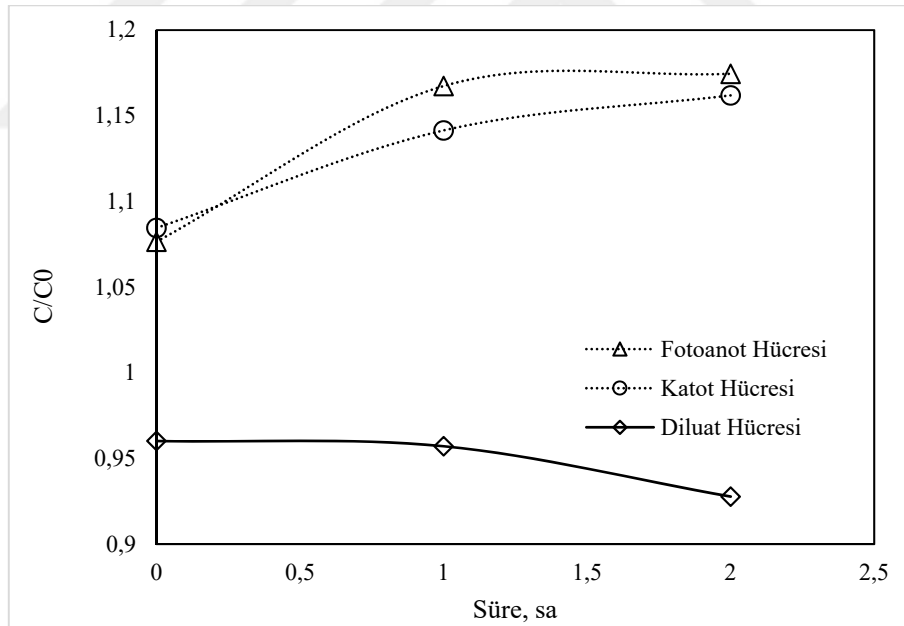
**Şekil 4.55:** Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen iletkenlik değişimleri (0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm<sup>2</sup>)

#### **4.4.2.3. Xenon Lamba ile 1V Gerilim Altında Farklı Membran Diziliminde Solüsyon Değişimi ile Yapılan Giderim Çalışması**

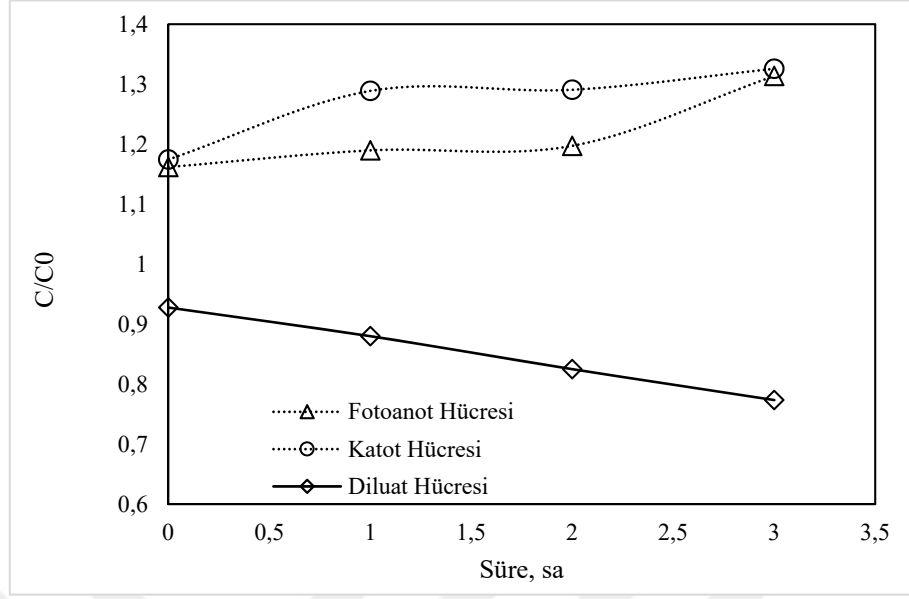
Fotoanot ve katot bölmelerindeki solüsyon değişiminin sistem üzerine etkisinin anlaşılabilmesi için, sistemde 2 saatlik periyotlar halinde fotoanot ve katot bölmeleri arasında solüsyon değişimi yapılmıştır. Sisteme 0,0016 M'lık NaNO<sub>3</sub> solüsyonu verilmiş ve sistem 1V gerilim şiddeti altında, Xenon ışıkla aydınlatma yapılarak çalıştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen konsantrasyon değişimleri Şekil 4.56-4.62'de gösterilmiştir. Üç solüsyon döngüsü ile toplamda 8 saat çalıştırılan sistemde Na gideriminin %22 oranında olduğu belirlenmiştir. Solüsyon döngüsü olmayan çalışma ile karşılaştırıldığında verimin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum döngülü çalıştırılan sistemde daha iyi verim sonucu alındığının bir göstergesidir.



**Şekil 4.56:** Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen konsantrasyon değişimleri (0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm<sup>2</sup>)

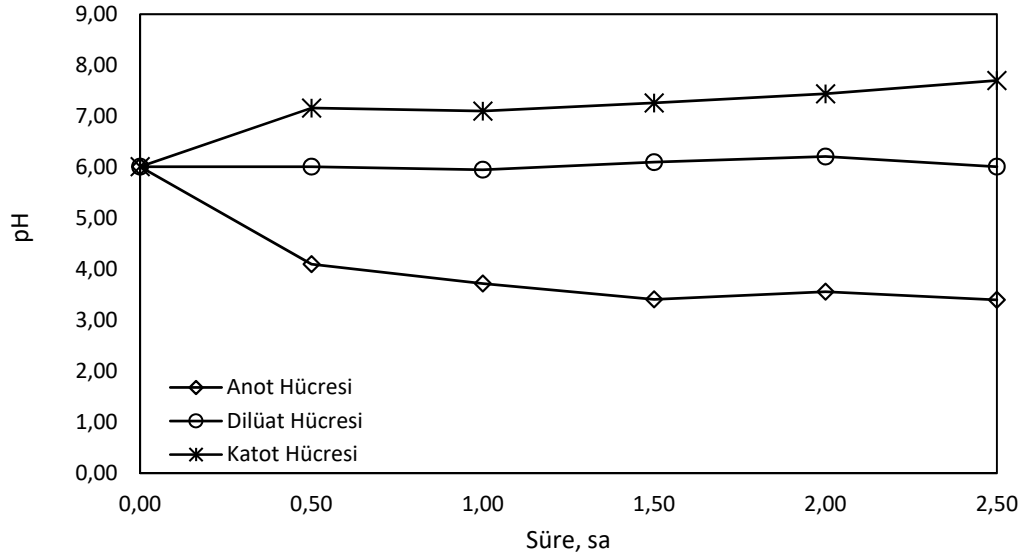


**Şekil 4.57:** Kesikli döngüsüz sistemde birinci solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen konsantrasyon değişimleri (0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm<sup>2</sup>)

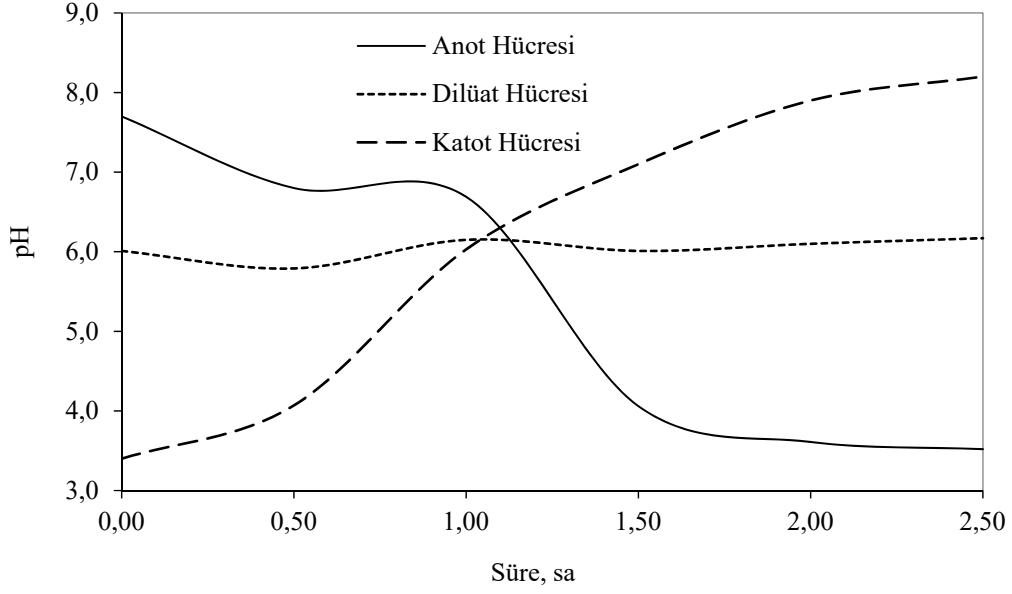


**Şekil 4.58:** Kesikli döngüsüz sistemde ikinci solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen konsantrasyon değişimleri (0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm<sup>2</sup>)

Sistemde pH değişimi izlendiğinde solüsyon değişimi yapılmadan önce anot hücresinde pH'ın düşerken, katot hücresinde ise tam tersi bir durum gözlemlenmiştir (Şekil 4.59). Solüsyon değişimi yapıldıktan sonra da aynı değişimler gözlemlenmiştir (Şekil 4.60).

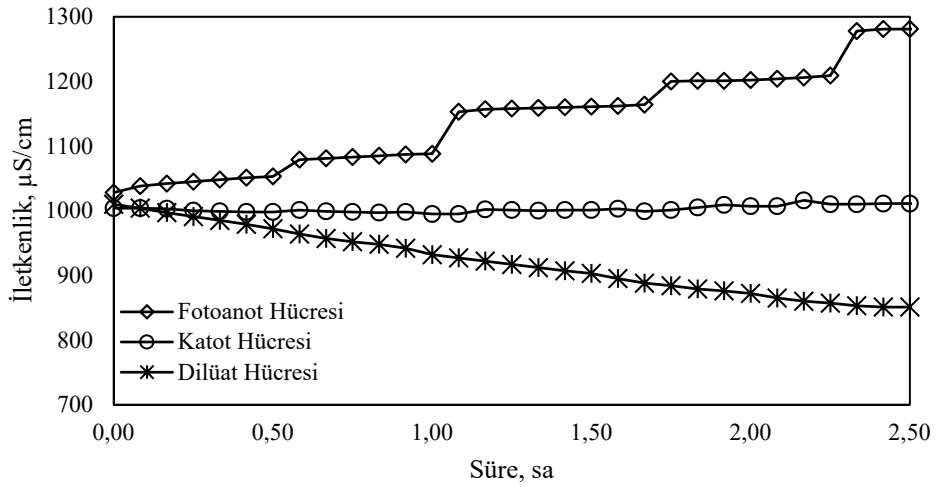


**Şekil 4.59:** Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm<sup>2</sup>)

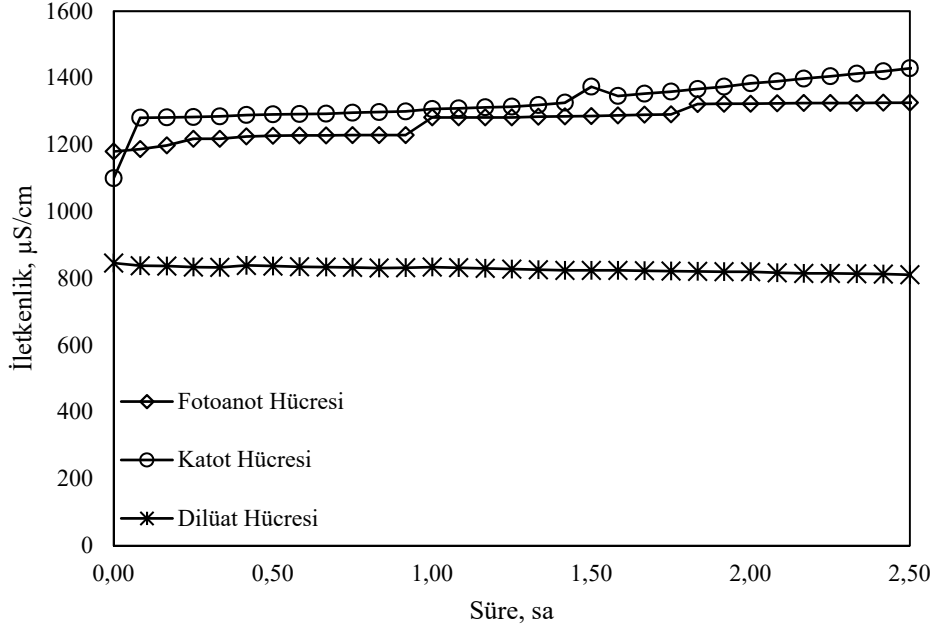


**Şekil 4.60:** Kesikli döngüsüz sistemde birinci solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen pH değişimleri (0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm<sup>2</sup>)

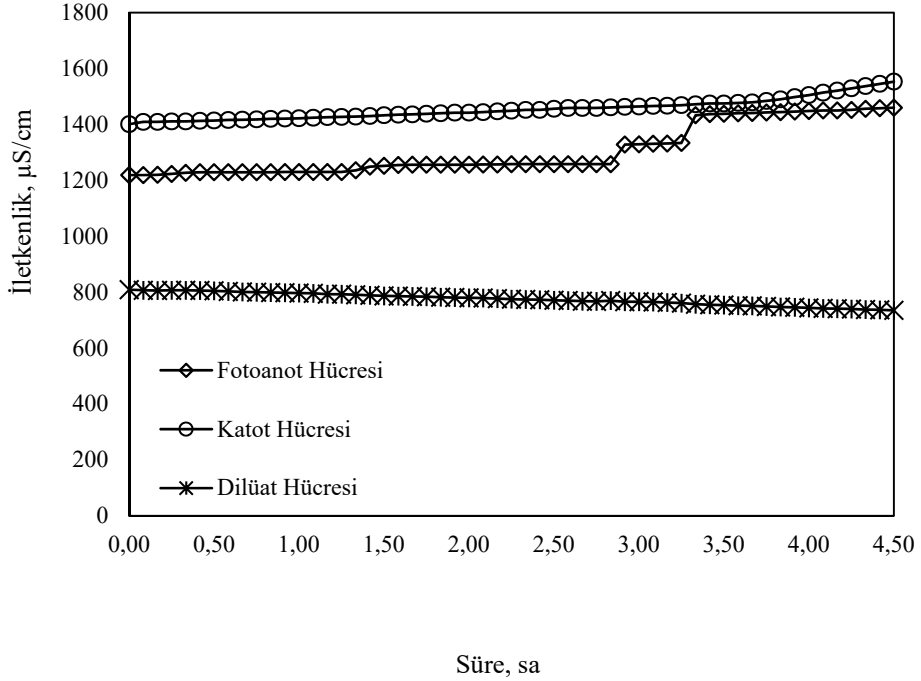
İletkenlik değerlerine bakıldığında sistemin ilk çalıştırıldığı döngüde bir önceki çalışmaya benzer bir şekilde fotoanot hücresinde iletkenliğin hızlıca arttığı, dilüat hücresinde ise hızlıca düştüğü gözlemlenmiştir. Katot hücresinde ise ciddi bir değişim gözlemlenmemiştir (Şekil 4.61). Bununla birlikte birinci ve ikinci solüsyon değişiminden sonra katot hücresinde iletkenliğin artmaya başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.61-4.67).



