

Tekstil Boyar Maddesinin Sulu Çözeltilerinden Elektrokimyasal Yöntemler İle Giderimi

Duygu Yamaç

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat 2016

Electrochemical Methods Of Textile Dyes From Aqueous Solutions With Removal  
Duygu Yamaç

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Chemical Engineering

February 2016

Tekstil Boyar Maddesinin Sulu Çözeltilerinden Elektrokimyasal Yöntemler İle Giderimi

Duygu Yamaç

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimyasal Teknolojiler Bilim Dalı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç.Dr. Belgin Karabacakoğlu

Şubat 2016

## ONAY

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Duygu YAMAÇ'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Tekstil Boyar Maddesinin Sulu Çözeltilerinden Elektrokimyasal Yöntemler İle Giderimi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Belgin KARABACAKOĞLU

**İkinci Danışman** : ----

### **Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

Üye : Doç. Dr. Belgin KARABACAKOĞLU

Üye : Doç. Dr. Fatma TÜRMEK

Üye : Doç. Dr. İlker KIPÇAK

Üye : Doç. Dr. İlknur DEMİRAL

Üye : Prof. Dr. Ümran TEZCAN ÜN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŐAHAN  
Enstitü Müdürü



## ÖZET

Bu çalışmada bir azo boya olan Deep Red içeren model atıksuyun arıtımı için mikroeletroliz, elektrokoagülasyon ve elektro-Fenton yöntemleri kullanıldı. Mikroeletroliz deneylerinde boya giderimi üzerinde dolgu maddesi, çözelti derişimi, pH, elektriksel iletkenlik ve besleme hızının etkileri incelenmiştir. Mikroeletroliz için en yüksek giderim olan %99,5 değerine toz demir talaşı-aktif karbon dolgu maddesi ile, 150 mg/L çözelti derişiminde, pH değeri 3, elektriksel iletkenlik 3 mS/cm ve besleme hızı 9,1 mL/s ile ulaşılmıştır. Elektrokoagülasyon deneylerinde pH, akım yoğunluğu, destek elektrolit derişimi ve gerilimin boya giderimine ve enerji tüketimine olan etkileri incelenmiştir. Buna göre en yüksek boya giderimine (%99) pH 2, 25 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu, 0,15625 g Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ilavesi ve 7,5 V gerilim değerinde ulaşılmıştır. Elektro-Fenton prosesi için yapılan deneylerde ise yine pH, akım yoğunluğu, destek elektrolit ilavesi ve gerilim değerinin boya giderimine ve enerji tüketimine olan etkileri incelenmiştir. %99 luk boya giderimi için optimum pH değeri 2, akım yoğunluğu 25 A/m<sup>2</sup>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ilavesi 0,15625 g ve gerilim değeri olarak 10 V bulunmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Mikroeletroliz, elektrokoagülasyon, elektro-Fenton, aktif karbon, Deep Red, adsorpsiyon.

## SUMMARY

In this study, micro-electrolysis, electrocoagulations and electro-Fenton techniques were investigated for the treatment of model wastewater which contains Deep Red azo dye. In microelectrolysis experiments, the effects of fillings material, electrical conductivity, initial dye concentration, pH on the removal efficiency of dye were studied. The 99.5% value of the highest removals for micro-electrolysis with powder iron filings-active carbon filler, 150 mg / L solution concentration, pH 3, the electrical conductivity of 3 mS / cm and feed rate of 9.1 mL/ s was reached . In electrocoagulation experiments; the effects of pH, current density, electrolyte concentration and voltage for the dye removal and the effect on energy consumption was examined. The highest dye removal (99%) was achieved at pH 2, 25 A / m<sup>2</sup> current density, the addition of 0.15625 g Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and 7.5 V. In experiments conducted for the electro-Fenton process; the effects of pH, current density, voltage the addition of supporting electrolyte on the removal of dyes and energy consumption were examined. The maximum dye removal of 99% was found at the pH of dyes 2, current density of 25 A / m<sup>2</sup>, applied voltage of 10 V and addition of 0.15625 g Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

**Key Words:** Microelectrolysis, electrocoagulations, electro-Fenton, active carbon, Deep Red, adsorption.

## TEŞEKKÜR

Bu tezin gerekleŐmesinde her zaman yanımda olan deneyimlerini benimle paylaŐan ve desteğini hi eksik etmeyen değerli hocam sayın Do. Dr. Belgin KARABACA KOğLU' na ve sadece tez çalıŐmam sÜrecinde değil her zaman yanımda olan, maddi manevi beni her anlamda destekleyen canım annem Semiha ÖğÜRLÜ YAMAÇ'a en içten teŐekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| <b>ÖZET</b> .....   | vi           |
| <b>SUMMARY</b> .....  | vii          |
| <b>TEŞEKKÜR</b> .....   | viii         |
| <b>İÇİNDEKİLER</b> .....  | ix           |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....  | xiii         |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....                                      | xv           |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....                         | xx           |
| <b>1.GİRİŞ</b> .....  | 1            |
| <b>2.BOYAR MADDELER</b> .....                                       | 4            |
| 2.1. Boyar Maddelerin Sınıflandırılması.....                        | 4            |
| 2.2. Boyar Maddelerin Çevre ve İnsan Sağlığına Etkileri.....        | 4            |
| 2.3. Boyar Madde Arıtım Yöntemleri.....                             | 6            |
| 2.3.1. Fiziksel yöntemler.....                                      | 6            |
| 2.3.1.1. <u>Adsorpsiyon ve aktif karbon</u> .....                   | 6            |
| 2.3.1.2. <u>Membran filtrasyonu</u> .....                           | 7            |
| 2.3.1.3. <u>İyon değişimi</u> .....                                 | 7            |
| 2.3.2. Kimyasal yöntemler.....                                      | 8            |
| 2.3.2.1. <u>Oksidatif yöntemler</u> .....                           | 8            |
| 2.3.2.2. <u>Kimyasal flokleştirme ve çöktürme</u> .....             | 9            |
| 2.3.3. Biyolojik arıtım.....  | 9            |
| 2.3.3.1. <u>Anaerobik arıtım</u> .....                              | 9            |
| 2.3.3.2. <u>Aerobik Arıtım</u> .....                                | 10           |
| <b>3. ELEKTROKİMYASAL ARITMA</b> .....                              | 11           |
| 3.1. Mikroelektroliz.....   | 11           |
| 3.1.1. Mikroelektrolizin mekanizması.....                           | 11           |
| 3.1.2. Mikroelektroliz yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar..... | 13           |

## İÇİNDEKİLER (devam)

### Sayfa

|  |           |
|--|-----------|
| 3.2. Elektrokoagülasyon Prosesi.....   | 15        |
| 3.2.1. Elektrokoagülasyon sırasında gerçekleşen reaksiyonlar.....                  | 16        |
| 3.2.2. Elektrokoagülasyon prosesinin avantajları ve dezavantajları.....            | 18        |
| 3.2.3. Elektrokoagülasyon prosesi ile yapılan çalışmalar.....                      | 19        |
| 3.3. Elektro-Fenton Prosesi.....   | 22        |
| 3.3.1. Elektro-Fenton sırasında gerçekleşen reaksiyonlar.....                      | 22        |
| 3.3.2. Elektro-Fenton prosesinin avantaj ve dezavantajları.....                    | 24        |
| 3.3.3. Elektro-Fenton prosesi ile yapılan çalışmalar.....                          | 25        |
| <b>4. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>  | <b>27</b> |
| 4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Boyar Madde.....                             | 27        |
| 4.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Çözeltinin Hazırlanması ve Boya Analizi..... | 28        |
| 4.3. Mikroelektroliz Deney Düzeneği.....   | 28        |
| 4.3.1. Mikroelektroliz deneylerinin yapılışı.....                                  | 30        |
| 4.3.1.1. <u>Granül aktif karbonun boyayı adsorplama kapasitesi</u> .....           | 30        |
| 4.3.1.2. <u>Dolgu maddesi</u> .....  | 30        |
| 4.3.1.3. <u>Çözelti derişimi</u> .....   | 31        |
| 4.3.1.4. <u>pH</u> .....   | 32        |
| 4.3.1.5. <u>Elektriksel iletkenlik</u> .....                                       | 32        |
| 4.3.1.6. <u>Besleme hızı</u> .....   | 32        |
| 4.4. Elektrokoagülasyon Deney Düzeneği.....  | 33        |
| 4.4.1. Elektrokoagülasyon deneylerinin yapılışı.....                               | 33        |
| 4.4.2. Elektrokoagülasyon prosesinin verimini etkileyen parametreler.....          | 34        |
| 4.4.2.1. <u>Elektrot tipi</u> .....  | 34        |
| 4.4.2.2. <u>pH</u> .....   | 34        |
| 4.4.2.3. <u>Elektriksel iletkenlik</u> .....                                       | 35        |
| 4.4.2.4. <u>Gerilim değeri optimizasyonu</u> .....                                 | 35        |

## İÇİNDEKİLER (devam)

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 4.4.2.5. <u>Konsantrasyon optimizasyonu</u> .....                                    | 35           |
| 4.5. Elektro-Fenton Deney Düzenegi.....  | 35           |
| 4.5.1. Elektro-Fenton deneyinin yapılışı.....  | 36           |
| 4.5.2. Elektro-Fenton prosesinin verimini etkileyen parametreler.....                | 37           |
| 4.5.2.1. <u>Arıtma süresi</u> .....  | 37           |
| 4.5.2.2. <u>pH</u> .....   | 37           |
| 4.5.2.3. <u>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dozu optimizasyonu</u> .....                  | 37           |
| 4.5.2.4. <u>Gerilim değeri optimizasyonu</u> .....                                   | 37           |
| <b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....   | <b>38</b>    |
| 5.1. Adsorpsiyon Deneylerinin Sonuçları.....   | 38           |
| 5.2. Mikroelektroliz Deneylerinin Sonuçları.....                                     | 43           |
| 5.2.1. Boya derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları.....                   | 43           |
| 5.2.2. pH etkisinin incelendiği deney sonuçları.....                                 | 47           |
| 5.2.3. Elektriksel iletkenliğin etkisinin incelendiği deney sonuçları.....           | 53           |
| 5.2.4. Besleme hızının etkisinin incelendiği deney sonuçları.....                    | 55           |
| 5.3. Elektrokoagölasyon İle Yapılan Deney Sonuçları.....                             | 57           |
| 5.3.1. Elektrot tipinin etkisinin incelendiği deney sonuçları.....                   | 57           |
| 5.3.2. pH etkisinin incelendiği deney sonuçları.....                                 | 59           |
| 5.3.3. Elektriksel iletken seçimi etkisinin incelendiği deney sonuçları.....         | 62           |
| 5.3.4. Gerilim etkisinin incelendiği deney sonuçları.....                            | 64           |
| 5.3.5. Elektriksel iletkenlik miktarının etkisinin incelendiği deney sonuçları.....  | 66           |
| 5.3.6. Başlangıç konsantrasyon miktarının etkisinin incelendiği deney sonuçları..... | 69           |
| 5.3.7. Elektrotlar arası mesafenin etkisinin incelendiği deney sonuçları.....        | 70           |
| 5.4. Elektro-Fenton Prosesi İle Yapılan Deney Sonuçları.....                         | 72           |
| 5.4.1. pH etkisinin incelendiği deney sonuçları.....                                 | 72           |
| 5.4.2. Gerilim etkisinin incelendiği deney sonuçları.....                            | 75           |