**Şekil 4.61:** Kesikli döngüsüz sistemde solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen iletkenlik değişimleri (0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm<sup>2</sup>)



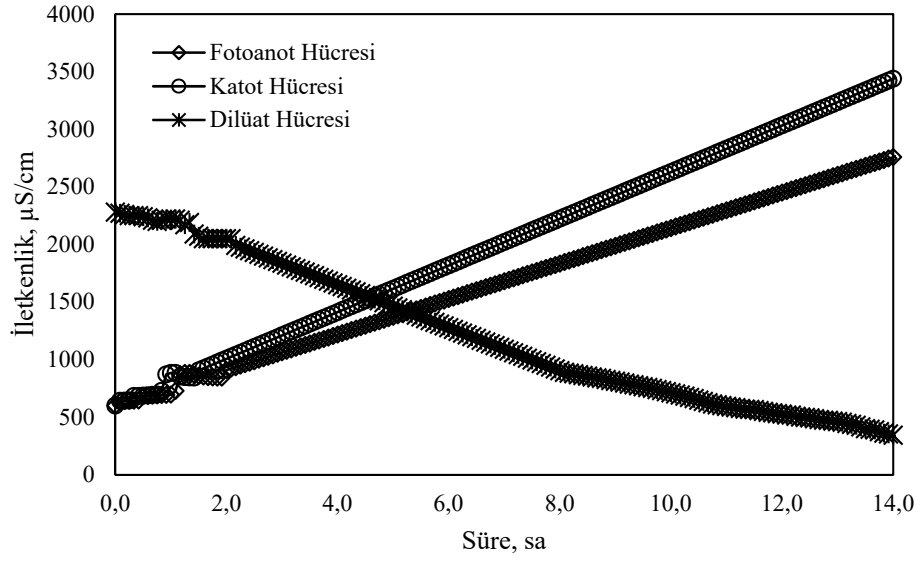
**Şekil 4.62:** Kesikli döngüsüz sistemde birinci solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen iletkenlik değişimleri (0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm<sup>2</sup>)



**Şekil 4.63:** Kesikli döngüsüz sistemde ikinci solüsyon değişiminden sonra anot ve katot hücrelerinde meydana gelen iletkenlik değişimleri (0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; E= 1V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm<sup>2</sup>)

#### 4.4.2.4. Xenon Lamba ile 5V Gerilim Altında Farklı Membran Dizilimi ile Yapılan Uzun Süreli Giderim Çalışması

Fotoanot ve katot bölmelerin yüksek gerilimin sistem üzerine etkisinin anlaşılabilmesi için, sistem 14 saatlik boyunca çalıştırılmıştır. Sisteme 0,0016 M'lık NaNO<sub>3</sub> solüsyonu verilmiş ve sistem 5V gerilim şiddeti altında, Xenon ışıkla aydınlatma yapılarak çalıştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen iletkenlik değişimi Şekil 4.64'da gösterilmiştir.

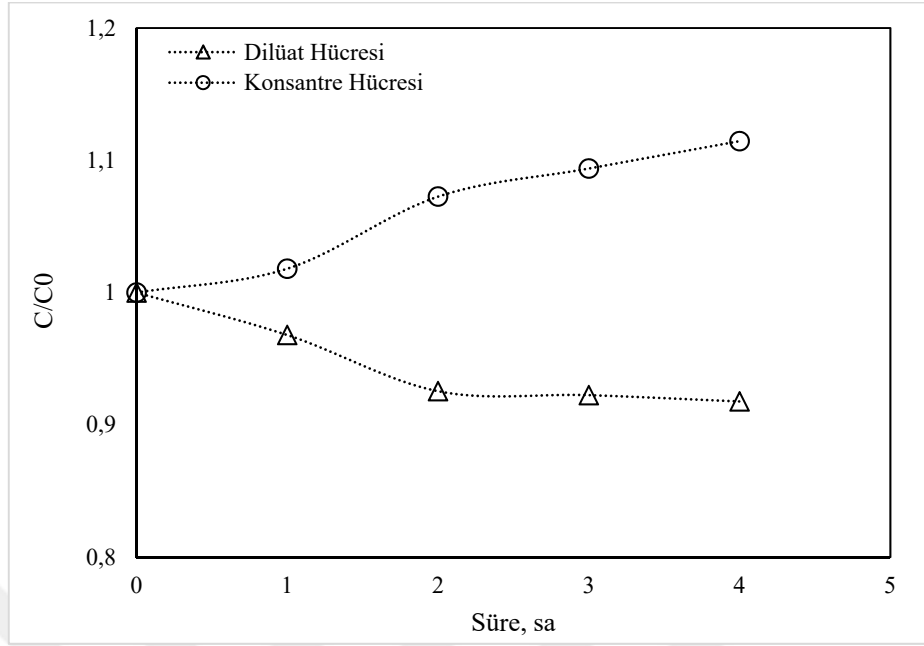


Şekil 4.64: Kesikli döngüsüz sistemde anot ve katot hücrelerinde meydana gelen iletkenlik değişimleri (0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; E= 5V vs. SCE; Işık kaynağı Xenon Lamba; elektrot alanı=64 cm<sup>2</sup>)

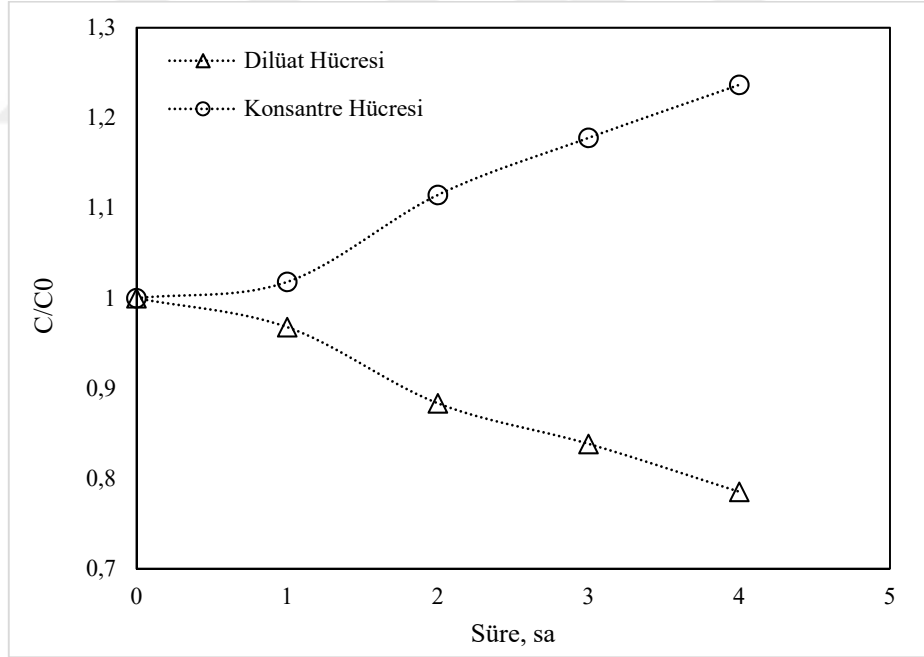
#### 4.5. ÇEVİRİMLİ SİSTEMDE NAÇL GİDERİM VERİMİ

Kesikli çevrimli sistem veriminin incelenbilmesi için sistem 0,00525 M NaCl ile 1V gerilim altında, Xenon ışık kaynağı ile aydınlatılarak çalıştırılmıştır. Elektrot boyutu 25 ve 64 cm<sup>2</sup>'lik alana sahip elektrotlar ile yapılan çalışmalarda Na<sup>+</sup> giderim verimi sırasıyla %11,5 ve %24 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.65-70). Döngüsüz sistemin aksine, fotoanot ve katot hücrelerinde sürekli bir çevrim yapıldığından dolayı pH değerlerinde bir değişim gözlemlenmemiştir. Bununla birlikte kesikli döngüsüz sisteme göre daha kısa sürede benzer verim değerleri elde edildiği görülmüştür. Bu durum sistemin pH dengesine bağlı olarak çalışması ile açıklanabilir.





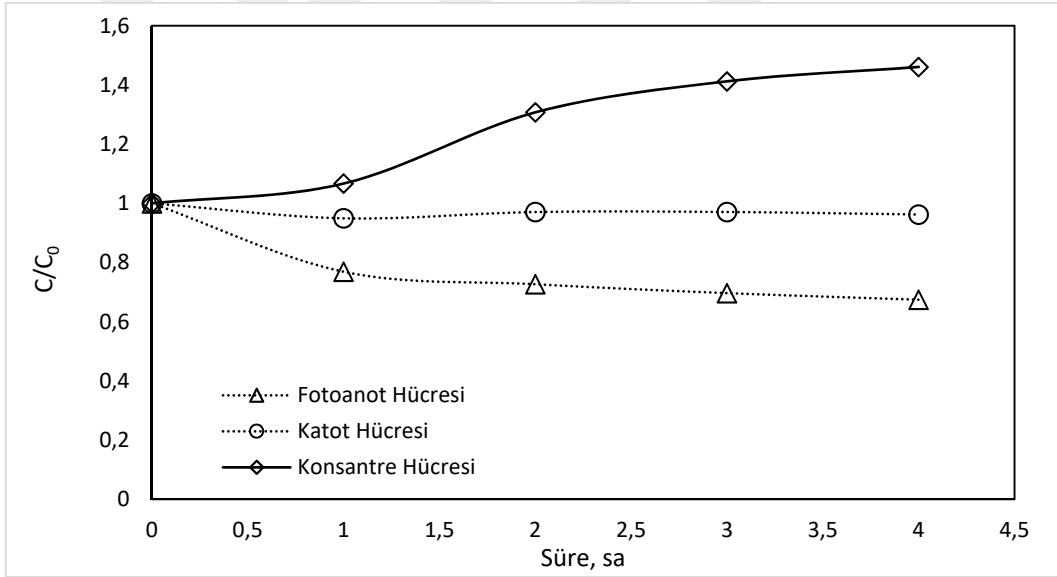
Şekil 4.65: Kesikli döngülü sistemde Na<sup>+</sup> konsantrasyon değişimi (0,00525 M NaCl; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)



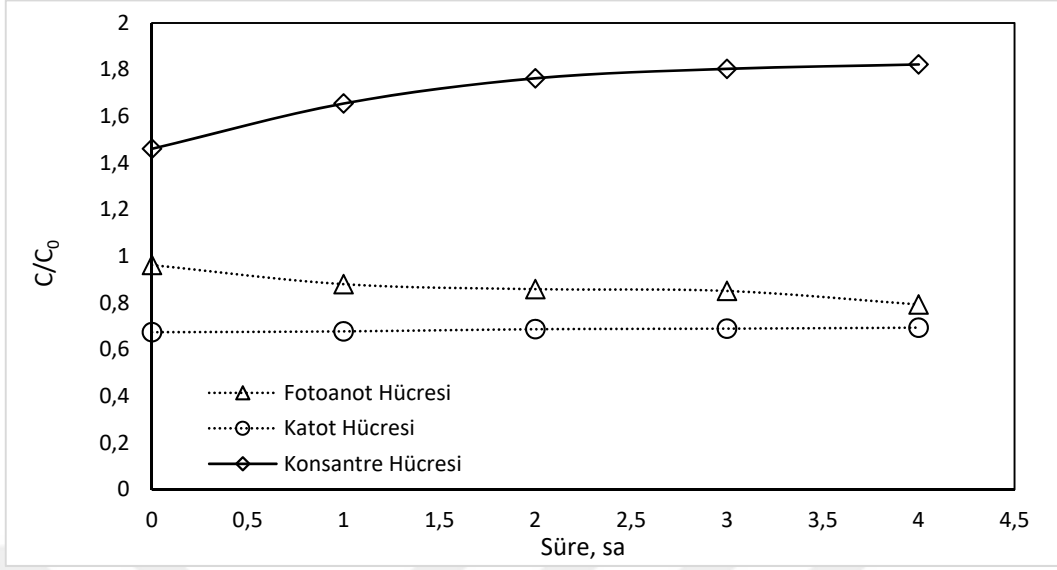
Şekil 4.66: Kesikli döngülü sistemde Na<sup>+</sup> konsantrasyon değişimi (0,00525 M NaCl; Elektrot Alanı: 64 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)

#### 4.6. PH TAMPONU VARLIĞINDA SİSTEM VERİMİ

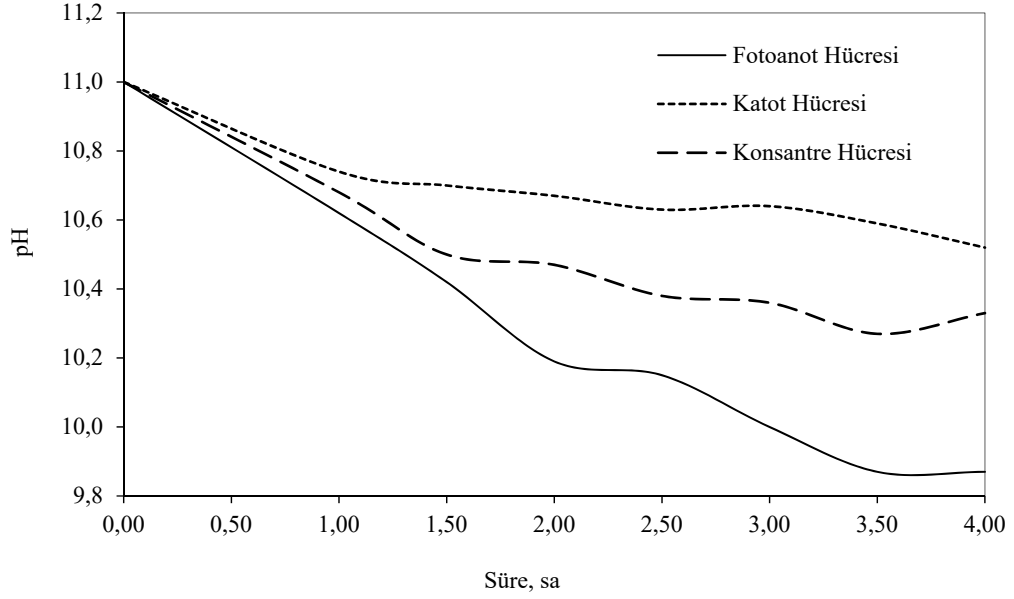
Reaktörde pH değişiminin engellenmesi ile birlikte sistemde meydana gelebilecek etkilerin değerlendirilebilmesi için kesikli döngüsüz sistem pH tamponu varlığında çalıştırılmıştır. pH değişiminin gerçekleştiği hücreler olan fotoanot ve katot hücrelerine 0,0025 M  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  eklenerek sistemde 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$  giderimi çalışılmıştır. Konsantre hücreesine 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$  eklenmiştir. Sistem 1V gerilim altında, xenon lamba ile aydınlatılarak çalıştırılmıştır. Sistemden elde edilen konsantrasyon değişimleri Şekil 4.67-72’te verilmiştir. Sistemde toplam  $\text{Na}^+$  giderimi %32 civarında bulunmuştur. Her iki döngüde de sistemin pH’ı dalgalı bir sonuç vermiştir (Şekil 4.69-74). Anyon giderimleri ve birikimleri karşılaştırıldığında fotoanot hücreesinde kümülatif  $\text{NO}_3^-$  giderimi %20, konsantre hücreesinde birikim ise %24 oranında tespit edilmiştir.