**İÇİNDEKİLER (devam)**

|   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| 5.4.3. Başlangıç H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> dozunun etkisinin incelendiği deney sonuçları..... | 76                  |
| <b>6.SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>   | <b>79</b>           |
| <b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>  | <b>81</b>           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Şekil</u>  | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 2.1. Boyarmaddelerin sınıflandırılması.....   | 5            |
| 3.1. Şematik ECreaktörü.....  | 16           |
| 3.2. Elektrokoagülasyon prosesi çalışma mekanizması.....  | 17           |
| 3.3. Elektro-Fenton yöntemiyle OH radikallerinin üretim şeması.....   | 24           |
| 4.1. Deep Red'in kimyasal yapısı.....   | 27           |
| 4.2. Kalibrasyon için 10-60 mg/L derişim aralığında hazırlanan çözeltiler .....   | 28           |
| 4.3. Mikroelektroliz yöntemi ile Deep Red giderimi deney düzeneği .....   | 29           |
| 4.4. Dolgu maddesi olarak kullanılan spiral ve toz demir talaşı.....  | 31           |
| 4.5. Dolgu maddesi aktif karbon ve toz demir talaşı olan reaktörde farklı<br>boya derişimlerinde renk giderimi .....  | 32           |
| 4.6. EC deney düzeneği.....   | 33           |
| 4.7. Arıtım sonrası elektrotların durumu.....   | 34           |
| 4.8. EF deney düzeneği.....   | 36           |
| 5.1. Adsorpsiyonla % boya gideriminin zamanla değişimi( Co: 100 mg/L, V: 200 ml, m: 1 g<br>AC, pH:3).....   | 39           |
| 5.2. Kesikli geri dolaşımli adsorpsiyonla % boya gideriminin zamanla değişimi (Akış Hızı:<br>11,4 mL/s, V:250 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Aktif Karbon).....   | 42           |
| 5.3. Farklı derişim değerleri için zamana karşı % giderim değerleri(Akış Hızı: 11,4 mL/s, V:<br>250 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon).....  | 45           |
| 5.4. Farklı derişim değerleri için zamana karşı % giderim değerleri (Akış Hızı: 11,4 mL/s, V:<br>200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon.....  | 46           |
| 5.5. Farklı pH değerleri için zamana karşı % giderim değerleri(Akış Hızı: 11,4 mL/s, Co: 100<br>mg/L, V: 200 mL, m: 15 mL Demir ve Aktif Karbon, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı<br>Aktif Karbon)..... | 50           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

| <u>Şekil</u>  | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 5.6. Farklı pH değerleri için % giderim değerleri (Akış Hızı: 11,4 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL Dolgu Maddesi Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon).....  | 53           |
| 5.7. Farklı elektriksel iletkenlik değerleri için zamana karşı % giderim değerleri (Akış Hızı:11,4 mL/s, Co: 100 mg/L,V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon)..... | 55           |
| 5.8. Farklı besleme hızı değerleri için zamana karşı % giderim değerleri(Co: 100 mg/L, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon).....                                | 57           |
| 5.9. Farklı 2 tip elektrot değerleri için zamana karşı % giderim değerleri (Co: 100 mg/L, v: 250 mL,pH:2, V: 5 volt).....   | 58           |
| 5.10. Farklı pH değerleri için zamana karşı % giderim değerleri.....  | 61           |
| 5.11. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ve NaCl tuzlarının % giderim değerlerinin karşılaştırılması (Co:100 mg/L, V: 250 mL, pH :2,V:5 Volt) .....  | 63           |
| 5.12. 100 mg/L boya çözeltilisinin farklı gerilim değerleri için % giderimlerinin karşılaştırılması.....  | 66           |
| 5.13. Farklı Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> değerleri için % giderimlerinin karşılaştırılması .....  | 69           |
| 5.14. Boya çözeltilisinin farklı konsantrasyon değerleri için % giderimlerinin karşılaştırılması.....   | 70           |
| 5.15. Farklı elektrot mesafe değerleri için % giderimlerinin karşılaştırılması.....   | 72           |
| 5.16. Farklı pH değerleri için zamana karşı % giderim değerleri.....  | 74           |
| 5.17. Farklı gerilim değerleri için zamana karşı % giderim değerleri.....   | 76           |
| 5.18 Farklı başlangıç H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> derişim değerleri için zamana karşı % giderim değerleri.....  | 77           |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>Cizelge</u>  | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 3.1. Elektrokoagülasyon prosesinin avantaj ve dezavantajları.....   | 18           |
| 3.2. Elektro-Fenton prosesinin avantaj ve dezavantajları.....   | 24           |
| 4.1. Deep Red boyarmaddesinin özellikleri.....  | 28           |
| 5.1. Kesikli adsorpsiyon deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 200 ml, m: 1 g AC, pH: 3).....  | 39           |
| 5.2. 50 mg/L boya çözeltisi ile yapılan kesikli geri dolaşımli adsorpsiyon deneyleri(Akış Hızı:11,5 mL/s, V: 250 mL, pH: 3, Dolgu Maddesi: Aktif Karbon).....                                       | 40           |
| 5.3.100 mg/L boya çözeltisi ile yapılan kesikli geri dolaşımli adsorpsiyon deneyleri(Akış Hızı:11,5 mL/s, V: 250 mL, pH: 3, Dolgu Maddesi: Aktif Karbon).....                                       | 41           |
| 5.4. 200 mg/L boya çözeltisi ile yapılan kesikli geri dolaşımli adsorpsiyon deneyleri(Akış Hızı:11,5 mL/s, V: 250 mL, pH: 3, Dolgu Maddesi: Aktif Karbon).....                                      | 42           |
| 5.5. 100 mg/L boya derişimi ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları(Akış Hızı: 10,8 mL/s,V: 250 mL, pH: 3, m: 15 mL Demir ve Aktif Karbon, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon)..... | 44           |
| 5.6. 200 mg/L boya derişimi ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları(Akış Hızı: 10,8 mL/s,V: 250 mL, pH: 3, m: 15 mL Demir ve Aktif Karbon, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon)..... | 44           |
| 5.7. 50 mg/L boya derişiminde % giderim değerleri(Akış Hızı: 10,9 mL/s, V: 200 mL, pH 3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon).....   | 45           |
| 5.8. 100 mg/L boya derişiminde % giderim değerleri(Akış Hızı: 10,7 mL/s, V: 200 mL, pH 3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon).....  | 45           |
| 5.9. 150 mg/L boya derişiminde % giderim değerleri(Akış Hızı: 10,1 mL/s, V: 200 mL, pH 3,Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon).....   | 46           |
| 5.10. 200 mg/L boya derişiminde % giderim değerleri(Akış Hızı: 10,8 mL/s, V: 200 mL, pH 3,Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon).....  | 46           |
| 5.11. pH:1 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı:11,5 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon).....  | 47           |
| 5.12. pH:2 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı:11,2 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon).....  | 48           |

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

| <u>Çizelge</u>   | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 5.13. pH:3 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları(Akış Hızı:11,2 mL/s, Co: 100 mg/L<br>V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon) .....         | 48           |
| 5.14. pH:4 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı:11,5 mL/s, Co: 100 mg/L<br>V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon).....         | 49           |
| 5.15. pH: 5 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları(Akış Hızı:11,5 mL/s, Co: 100 mg/L<br>V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon).....         | 49           |
| 5.16. pH:6,35 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı:11,5 mL/s,<br>Co:100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon).....      | 50           |
| 5.17. pH:1 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı :10,2 mL/s,<br>Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi:Toz Demir Talaşı- Aktif Karbon).....          | 51           |
| 5.18. pH:2 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı : 10,3 mL/s,<br>Co: 100 mg/L V: 200 mL, Dolgu Maddesi:Toz Demir Talaşı- Aktif Karbon).....          | 51           |
| 5.19. pH:3 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı : 10,3 mL/s,<br>Co: 100 mg/L V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı- Aktif Karbon).....         | 51           |
| 5.20. pH:4 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı : 10,3 mL/s,<br>Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı- Aktif Karbon).....        | 52           |
| 5.21. pH:5 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı : 10,2 mL/s,<br>Co:100 mg/L, V:200 mL, Dolgu Maddesi:Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon).....            | 52           |
| 5.22. pH:6,35 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı : 10,2 mL/s,<br>Co:100 mg/L, V:200 mL, Dolgu Maddesi:Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon).....         | 52           |
| 5.23. 3 mS/cm elektriksel iletkenlik için deney sonuçları (Akış Hızı :10,9 mL/s,<br>Co: 100 mg/L V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi:Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon).....  | 53           |
| 5.24. 6 mS/cm elektriksel iletkenlik için deney sonuçları (Akış Hızı :10,9 mL/s,<br>Co: 100 mg/L V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi:Toz Demir Talaşı- Aktif Karbon)..... | 54           |



## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

| <u>Cizelge</u>  | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 5.25. 8 mS/cm elektriksel iletkenlik için deney sonuçları (Akış Hızı :10,3 mL/s,<br>Co: 100 mg/L, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-<br>Aktif Karbon)..... | 54           |
| 5.26. 11 mS/cm elektriksel iletkenlik için deney sonuçları (Akış Hızı :10,3 mL/s,<br>Co:100 mg/L, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-<br>Aktif Karbon)..... | 54           |
| 5.27. 33,1 mL/s besleme hızındaki deney sonuçları(Co:100 mg/L,V:200mL, pH:3,<br>Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon).....  | 55           |
| 5.28. 14,5 mL/s besleme hızındaki deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 200 mL, pH:3,<br>Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı Aktif Karbon).....                                    | 56           |
| 5.29. 11,4 mL/s besleme hızındaki deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 200 mL, pH:3,<br>Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon).....                                    | 56           |
| 5.30. 9,1 mL/s besleme hızındaki deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 200 mL, pH:3,<br>Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı Aktif Karbon).....                                    | 56           |
| 5.31. Elektrot tiplerine göre % giderim değerleri(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2,<br>V=5 Volt).....   | 58           |
| 5.32. pH:2 'de EC deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:5 Volt, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,625 g,<br>Alüminyum kaybı:0,1138g ).....                         | 59           |
| 5.33. pH:3 'de EC deney sonuçları(Co:100 mg/L, V: 250 mL, V:5 Volt , Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,625 g,<br>Alüminyum kaybı:0,1132 g).....                           | 59           |
| 5.34. pH:4 'de EC deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:5 Volt Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,625 g,<br>Alüminyum kaybı:0,1071g ).....                         | 60           |
| 5.35. pH:5 'de EC deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:5 Volt, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :0,625 g<br>Alüminyum kaybı:0,1220g).....                            | 60           |
| 5.36. pH:6,35 'de EC deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:5 Volt , Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,625 g<br>Alüminyum kaybı:0,1821 g).....                      | 61           |

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

| <u>Cizelge</u>  | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 5.37. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> tuzu kullanılarak yapılan deney sonuçları(Co:100 mg/L, V: 250 mL, pH :2,V:5 Volt, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,625 g, Alüminyum kaybı:0,1821 g)..... | 62           |
| 5.38. NaCl tuzu kullanılarak yapılan deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2,V:5 Volt , NaCl: 0,625 g Alüminyum kaybı:0,1025 g).....  | 63           |
| 5.39. 5 V gerilimde yapılan deney sonuçları (Co: 100 mg/L,V: 250 mL, pH :2, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,625 g, Alüminyum kaybı:0,1138 g).....   | 64           |
| 5.40. 7,5 V gerilimde yapılan deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,625 g, Alüminyum kaybı:0,1988g).....   | 64           |
| 5.41. 10 V gerilimde yapılan deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,625 g,Alüminyum kaybı:0,3331 g).....  | 65           |
| 5.42. 12,5 V gerilimde yapılan deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,625 g , Alüminyum kaybı:0,3339 g).....   | 65           |
| 5.43. 0,15625 g Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ile yapılan deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2 Gerilim: 7,5 V, Alüminyum kaybı:0,3404 g).....   | 65           |
| 5.44. 0,3125 g Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ile yapılan deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2 Gerilim: 7,5 V, Alüminyum kaybı:0,2714 g).....   | 67           |
| 5.45. 0,625 g Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ile yapılan deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2 , Gerilim :7,5 V, Alüminyum Kaybı:0,2325 g).....   | 68           |
| 5.46. 1,25 g Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ile yapılan deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, Gerilim: 7,5 V pH :2, Alüminyum kaybı:0,1873 g).....  | 68           |
| 5.47. Farklı boya konsantrasyonları için % giderim değerleri (V: 250 mL, Gerilim: 7,5 V, pH :2, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :0,15625 g).....  | 69           |
| 5.48. Elektrotlar arası mesafenin 1 cm olduğu deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V:250 mL, pH :2, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :0,625 g Alüminyum kaybı:0,1356 g ).....                             | 70           |
| 5.49. Elektrotlar arası mesafenin 1,5 cm olduğu deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,625 g Alüminyum kaybı:0,12 g ).....                          | 71           |

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

| <u>Cizelge</u>   | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 5.50. Elektrotlar arası mesafenin 2 cm olduğu deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V:250 mL, pH :2, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,625 g Alüminyum kaybı:0,1192 g ).....                  | 71           |
| 5.51. pH:2 için EF deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:10 Volt, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,1563 g, Anot kaybı:0,502 g).....   | 73           |
| 5.52. pH:3 için EF deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:10 Volt, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,1563 g, Anot kaybı:0,492 g ).....  | 73           |
| 5.53. pH:4 için EF deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:10 Volt, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,1563 g, Anot kaybı:0,357 g).....   | 73           |
| 5.54. pH:5 için EF deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:10 Volt, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,1563 g, Anot kaybı:0,332g).....  | 73           |
| 5.55. 5 V için EF deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,1563 g, Anot kaybı:0,168 g ).....   | 75           |
| 5.56. 7,5 V için EF deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,1563 g, Anot kaybı:0,196 g ).....  | 75           |
| 5.57. 10 V için EF deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,1563 g, Anot kaybı: 0,277g ).....   | 75           |
| 5.58. 12,5 V için EF deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,1563 g, Anot kaybı: 0,367g ).....   | 75           |
| 5.59. 50 mM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> derişiminde elde edilen deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,1563 g , Anot kaybı:0,473g )..... | 76           |
| 5.60. 75 mM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> derişiminde elde edilen deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,1563 g ,Anot kaybı:0,380g).....    | 77           |
| 5.61. 100 mM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> derişiminde elde edilen deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0,1563 g ,Anot kaybı:0,363 g)..... | 77           |

**SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ**

| <b>Simgeler</b>    | <b>Açıklama</b>                                 |
|--------------------|---|
| C <sub>0</sub>     | Çözünenin çözeltideki başlangıç derişimi (mg/L) |
| C                  | Çözünenin t anındaki derişimi (mg/L)            |
| <b>Kisaltmalar</b> | <b>Açıklama</b>                                 |
| AC                 | Aktif karbon                                    |
| dk                 | Dakika  |
| EC                 | Elektrokoagülasyon                              |
| EF                 | Elektro-Fenton                                  |
| g                  | Gram  |
| GAC                | Granül aktif karbon                             |
| KOİ                | Kimyasal oksijen ihtiyacı                       |
| M                  | Molar   |
| mg                 | Miligram  |
| mL                 | Mililitre                                       |
| mS                 | Milisiemens                                     |
| ME                 | Mikroelektroliz                                 |
| ppm                | Milyonda bir                                    |
| RB5                | Reaktive black 5                                |
| s                  | Saniye  |
| UV                 | Ultraviyole                                     |

## 1. GİRİŞ

Tekstil endüstrisi su tüketiminin ve dolayısıyla atıksu üretiminin fazla olduğu endüstrilerden biridir. Bu atıksuların kirlilik kaynaklarından birisi kullanılan boyarmaddelerdir. Tekstil sektöründe asidik, bazik, reaktif ve pigment gibi değişik türden pekçok boyar madde kullanılmaktadır. Pamuklu kumaşlar için iyi yapışma özellikleri nedeniyle reaktif boyalar tercih edilir ve bu tür boyaların başlangıçtaki miktarının yaklaşık %60'ının boyama sırasında hidroliz yan tepkimeleri nedeniyle atıksuya geçtiği bilinmektedir (Pazos vd., 2011). Özellikle azo yapıdaki reaktif boyalar çevresel açıdan ciddi problem oluşturmaktadır. Bu nedenle boyar madde içeren tekstil endüstrisi atıksularından renk giderim prosesleri ekolojik açıdan önem kazanmaktadır.

Atıksulardan renk giderimi için fiziksel ve kimyasal metodlarla birlikte biyolojik arıtma sistemleri kullanılabilir. Boyar madde içeren atıksuların biyolojik arıtımı atıksulardaki organik kirliticileri gidermede yaygın olarak kullanılmasına rağmen bu metotlar toksik ve biyolojik olarak parçalanamayan organik maddeleri içeren endüstriyel atıksuların arıtımı için yeterli olmayabilir ve düşük reaksiyon hızı ve düşük verimden dolayı çok fazla tercih edilmez. Bu nedenle biyolojik proseslere göre fiziksel ve kimyasal metotlar daha çok kullanılmaktadır. Flokülasyon ve aktif karbon adsorpsiyonunda ise sırasıyla fazla miktarda çamur oluşumu ve adsorbanın belirli bir süre sonunda rejenere edilmesi gereği bu metotların temel sakıncalarındandır (Hanay ve Hasar, 2007).

Son yıllarda renk giderimi ve boya moleküllerinin yükseltgenmesinde elektrokimyasal yöntemler dikkat çekmektedir. Reaktif azo boyaların arıtımında elektrokimyasal yükseltgeme (Yavuz ve Shahbazi, 2012), elektrokoagülasyon (Şengil ve Özacar, 2009) ve elektrofenton (Kuşvuran vd., 2005) gibi elektrokimyasal yöntemler önemli bir yere sahiptir. Ancak elektrik enerjisi ihtiyacı bu yöntemlerin büyük ölçekte uygulanmasını kısıtlamaktadır.

Mikroelektroliz (ME) yöntemi dışarıdan bir güç kaynağına ihtiyaç duymayan bir elektrokimyasal yöntemdir. Mikroelektroliz ile kirliticilerin giderim mekanizmasında

elektrokoagülasyon, elektroforez ve redoks tepkimeleri gibi birden fazla olay etkilidir (Cheng vd., 2007). Ancak dış elektrik kaynağı olmaması nedeniyle bu yöntemdeki tepkimeler elektrolize göre oldukça yavaştır. Mikroelektrolizde başlıca hammadde olarak mekanik işlem hurdalarından geri dönüşüme uygun olanları kullanılır (Chen vd., 2014). ME genellikle demir talaşı ve granül aktif karbon ile doldurulmuş bir kolonda uygulanır. Bu malzemeler belirli oranda karıştırıldığında ve uygun pH'da bir çözelti veya atıksu kolondan geçirildiğinde çok sayıda makroskopik galvanik hücre oluşur (Fan vd., 2009). Elektron akışı dış güç kaynağı yerine bu galvanik hücreler tarafından oluşturulur. Demir talaşı hücrenin anodu, aktif karbon ise katodu olarak davranır.

Mikroelektroliz yüksek kimyasal kararlılığı ve düşük biyobozunurluğu nedeniyle geleneksel yöntemlerle arıtılamayan organik kirleticiler için düşük maliyetli ve çevre dostu bir işlemdir (Guo vd., 2013). Ayrıca arıtım sonucunda ikincil kirletici oluşturmaması da önemli avantajlarından biridir. Bu yöntem tekstil fabrikası atık suyu (Yang, 2009), metal kompleksi (Lan vd., 2012) ve organik madde içeren atıksular (Lai vd., 2013), petrol rafinesi atık suyu arıtımında (Qin ve Gong , 2013), ve yaygın olarak çeşitli atık sularda, çöp sahası sızıntı suyunda, koklaştırma (Luo vd., 2014) gibi farklı özelliklere atıksuların arıtımı için tek başına ya da diğer yöntemlerle birlikte kullanılmaktadır.

Elektrokoagülasyon, çok küçük kolloidal tanecikleri uzaklaştırabilme, nispeten daha az çamur üretme, biyolojik olarak bozunmayan organik maddeleri uzaklaştırabilme veya biyolojik arıtıma hazır hale getirme, koagülant dozajının kolayca kontrol edilebilmesi, hidroksitler şeklindeki çökelekler veya floklar üzerinde adsorpsiyonla ağır metal iyonlarını uzaklaştırabilme, sürekli pH kontrolü gerektirmeme, iyi dizayn edilmiş sistemlerde %90 civarında yüksek verim elde edilebilme, yaklaşık 10 dk gibi kısa temas süresi gerektirme ve nispeten düşük yatırım maliyeti gerektirme, alışılmış koagülasyon-flokülasyon uygulamalarına kıyasla, elektriksel alanın varlığından dolayı en küçük kolloidal parçacıkları uzaklaştırabilme gibi avantajlara sahiptir. Ancak bu proses, katotta üretilen H<sub>2</sub> gazının çökelmeyi engellemesi, arıtılan sudaki demir ve alüminyum iyonlarının derişimlerinin nispeten yüksek olması, üretilmiş çözünmeyen hidroksitlerin elektrotlar arasında birikmesi gibi dezavantajlara da sahiptir. Bu dezavantajların çeşitli şekillerde giderilebileceği ve geleneksel atıksu arıtım proseslerine alternatif olarak sunulabileceği düşünülmektedir (Solak, 2007).

Elektrokimyasal yöntemlerin verimliliğinin artırılabilmesi için farklı oksidasyon proseslerinin (Fenton oksidasyonu, foto-oksidasyon, elektro-oksidasyon gibi) aynı elektrokimyasal hücre içerisinde eş zamanlı olarak yürütüldüğü hibrit sistemler sıkça kullanılmaktadır. Özellikle elektro-oksidasyon (EO) ve elektro-koagülasyonun (EC) bir arada gerçekleştiği bir sistem olarak bilinen elektro-Fenton (EF), kirlilik yükü yüksek atıksuların arıtımında oldukça iyi sonuçlar vermektedir (Demirtaş, 2011).

Bu çalışmanın amacı reaktif bir azo boyar madde olan Deep Red'in giderimi için mikroeletroliz yönteminin kullanılabilirliğini incelemek ve literatürde daha önce sıklıkla çalışılmış olan elektrokoagülasyon ve elektro-Fenton yöntemleri ile karşılaştırmaktır.

## 2. BOYAR MADDELER

Dünyada ve ülkemizde boyar madde kullanım alanları ve gereksinimi gün geçtikçe artmaktadır. Kullanım alanları çok geniş olan sentetik boyar maddelerin %80'i tekstil sanayiinde, yün, pamuk, ipek, vb. boyanması için kullanılmaktadır. Tekstil sanayiinden sonra sentetik boyar maddeler; plastik sanayi, deri sanayi, sentetik lif üretim sanayi, lastik sanayi, kereste sanayi, selüloz ve kağıt sanayi, kozmetik sanayi, ilaç sanayi, gıda sanayi, inşaat sanayii, cam ve porselen sanayii, otomotiv sanayi, makine sanayi, matbaacılık, güzel sanatlar, vb. alanlarda kullanıldığı bilinmektedir (Koçak, 2011).

Boyarmadde üretiminde benzen, toluen, ksilen, naftalin, ftalik asit anhidriti, fenol gibi aromatik yapıli hidrokarbonlar yer almaktadır. Bunların esas ana kaynağını kömür ve petrol oluşturmaktadır (Yüce, 2007).

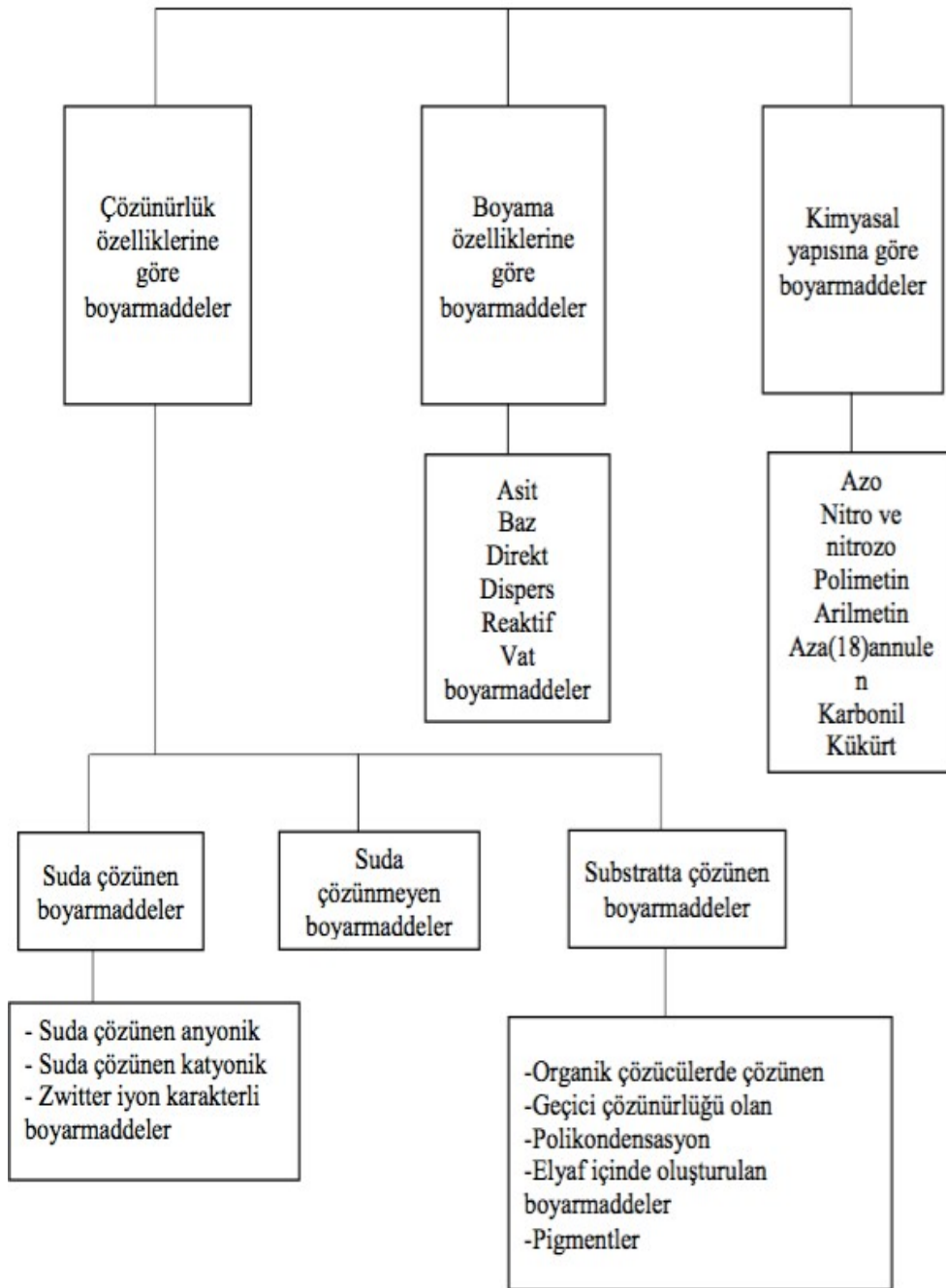
### 2.1. Boyar Maddelerin Sınıflandırılması

Boyar maddeler çözünürlük, boyama özellikleri ve kimyasal yapı gibi çeşitli karakteristikler göz önünde bulundurulurarak sınıflandırılabilir. Bu özelliklerine göre boyarmaddelerin sınıflandırılması Şekil 2.1' de verilmiştir.

### 2.2. Boyar Maddelerin Çevre ve İnsan Sağlığına Etkileri

Boyar maddelerin zehirli özelliklere sahip olduğu, bazı boyar maddelerin çalışma ortamında önceden belirlenen miktarlarda tutulması gerektiği, az miktarda fakat uzun süreli olarak bulduklarında kronik etkilerinin göz önünde tutulması zorunluluğu boya ile çalışan kişiler üzerinde araştırılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, boyar maddelerin metabolizmalar üzerinde kanserojenik etkileri olduğu belirlenmiştir. Boyar maddelerin içerdiği kanserojen maddelerin ise nitro bileşikleri, polisiklik hidrokarbonlar ve benzeri diğer bileşikler olduğu ispatlanmıştır.