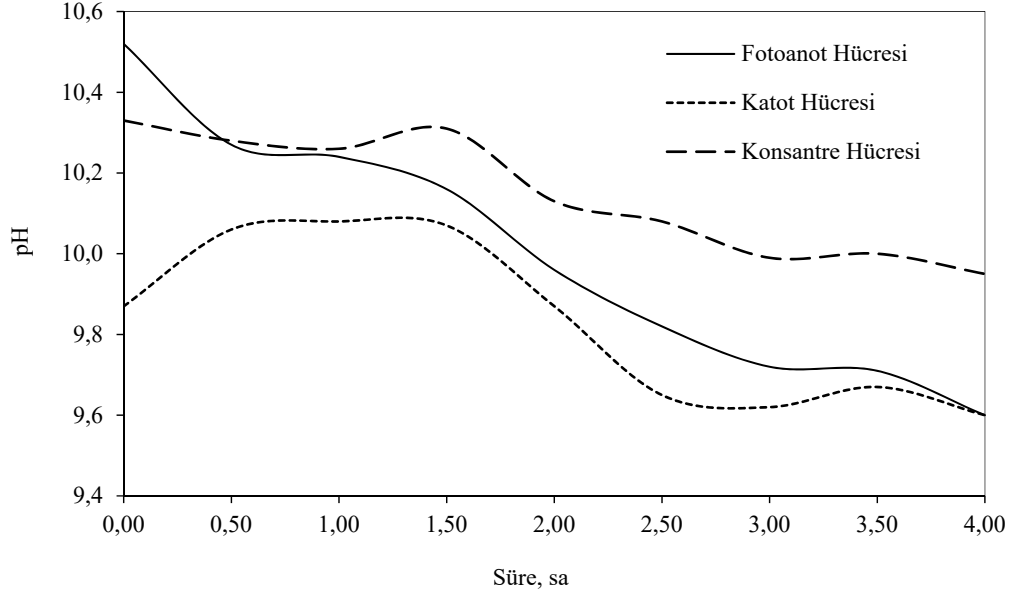
**Şekil 4.67:** Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu varlığında konsantrasyon değişimi (Fotoanot-katot hücresi: 0,0025 M  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$ , Konsantre hücresi: 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$ ; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)



**Şekil 4.68:** Kesikli döngüsüz sistemde fotoanot-katot sölüsyon çevriminden sonra pH tamponu varlığında konsantrasyon değışimi (Fotoanot-katot hücresi: 0,0025 M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve 0,0064 M NaNO<sub>3</sub>, Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)

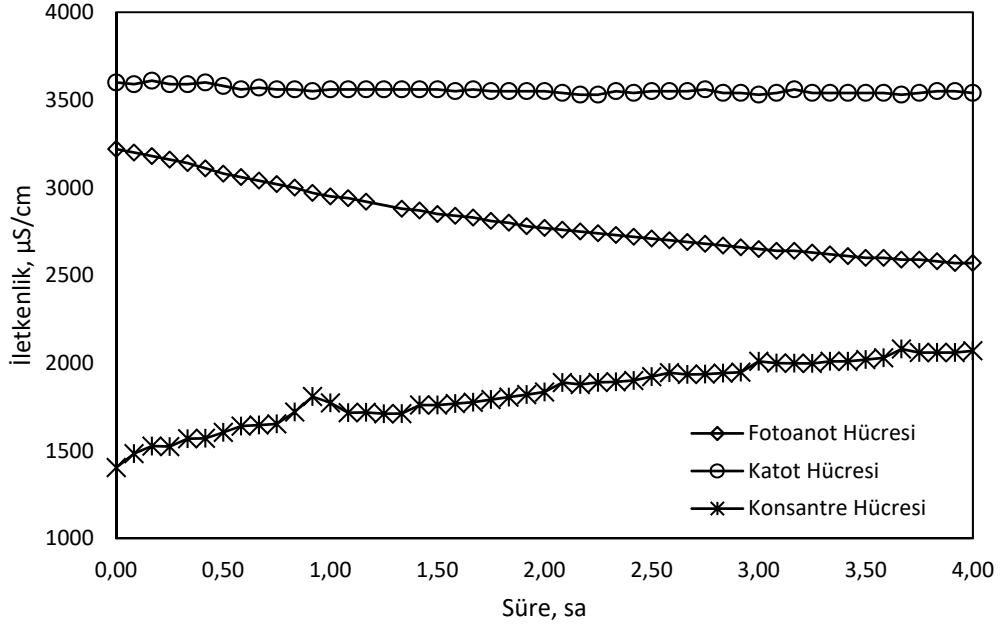


**Şekil 4.69:** Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu varlığında pH değışimi (Fotoanot-katot hücresi: 0,0025 M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve 0,0064 M NaNO<sub>3</sub>, Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)

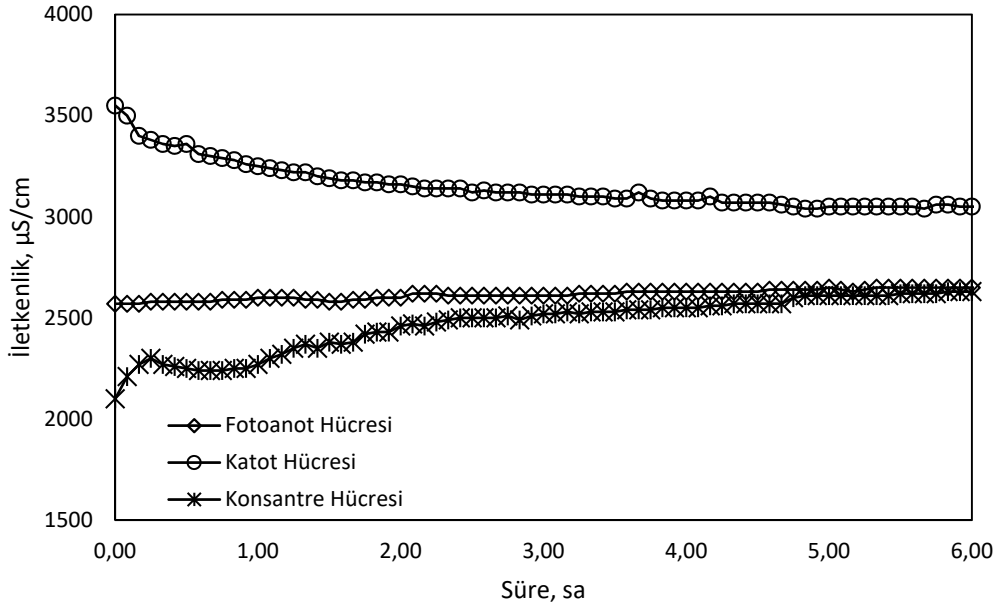


**Şekil 4.70:** Kesikli döngüsüz sistemde fotoanot-katot solüsyon çevriminden sonra pH tamponu varlığında pH değişimi (Fotoanot-katot hücresi: 0,0025 M  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$ , Konsantre hücresi: 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$ ; Elektrot Alanı: 25  $\text{cm}^2$ , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)

Fotoanot ve katot hücreleri arasında solüsyon değişimi yapılmadan önce katot hücresinde iletkenlik değerlerinde herhangi bir değişiklik görülmezken, fotoanot hücresinde iletkenliğin azaldığı ve buna bağlı olarak konsantre hücresinde arttığı görülmektedir (Şekil 4.71). Fotoanot ve katot hücreleri arasında solüsyon değişimi yapıldıktan sonra katot hücresinde iletkenliğin düştüğü gözlemlenmiş, bununla birlikte anot hücresinde ciddi bir değişim gözlemlenmemiştir. Konsantre hücresi katot hücresindeki azalmaya bağlı olarak yükselmektedir (Şekil 4.72).



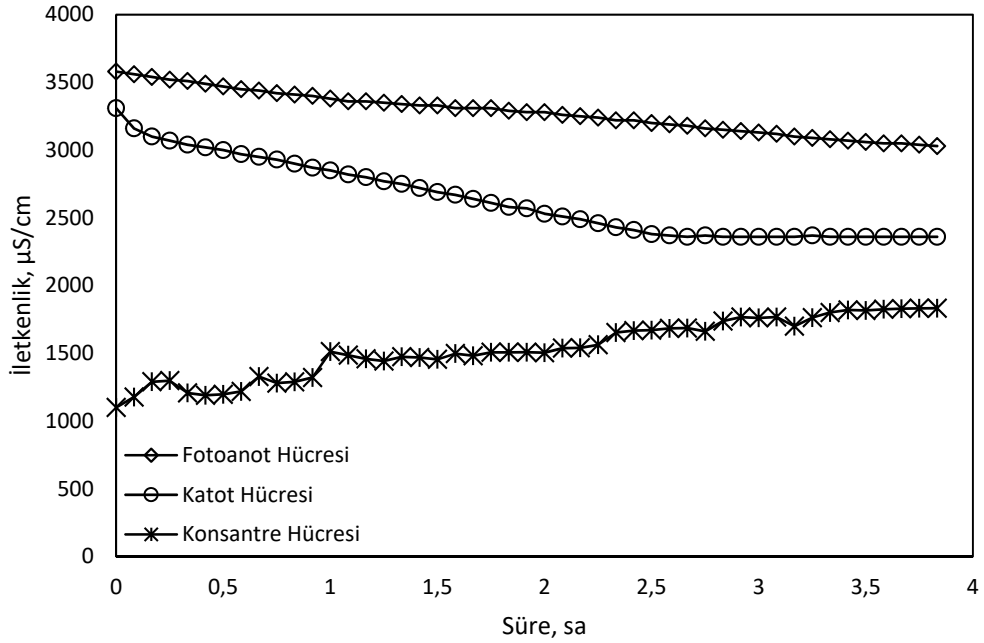
**Şekil 4.71:** Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu varlığında iletkenlik değişimi (Fotoanot-katot hücresi: 0,0025 M  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$ , Konsantre hücresi: 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$ ; Elektrot Alanı: 25  $\text{cm}^2$ , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)



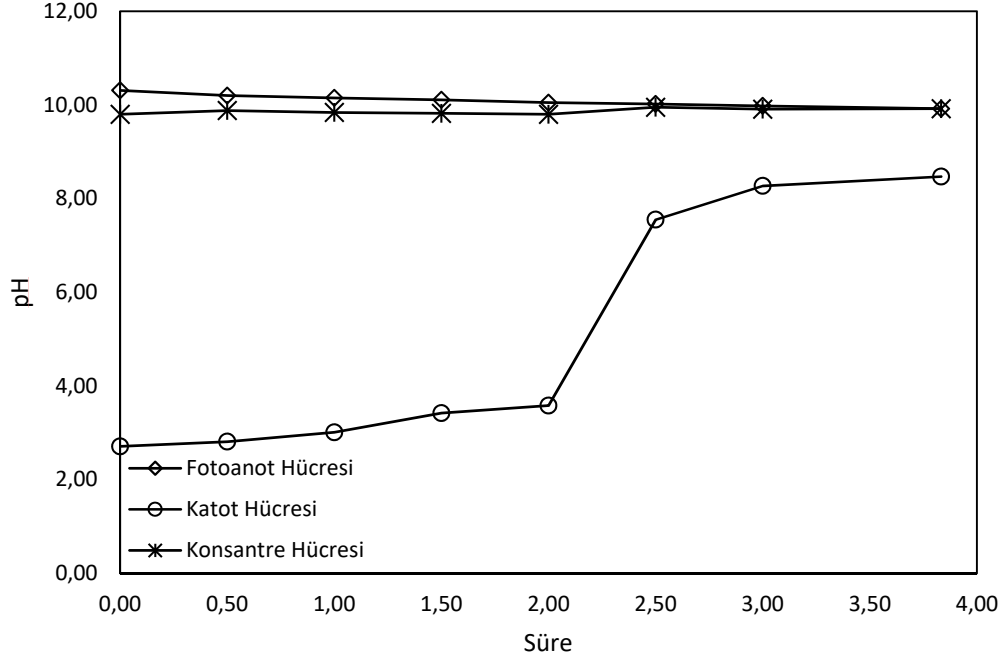
**Şekil 4.72:** Kesikli döngüsüz sistemde fotoanot-katot çözümü çevriminden sonra pH tamponu varlığında iletkenlik değişimi (Fotoanot-katot hücresi: 0,0025 M  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$ , Konsantre hücresi: 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$ ; Elektrot Alanı: 25  $\text{cm}^2$ , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)

#### 4.7. PH TAMPONU VE KUVVETLİ ASİT VARLIĞINDA SİSTEM VERİMİ

Reaktörde pH değişiminin engellenmesi ile birlikte sistemde meydana gelebilecek etkilerin değerlendirilebilmesi için kesikli döngüsüz sistem pH tamponu ve kuvvetli asit varlığında çalıştırılmıştır. pH değişiminin gerçekleştiği hücreler olan fotoanot hücrelerine 0,0025 M  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$ , katot hücrelerine ise 0,0025 M  $\text{HCl}$  ve 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$  eklenmiştir. Konsantre hücrelerine 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$  konularak 1V gerilim altında, Xenon lamba ile aydınlatma yapılarak giderim çalışması yürütülmüştür (Şekil 4.73-4.78). Çalışma sonucunda Na giderimi %21 olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 4.73:** Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu varlığında iletkenlik değişimi (Fotoanot hücresi: 0,0025 M  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$ , Katot hücresi: 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$  ve 0,0025 M  $\text{HCl}$  Konsantre hücresi: 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$ ; Elektrot Alanı: 25  $\text{cm}^2$ , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)