**Şekil 2.1.** Boyarmaddelerin sınıflandırılması (Bozkan, 2012).

Boyar maddeler özellikle mesane kanserine yol açmaktadır ve direkt olarak temas edilmesi halinde cilt hastalıkları ve alerjik haller oluşturabilmektedirler. Solunmalarının ve gözle temaslarının tehlikeli olduğu, özellikle alkali boyaların göz kayıplarına neden olabileceği belirlenmiştir. Boyar maddeler ayrıca yapılarındaki bileşenlere göre de tehlike oluşturmaktadırlar. Örneğin, kurşun içeren boyar maddelerle uzun süreli temas halinde kalmak kurşun zehirlenmelerine neden olmaktadır. Boyar maddelerin genellikle zehirlilik

özelliği, aktarıldığı alıcı su ortamlarındaki canlılar için de tehlike yaratmaktadır. Boyar maddelerin pek çoğu, su canlıları üzerinde özellikle balıklar için öldürücü etkiye sahip değildir. Bununla birlikte alıcı su kaynağının yeterince yüksek seyrelme faktörüne sahip olmaması durumunda gerek zehirlilik özelliği gerek güneş ışınlarını absorplaması gerekse fotosentezin yavaşlamasına bağlı olarak çözünmüş oksijen miktarını azaltarak hem yaşamı tehdit etmekte hem de ekolojik dengeyi bozmaktadır. Ayrıca boyar maddeler estetik yönden de çevre kirliliğine neden olurlar. Özellikle insanların toplu olarak yaşıadığı bölgelerde ve piknik yerlerinde bu tür kirlilik çevre insanı için büyük önem taşımaktadır (Yıldız, 2013).

### **2.3. Boyar Madde Arıtım Yöntemleri**

Tekstil endüstrilerinde boyamada ve diğer işlemlerde kullanılan organik ve inorganik formdaki bileşiklerin çeşitliliğine bağlı olarak, ortaya çıkan atıksuların özellikleri de farklı olmaktadır. Kompleks kimyasal yapılarına ve sentetik kökenlerine bağlı olarak boyar maddelerin giderilmesi oldukça zor bir işlemdir. Boyalı atıksuların karakterizasyonu da boyaların kimyasal yapılarındaki farklılıklardan ve boyama işlemlerinin değişim göstermesinden dolayı oldukça zordur. Günümüzde boyar maddelerin arıtımı büyük ölçüde fiziksel, kimyasal, biyolojik arıtım ve elektrokimyasal yöntemlerle gerçekleştirilmektedir (Yüce, 2007).

#### **2.3.1. Fiziksel yöntemler**

Arıtımda kullanılan fiziksel yöntemleri üç başlık altında toplamak mümkündür (Yüce, 2007).

##### **2.3.1.1. Adsorpsiyon ve aktif karbon**

Adsorpsiyon teknikleri geleneksel metodlar için fazla kararlı olan kirleticilerin giderimindeki verimlilikten dolayı son yıllarda ilgi görmektedir. Adsorpsiyon ekonomik açıdan makul bir yöntemdir ve yüksek kalitede ürün oluşumu sağlar. Adsorpsiyon prosesi, boya/adsorban etkileşimi, adsorbanın yüzey alanı, tanecik büyüklüğu, sıcaklık, pH ve temas süresi gibi pek çok fizikokimyasal faktörün etkisi altındadır.

Adsorpsiyonla renk gideriminde en çok kullanılan yöntem aktif karbon yöntemidir. Aktif karbonla renk giderimi özellikle katyonik ve asit boyalar için etkiliyken, dispers, direkt, vat, pigment ve reaktif boyalar için daha az bir renk giderimi söz konusudur. Metodun performansı kullanılan karbonun tipine ve atıksuyun karakteristiğine bağlıdır. Rejenerasyon ve tekrar kullanım performansta azalmaya neden olurken bu dezavantaj aşırı miktarda aktif karbon kullanılmasıyla giderilebilir. Ancak aktif karbon pahalı bir malzemedir (Kocaer ve Alkan, 2002).

### **2.3.1.2. Membran filtrasyonu**

Bu yöntemle boyanın sürekli olarak arıtılması, konsantre edilmesi ve en önemlisi atıksudan ayrılması mümkün olmaktadır. Diğer yöntemlere göre en önemli üstünlüğü sistemin sıcaklığa, çevreye ve mikrobiyal aktiviteye karşı dirençli olmasıdır. Ters osmoz membranları çoğu iyonik türler için %90'ın üzerinde verim gösterir ve yüksek kalitede bir permeat eldesi sağlar. Boya banyoları çıkış sularındaki boyalar ve yardımcı kimyasallar tek bir basamakta giderilmiş olur. Ancak yüksek ozmotik basınç farklılığı ters osmoz uygulamalarını sınırlandırmaktadır. Nanofiltrasyon membranları negatif yüzeysel yüklerinden dolayı iyon seçicidirler. Yani, çok değerlikli anyonlar tek değerlikli anyonlara göre daha sıkı tutulurlar. Membranların bu özelliğine bağlı olarak boyalı atıksularda bulunan bir kısım yardımcı kimyasal membrandan geçebilmektedir.

Membran teknolojileri, ayırmadan sonra kalan konsantre atığın bertaraf problemlerine neden olması, sermaye giderlerinin yüksek olması, membranın tıkanma olasılığı ve yenilenme gerekliliği gibi dezavantajlara da sahiptir (Kocaer ve Alkan, 2002).

### **2.3.1.3. İyon değişimi**

Boya içeren atıksuların arıtılmasında iyon değiştiricilerin kullanılması henüz yeterince yaygın değildir. Bunun ana nedeni, iyon değiştiricilerle arıtılarak olumlu sonuç alınan boya sınıfının kısıtlı olmasıdır. Yöntemde atıksu, mevcut iyon değişim bölgeleri doygunluğa erişene kadar iyon değiştirici reçineler üzerinden geçer. Bu şekilde, boyar madde içeren atıksulardaki hem katyonik hem de anyonik boyalar uzaklaştırılabilmektedir.

Yöntemin avantajları, rejenerasyon sayesinde adsorban kaybının bulunmaması, çözücünün kullanıldıktan sonra iyileştirilebilmesi ve çözünebilir boyaların etkin şekilde giderilebilmesidir. En büyük dezavantaj ise kuşkusuz yöntemin maliyetidir. Organik çözücüler oldukça pahalıdır (Kocaer ve Alkan, 2002).

### 2.3.2. Kimyasal yöntemler

Arıtımda kullanılan kimyasal yöntemleri aşağıdaki iki başlık altında toplamak mümkündür (Yüce, 2007).

#### 2.3.2.1. Oksidatif yöntemler

Oksidasyonla boya molekülündeki aromatik halka yapısı kırılır ve atık sulardaki boyarmadde giderilir. Oksidasyon basit olması boyarmaddelerin gideriminde en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Oksitleyici ajan olarak hidrojen peroksit kullanılır. Hidrojen peroksit UV ile aktif hale getirilerek serbest OH radikallerinin oluşması sağlanır. OH radikalleri organik maddeyi okside ederek parçalanmasını sağlarlar (Yüce, 2007).

**Fenton ajanları:** Çözünen veya çözünmeyen boyaları etkili bir şekilde renk giderimi sağlar. Biyolojik yaşama uygun olmayan atık suların arıtımı için uygun bir yoldur. Ancak en büyük dezavantajı çamur üretimidir. Ortaya çıkan çamur konsantre maddeler ürettiği için tekrar arıtıma ihtiyaç duyar (Yüce, 2007).

**Ozonlama:** Ozonla oksidasyon hidrokarbonları ve aromatik hidrokarbonları indirgeyebilir. Gaz fazında olduğu için çevreye atık su veya çamur bırakmaz. Boyaların kromofor guruplarının oluşturduğu toksik özellikleri azaltır. Kimyasal oksijen ihtiyacını düşürür. Ozonun dezavantajı yarı ömrünün çok kısa olması ve maliyetinin yüksek olmasıdır (Yüce, 2007).

**Fotokimyasal yöntem:** Bu yöntemle boya molekülleri karbondioksit ve suya kadar parçalanırlar. Degredasyon sonucu yüksek miktarda serbest radikal oluşur ve bunlar organik atıkları okside ederler. Her boya için etkili bir hidrojen peroksit konsantrasyonu vardır (Yüce, 2007).

**Sodyum hipoklorit:** Klor boyalardaki amino guruplarına etki eder ve azo bağlarını koparır. Ancak kanserojen olduğu ve aromatik aminler salgılandığı için bu yöntem çok nadir kullanılır. Alıcı ortamda olumsuz etkiler yaratır. Fiziksel ve kimyasal yöntemler sadece

atık su hacminin düşük olduğu durumlarda kullanılırlar (Yüce, 2007).

### **2.3.2.2. Kimyasal flokleştirme ve çöktürme**

Bu yöntemde flokleştirme ve çökelme kimyasal maddeler yardımıyla sağlanır. Atıksuya katılan kimyasal maddeler yardımıyla meydana gelen flokleştirme ile çözünmüş maddeler ve kolloidler giderilirler. En çok kullanılan kimyasallar arasında,  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $FeCl_3$ ,  $FeSO_4$  ve kireç sayılabilir (Kocaer ve Alkan, 2002).

### **2.3.3. Biyolojik arıtım**

Biyolojik arıtım fiziksel ve kimyasal arıtıma nazaran çok daha ekonomik bir yöntemdir. Organizmalarla renk giderimi, mikrobiyel parçalanma, ölü ve canlı hücrelerle yapılan adsorpsiyon ve biyoremediasyon gibi biyolojik parçalama yöntemleri atık suların biyolojik arıtımında en çok kullanılan yöntemlerdir. Biyolojik arıtım aerobik veya anaerobik şartlarda gerçekleştirilir (Yüce, 2007).

#### **2.3.3.1. Anaerobik arıtım**

Anaerobik arıtım oksijensiz ortamda gerçekleştirilen arıtım aşamalarından oluşur. Organik maddelerin oksijensiz ortamda metan, karbondioksit ve suya dönüştürüldüğü bir süreçtir. Bu yöntemle tekstil atıklarının %60-70'inde bulunan ve klasik yollarla arıtılmayan azo boyalar ve diğer çözünür boyalar dekolorize edilirler. Bu işlem oksidasyon indirgenme mekanizmaları ile gerçekleşir. Anaerobik sistemin büyük bir avantajı biyogaz üretimidir. Oluşan biyogaz ısı ve güç kaynağı olarak yeniden kullanılabilir ve enerji maliyetini düşürür. Birçok atıksu çeşidi için uygulanabilmesi, enerji gerektirmemesi, hatta fazladan enerji üretebilmesi, düşük teknolojiyle çalışabilmesi ve maliyetinin düşük olması gibi avantajlara sahiptir. Alet ve teçhizat donanımı açısından aerobik arıtmaya göre daha ucuzdur. Aerobik ya da diğer çeşit arıtımların uygulandığı sistemlerde anaerobik arıtım en azından bir ön arıtım olarak uygulanmalıdır. Çünkü anaerobik parçalanma sonucu oluşan bazı aromatik aminler sitotoksik, mutajenik ve kanserojen etkili olabilirler. Aromatik aminler halka yapısının açılması ve hidroksilasyonla aerobik ortamda mineralize olabilmektedir. Böylece boyarmadde içeren atıksuların

kombine anaerobik aerobik sistemlerle arıtılması sonucu ilk basamakta etkili bir renk giderimi sağlanmakta ve anaerobik ortamda dirençli olan aromatik aminler aerobik basamakta giderilebilmektedir (Yüce, 2007).

### **2.3.3.2. Aerobik arıtım**

Aerobik arıtımda en sık kullanılan yöntem aktif çamur yöntemidir. Aktif çamur sistemi dengeleme, havalandırma, çöktürme ve dezenfeksiyon süreçlerinden oluşur. Aktif çamur koloidal çözünmüş maddelerin mikroorganizmalar ile çökebilir biyolojik floklara dönüştürüldüğü süreçtir ve bu süreçte havalandırma havuzu içindeki mikroorganizmaların askıda tutulması esastır. Biyolojik arıtma ünitesi, havalandırma sonucu organik maddelerin askıda büyüyen mikroorganizmalar tarafından parçalanması prensibiyle çalışır. Mikroorganizmaların organik maddeleri oksitlemesi sonucu organik maddeler ya okside olur ya da biyokütleyle dönüşür. Gereken arıtma veriminin sağlanması için oluşan biyokütlenin bir kısmı çöktürme kademesinde fazla çamur olarak sistemden atılırken, bir kısmı havalandırma ünitesine geri verilir.

Suda iyi çözünen bazik, direkt ve bazı azo boya atıklarının olması durumunda mikroorganizmalar bu tür bileşikleri biyolojik olarak indirgeyememekle birlikte boyanın bir kısmını adsorbe ederek atıksuyun rengini almakta ve böylece renk giderimi sağlanabilmektedir. Organik yükü fazla olan atık sular için doğrudan aktif çamur kullanmak aşırı enerji ihtiyacından dolayı mümkün değildir. Bu durumda aktif çamur yöntemi anaerobik arıtmadan sonra ikinci kademe olarak kullanılmaktadır (Yüce, 2007).

### 3. ELEKTROKİMYASAL ARITMA

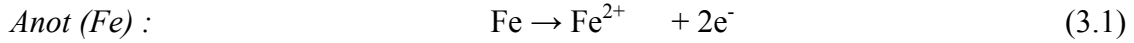
Son yıllarda renk giderimi ve boya moleküllerinin yükseltgenmesinde elektrokimyasal yöntemlerin kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Reaktif azo boyaların arıtımında elektrokimyasal yükseltgeme (Yavuz ve Shahbazi, 2012), elektrokoagülasyon (Şengil ve Özacar, 2009) ve elektro-Fenton (Kuşvuran vd., 2005) gibi elektrokimyasal yöntemler önemli bir yere sahiptir. Ancak elektrik enerjisi ihtiyacı bu yöntemlerin büyük ölçekte uygulanmasını kısıtlamaktadır.

#### 3.1. Mikroelektroliz

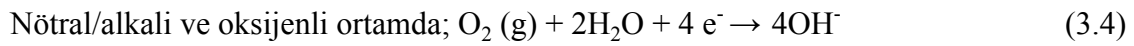
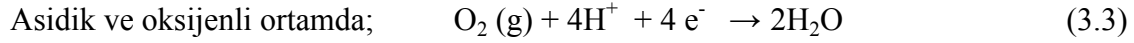
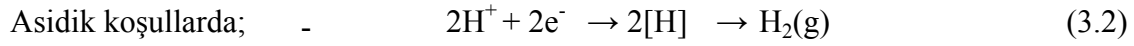
Mikroelektroliz, galvanik hücrelerin yükseltgenme-indirgenme reaksiyonuna dayanır. Mikroelektroliz ilkeleri, geleneksel elektroliz ile oldukça benzerdir. Mikroelektroliz elektrokimyasal oksidasyon metotlarından biri olarak demir, karbon ve atıksu arasında elektrik alanının oluşumu esasına dayanır. Mikroelektroliz çevreye az ya da hiç zararı olmayan zararsız reaktifleri kullanmasıyla bilinir ve ekstra enerji ihtiyacı yoktur. Diğer su arıtma işlemleriyle karşılaştırıldığında, mikroelektroliz çevre dostu, ekonomik ve birincil hücre oluşumları olan ek enerji ve kimyasal gerekmemesi nedenleriyle arıtım uygulamaları için büyük bir potansiyele sahiptir (Zhang vd., 2014). Bununla birlikte bu yöntemin bazı dezavantajları vardır. Örneğin, belirli bir giderimden sonra mikroelektroliz yavaşlar. Ayrıca, çözelti içindeki demir iyonlarının artan derişimi sonraki giderim süreçleri için sorun oluşturur. Bu dezavantajları önlemek ve kirletici maddelerin bozulmasını arttırmak için mikroelektroliz farklı yöntemlerle birleştirilmelidir (Zuo vd., 2011).

##### 3.1.1. Mikroelektrolizin mekanizması

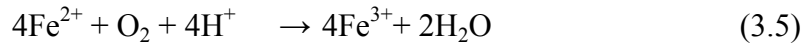
Mikroelektroliz (aynı zamanda iç elektroliz veya demir talaşı filtrasyonu olarak da bilinir) etkili bir atıksu arıtma yöntemidir. Metal korozyonu teorisine göre, karbon çeliğinden demir ve karbon sistemi elektrot olarak kullanılır. Elektronlar birçok mikrokarbon anotların galvanik korozyonu ile elde edilmektedir. Mikroskobik galvanik hücreler atıksu (elektrolit), demir ve karbon partikülleri arasında oluşmaktadır (Zuo vd., 2011). Anot ve katotta aşağıdaki tepkimeler gerçekleşir (Guo vd., 2013; Cheng vd., 2007):



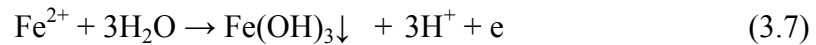
*Katot (AC) :*



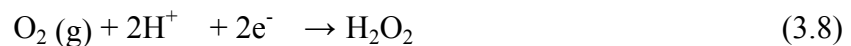
Anotta demirin korozyonu sonucunda açığa çıkan  $\text{Fe}^{2+}$  oksijen varlığında düşük çözünürlüğü nedeniyle daha iyi bir pıhtılaştırıcı olan  $\text{Fe}^{3+}$  yükseltgenebilir:



Ortamda bulunan  $\text{Fe}^{2+}$  ve  $\text{Fe}^{3+}$  ise aşağıdaki tepkimeler aracılığıyla hidroksitleri haline dönüşebilmektedir:



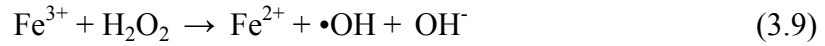
Çok sayıda demir talaşı ve karbon parçacıkları yüzeyinde mikroskobik ölçekte meydana gelen bu eş zamanlı yarı hücre reaksiyonları sonucunda önemli bir elektron akışının olduğu sistem oluşur. Ayrıca katotta oksijenin iki elektronlu indirgenmesiyle asidik çözeltilerden hidrojen peroksit oluşturur (Zuo vd., 2011).



Elektrofenton yöntemiyle hidrojen peroksit oksitleme gücü mikroeletroliz işlemi sırasında asidik çözeltilerde korozyon tarafından oluşturulan  $\text{Fe}^{2+}$  ve etkisi altında



geliştirilmiştir.  $Fe^{3+}$  ve hidrojen peroksit klasik fenton reaksiyonu oluştururlar (Zuo vd., 2011).



Seçici olmayan  $\bullet OH$  atıksu içinde organik kirleticilerin okside yeteneğiyle güçlü bir oksidan olarak hareket ederler. Organik kirleticiler  $\bullet OH$  veya mikroeletroliz işlemi sırasında oluşturulan diğer oksidanlar tarafından oksitlenir. Ek olarak, kirleticilerde adsorplanır ve demir karbon tarafından çöktülür (Zuo vd., 2011).

Mikroeletrot yüzeyinde büyük partiküllerin çökmesi nedeniyle elektro yer değiştirme ve elektroforez etkisi altında mikroeletroliz alanı oluşur. Organik kirleticinin indirgenmesi demir oksidasyonu tarafından düşük pH' da gerçekleşir. Atık boyanın redoks tepkimeleri, aktif hidrojen ile birlikte hidrojenin katotta asidik koşullar altında indirgenmesiyle meydana gelir. Koagülasyon, demir ve demir hidroksitleri tarafından oluşturulan oksidasyon ve anottan salınan  $Fe^{2+}$  nın çöktülmesiyle oluşur. Adsorpsiyon ve organik kirleticilerin indirgenmesi aktif karbon tarafından gerçekleştirilir. Mükemmel renk ve KOİ giderimi performansı nedeniyle, mikroeletroliz yöntemi kullanılarak organik ve inorganik kirleticilerin bertarafı cazip hale gelmiştir (Zhang vd., 2014).

### 3.1.2. Mikroeletroliz yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar

Gillham ve arkadaşlarına (1996) göre mikroeletroliz yönteminin en önemli şekli sıfır değerlikli demirdir (Zero-Valent Iron, ZVI). Gillham ve arkadaşları yeraltı sularını iyileştirmede hareketsiz bir ayıraç olarak geçirgen reaktif bariyer olması için ZVI yöntemini kullanmıştır. Bu reaktif bariyerler (Permeable Reactive Barriers, PRB) başarı ile kullanılmıştır. Avrupa' nın ticari amaçla kurulan en eski PRB sistemi The Monkstown PRB, Kuzey İrlanda' daki Nortel Ağ sitesindeki on yıldır yeraltı sularına karışmış olan trikloroeteni temizlemektedir ve muhtemelen bir on yıl daha hizmet edebilecek şekilde yapılmıştır (Ying vd., 2012). Günümüzde ZVI tabanlı mikroeletroliz sistemleri; ilaç sektöründeki atıksuları arıtmada, yararlı kimyasal ve pestisit endüstrilerinde biyolojik arıtma ile kullanılabilir şekilde geliştirilmiştir. Örneğin Çin' in Shanghai şehrinde ağustos 2006' dan bu yana günde 60000 m<sup>3</sup> atıksu, biyolojik arıtma ve ZVI sistemi

sayesinde artılmaktadır. Ayrıca kütleli ve kübik ticari ZVI parçaları da Çin’ de üretilmektedir (Ying vd., 2012). 1970’ lardan bu yana, mikroeletroliz atıksu arıtımında kullanılmaktadır ve şimdiye kadar Çin’ de atıksu arıtmak için yeni bir elektrokimyasal yöntem olarak (Örneğin petrol, ilaç, boya gibi) birçok endüstriyel alanda uygulanmıştır.

Qin ve Gong (2013) tarafından petrol rafineri atık suyunun ön muamelesi deneysel olarak mikrodalga varlığında ve yokluğunda Fe<sup>0</sup>/GAC (granül aktif karbon) mikroeletroliz sistemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmalarında reaksiyon süresinin, pH değerinin, Fe<sup>0</sup> GAC hacim oranının ve mikrodalga gücünün atıksuyu arıtmada etkilerini incelemiştir. Optimum koşullar mikrodalga gücü 500 W, reaksiyon süresi minimum 15 dakika, demir talaşı miktarı 30 g/L, GAC miktarı 5,75 g/L ve pH 3 olarak belirlenmiştir. Optimum koşullar altında kimyasal oksijen ihtiyacı giderim verimi % 38,3 bulunmuştur. Atıksuyun biyoçözünürlüğünün Fe<sup>0</sup> GAC mikroeletroliz işlemi ile geniş ölçüde gerçekleştiği kanıtlanmıştır. Bu çalışma ile ön işlem proseslerinde mikroeletroliz yönteminin elverişli olduğu ispat edilmiştir.

Luo ve arkadaşları (2014) mikroeletroliz konusunda önemli çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarında sıfır değerlikli toz demir talaşı/AC (aktif karbon) ara yüzeyinde mikroeletroliz yöntemiyle nitrat indirgenmesini incelemiştir. Çalışmalarına göre sıfır değerlikli toz demir talaşı tarafından nitrat giderimi her zaman pH < 4 olduğunda iyi sonuç vermiştir. Çalışmalar Fe<sup>0</sup>/ AC sisteminin pH 6 da bile nitrat indirgenmesini sağladığını ve verimin %73’ e kadar yükseldiğini göstermiştir. Nitrat indirgenme verimi Fe<sup>0</sup>/AC kütle oranının etkisi altında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan Fe<sup>0</sup>/AC mikroeletroliz yöntemiyle gelecekte fazla pH düzenlemesi olmadan atıksudan nitrat gideriminin başarıyla yapılabileceği görülmüştür.

Guo ve arkadaşları ise (2013) Reaktif Siyah 5 giderimi için bir ön arıtma süreci olarak iç mikro elektroliz (IM) yönteminin uygulanabilirliğini incelemiştir. Kimyasal oksijen, toplam organik karbon ve renk giderim oranları sırasıyla %46,05; %39,99 ve %98,77 olarak elde edilmiştir.

### 3.2. Elektrokoagülasyon Prosesi

Elektrokoagülasyon (EC) elektroliz sonucu anodun çözünmesiyle atıksu içerisinde metal hidroksit floklarının oluşturulmasıyla gerçekleşen bir prosestir. EC'nin birbirini izleyen 3 aşamada gerçekleştiği kabul edilmektedir:

1.Aşama: Kullanılan elektrodun, elektrolitik oksidasyonu ile koagülantların oluşturulması.

2.Aşama: Kirleticilerin, askıdaki partiküllerin destabilizasyonu ve emülsiyonların kırılması.

3.Aşama: Flokları oluşturmak için destabilize fazların birleşmesi ya da toplanması.

Kirleticilerin, askıdaki partiküllerin destabilizasyonu ve emülsiyonların kırılma mekanizmaları aşağıdaki basamaklarla özetlenebilir:

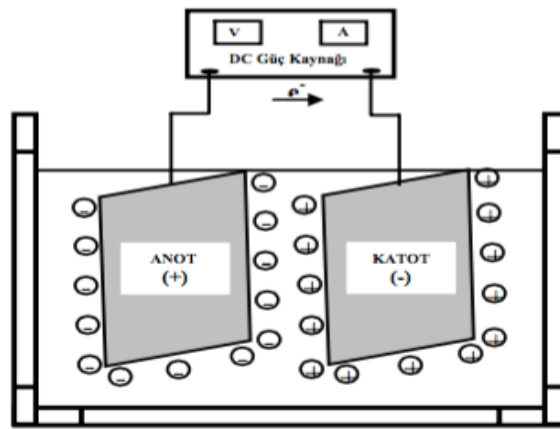
- a) Çözelti içerisinde akımın geçmesi ve kullanılan elektrodun çözünmesi ile üretilen iyonların etkileşimi sonucu meydana gelmiş yüklü türler etrafındaki difüze çift tabakanın sıkıştırılması.
- b) Kullanılan elektrotların elektrokimyasal olarak çözünmesi ile üretilen zıt iyonların sebep olduğu, atıksu içerisindeki mevcut iyonik türlerin yük nötralizasyonu (Bu zıt iyonlar, elektrostatik partiküllerin içsel itme kuvvetini azaltmasından dolayı Van der Waals kuvvetleri baskın hale gelerek koagülasyon prosesini etkin hale getirir).
- c) Flok yapısı ve koagülasyon sonucundaki flok oluşumu, kompleksleşmeyen kolloidal partikülleri yakalayan ve köprü kuran çamur tabakası oluşumu (Mollah vd., 2001).