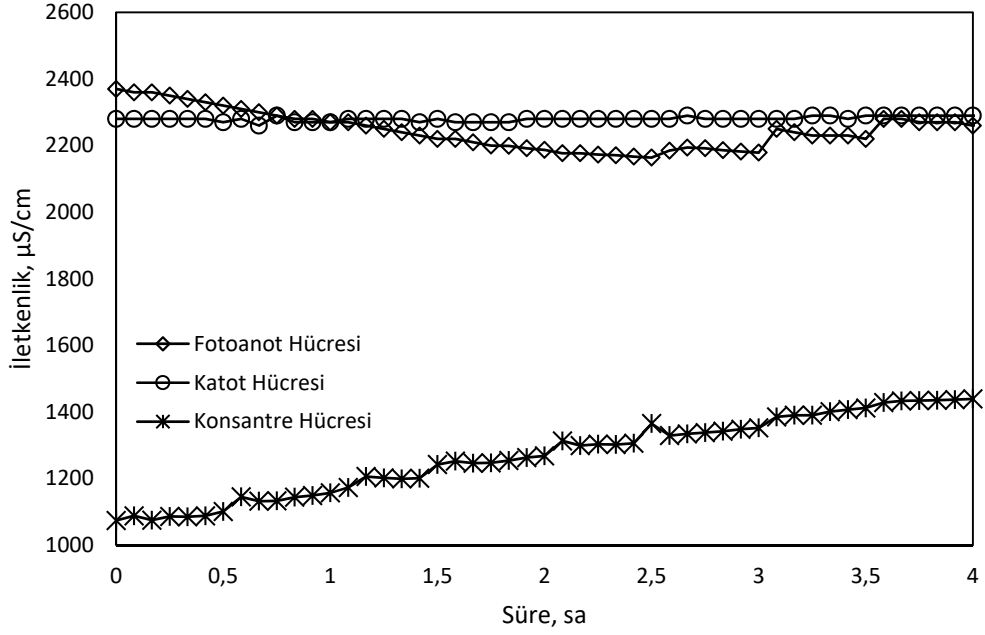


**Şekil 4.74:** Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu varlığında pH değişimi (Fotoanot hücresi: 0,0025 M  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$ , Katot hücresi: 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$  ve 0,0025 M HCl Konsantre hücresi: 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$ ; Elektrot Alanı: 25  $\text{cm}^2$ , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)

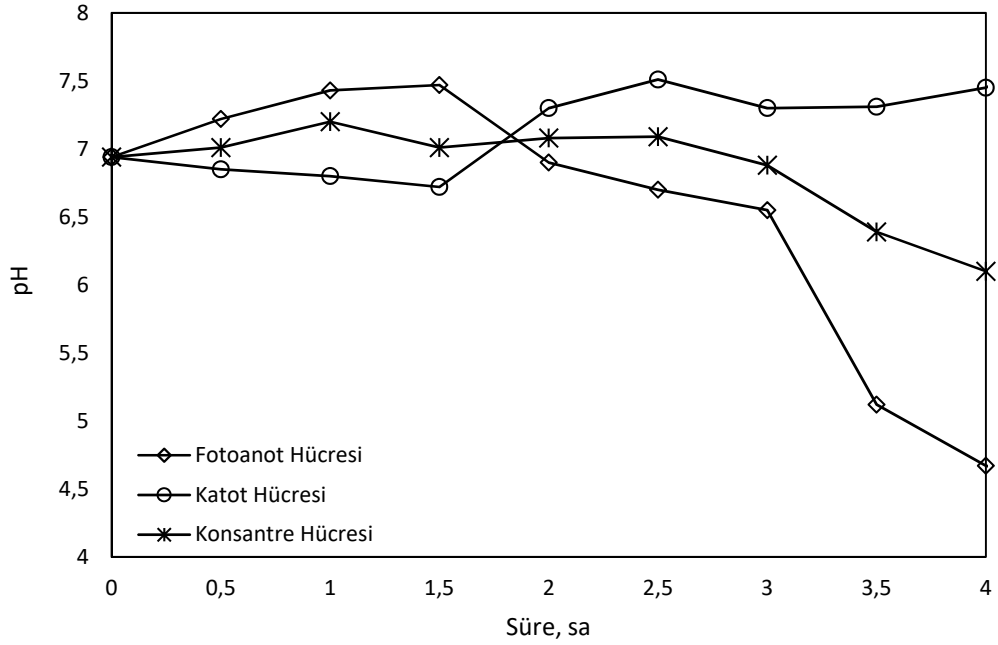
## 4.8. ORGANİK MADDE GİDERİMİ

### 4.8.1. Kesikli Döngüsüz Sistemde Hümkik Asit Giderimi

Sistemin organik madde gideriminin ölçülebilmesi için hümkik asit kullanılmıştır. 24 mg/L olarak hazırlanan hümkik asit solüsyonu içerisine uygun miktarda  $\text{NaNO}_3$  eklenerek nihai molaritenin 0,0064 M olması sağlanmıştır. Fotoanot üzerindeki organik madde giderimi araştırıldığı için hazırlanan solüsyon fotoanot bölgesine konulmuştur. Katot içerisinde 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$ , konsantre içerisinde de 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$  bulunmaktadır. İçerisinde 64  $\text{cm}^2$  çalışma alanına sahip elektrotlar bulunan sistem 1V gerilim altında Xenon lamba ile aydınlatılarak çalıştırılmıştır. Yapılan iyon ölçümlerinde  $\text{Na}^+$  giderim verimi %13 olarak belirlenmiştir. Buna karşın TOK miktarında %56'lık azalma elde edilmiştir (Şekil 4.75-4.82).

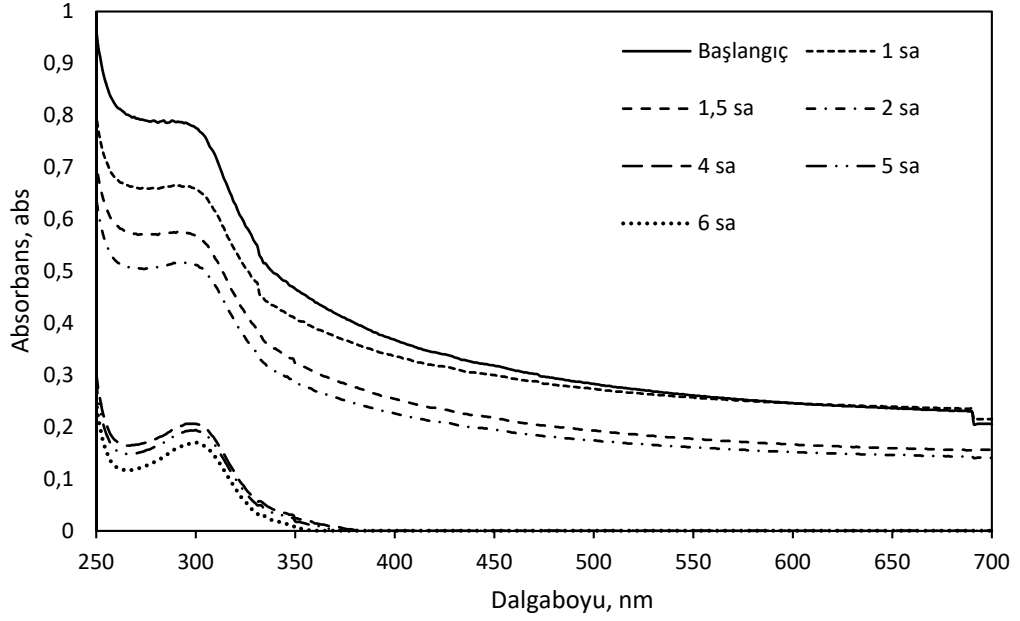


**Şekil 4.75:** Kesikli döngüsüz sistemde organik madde varlığında iletkenlik değişimi (Fotoanot hücresi: 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$  ve 24 mg/L Hümik Asit, Katot hücresi: 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$  Konsantre hücresi: 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$ ; Elektrot Alanı: 25  $\text{cm}^2$ , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)

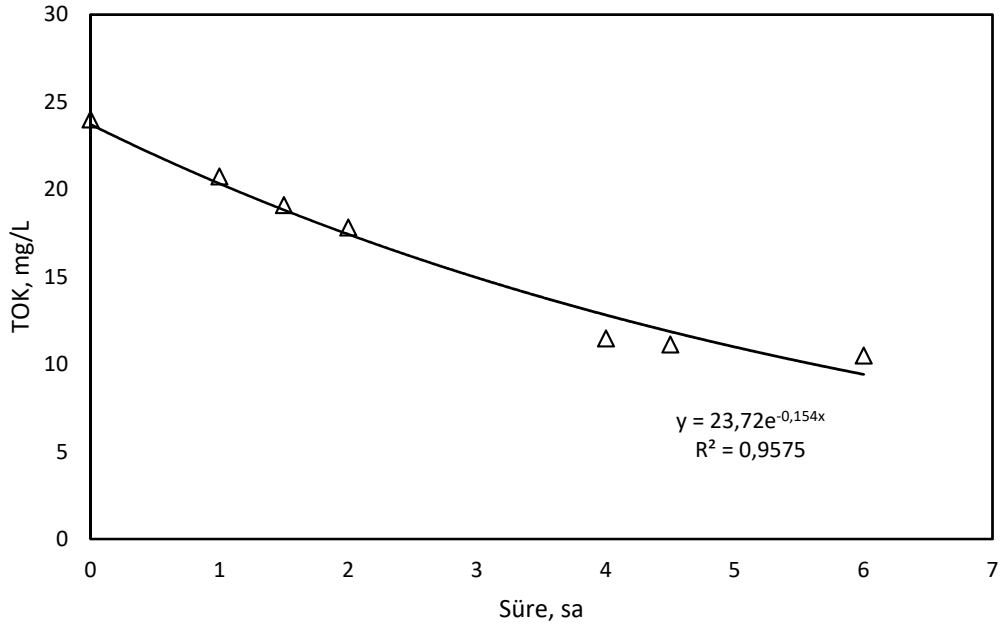


**Şekil 4.76:** Kesikli döngüsüz sistemde organik madde varlığında pH değişimi (Fotoanot hücresi: 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$  ve 24 mg/L Hümik Asit, Katot hücresi: 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$  Konsantre hücresi: 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$ ; Elektrot Alanı: 25  $\text{cm}^2$ , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)





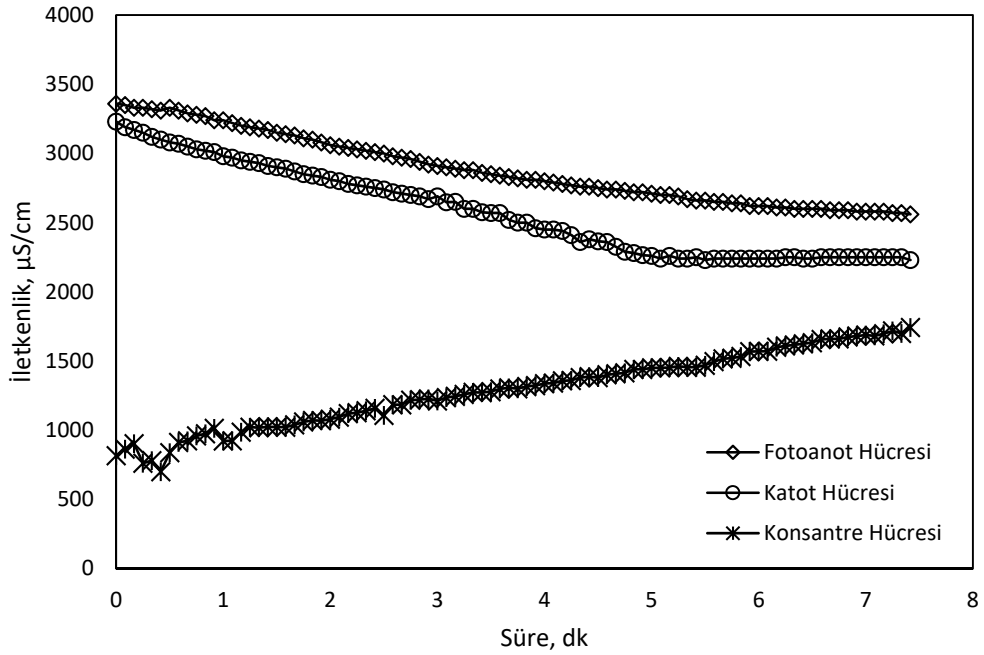
**Şekil 4.77:** Kesikli döngüsüz sistemde organik madde varlığında absorban değişimi (Fotoanot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> ve 24 mg/L Hümik Asit, Katot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)



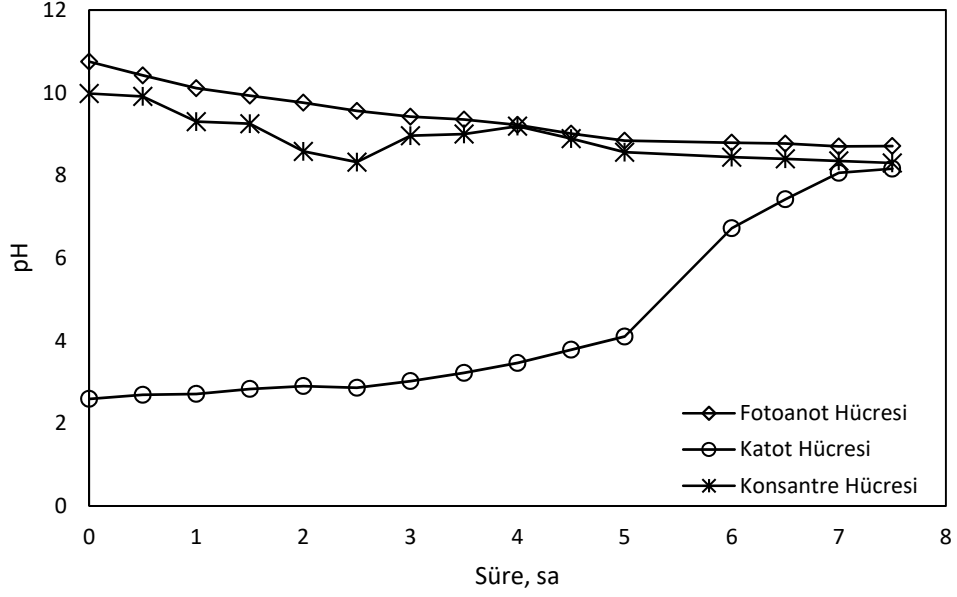
**Şekil 4.78:** Kesikli döngüsüz sistemde organik madde varlığında TOK değişimi (Fotoanot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> ve 24 mg/L Hümik Asit, Katot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)