EC, çok küçük kolloidal tanecikleri uzaklaştırabilme, nispeten daha az çamur üretme, biyolojik olarak bozunmayan organik maddeleri uzaklaştırabilme veya biyolojik arıtıma hazır hale getirme, koagülant dozajının kolayca kontrol edilebilmesi, hidroksitler şeklindeki çökelekler veya floklar üzerinde adsorpsiyonla ağır metal iyonlarını uzaklaştırabilme, sürekli pH kontrolü gerektirmeme, iyi dizayn edilmiş sistemlerde %90 civarında yüksek verim elde edilebilme, yaklaşık 10 dk gibi kısa temas süresi gerektirme ve nispeten düşük yatırım maliyeti gerektirme (Do ve Chen, 1994; Vik vd., 1984; Uğurlu, 2004), alışılmış koagülasyon-flokülasyon uygulamalarına kıyasla, elektriksel alanın

varlığından dolayı en küçük kolloidal parçacıkları uzaklaştırabilme (Pouet ve Grasmick, 1995; Uğurlu, 2004) gibi avantajlara sahiptir.

### 3.2.1. Elektrokoagülasyon sırasında gerçekleşen reaksiyonlar

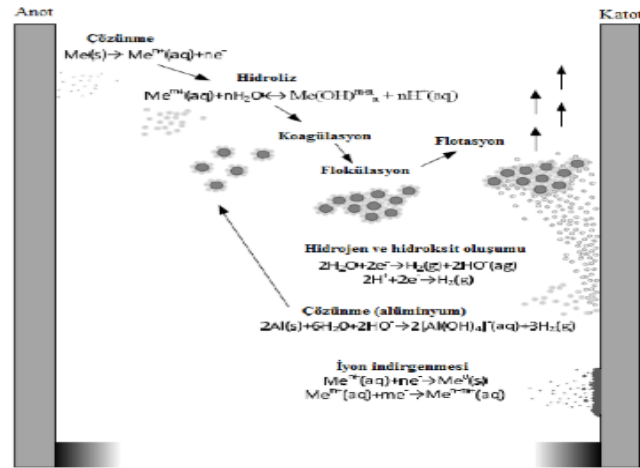
EC reaktörü, basit olarak anot ve katot elektrodun bulunduğu elektrolitik hücre ile anot ve katot elektrotların bağlandığı DC Güç Kaynağından oluşmaktadır (Mollah vd., 2001). Basit EC reaktörü Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Şematik EC reaktörü (Solak,2007).

EC'nin en önemli etkenlerinden biri kullanılan elektronun cinsidir. Elektrokoagülasyon prosesinde genellikle alüminyum ( $Al^{3+}$ ) ve demir ( $Fe^{3+}$  veya  $Fe^{2+}$ ) elektronları kullanılmaktadır.

Proses işletim sırasında bu elektrotlar atıksuda reakte olarak  $Al(OH)_3$ ,  $Fe(OH)_3$  ve  $Fe(OH)_3$  gibi metal hidroksit bileşikleri meydana gelmektedir. Bu metal hidroksitler atıksu ortamındaki farklı kirlilik parametrelerini adsorbe ederek çökmesini sağlar. Kirleticiler bu sayede atıksudan uzaklaştırılmış olur. EC prosesi çalışma mekanizması aşağıdaki şekilde (Şekil 3.2) gösterilmiştir.

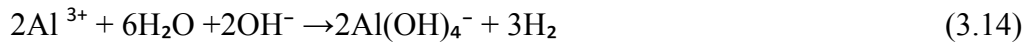
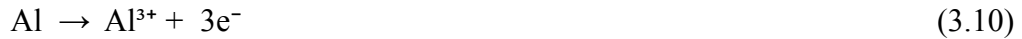


**Şekil 3.2.** Elektrokoagülasyon prosesi çalışma mekanizması (Akarsu,2014)

Alüminyum elektrot ile elektrokoagülasyon prosesinde  $Al^{3+}$ 'ün hidrolizi ve bunun sonucunda çeşitli alüminyum hidroksit polimer kompleks ve çökeltileri meydana gelmektedir (Bayar,2012). Katotta suyun indirgenmesi sonrası hidrojen oluşumu ve hidroksit birikmesi sonucu pH artmaktadır.

Aşağıda, anot ve katotta oluşabilecek reaksiyonlar verilmiştir.  $Al(OH)_3$ (katı) çok yüksek pH' larda amfoterik metal hidroksit özelliğinden dolayı mevcut  $OH^-$  iyonlarıyla reaksiyona girerek ortamın pH' sını düşürmektedir (Can vd., 2003; Bayar, 2012).

$Al(OH)_3$  (katı) çok yüksek pH' larda amfoterik metal hidroksit özelliğinden dolayı mevcut  $OH^-$  iyonlarıyla reaksiyona girerek ortamın pH' sını düşürmektedir (Can vd., 2003; Bayar, 2012).



### 3.2.2. Elektrokoagülasyon prosesinin avantajları ve dezavantajları

Elektrokoagülasyon prosesinin avantajları ve dezavantajları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Elektrokoagülasyon prosesinin avantaj ve dezavantajları (Solak, 2007).

| Avantajları   | Dezavantajları   |
|---|--|
| Sistemin çalışması sırasında karşılaşılan birçok problemde elle müdahale kolaylığı sunar.   | Bazı yerlerde elektrik kullanımı pahalı olabilir.  |
| EC prosesi ile atıksu arıtımı sonucu istenilen nitelikte, temiz, renksiz, kokusuz su elde edilir.   | Katot üzerinde geçirimsiz film tabakası oluşumu prosesin verimliliğini düşürebilir.  |
| EC prosesi uygulanması sonucu oluşan çamur kolayca çökebilme ve kolay susuzlaştırılabilme özelliği sunar, çünkü, temelde oksit/hidroksitlerden oluşmuştur.  | Atıksu çözeltilerinin yüksek iletkenliğe sahip olması gerekir.   |
| EC prosesi ile oluşan floklar büyük, asidik ortama dayanıklı, oldukça stabil ve filtrasyonla kolaylıkla ayrılabilir.  | Jelatinli hidroksit bazı durumlarda çözünmeye meyilli olabilir.  |
| EC prosesi, kimyasal koagülasyon-flokülasyon prosesleri ile karşılaştırılırsa, az miktarda toplam çözülmüş katıları içeren çıkış suyu üretir.   | EC reaktör dizaynı/işletimi ve elektrot güvenilirliği konusunda sistematik katılımın eksikliği mevcuttur (özellikle kullanma ömrü dolan elektrotların pasivasyonu*). |
| EC prosesi, en küçük kolloid partiküllerin giderimi avantajına sahiptir çünkü, güç kaynağı ile verilen elektrik sonucu oluşan elektriksel alan en küçük partiküllerin hızlı hareket etmesini sağlayarak koagülasyona yardımcı olmakta ve çöktürmektedir.  | *pasivasyon;metalin kimyasal olan aktif yüzeyinin aktivasyona zıt olarak çok daha az reaktif duruma dönüşmesi  |
| EC prosesinde, kimyasal madde gereksinimi ve kimyasal arıtmada problem oluşturan fazla kimyasalları nötralize etme problemi yoktur, atıksu arıtımında kimyasal koagülasyon kullanılmış olması durumundaki gibi yüksek konsantrasyonlarda kimyasal madde ilavesi ile ikincil kirlenmeye olanak tanımaz |  |
| Elektroliz sırasında üretilen gaz kabarcıkları, kirleticileri çözeltinin üst kısmına taşıyabilir, söz konusu bu kirleticilerde kolaylıkla konsantre olabilir ve daha kolay ayrılmalarını sağlar.  |  |
| EC tekniği kırsal kesimlerde uygun bir şekilde elektriğin mevcut olmaması durumunda üniteye güneş paneli ilave edilmesi ile proseste yine başarı sağlanabilir .   |  |
| İlk yatırım ve işletme maliyeti alternatif teknolojilerden belirgin bir şekilde düşüktür.   |  |
| Optimum şartlar sağlanması durumunda enerji ihtiyacı çok yüksek değildir.   |  |
| Diğer birçok proseste sadece tek bir kirleticisi giderilirken bu prosesle birçok kirleticisi aynı anda giderilebilir.   |  |

### 3.2.3. Elektrokoagülasyon prosesi ile yapılan çalışmalar

Bir çok alanda elektrokoagülasyon prosesinin uygulanabilirliği araştırılmış olup, bazı araştırmacıların araştırmalarında uygulanabilirliği hakkındaki görüşleri ve belirlemiş olduğu optimum değerler şu şekildedir:

Can ve arkadaşlarının 2002 yılında alüminyum elektrot ile elektrokoagülasyon metoduyla sulu çözeltilerden reaktif tekstil boyalarının giderimi üzerine çalışılmış ve başlangıç pH, çözelti iletkenliği, akım yoğunluğu, karıştırma hızı, boya konsantrasyonu ve zamanın etkisinin optimum koşulları belirlenmiştir. Renk giderimi açısından en iyi pH aralığı 4-6 arası olduğu, iletkenlik artışıyla elektrotlar arasında potansiyel farkın azalması sonucu anodik oksidasyon azalmakta ve renk giderimi veriminde azalma göstermiştir. Karıştırma hızının alüminyum hidroksit türlerinin çözelti içinde homojen dispersiyonu, kolloidlerle çarpışma sayısının artması ve oluşan flokların büyümesi açısından önemli olduğu, ancak yüksek miktardaki karıştırma hızlarında flok yapısını bozduğu görüşmüştür. En iyi sonucuda 200 rpm'de verildiği gözlenmiştir. Akım yoğunluğu ve süre parametreleri ile alüminyum konsantrasyonu kontrol edilebildiğini belirten tek bir parametre olan Faraday/m<sup>3</sup> 'ü önemli kıldığı sonucuna varılmıştır. Ancak, optimum Faraday/m<sup>3</sup> belirlenirken düşük akım yoğunluğu uzun elektrokoagülasyon süresi seçildiğinde enerji tüketimi azalacağı için işletme maliyetinin düşeceği, bekleme süresi arttığı için ilk yatırım maliyetinin artacağı göz önüne alınmalıdır.

Eyvaz ve arkadaşlarının 2006 yılında tekstil endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtılmasını araştırmışlardır. Demir ve alüminyum elektrotlar; monopolar paralel, monopolar seri ve bipolar seri bağlantı şekli ile kullanılmış, arıtma verimliliğinin ölçülmesinde KOİ ve türbidite giderimleri dikkate alınmıştır. KOİ gideriminde, her iki elektrot materyalinde asidik ortam daha uygun olup; demir elektrot için, Bipolar Seri (BP-S) bağlantı şekli etkili olurken, alüminyum elektrotlarda ise her üç bağlantı şekli için birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Türbidite gideriminde; optimum pH'nın elektrot materyaline bağlı olduğu, alüminyum elektrotlar için asidik ortamın, demir elektrotlar için ise nötral ortamın daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak, yüksek akım yoğunluklarının yüksek KOİ ve bulanıklık giderme verimleri sağladığı görülmüştür. Düşük akım yoğunluğunda (30 A.m<sup>-2</sup>) demir elektrotlarda sadece monopolar paralel

(MP- P) sistemden verim alınmıştır. Alüminyum elektrotlarda ise; KOİ giderimi bağlantı şekline göre değişirken, türbidite giderimi bağlantı şeklinden oldukça bağımsızdır. Diğer yandan, EC prosesi alüminyum elektrotlarla daha hızlı ilerlediğinden; her üç bağlantı için de 5 dakikalık bir süre etkili olurken, demir elektrotlarda ise; seri bağlantı sistemleriyle en az 10 dakikalık bir işlem süresine ihtiyaç duyulmakta, MP-P bağlantı şekli ise daha fazla işlem süresi gerektirmektedir. Ekonomik analizde, bir tekstil fabrikasının 1000 m<sup>3</sup>/gün debide atıksuyunun EC ile arıtılmasının işletme giderleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada EC prosesinin, kimyasal koagülasyona göre daha az materyal tüketen ve daha az çamur üreten, daha hızlı ve daha ekonomik bir proses olduğu belirlenmiştir.

Zaroual 2006 yılında tekstil atıksuyunun Fe elektrotlarla arıtımında EC prosesi ile kesikli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elektroliz süresi, elektroliz potansiyeli gibi işletim parametrelerinin renk ve KOİ giderim verimi üzerine etkileri araştırılmıştır. 3 dk'lık elektroliz süresi ve 600 mV'luk potansiyel ile %100 renk, %84 KOİ giderim verimi elde edilmiştir. Çıkış suyu deşarj standartlarını sağlayacak kadar ve kalitelidir. EC mekanizması zeta potansiyeli ölçümleri ile ortaya konmuştur.

Modirshahla 2006 yılında elektrokoagülasyon yöntemi ile sulu çözeltilerden tartrazinin uzaklaştırılmasını araştırmıştır. Farklı elektrot bağlantıları ve materyallerinin (Al, Fe) renk giderim verimi üzerine etkileri karşılaştırılmıştır. Akım yoğunluğu, elektroliz süresi, elektrotlar arası mesafe, elektrot konsantrasyonu ve çözelti pH'sı renk giderim verimini etkileyen parametrelerdir. Başlangıçta, basit bir elektrokimyasal hücre anot ve katot kullanılarak hazırlanmıştır, daha sonra her bir değişken için sulu tartrazin kullanılarak kesikli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık olarak 30 mg/lt KOİ ile 400 mg/lt'lik NaCl + 40 mg/ lt'lik tartrazin çözeltisi için, pH 5.78, elektroliz süresinin 6 dk, akım yoğunluğunun 120 A/m<sup>2</sup> ve elektrotlar arası mesafenin yaklaşık olarak 1.5 cm olduğu değerlerde yaklaşık olarak %100 renk ve %90 KOİ giderilmiştir. Gerçekleştirilen ikinci deney serisinde, seri-paralel monopolar ve bipolar elektrot bağlantılarının basit EC hücresine etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları monopolar elektrotların seri bağlanması durumunda Al ve Fe elektrotlarının anot ve katot olarak kullanılması durumunda daha etkili olduğunu göstermiştir. EC prosesinde Fe/Al (anot/katot) elektrot bağlantısı Fe/Fe (anot/katot) elektrot bağlantısından daha etkilidir .



Bayar ve arkadaşlarının 2012 yılında yaptıkları bir araştırmada sentetik olarak hazırlanan Direct Red 23 boyar maddesinin sulu ortamdan elektrokolagülasyon yöntemi kullanılarak giderimi üzerine çalışılmıştır. Alüminyum elektrotların kullanıldığı çalışmada, başlangıç çözelti pH'sı, karıştırma hızı ve destek elektrolit türünün renk giderimi üzerine etkileri incelenmiştir. Denemeler süresince akım yoğunluğu  $0.1 \text{ mA cm}^{-2}$  ve sıcaklık  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  de sabit tutulmuştur. Elektrotlar arası mesafe  $0.5 \text{ cm}$  olarak belirlenmiştir. Renk giderme verimi üzerine çözeltinin başlangıç pH'sının çok etkili bir parametre olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek renk giderim verimi başlangıç çözelti pH'sı 5, 150 devir/dakika'lık karıştırma hızı ve  $5 \text{ mMolar NaCl}$  tuzunun kullanıldığı denemede 30 dakika deney süresi sonunda % 98 olarak gerçekleşmiştir. Yapılan deney-lerde destek elektrolit türünün renk giderim verimine etkili bir parametre olmadığı gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda Direct Red 23 boyar maddesi içeren atıksuların arıtımında alüminyum elektrot içeren elektrokoagülasyon prosesinin uygulanabileceği görüşüne varılmıştır.

Özyonar ve Karagözoğlu (2012) elektrokoagülasyonun tekstil atıksu arıtımına uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Bu amaçla monopolar paralel bağlı alüminyum elektrotlarının kullanıldığı, elektrokoagülasyon prosesinin performansı araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler değerlendirilerek EC prosesinin optimum koşulları belirlenmiştir. Bu koşullar; başlangıç pH:3, akım yoğunluğu  $100 \text{ A/m}^2$  ve elektroliz süresi 20 dk olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar neticesinde TOK, KOİ, renk ve bulanıklık giderme verimleri sırasıyla, %82,6-%72,5-%97,7 ve %98,7'dir. Ayrıca yapılan çalışmada KOİ parametresi açısından, arıtılmış suyun Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'nde belirtilen deşarj limit değerini sağladığı görülmüştür. Sonuç olarak tekstil sanayi atıksuyunun arıtımında EC prosesinin etkili bir yöntem olduğu ortaya konulmuştur.

Assadi ve arkadaşları 2015 yılında sulu çözeltilerden elektrokoagülasyon yöntemi ile kurşun giderimi üzerine çalışmışlardır. Dört adet paralel alüminyum elektrot  $0,01 \text{ cm}$  aralıklar ile yerleştirilmiş, akım yoğunluğu, pH ve kurşunun başlangıç konsantrasyonları üzerine çalışmalar yapılmıştır.  $33 \text{ A/m}^2$  yoğunlukta  $7.25$  başlangıç pH'ında ve  $5 \text{ mg/L}$  konsantrasyonunda giderimin %94 olduğu gözlenmiştir.

### 3.3. Elektro-Fenton Prosesi

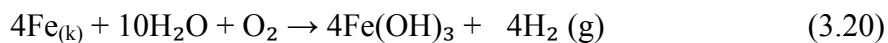
Elektro-Fenton (EF) prosesi, elektrooksidasyon ve elektrokoagülasyonun bir arada gerçekleştiği bir sistemdir ve kirlilik yükü yüksek atıksuların arıtımında oldukça iyi sonuçlar vermektedir (Deliktaş,2011).

#### 3.3.1. Elektro-Fenton sırasında gerçekleşen reaksiyonlar

Bu yöntemde,  $H_2O$ ' nun  $Fe^{3+}$  iyonlarıyla katalizlenmesi yolu ile  $OH^\cdot$  radikallerinin oluşturulması amaçlanır. Serbest hidroksil radikalleri oldukça reaktif, hidrokarbonlardan hidrojen koparma kabiliyetli, yüksek oksidasyon gücüne sahip ( $E=2,80V$ ) reaktiflerdir. Element halindeki flordan sonra ikinci yüksek oksidasyon gücüne sahip radikallerdir. Bu özelliklerinden dolayı da bütün organik bileşiklerle reaksiyona girmektedirler. Hidroksil radikalleri ( $OH^\cdot$ ) ile organik maddelerin oksidasyonu genel olarak aşağıda verilen zincir reaksiyonlar sayesinde gerçekleşir (Deliktaş, 2011).



EF yönteminde gözlenen bir diğer arıtma mekanizması ise elektrokoagülasyondur. EC'de, anodik olarak üretilen  $Fe^{2+}$  ve  $Fe^{3+}$  bileşenleri ortam pH' ına bağlı olarak  $Fe(OH)^\cdot$ ' in türündeki yapılara dönüşür ve bu yapılar flokların polaritesine bağlı olarak elektrostatik ilgi veya kompleksleşme reaksiyonlarıyla, kirleticilerin giderimi sağlanmaktadır (Mollah ve ark., 2001).



EF’de bu reaksiyonlar gerçekleşirken elektrokimyasal hücrede yöntemin verimini sınırlandıran istenmeyen reaksiyonların meydana gelmesi de mümkündür. Özellikle, sistemde üretilen OH<sup>·</sup> radikalleri ve dışarıdan eklenen H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, bu verimi düşüren reaksiyonların oluşması mümkündür (Diaz ve ark., 2002).

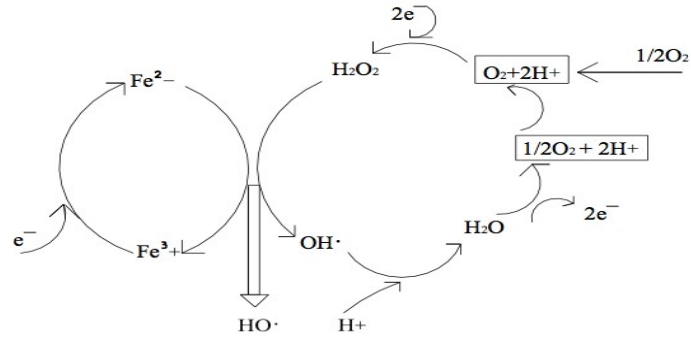


Bu reaksiyonlar, genellikle reaktörde sağlanacak uygun Fe(II)/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve Fe(III)/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> molar oranları ve pH ile azaltılabilmektedir. istenmeyen reaksiyonların yanında , yüksek akım uygulamalarında, aşağıda verilen iki reaksiyonunun diğer elektrot reaksiyonları tarafından engellenmesi engellemesi mümkündür. Bu durum, EF reaktöründeki organik madde giderimini azaltan bir diğer önemli faktör olarak kabul edilmektedir (Zhang ve ark., 2005).



Yukarıda da ifade edildiği gibi, EF yönteminde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar oldukça karmaşık ve kontrolü oldukça güçtür. Bu nedenle, optimum işletme koşullarının belirlenmesinin EF yönteminin verimliliğinin artırılmasında büyük önemi vardır.

Şekil 3.3’ de elektro-Fenton yöntemiyle OH<sup>·</sup> radikallerinin üretim şeması verilmiştir. Elektro- Fenton yönteminde çözeltiye katalizör olarak Fe<sup>2+</sup> iyonları eklenir. Uygulanan elektriksel potansiyelle bir taraftan oksijenin indirgenmesi ile H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oluşurken diğer taraftan Fe<sup>3+</sup> tekrar Fe<sup>2+</sup>, ya indirgenerek olayın katalitik bir şekilde yürümesi sağlanır (Deliktaş, 2011).



Şekil 3.3. Elektro-Fenton yöntemiyle OH· radikallerinin üretim şeması (Oturun, 1992).

### 3.3.2. Elektro-Fenton prosesinin avantaj ve dezavantajları

Elektro-Fenton prosesi oksidasyon ve koagülasyon proseslerinin avantajlarına sahip olmakla beraber sudaki oksijen miktarını da arttırmaktadır. Elektro-Fenton prosesinin avantajları ve dezavantajları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Elektro-Fenton prosesinin avantaj ve dezavantajları (Deliktaş, 2011).

| Avantajları  | Dezavantajları   |
|--|--|
| H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ihtiyaç duyuldukça yerinde ve sürekli üretilebilir. Bu nakliye ve depolamayı ortadan kaldırır. | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> katot ara yüzeyinde birikebilir ve kısmen bozunabilir. |
| Seyreltik H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> çözeltisi işlem sırasında güvenliği artırır.   | Yüksek derişimlerde protonlar elektronlar ile yarışır ve hidrojen gazı açığa çıkar.  |
| Üretim prosesi normal sıcaklık ve basınçta basitçe gerçekleştirilir.   | İlk iki dezavantaj H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> üretiminde akım verimini azaltır.   |
| Fe <sup>2+</sup> katotta tekrar üretilebilir.  | Normal kimyasal reaksiyonlar devam eder.   |
| Reaksiyon hemen başlatılabilir.  | Potansiyel korozyon problemleri vardır.  |
| Çamurların çökme karakteristikleri oldukça iyidir  | Anot ve katotta meydana gelen gaz kabarcıkları oluşan çamurun çökme zamanını artırır |
| Oksijen veya hava gönderilmesi tepkime çözeltisinin karışımını artırır.  | Köpük oluşumu söz konusu olabilir.   |
| Hidroksil radikallerinin kontrollü üretimi söz konusudur.  |  |

### 3.3.3. Elektro-Fenton prosesi ile yapılan çalışmalar

Rahmani ve arkadaşlarının (2015) yaptığı çalışmada basit ve çevre dostu elektro-Fenton süreci tarafından aktif çamur ve mineralizasyon değerlendirilmesinden bahsetmektedirler. Başlangıç  $H_2O_2$  konsantrasyonu ve pH değerini etkileri incelemişler, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam koliform (TC) kaldırılması oranının belirlenmesinde yoluyla MAS üzerinde akım yoğunluğu ve çalışma süresi üzerine çalışılmış olan bu makale de,  $127 \text{ mmol L}^{-1}$ , hidrojen peroksit,  $\text{pH} = 3,0$ ,  $\text{NaCl}$   $10 \text{ mA cm}^{-2}$  DC akımın, çalışma süresi 120 dakika ve  $0,22 \text{ mol L}^{-1}$  olarak destek elektrolit kullanılarak KOİ giderimi % 72 ile dolaylı oksidasyon çift aracılı elektro-nesil dayalı hidroksil kökü ve aktif klorun optimum koşulları belirlemişlerdir.  $\text{pH} 3.0'$  da 10 dakika karıştırılarak yaklaşık TC 100% uzaklaştırılmıştır. Bulgular EFP uygun çalışma koşullarını seçerek MAS verimli bir şekilde tatbik edilebilir olduğunu göstermişlerdir.

Saatçi ve Hanay (2012) biyolojik arıtıma dirençli olan indigo boyaması yapan tekstil endüstrisi atıksuyunda renk giderimi için elektro-Fenton yönteminin kullanımını incelemiştir. Atıksuda en iyi renk giderimini sağlamak amacıyla sistemde elektriksel akım uygulaması ile farklı pH seviyelerinde, değişen  $\text{Fe}^{2+}$  konsantrasyonlarında ve farklı  $H_2O_2$  dozajlarında deneyler gerçekleştirmişlerdir. Farklı başlangıç pH seviyelerinde çalışılan deney serilerinde  $\text{pH}=4$  için elde edilen renk giderimi %100 olarak bulunmuştur. Ayrıca ortama ilave edilen  $H_2O_2$  dozajı optimize edilerek ve  $\text{pH}=4'$ de çözünen Fe konsantrasyonuna göre Fe :  $H_2O_2$  molar oranı 1: 73 olarak belirlemişlerdir.