#### 4.8.2. Kesikli Döngüsüz Sistemde pH Tamponu Varlığında Hümik Asit Giderimi

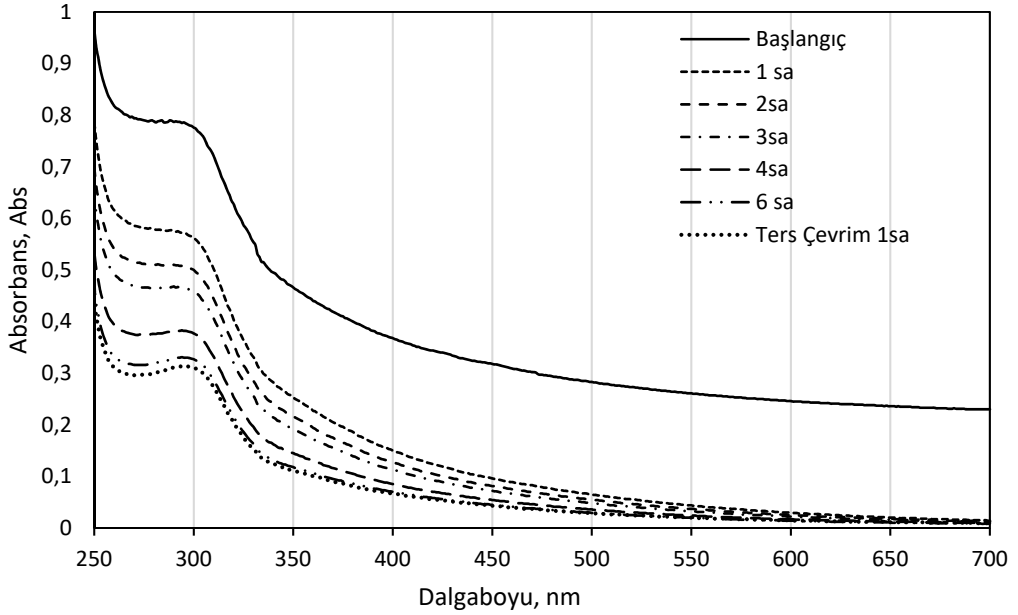
pH tamponu varlığında sistemin organik madde gideriminin ölçülebilmesi için daha önce kullanılan hümik asit solüsyonu içerisine 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$  ve 0,0025 M  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  eklenmiştir. Katot içerisinde 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$  ve 0,0025 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , konsantre içerisinde de 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$  bulunmaktadır. İçerisinde  $64 \text{ cm}^2$  çalışma alanına sahip elektrotlar bulunan sistem 1V gerilim altında Xenon lamba ile aydınlatılarak çalıştırılmıştır. Yapılan iyon ölçümlerinde  $\text{Na}^+$  giderim verimi %38 olarak belirlenmiştir. Bununla beraber TOK giderimi %41 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.79-4.82).  $\text{NaNO}_3$  varlığında iyon geçişinin arttığı, bununla beraber organik madde gideriminin azaldığı hem TOK ölçümlerinde hem de absorbans ölçümlerinde görülmektedir. Bu durum  $\text{NaNO}_3$ 'ün serbest radikal tutucu özelliğinden kaynaklanmaktadır (Mehrvar ve diğ., 2001).



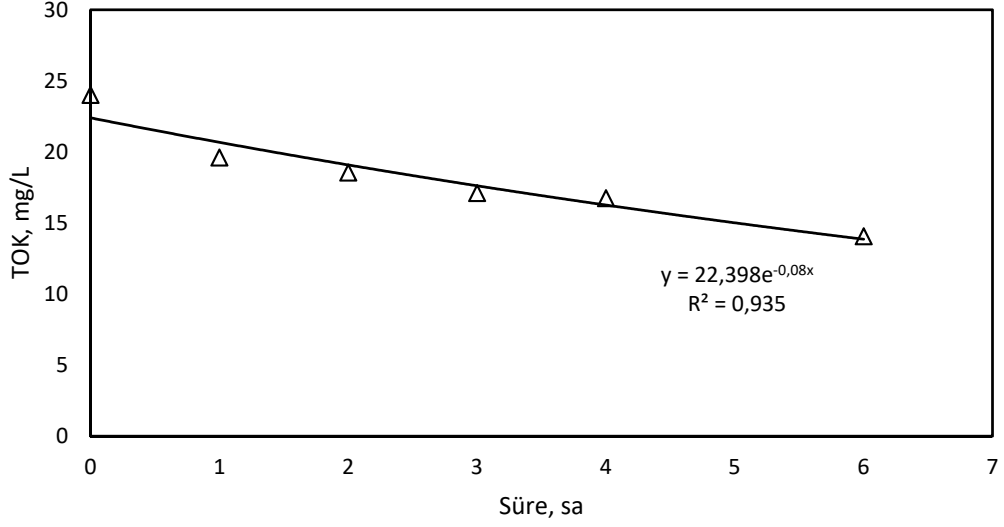
**Şekil 4.79:** Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu ve organik madde varlığında iletkenlik değişimi (Fotoanot hücresi: 0,0025 M  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$  ve 24 mg/L Hümik Asit; Katot hücresi: 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$ , 0,0025 M;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  Konsantre hücresi: 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$ ; Elektrot Alanı:  $25 \text{ cm}^2$ , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)



**Şekil 4.80:** Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu ve organik madde varlığında pH değişimi (Fotoanot hücresi: 0,0025 M  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$  ve 24 mg/L Hümik Asit; Katot hücresi: 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$ , 0,0025 M;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  Konsantre hücresi: 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$ ; Elektrot Alanı: 25  $\text{cm}^2$ , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)



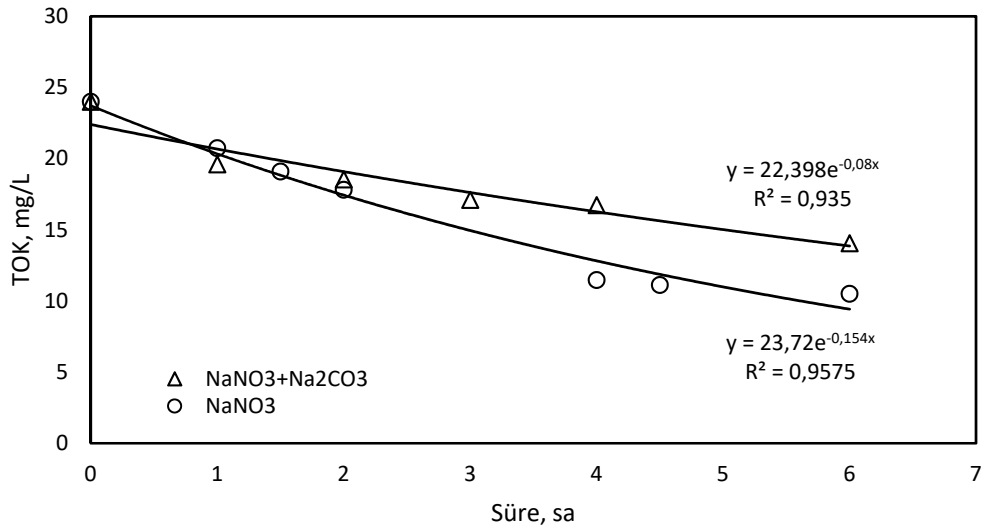
**Şekil 4.81:** Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu ve organik madde varlığında absorbans değişimi (Fotoanot hücresi: 0,0025 M  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$  ve 24 mg/L Hümik Asit; Katot hücresi: 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$ , 0,0025 M;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  Konsantre hücresi: 0,0016 M  $\text{NaNO}_3$ ; Elektrot Alanı: 25  $\text{cm}^2$ , Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)



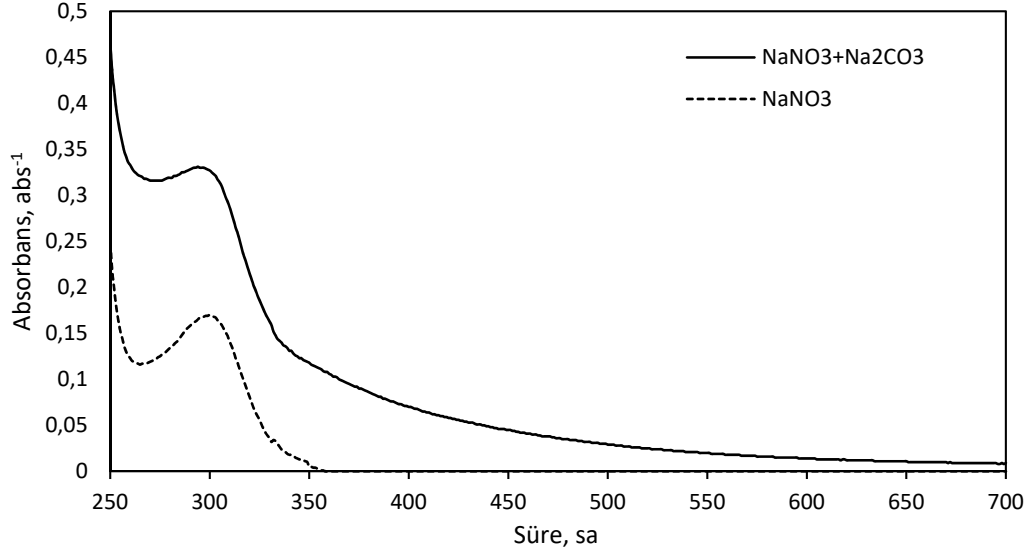
**Şekil 4.82:** Kesikli döngüsüz sistemde pH tamponu ve organik madde varlığında TOK değişimi (Fotoanot hücresi: 0,0025 M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> ve 24 mg/L Hümik Asit; Katot hücresi: 0,0064 M NaNO<sub>3</sub>, 0,0025 M; H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Konsantre hücresi: 0,0016 M NaNO<sub>3</sub>; Elektrot Alanı: 25 cm<sup>2</sup>, Gerilim: 1V vs SCE., Işık kaynağı: Xenon Lamba)

#### 4.8.3. Organik Madde Giderim Verimlerinin Karşılaştırılması

Organik madde giderimleri karşılaştırıldığında pH tamponu içeren çalışmadan elde edilen TOK ve absorbans ölçümleri organik madde gideriminin daha düşük olduğunu göstermektedir (Şekil 4.83-4.84). pH tamponu olarak kullanılan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aynı zamanda serbest radikal tutucusudur ve fotokatalitik sistemlerde giderimi azalttığı bilinmektedir (Mehrvar ve diğ., 2001).



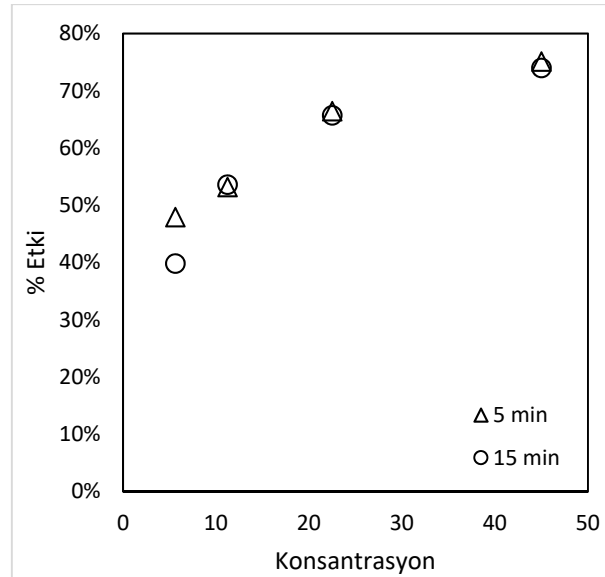
**Şekil 4.83:** Toplam organik karbon giderimlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.84: Absorbans değişiminin karşılaştırılması

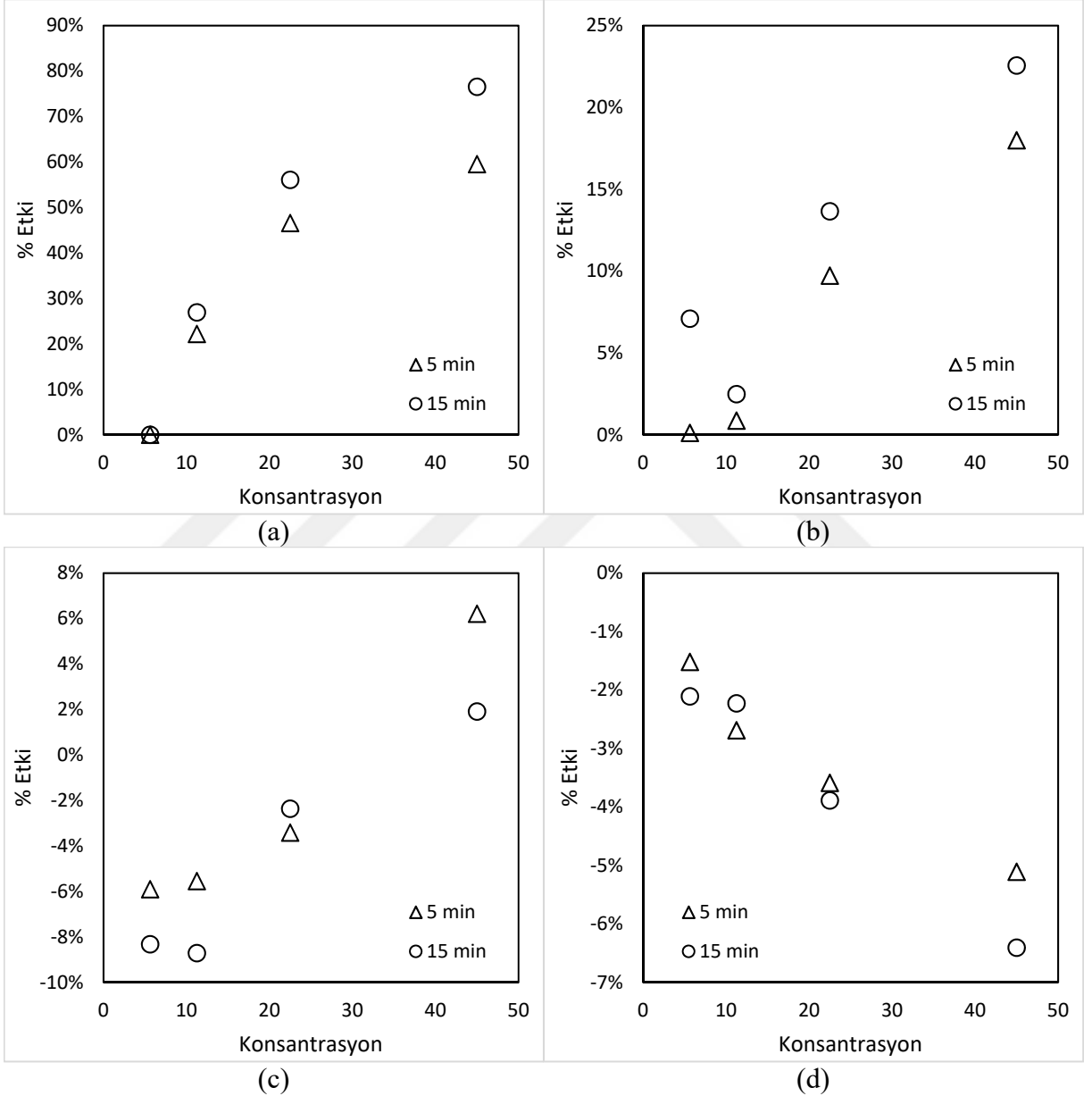
#### 4.9. DETOKSİFİKASYON ÇALIŞMALARI

Detoksifikasyon çalışmaları, hümik asit ile yapılan çalışmalar ile eşzamanlı olarak yürütülmüştür. Hümik asit giderimi ile birlikte meydana gelen toksisite değişimleri Microtox M500 toksisite cihazı ile ölçülmüştür. 24 g/L konsantrasyona sahip hümik asit çözeltisi ile yapılan toksisite ölçümlerinde EC50 değeri %7,30 olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.85).



Şekil 4.85: Hümik asit toksisite sonuçları

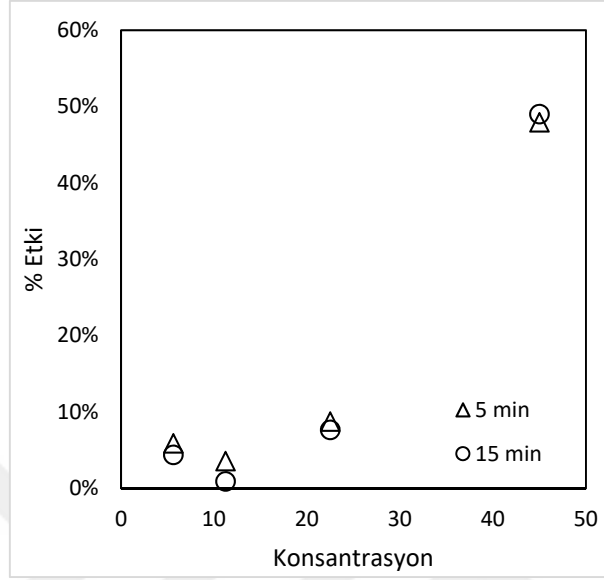
Kesikli döngüsüz sistemde 24 mg/L hümik asit ve 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> varlığında yapılan çalışmada saatlik olarak numune alınarak toksisite ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.86). Yapılan ölçümler sonucunda 1 saat sonunda EC50 değerinin %29'a çıktığı gözlemlenmiştir. 2 saat ve sonrasında yapılan ölçümlerde toksik etki tespit edilememiştir.



**Şekil 4.86:** Kesikli döngüsüz sistemde 24 mg/L hümik asit ve 0,0064 M NaNO<sub>3</sub> varlığında yapılan toksisite ölçüm sonuçları. (a) 1 sa; (b) 2 sa; (c) 3 sa; (d) 6 sa

pH tamponu varlığında 6 saatlik çalışma sonucunda EC50 değeri %48 olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.87). Yapılan TOK ve absorpsiyon ölçümlerinde tampon çözelti varlığında organik madde gideriminin düşük olduğu görülmektedir. Organik madde ve buna bağlı olarak toksisite

gideriminin düşük olması, aynı zamanda güçlü bir radikal iyon tutucusu olan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  nedeniyle meydana gelmektedir.



**Şekil 4.87:** Kesikli döngüsüz sistemde 6 saat sonunda 24 mg/L hümik asit, pH tamponu ve 0,0064 M  $\text{NaNO}_3$  varlığında yapılan toksisite ölçüm sonuçları.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, elektrodializ ve fotoelektrokataliz sistemlerini birleştiren kesikli döngüsüz ve kesikli döngülü olmak üzere iki yeni arıtma sistemi geliştirilmiş ve arıtma denemeleri yapılmıştır. Yeraltı sularında bol miktarda bulunabilen NaCl ve NaNO<sub>3</sub> kimyasalları seçilerek, arıtma çalışmaları yürütülmüştür. Geliştirilen sistemde fotoakım oluşumu, gerilim değişimine karşı sistemin verdiği tepki, sodyum iyonlarının sistem içerisindeki hareketi, organik madde giderimi, toksisite, pH ve iletkenlik değişimleri takip edilmiştir.

Geliştirilen sistem UV ışığı altında TiO<sub>2</sub> NP'lerinin uyarılarak su içerisinde fotoakım oluşturulması ve iyon seçici membranlar yardımı ile iyonların ortamdaki uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır. İyonların ayrılmasına eş zamanlı olarak fotoanot hücrelerinde meydana gelen fotokatalitik reaksiyonlar sonucunda oluşan serbest radikaller ile organik maddelerin parçalanması sağlanmaktadır.

Yapılan çalışmalar sonucunda sistemde pH değişiminin önemli bir rol oynadığı görülmüştür. Kesikli döngüsüz sistemlerde yapılan giderim çalışmalarında fotoanot hücrelerinde pH değerinin düşmesi ile birlikte sistemde iyon transfer veriminin düştüğü görülmüştür. Bu nedenle fotoanot ve katot hücrelerinde meydana gelen iyon değişimlerinin dengelenebilmesi amacıyla belirli periyotlarda iki hücre arasında solüsyon değişimi yapılmıştır. Solüsyon değişimi ile birlikte verimin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, aynı zamanda kesikli döngülü sistemin daha verimli olacağına bir göstergesidir. Çalışmada uygulanan farklı membran dizilimlerinde fotoanot hücreleri pH değeri, sistemin çalıştırılmaya başlamasıyla birlikte ilk yarım saat içerisinde hızlı bir şekilde düşmektedir. Bu durum fotoanot ve konsantre hücrelerinin arasında katyon seçici membran olduğunda, katyonların konsantre hücrelerine hareketi sonucunda meydana gelmektedir. Fotoanot ve dilüat hücreleri arasındaki anyon seçici membran da, fotoanot hücrelerine anyonların geçişini sağlamaktadır. Her iki durumda da fotoanot hücrelerinde katyon miktarının azalması ve fotokatalitik reaksiyonların oluşması ile birlikte H<sup>+</sup> iyonu ile bağ yaparak asit oluşumuna neden olmaktadır. Bu durum pH değerinin hızlı bir şekilde düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle fotoanot ve katot hücreleri arasında döngü yapılması verimin artırılabilmesi için gereklidir. pH'ın tampon bir madde ile dengelendiği durumlarda sistemin daha uzun bir süre çalışabildiği gözlemlenmiştir.



Işık şiddeti, sistemin çalışmasını doğrudan etkilemektedir. Karanlık ortam ile yapılan karşılaştırmalarda en yüksek fotoakım değerini Xenon lambanın verdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte Suntest güneş simülatörü ile yapılan çalışmalarda da solüsyon çevrimi yapılmadan önce ve yapıldıktan sonra sırasıyla %6 ve %10 oranında sodyum giderimi yapıldığı görülmüştür. Xenon lamba ile aynı şartlarda yapılan çalışmalarda bu oranların sırasıyla %9 ve %23 olduğu görülmektedir. Her ne kadar Xenon lamba ile yapılan çalışmanın verimi yüksek olsa da, enerji maliyeti olarak bakıldığında Suntest'in güneş ışınlarını simüle ettiği için daha uygun bir yöntem olabileceği düşünülmektedir.

Sodyum klorür ile yapılan çalışmalara benzer şartlarda yapılan sodyum nitrat ile yapılan çalışmalarda aynı iletkenliğe sahip farklı sodyum tuzları kullanıldığında fotoakım oluşumunda biraz daha iyi sonuç verebildiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte verimler karşılaştırıldığında büyük farklar elde edilememiştir. Bu durum mevcut iyonların transfer katsayılarının birbirine yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

Sistemde solüsyon değişimi yapılmadığında nitrat giderimi 8 saatte %10 olarak elde edilmiştir. Buna karşın periyodik olarak iki saatte bir fotoanot ve katot solüsyonlarındaki solüsyonlar değiştirildiğinde verimin %22'ye çıktığı görülmektedir. Bu durum sistemde değişen pH değerinin bir etkisidir. Fotoanot ve katot hücrelerinde pH değerinin sırasıyla düşmesi ve yükselmesi ile birlikte membranlardan proton geçişinin arttığı ve bunun verimi düşürdüğü düşünülmektedir. Tampon çözelti varlığında, sistemdeki pH değişimi dengelendiğinde de benzer verimler elde edilmiştir. Bu durum çok daha detaylı bir şekilde irdelenmesi gereken bir durumdur. Bununla birlikte döngü yapıldığında verimin yükselmesi, bu durumun kesikli döngülü bir sistemle engellenebileceğini göstermektedir. Konsantre hücrelerinde meydana gelen birikimler göz önüne alındığında, 1V gerilim altında %42, 5V gerilim altında ise %60'a yakın birikim olduğu görülmektedir.

Membran dizilimi iyon hareketi reaktörün içinden dışına olacak şekilde değiştirildiğinde sistemdeki giderim verimi %33 olarak bulunmuştur. Bu membran diziliminde solüsyon fotoanot ve katot bölmesi arasında bulunan diluat bölmesinde yer almaktadır. Her ne kadar giderim aynı şartlarda diğer membran dizilimine göre daha yüksek olsa da, diluat bölmesinde fotoanot reaksiyonları elde edilemediği için organik madde gideriminden söz edilememekte olup, sistem ışık altında çalışan bir elektrodializ sistemi gibi davranmaktadır.

Sistem içerisinde organik madde miktarının ve toksisitenin fotokatalitik reaksiyonlara bağı olarak düştüğü görülmektedir. Bununla birlikte, kesikli döngüsüz olarak çalıştırılan sistemde sodyum klorür ile yapılan çalışmalarda, fotoanot hücresinde serbest klor oluşumu gözlemlenmiştir. İçme suyu arıtımı söz konusu olduğunda, özellikle dezenfeksiyona katkıda bulunabilir fakat bununla birlikte organik madde içeriği ile birlikte yan ürün oluşumuna dikkat edilmelidir (Glaze ve diğ., 1993). Fotokatalitik reaksiyonların meydana geldiği hücrede organik maddenin parçalanması sonucu oluşabilecek son ürünler ve serbest klor oluşumuna bağı olarak yan ürün oluşumu ayrıca detaylı olarak incelenmesi gereken bir durumdur.

Genel olarak elde edilen veriler karşılaştırıldığında reaktörün verimli bir şekilde çalışmadığı görülmektedir. Bu durum reaktör içerisinde gerekli ölçümlerin yapılabilmesi için reaktör boyutunun büyük tutulmasından kaynaklanmaktadır. Elektrodializ ve fotokataliz sistemlerinin birleştirilerek çalıştırıldığı sistem, elektrotlar arasında 6 cm'lik bir mesafeye sahiptir ve bir hücrenin genişliği 2 cm civarındadır. Günümüzde kullanılan ticari elektrodializ sistemlerinde bu mesafe 1-3 mm arasında değişmektedir. Bu nedenle sistem boyutunun elektrodializ hücresi kriterleri değerlendirilerek optimize edilmesi gerekmektedir.

Fotokatalitik elektrodializ prosesi yeni geliştirilmekte olan bir teknolojidir ve yapılan ön çalışmalarda sistemin çalışma prensipleri ve uygulanabilirliği üzerine çalışmalar yapılmıştır. Sistem boyutları optimize edilmediği halde kabul edilebilir seviyede giderim verimleri elde edilmiştir. Bu nedenle sistemin geliştirilmesi ve optimizasyonu için daha pek çok çalışma yapılması gerekmektedir. Gerekli çalışmalar ve düzenlemeler yapıldığı takdirde fotokatalitik elektrodializ prosesinin güneş enerjisi ile çalışabilen bir arıtma metodu olarak kullanılabilceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Abou-Shady, A. 2017. Recycling of polluted wastewater for agriculture purpose using electro dialysis: Perspective for large scale application. *Chemical Engineering Journal*, 323, 1-18.
- Akpan, U. ve Hameed, B. 2010. The advancements in sol–gel method of doped-TiO<sub>2</sub> photocatalysts. *Applied Catalysis A: General*, 375, 1-11.
- Akple, M. S., Low, J., Qin, Z., Wageh, S., Al-Ghamdi, A. A., Yu, J. ve Liu, S. 2015. Nitrogen-doped TiO<sub>2</sub> microsheets with enhanced visible light photocatalytic activity for CO<sub>2</sub> reduction. *Chinese Journal of Catalysis*, 36, 2127-2134.
- Al-Amoudi, A. S. 2010. Factors affecting natural organic matter (NOM) and scaling fouling in NF membranes: a review. *Desalination*, 259, 1-10.
- Arnell, N. W. 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 14, 31-52.
- Asano, T. 2007. *Water reuse : issues, technologies, and applications*, New York ; London, McGraw-Hill.
- Atkins, P. ve De Paula, J. 2010. *Atkins' Physical Chemistry*, OUP Oxford.
- Bacher, L. E., De Oliveira, C., Giacobbo, A., Benvenuti, T., Lacerda, A. B., Bernardes, A. M. ve Rodrigues, M. a. S. 2017. Coupling coagulation using tannin-based product with electro dialysis reversal to water treatment: A case study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 6008-6015.
- Bahnmann, D. 2004. Photocatalytic water treatment: solar energy applications. *Solar energy*, 77, 445-459.
- Bedford, N. ve Steckl, A. 2010. Photocatalytic self cleaning textile fibers by coaxial electrospinning. *ACS applied materials & interfaces*, 2, 2448-2455.
- Benvenuti, T., Rodrigues, M. a. S., Bernardes, A. M. ve Zoppas-Ferreira, J. 2017. Closing the loop in the electroplating industry by electro dialysis. *Journal of Cleaner Production*, 155, 130-138.
- Bernardes, A. M., Rodrigues, M. a. S. ve Ferreira, J. Z. 2013. *Electrodialysis and Water Reuse: Novel Approaches*, Springer Berlin Heidelberg.
- Bittencourt, S. D., Marder, L., Benvenuti, T., Ferreira, J. Z. ve Bernardes, A. M. 2017. Analysis of different current density conditions in the electro dialysis of zinc electroplating process solution. *Separation Science and Technology*, 52, 2079-2089.
- Bunani, S., Arda, M., Kabay, N., Yoshizuka, K. ve Nishihama, S. 2017. Effect of process conditions on recovery of lithium and boron from water using bipolar membrane electro dialysis (BMED). *Desalination*, 416, 10-15.
- Butterfield, I., Christensen, P., Hamnett, A., Shaw, K., Walker, G., Walker, S. ve Howarth, C. 1997. Applied studies on immobilized titanium dioxide films as catalysts for the

- photoelectrochemical detoxification of water. *Journal of applied electrochemistry*, 27, 385-395.
- Cahill, D. G. ve Allen, T. H. 1994. Thermal conductivity of sputtered and evaporated SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> optical coatings. *Applied Physics Letters*, 65, 309-311.
- Carmo-Silva, A. E., Keys, A. J., Beale, M. H., Ward, J. L., Baker, J. M., Hawkins, N. D., Arrabaca, M. C. ve Parry, M. a. J. 2009. Drought stress increases the production of 5-hydroxynorvaline in two C-4 grasses. *Phytochemistry*, 70, 664-671.
- Červenková, M., Chromíková, J., Heviánková, S. ve Wranová, Z. 2017. The application of electro dialysis for the recovery of phosphorus from wastewater sludge liquid discharge. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 92, 012007.
- Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W. ve Saint, C. 2010. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. *Water research*, 44, 2997-3027.
- Coleman, R. N. ve Qureshi, A. A. 1985. Microtox and Spirillum-Volutans Tests for Assessing Toxicity of Environmental-Samples. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 35, 443-451.
- Daghrir, R., Drogui, P. ve Robert, D. 2012. Photoelectrocatalytic technologies for environmental applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 238, 41-52.
- Dhatshanamurthi, P., Shanthi, M. ve Swaminathan, M. 2017. An efficient pilot scale solar treatment method for dye industry effluent using nano-ZnO. *Journal of Water Process Engineering*, 16, 28-34.
- Doganli, G., Yuzer, B., Aydin, I., Gultekin, T., Con, A. H., Selcuk, H. ve Palamutcu, S. 2016. Functionalization of cotton fabric with nanosized TiO<sub>2</sub> coating for self-cleaning and antibacterial property enhancement. *Journal of Coatings Technology and Research*, 13, 257-265.
- El-Morsi, T. M., Budakowski, W. R., Abd-El-Aziz, A. S. ve Friesen, K. J. 2000. Photocatalytic degradation of 1, 10-dichlorodecane in aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub>: a reaction of adsorbed chlorinated alkane with surface hydroxyl radicals. *Environmental science & technology*, 34, 1018-1022.
- Faust, S. D. ve Aly, O. M. 2013. *Adsorption processes for water treatment*, Elsevier.
- Fernandez-Gonzalez, C., Dominguez-Ramos, A., Ibañez, R. ve Irabien, A. 2015. Sustainability assessment of electro dialysis powered by photovoltaic solar energy for freshwater production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 604-615.
- Ferraz, E., Oliveira, G., Grando, M., Lizier, T., Zanoni, M. V. B. ve Oliveira, D. 2013. Photoelectrocatalysis based on Ti/TiO<sub>2</sub> nanotubes removes toxic properties of the azo dyes Disperse Red 1, Disperse Red 13 and Disperse Orange 1 from aqueous chloride samples. *Journal of environmental management*, 124, 108-114.
- Firdaus, C., Rizam, M. S., Rusop, M. ve Hidayah, S. R. 2012. Characterization of ZnO and ZnO: TiO<sub>2</sub> thin films prepared by sol-gel spray-spin coating technique. *Procedia Engineering*, 41, 1367-1373.

- Fujihara, K., Kumar, A., Jose, R., Ramakrishna, S. ve Uchida, S. 2007. Spray deposition of electrospun TiO<sub>2</sub> nanorods for dye-sensitized solar cell. *Nanotechnology*, 18, 365709.
- Gaya, U. I. 2013. *Heterogeneous Photocatalysis Using Inorganic Semiconductor Solids*, Springer Netherlands.
- Glaze, W. H., Kenneke, J. F. ve Ferry, J. L. 1993. Chlorinated byproducts from the titanium oxide-mediated photodegradation of trichloroethylene and tetrachloroethylene in water. *Environmental science & technology*, 27, 177-184.
- Gonzalez, A., Grágeda, M. ve Ushak, S. 2017. Assessment of pilot-scale water purification module with electrodialysis technology and solar energy. *Applied Energy*, 206, 1643-1652.
- Guaraldo, T., Pulcinelli, S. H. ve Zanoni, M. B. 2011. Influence of particle size on the photoactivity of Ti/TiO<sub>2</sub> thin film electrodes, and enhanced photoelectrocatalytic degradation of indigo carmine dye. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 217, 259-266.
- Gupta, S. M. ve Tripathi, M. 2011. A review of TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Chinese Science Bulletin*, 56, 1639.
- Hachisu, T., Shi, K., Yokoshima, T., Sugiyama, A., Kuroiwa, S., Osaka, T., Nakajima, N. ve Yoshino, M. 2016. Preparation of anatase phase titanium dioxide film by non-aqueous electrodeposition. *Electrochemistry Communications*, 65, 5-8.
- Hosono, E., Matsuda, H., Honma, I., Ichihara, M. ve Zhou, H. 2007. Synthesis of a perpendicular TiO<sub>2</sub> nanosheet film with the superhydrophilic property without UV irradiation. *Langmuir*, 23, 7447-7450.
- Huang, C. ve Xu, T. 2006. Comparative Study on the Regeneration of Flue-Gas Desulfurizing Agents by Using Conventional Electrodialysis (ED) and Bipolar Membrane Electrodialysis (BMED). *Environmental Science & Technology*, 40, 5527-5531.
- Huang, C., Xu, T. ve Yang, X. 2007. Regenerating Fuel-Gas Desulfurizing Agents by Using Bipolar Membrane Electrodialysis (BMED): Effect of Molecular Structure of Alkanolamines on the Regeneration Performance. *Environmental Science & Technology*, 41, 984-989.
- Ibáñez, R., Pérez-González, A., Gómez, P., Urtiaga, A. M. ve Ortiz, I. 2013. Acid and base recovery from softened reverse osmosis (RO) brines. Experimental assessment using model concentrates. *Desalination*, 309, 165-170.
- İlhan, F. 2012. *Sızıntı Sularının Elektrodializ Prosesiyle Arıtılabilirliğinin ve Geri Kazanım Amaçlı Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Kabra, K., Chaudhary, R. ve Sawhney, R. L. 2004. Treatment of Hazardous Organic and Inorganic Compounds through Aqueous-Phase Photocatalysis: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43, 7683-7696.
- Khoshrou, I., Jafari Nasr, M. R. ve Bakhtari, K. 2017. New opportunities in mass and energy consumption of the Multi-Stage Flash Distillation type of brackish water desalination process. *Solar Energy*, 153, 115-125.

- Kim, D. H. ve Anderson, M. A. 1994. Photoelectrocatalytic degradation of formic acid using a porous titanium dioxide thin-film electrode. *Environmental science & technology*, 28, 479-483.
- Kisch, H. 2014. *Semiconductor Photocatalysis: Principles and Applications*, Wiley.
- Kobyas, M., Can, O. T. ve Bayramoglu, M. 2003. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of hazardous materials*, 100, 163-178.
- Kobyas, M., Demirbas, E. ve Akyol, A. 2009. Electrochemical treatment and operating cost analysis of textile wastewater using sacrificial iron electrodes. *Water science and technology*, 60, 2261-2270.
- Konstantinou, I. K. ve Albanis, T. A. 2003. Photocatalytic transformation of pesticides in aqueous titanium dioxide suspensions using artificial and solar light: intermediates and degradation pathways. *Applied Catalysis B: Environmental*, 42, 319-335.
- Lan, Y., Lu, Y. ve Ren, Z. 2013. Mini review on photocatalysis of titanium dioxide nanoparticles and their solar applications. *Nano Energy*, 2, 1031-1045.
- Lee, H.-J., Oh, S.-J. ve Moon, S.-H. 2003. Recovery of ammonium sulfate from fermentation waste by electrodialysis. *Water Research*, 37, 1091-1099.
- Lee, K. M., Lai, C. W., Ngai, K. S. ve Juan, J. C. 2016. Recent developments of zinc oxide based photocatalyst in water treatment technology: a review. *Water research*, 88, 428-448.
- Lee, S.-A., Choo, K.-H., Lee, C.-H., Lee, H.-I., Hyeon, T., Choi, W. ve Kwon, H.-H. 2001. Use of ultrafiltration membranes for the separation of TiO<sub>2</sub> photocatalysts in drinking water treatment. *Industrial & engineering chemistry research*, 40, 1712-1719.
- Lianos, P. 2011. Production of electricity and hydrogen by photocatalytic degradation of organic wastes in a photoelectrochemical cell: the concept of the photofuelcell: a review of a re-emerging research field. *Journal of Hazardous Materials*, 185, 575-590.
- Lin, J., Ye, W., Huang, J., Ricard, B., Baltaru, M.-C., Greydanus, B., Balta, S., Shen, J., Vlad, M., Sotto, A., Luis, P. ve Van Der Bruggen, B. 2015. Toward Resource Recovery from Textile Wastewater: Dye Extraction, Water and Base/Acid Regeneration Using a Hybrid NF-BMED Process. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3, 1993-2001.
- Lin, Y., Wu, G., Yuan, X., Xie, T. ve Zhang, L. 2003. Fabrication and optical properties of TiO<sub>2</sub> nanowire arrays made by sol-gel electrophoresis deposition into anodic alumina membranes. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 15, 2917.
- Long, M., Cai, W., Cai, J., Zhou, B., Chai, X. ve Wu, Y. 2006. Efficient photocatalytic degradation of phenol over Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/BiVO<sub>4</sub> composite under visible light irradiation. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110, 20211-20216.
- Malek, P., Ortiz, J. ve Schulte-Herbrüggen, H. 2016. Decentralized desalination of brackish water using an electrodialysis system directly powered by wind energy. *Desalination*, 377, 54-64.

- Mehrvar, M., Anderson, W. A. ve Moo-Young, M. 2001. Photocatalytic degradation of aqueous organic solvents in the presence of hydroxyl radical scavengers. *International Journal of Photoenergy*, 3.
- Mei, Y. ve Tang, C. Y. 2018. Recent developments and future perspectives of reverse electro dialysis technology: A review. *Desalination*, 425, 156-174.
- Momeni, M. M., Hakimian, M. ve Kazempour, A. 2015. In-situ manganese doping of TiO<sub>2</sub> nanostructures via single-step electrochemical anodizing of titanium in an electrolyte containing potassium permanganate: A good visible-light photocatalyst. *Ceramics International*, 41, 13692-13701.
- Morgado Jr, E., Jardim, P., Marinkovic, B. A., Rizzo, F. C., De Abreu, M. A., Zotin, J. L. ve Araújo, A. S. 2007. Multistep structural transition of hydrogen trititanate nanotubes into TiO<sub>2</sub>-B nanotubes: a comparison study between nanostructured and bulk materials. *Nanotechnology*, 18, 495710.
- Muñoz, F. ve Becerril, L. A. 2014. Low-capacity Reverse Osmosis Solar Desalination Plant. *Energy Procedia*, 57, 2787-2793.
- Nayar, K. G., Sundararaman, P., O'connor, C. L., Schacherl, J. D., Heath, M. L., Gabriel, M. O., Shah, S. R., Wright, N. C. ve Winter, V. a. G. 2017. Feasibility study of an electro dialysis system for in-home water desalination in urban India. *Development Engineering*, 2, 38-46.
- Nowotny, J. ve Nowotny, M. K. 2010. *Solid state chemistry and photocatalysis of titanium dioxide : special topic volume with invited peer reviewed papers only*, Switzerland ; United Kingdom, Trans Tech.
- Onorato, C., Banasiak, L. J. ve Schäfer, A. I. 2017. Inorganic trace contaminant removal from real brackish groundwater using electro dialysis. *Separation and Purification Technology*, 187, 426-435.
- Onotri, L., Race, M., Clarizia, L., Guida, M., Alfè, M., Andreozzi, R. ve Marotta, R. 2017. Solar photocatalytic processes for treatment of soil washing wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 318, 10-18.
- Pca. 2018. *Electrodialysis: Moving Ions in Water by Electric Current*. Available: <http://www.pca-gmbh.com/appli/ed.htm> [Erişim Tarihi 10.12.2017].
- Pilat, B. 2001. Practice of water desalination by electro dialysis. *Desalination*, 139, 385-392.
- Pirsaheb, M., Khosravi, T., Sharafi, K. ve Mouradi, M. 2016. Comparing operational cost and performance evaluation of electro dialysis and reverse osmosis systems in nitrate removal from drinking water in Golshahr, Mashhad. *Desalination and Water Treatment*, 57, 5391-5397.
- Pletcher, D. 2013. *Industrial Electrochemistry*, Springer Netherlands.
- Pongwan, P., Wetchakun, K., Phanichphant, S. ve Wetchakun, N. 2016. Enhancement of visible-light photocatalytic activity of Cu-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Research on Chemical Intermediates*, 42, 2815-2830.

- Qian, L. ve Hinestroza, J. P. 2004. Application of nanotechnology for high performance textiles. *Journal of textile and apparel, technology and management*, 4, 1-7.
- Quteishat, K. ve Abu-Arabi, M. 2006. Promotion of solar desalination in the MENA region. *Middle East Desalination Centre, Muscat, Oman*—<http://www.menarec.com/docs/Abu-Arabi.pdf> [accessed March 28, 2006].
- Rahaoui, K., Ding, L. C., Tan, L. P., Mediouri, W., Mahmoudi, F., Nakoa, K. ve Akbarzadeh, A. 2017. Sustainable Membrane Distillation Coupled with Solar Pond. *Energy Procedia*, 110, 414-419.
- Rahmani, E., Ahmadpour, A. ve Zebarjad, M. 2011. Enhancing the photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> nanocrystalline thin film by doping with SiO<sub>2</sub>. *Chemical Engineering Journal*, 174, 709-713.
- Rengaraj, S., Yeon, K.-H. ve Moon, S.-H. 2001. Removal of chromium from water and wastewater by ion exchange resins. *Journal of hazardous materials*, 87, 273-287.
- Ryu, J. ve Choi, W. 2007. Substrate-specific photocatalytic activities of TiO<sub>2</sub> and multiactivity test for water treatment application. *Environmental science & technology*, 42, 294-300.
- Selcuk, H. 2010. Disinfection and formation of disinfection by-products in a photoelectrocatalytic system. *Water Research*, 44, 3966-3972.
- Selcuk, H. ve Anderson, M. A. 2005. Effect of pH, charge separation and oxygen concentration in photoelectrocatalytic systems: active chlorine production and chlorate formation. *Desalination*, 176, 219-227.
- Selcuk, H. ve Bekbolet, M. 2008. Photocatalytic and photoelectrocatalytic humic acid removal and selectivity of TiO<sub>2</sub> coated photoanode. *Chemosphere*, 73, 854-858.
- Selcuk, H., Sene, J., Sarikaya, H., Bekbolet, M. ve Anderson, M. 2004a. An innovative photocatalytic technology in the treatment of river water containing humic substances. *Water Science and Technology*, 49, 153-158.
- Selcuk, H., Sene, J. J. ve Anderson, M. A. 2003. Photoelectrocatalytic humic acid degradation kinetics and effect of pH, applied potential and inorganic ions. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 78, 979-984.
- Selcuk, H., Sene, J. J., Zanoni, M. V. B., Sarikaya, H. Z. ve Anderson, M. A. 2004b. Behavior of bromide in the photoelectrocatalytic process and bromine generation using nanoporous titanium dioxide thin-film electrodes. *Chemosphere*, 54, 969-974.
- Selcuk, H., Zaltner, W., Sene, J., Bekbolet, M. ve Anderson, M. 2004c. Photocatalytic and photoelectrocatalytic performance of 1% Pt doped TiO<sub>2</sub> for the detoxification of water. *Journal of applied electrochemistry*, 34, 653-658.
- Sharan, P. ve Bandyopadhyay, S. 2017. Solar assisted multiple-effect evaporator. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2340-2351.
- Shephard, G. S., Stockenstrom, S., De Villiers, D., Engelbrecht, W. J. ve Wessels, G. F. S. 2002. Degradation of microcystin toxins in a falling film photocatalytic reactor with immobilized titanium dioxide catalyst. *Water Research*, 36, 140-146.
- Snoeyink, V. L. ve Jenkins, D. 1980. *Water chemistry*, New York, Wiley.



- Strathmann, H. 2004. *Ion-exchange membrane separation processes*, Amsterdam ; Boston, Elsevier.
- Strathmann, H. 2010. Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications. *Desalination*, 264, 268-288.
- Strathmann, H. 2016. *Ion-exchange membrane processes : their principle and practical applications*, Hopkinton 01748, MA, Balaban Desalination Publications.
- Sui, D. D., Yin, X. H., Dong, H. Z., Qin, S. Y., Chen, J. S. ve Jiang, W. L. 2012. Photocatalytically Reducing CO<sub>2</sub> to Methyl Formate in Methanol Over Ag Loaded SrTiO<sub>3</sub> Nanocrystal Catalysts. *Catalysis Letters*, 142, 1202-1210.
- Tanaka, K., Abe, K. ve Hisanaga, T. 1996. Photocatalytic water treatment on immobilized TiO<sub>2</sub> combined with ozonation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 101, 85-87.
- Tedesco, M., Cipollina, A., Tamburini, A., Micale, G., Helsen, J. ve Papapetrou, M. 2015. REAPower: use of desalination brine for power production through reverse electrodialysis. *Desalination and Water Treatment*, 53, 3161-3169.
- Thamilselvan, A., Nesaraj, A. S. ve Noel, M. 2016. Review on carbon-based electrode materials for application in capacitive deionization process. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13, 2961-2976.
- Tomkiewicz, M. 2000. Scaling properties in photocatalysis. *Catalysis Today*, 58, 115-123.
- Tongwen, X. 2002. Electrodialysis processes with bipolar membranes (EDBM) in environmental protection—a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 37, 1-22.
- Tufa, Ramato a., Curcio, E., Brauns, E., Van Baak, W., Fontananova, E. ve Di Profio, G. 2015. Membrane Distillation and Reverse Electrodialysis for Near-Zero Liquid Discharge and low energy seawater desalination. *Journal of Membrane Science*, 496, 325-333.
- Valero, D., García-García, V., Expósito, E., Aldaz, A. ve Montiel, V. 2015. Application of electrodialysis for the treatment of almond industry wastewater. *Journal of Membrane Science*, 476, 580-589.
- Vasilache, T., Lazar, I., Stamate, M., Nedeff, V. ve Lazar, G. 2013. Possible Environmental Risks of Photocatalysis used for Water and Air Depollution - Case of Phosgene Generation. *APCBEE Procedia*, 5, 181-185.
- Vorosmarty, C. J., Fekete, B. M., Meybeck, M. ve Lammers, R. B. 2000. Geomorphometric attributes of the global system of rivers at 30-minute spatial resolution. *Journal of Hydrology*, 237, 17-39.
- Waldner, G., Krýsa, J., Jirkovský, J. ve Grabner, G. 2003. Photoelectrochemical properties of sol-gel and particulate TiO<sub>2</sub> layers. *International Journal of Photoenergy*, 5, 115-122.
- Watanabe, T., Kitamura, A., Kojima, E., Hashimoto, K. ve Fujishima, A. 1999. Photocatalytic air treatment process under room light. Google Patents.
- Wei, K., Shen, C., Han, W., Li, J., Sun, X., Shen, J. ve Wang, L. 2017. Advance treatment of chemical industrial tailwater by integrated electrochemical technologies:

- Electrocatalysis, electro dialysis and electro-microfiltration. *Chemical Engineering Journal*, 310, 13-21.
- Wei, Y., Li, C., Wang, Y., Zhang, X., Li, Q. ve Xu, T. 2012. Regenerating sodium hydroxide from the spent caustic by bipolar membrane electro dialysis (BMED). *Separation and Purification Technology*, 86, 49-54.
- Wei, Y., Wang, Y., Zhang, X. ve Xu, T. 2013. Comparative study on regenerating sodium hydroxide from the spent caustic by bipolar membrane electro dialysis (BMED) and electro-electro dialysis (EED). *Separation and Purification Technology*, 118, 1-5.
- Wenderich, K. ve Mul, G. 2016. Methods, mechanism, and applications of photodeposition in photocatalysis: A review. *Chemical reviews*, 116, 14587-14619.
- Yan, H. Y., Wu, C. M. ve Wu, Y. H. 2015. Separation of alumina alkaline solution by electro dialysis: Membrane stack configuration optimization and repeated batch experiments. *Separation and Purification Technology*, 139, 78-87.
- Yao, J., Wen, D., Shen, J. ve Wang, J. 2016. Zero discharge process for dyeing wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 11, 98-103.
- Yeung, K. ve Lam, Y. 1983. A simple chemical vapour deposition method for depositing thin TiO<sub>2</sub> films. *Thin Solid Films*, 109, 169-178.
- Yuranova, T., Mosteo, R., Bandara, J., Laub, D. ve Kiwi, J. 2006. Self-cleaning cotton textiles surfaces modified by photoactive SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> coating. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 244, 160-167.
- Zanoni, M. V. B., Sene, J. J., Selcuk, H. ve Anderson, M. A. 2004. Photoelectrocatalytic production of active chlorine on nanocrystalline titanium dioxide thin-film electrodes. *Environmental science & technology*, 38, 3203-3208.
- Zhang, P., Tachikawa, T., Fujitsuka, M. ve Majima, T. 2016. In Situ Fluorine Doping of TiO<sub>2</sub> Superstructures for Efficient Visible-Light Driven Hydrogen Generation. *ChemSusChem*, 9, 617-623.
- Zhang, X., Li, C., Wang, Y., Luo, J. ve Xu, T. 2011. Recovery of acetic acid from simulated acetaldehyde wastewaters: Bipolar membrane electro dialysis processes and membrane selection. *Journal of Membrane Science*, 379, 184-190.
- Zhang, X., Zhang, T., Ng, J. ve Sun, D. D. 2009. High-Performance Multifunctional TiO<sub>2</sub> Nanowire Ultrafiltration Membrane with a Hierarchical Layer Structure for Water Treatment. *Advanced Functional Materials*, 19, 3731-3736.
- Zhang, Y., Sivakumar, M., Yang, S., Enever, K. ve Ramezani pour, M. 2018. Application of solar energy in water treatment processes: A review. *Desalination*, 428, 116-145.
- Zhong, L. S., Hu, J. S., Liang, H. P., Cao, A. M., Song, W. G. ve Wan, L. J. 2006. Self-Assembled 3D flowerlike iron oxide nanostructures and their application in water treatment. *Advanced Materials*, 18, 2426-2431.
- Zhou, Z., Wang, Z. ve Lin, L. 2012. *Microsystems and Nanotechnology*, Springer Berlin Heidelberg.

## ÖZGEÇMİŞ

| Kişisel Bilgiler |  |
|------------------|--|
| Adı Soyadı       | Muhammed İberia AYDIN  |
| Doğum Yeri       | Bolu   |
| Doğum Tarihi     | 24.06.1987   |
| Uyruğu           | <input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer: |
| Telefon          | 0555 599 00 36   |
| E-Posta Adresi   | iberiaaydin@gmail.com  |
| Web Adresi       | http://www.iberiaaydin.com   |



| Eğitim Bilgileri |                            |
|------------------|----------------------------|
| Lisans           |                            |
| Üniversite       | Yıldız Teknik Üniversitesi |
| Fakülte          | İnşaat Fakültesi           |
| Bölümü           | Çevre Mühendisliği Bölümü  |
| Mezuniyet Yılı   | 22.06.2010                 |

| Yüksek Lisans    |                                  |
|------------------|----------------------------------|
| Üniversite       | Yıldız Teknik Üniversitesi       |
| Enstitü Adı      | Fen Bilimleri Enstitüsü          |
| Anabilim Dalı    | Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı |
| Programı         | Çevre Mühendisliği Bölümü        |
| Mezuniyet Tarihi | 22.06.2012                       |

| Doktora          |                         |
|------------------|-------------------------|
| Üniversite       | İstanbul Üniversitesi   |
| Enstitü Adı      | Fen Bilimleri Enstitüsü |
| Anabilim Dalı    | Anabilim Dalı           |
| Programı         | Program Adı             |
| Mezuniyet Tarihi | 25.12.2017              |

| Makale ve Bildiriler   |  |
|--|--|
| <b>SCI Kapsamında Yayınlanan Makaleler</b>   |  |
| Doganli G., Yüzer B., Aydın M.İ., Gultekin T., Con A.H., Selçuk H., et al., "Functionalization of cotton fabric with nanosized TiO <sub>2</sub> coating for self-cleaning and antibacterial property enhancement", <i>Journal Of Coatings Technology And Research</i> , vol.13, pp.257-265, 2016 |  |
| Yüzer B., Guida M. , Ciner F., Aktan B., Aydın M.İ., Meriç S., et al., "A multifaceted aggregation and toxicity assessment study of sol-gel-based TiO <sub>2</sub>   |  |

nanoparticles during textile wastewater treatment", *Desalination And Water Treatment*, vol.0, pp.1-8, 2015

Yüzer B., Aydın M.İ., Selçuk H., Bulut F.B., Bekbölet M., Pak S., Palamutcu S., Emer Ü., "Reuse Of The Treated Textile Wastewater And Membrane Brine In The Wet Textile Processes: Distorting Effects On The Cotton Fabric", *Desalination And Water Treatment*, vol.1, pp.1-13, 2014(Link)

Ormancı T., Türkoğlu Demirkol G., Aydın M.İ., Tüfekçi N., "An Experimental Study On Manganese(Ii) Removal With Manganese Dioxide Recycling", *Desalination And Water Treatment*, vol.51, pp.2223-2230, 2013

### **Uluslararası Sempozyumlarda Sunulan Bildiriler**

Aydın M.İ., Köse İmer D., Türkoğlu Demirkol G., Temelli Çoban T.Y., Tüfekçi N., "Influence Of Ageing On The Catalytic Activity Of Mno<sub>2</sub> Sludge For Oxidation Of Mn(Ii)", *1st International Conference on Desalination and Environment: A Water Summit*, Birleşik Arap Emirlikleri, 29 Ekim-1 Kasım 2011

Ormancı T., Türkoğlu Demirkol G., Aydın M.İ., Temelli Çoban T.Y., Tüfekçi N., "The Effect Of Manganese Dioxide On The Oxygenation Of Manganous Ions And On The Aeration Tank Volume", *1st International Conference on Desalination and Environment: A Water Summit*, Kanada, 29 Ekim-1 Kasım 2011

Emrah E.T., Yüzer B., Aydın M.İ., Ökten H.E., Selçuk H., "Recovery of Biologically Treated Textile Wastewater by Ozonation and Subsequent Electrodialysis Membrane Desalination System ", *5th European Conference on Environmental Applications of Advanced Oxidation Processes*, Prag, Çek Cumhuriyeti, 25-29 Haziran 2017, pp.1-1

Öktem Y.A., Yüzer B., Aydın M.İ., Ökten H.E., Meriç S., Selçuk H., "Tackling Toxicity in Ozonated Textile Wastewater for Enhanced Biological Treatment", *5th European Conference on Environmental Applications of Advanced Oxidation Processes*, Prag, Çek Cumhuriyeti, 25-29 Haziran 2017, pp.1-1

Aydın M.İ., Yüzer B., Yıldız H., Erdem B., Selçuk H., "Pilot scale Application of Ion Exchange and Nanofiltration Membrane Processes for Zero Waste Approach in Aluminum Industry", *3rd International Conference on Recycling and Reuse*, İstanbul, Türkiye, 28-30 Eylül 2016, pp.178-178

Yüzer B., Aydın M.İ., Meriç S., Selçuk H., "Color Removal and Detoxification of Textile Wastewater by Using Polymer Based Coagulation and Ozonation Processes", *3rd International Conference on Recycling and Reuse*, İstanbul, Türkiye, 28-30 Eylül 2016, pp.180-180

Yüzer B., Aydın M.İ., Selçuk H., "Investigation Design and Cost Analysis of Efficient Reverse Osmosis System RO for the Marmara Sea Water", *3rd International*

*Conference on Recycling and Reuse*, İstanbul, Türkiye, 28-30 Eylül 2016, pp.312-312

Aydin M.İ., Yüzer B., Selçuk H., "Copper Doping on TiO<sub>2</sub> Nanoparticles for Development of Self Cleaning and Anti Bacterial Cotton Fabric", *Smart and Green Interfaces 2016*, Atina, Yunanistan, 28-30 Eylül 2016, pp.80-81 (Link)

Aydin M.İ., Yüzer B., Yurdakul B., Öngen A., Selçuk H., "Color Removal From Biologically Treated Textile Wastewater And Cost Analysis", *4th European Conference on Environmental Applications of Advanced Oxidation Processes*, Atina, Yunanistan, 21-24 Ekim 2015, pp.1-1

Aydin M.İ., Yüzer B., Öngen A., Yıldız H., Bekbölet M., Selçuk H., "Acid Recovery From Aluminium Anodizing Process Via Ion Change Resin", *2nd International Conference On Recycling And Reuse*, İstanbul, Türkiye, 4-6 Haziran 2014, pp.319-319

Yüzer B., Yurdakul B., Aydin M.İ., Öngen A., Selçuk H., "Application Of Nanofiltration Membrane Process For Recovery And Reuse Of Salt In The Segregated Reactive Dyeing Wastewater", *2nd International Conference on Recycling and Reuse*, İstanbul, Türkiye, 4-6 Haziran 2014, vol.1, no.1, pp.185-186

Yüzer B., Kursuncu I., Aydin M.İ., Selçuk H., "Caustic Recovery In Textile Industry By Using Nanofiltration And Evaporation Processes", *2nd International Conference On Recycling And Reuse*, İstanbul, Türkiye, 4-6 Haziran 2014, pp.317-317

Aydin M.İ., Yaman F.B., Elcik H., Karadağ D., Çakmaccı M., Özkaya B., "Biochemical Methane Potential Of Membrane Concentrates: A Case Study Of Textile Wastewaters", *International Conference on Recycling and Reuse, R&R 2012*, İstanbul, Türkiye, 1-4 Haziran 2012, vol.1, pp.55-55