Atmaca ve ark. (2009), katı atık depo sızıntı sularının elektro-Fenton prosesi ile arıtımını çalışmışlardır. 45 dakikalık oksidasyon süresi sonunda, pH 2–4 aralığında yaptıkları çalışmada, optimum pH'nın 3 olduğunu ve daha düşük ve daha yüksek pH'larda verimin azaldığını bulmuşlardır. 1–3 A akım şiddetlerinde yaptıkları deneylerde ise, optimum akım şiddetinin 2 A olduğunu ve daha şiddetli akımlarda verimde ciddi bir artış olmadığını tespit etmişlerdir. Başlangıç  $H_2O_2$  konsantrasyonları için 250–2500 mg/L aralığında yaptıkları çalışmada ise, optimum konsantrasyon olarak 2000 mg/L olduğunu ve artan  $H_2O_2$  konsantrasyonunda ciddi bir verim artışı olmadığını belirlemişlerdir. Elektrotlar arası mesafe için 1–4 cm aralığında yaptıkları çalışmada ise, en yüksek verimin 3 cm' lik mesafede elde edildiğini bulmuşlardır.

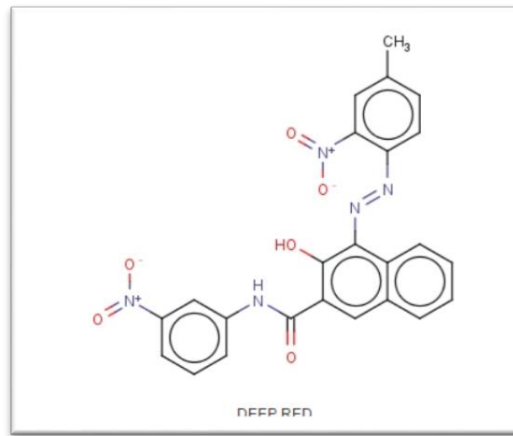
De Francesco ve Costamagna (2004), elektrokimyasal yöntemler ve elektro-Fentonla ilgili çalışmaların kullanılabilirliğinden bahsederek, bunları endüstriyel ölçekte kullanılması için reaktörlerin tasarımı ve fizibilite çalışması üzerinde durmuşlardır. Endüstriyel ölçekteki reaktörlerin tasarımı için en önemli parametreler; akım yoğunluğu, voltaj, reaksiyon kinetiği ve verim olarak sıralanmıştır. Bununla birlikte fizibilite için denge potansiyeli, akım ve deneysel kinetik verilerin önemi de belirtilmiştir. 60 ppm'lik bir kirliliği ortamdan elimine edebilmek için 300 GJ/m enerji gereklidir. Atıksulardaki belirli düzeydeki kirletici konsantrasyonunun belirli debide arıtılabilmesi için elektrot yüzeyi bakımından çeşitli elektrokimyasal prosesler arasında dikkati çeken bir farklılık göstermektedir.

Sheng ve Chih (2000) sızıntı suyu ile yaptıkları kimyasal koagülasyon sonrası elektro-Fenton çalışmasında 23 dakika gibi kısa bir sürede, teorik H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dozunun % 37'sini kullanarak % 68 oranında KOİ giderme verimine ulaşmışlardır.

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Boyar Madde

Deneysel çalışmada bir tekstil firmasından temin edilen Deep Red boyarmaddesi kullanılmıştır. Deep Red azo boyarmaddeler sınıfına girmektedir. Azo boyarmaddeler yapılarındaki kromofor grup olan azo (-N=N-) grubu ile karakterize edilir. Bu boyarmaddenin kimyasal yapısı Şekil 4.1 'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Deep Red'in kimyasal yapısı (Anonim, 2015)

Çizelge 4.1'de Deep Red boyar maddesinin bazı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deep Red boyarmaddesinin özellikleri (Anonim, 2015)

|                         |   |
|-------------------------|---|
| <b>İsmi</b>             | 2-Naftalinkarboksiamid,3-hidroksi-4-[2-(4- metil-2- nitrofenil)diazenil]-N-(3-nitrofenil)-      |
| <b>Iupac ismi</b>       | (4Z)-4-[(4-metill-2-nitrofenil )hidrozinlidin]-N- (3-nitrofenil)- 3-oksinaftalin-2-karboksiamid |
| <b>Molekül formülü</b>  | C <sub>24</sub> H <sub>17</sub> N <sub>5</sub> O <sub>6</sub>                                   |
| <b>Molekül ağırlığı</b> | 471,42 g/mol  |
| <b>Yoğunluk</b>         | 1,45 g/cm <sup>3</sup>  |

#### 4.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Çözeltinin Hazırlanması ve Boya Analizi

1 g Deep Red tartılıp üzerine 1000 mL'ye kadar saf su ilave edilerek 1000 ppm 'lik stok çözelti hazırlandı. Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan çözeltiler stok çözeltinin seyreltilmesiyle elde edildi.

Boya analizi UV Spektrofotometre kullanılarak yapıldı. Bu amaçla önce boyanın en yüksek absorpsiyon gösterdiği dalga boyu belirlendi ve ardından bu dalga boyunda 10-60 mg/L derişim aralığında hazırlanan çözeltilerle kalibrasyon işlemi yapıldı.



Şekil 4.2. Kalibrasyon için 10-60 mg/L derişim aralığında hazırlanan çözeltiler

#### 4.3. Mikroelektroliz Deney Düzenegi

Mikroelektroliz yöntemi ile boyarmadde giderimi için kurulan deney düzenegi Şekil 4.3 'te gösterilmiştir.

Mikroelektroliz deney düzenegi cam reaktör, boya çözeltisinin pompalanması için kullanılan peristaltik pompa ve hava pompasından oluşmaktadır. Deep Red boyarmaddesi bir tekstil fabrikasından ve demir talaşı metal doğrama atölyesinden temin edildi. Granül aktif karbonun (Picacarb 830, Pica) elek analizi yapıldı ve deneylerde 200 meshlik kısmı kullanıldı.





**Şekil 4.3.** Mikroelektroliz yöntemi ile Deep Red giderimi deney düzeneği

Demir talaşı ve granül aktif karbon (GAC) reaktöre doldurulmadan önce bazı ön işlemlere tabi tutuldu. Demir talaşı önce 0,1 M 'lık NaOH çözeltisi ile daha sonrada 0,1 M'lık HCl çözeltisi ile yıkandı.Sonrasında distile su ile yıkanarak süzöldü ve etüvde 105 °C' de kurutuldu. Aktif karbonda saf su ile yıkandıktan sonra kuruması için etüve konuldu. Etüvden alınan aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesini gidermek için reaktöre doldurmadan önce 200 mg/L 'lik boyarmadde çözeltisi ile doyuruldu.

Cam reaktöre önce çözelti besleme girişi yüksekliğine kadar raschig halkaları konuldu. Sonrasında ticari granül aktif karbon ve demir talaşı hacim oranı 1:1 olacak şekilde kolona dolduruldu ve kolon mikroelektroliz işlemine hazır hale getirildi.

pH ayarı 0,1 M HCl çözeltisi ve iletkenlik ayarı için Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> özeltisi kullanıldı. Belirli derişimde stok çözeltiden seyreltilerek hazırlanan Deep Red çözeltisi bir peristaltik pompa aracılığıyla kolona beslendi. Bir akvaryum pompası ile kolona sürekli hava beslendi. 15' er dakika aralıklarla çözelti kabından numune alınarak UV Spektrofotometrede Deep Red derişimi belirlendi.

### **4.3.1. Mikroelektroliz deneylerinin yapılışı**

Deneyselerde öncelikle GAC'nin boyayı adsorplama kapasitesi, dolgu maddesi türü, çözelti derişimi, pH, elektriksel iletkenlik ve besleme hızları parametreleri kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir

#### **4.3.1.1. Granül aktif karbonun boyayı adsorplama kapasitesi**

##### ***Kesikli Adsorpsiyon Deneyleri***

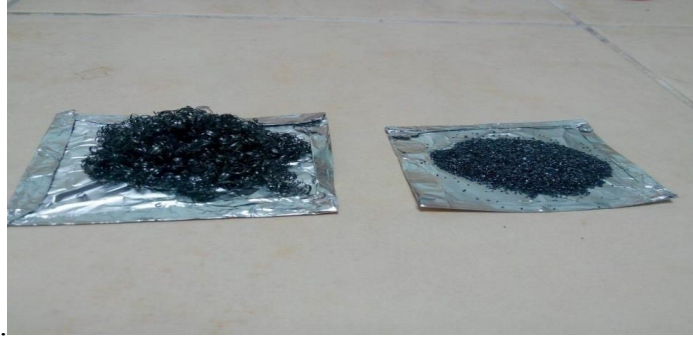
Deneysel çalışmaların ilk kısmında kullanılan granül aktif karbonun boyayı adsorpsiyon kapasitesi belirlendi. Stok çözülden 100 mg/L' lik pH değeri 3 olan çözelti hazırlandı. 200 mL lik iki adet erlene bu çözülden konularak 1g granül aktif karbon ilave edildi. Daha sonra 25 °C' deki çalkalayıcılı su banyosuna yerleştirildi ve belirli zaman aralıkları ile örnekler alınarak ölçümler yapıldı.

##### ***Kesikli Geri Dolaşımli Adsorpsiyon Deneyleri***

Kolon deneylerinde ise cam reaktöre 7 g granül aktif karbon dolduruldu. Peristaltik pompa ile 50-100 ve 200 mg/L derişimde pH' ı 3 olarak hazırlanan boya çözeltileri reaktörün altından verildi. Reaktöre hava beslemesi yapıp pompa hızı 30 rpm olarak ayarlandıktan sonra deneyler gerçekleştirildi. Belirli zaman aralıkları ile örnek alındı. Alınan bu numunelerin derişimleri okundu.

#### **4.3.1.2. Dolgu maddesi**

Dolgu maddesi olarak spiral demir talaşı, toz demir talaşı ve aktif karbon kullanıldı. Cam kolonun alt kısmı besleme çözeltisi seviyesine kadar cam Raschig halkaları ile doldurulduktan sonra üzerine granül aktif karbonla (C) hacim oranı 1:1 olacak şekilde spiral demir (Fe) talaşı karışımı yerleştirildi. Ayrıca AC ve toz demir talaşı karışımı hacim oranı 1:1 olacak şekilde reaktöre dolduruldu



**Şekil 4.4.** Dolgu maddesi olarak kullanılan spiral ve toz demir talaşı

#### **4.3.1.3.Çözelti derişimi**

Hacim oranı 1:1 olan aktif karbon (AC) ile spiral demir (Fe) talaşı karışımı ve aktif karbon (AC) ile toz demir (Fe) talaşı karışımı reaktöre doldurularak çözelti derişim deneyleri iki aşamada gerçekleştirildi. Çözelti derişiminin boyar madde giderimi üzerindeki etkisi şu şekilde incelendi. 1 g/L olarak hazırlanan stok çözülden seyreltilerek 50-100-200 mg/L 'lik çözümler elde edildi. Çözümlerin pH değeri HCl ilavesi ile 3 olarak ayarlandı. Besleme hızı 30 rpm olarak ayarlandıktan sonra sırasıyla 50-100-200 mg/L'lik çözümler reaktöre beslenerek deneylere başlandı. Her 15 dakikada bir çözeltinin rengi açılıncaya kadar kuvetlere numune alındı. Alınan bu numunelerin derişimleri UV Spektroskopi cihazında okundu. Deneyin ikinci aşamasında kolona granül aktif karbonla (AC) hacim oranı 1:1 olacak şekilde toz demir (Fe) talaşı karışımı yerleştirildi. 1 g/L olarak hazırlanan stok çözülden seyreltilerek 50-100-150-200 mg/L 'lik çözümler hazırlandı. Aynı işlemler tekrarlanarak renk giderimi gözlemlendi.



**Şekil 4.5.** Dolgu maddesi aktif karbon ve toz demir talaşı olan reaktörde farklı boya derişimlerinde renk giderimi

#### **4.3.1.4.pH**

Hacim oranı 1:1 olan AC- spiral demir (Fe) talaşı karışımı ve AC-toz demir talaşı karışımı reaktöre doldurularak pH deneyleri iki aşamada gerçekleştirildi. pH değerinin boyar madde giderimi üzerindeki etkisi şu şekilde incelendi.

Altı ayrı erlene stok çözülden 20 mL alınıp 200 mL'ye saf su ile seyreltilerek 100 mg/L 'lik çözeltiler elde edildi. 100 mg/L 'lik çözeltilerin pH değeri HCl ilavesi ile 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 olarak ayarlandı. Reaktöre hava beslemesi yapıp pompa hızı 30 rpm olarak ayarlandıktan sonra deneyler gerçekleştirildi. Her 15 dakikada bir çözeltinin rengi açılıncaya kadar küvetlere numune alındı. Alınan bu numunelerin derişimleri UV Spektroskopi cihazında okundu.

#### **4.3.1.5.Elektriksel iletkenlik**

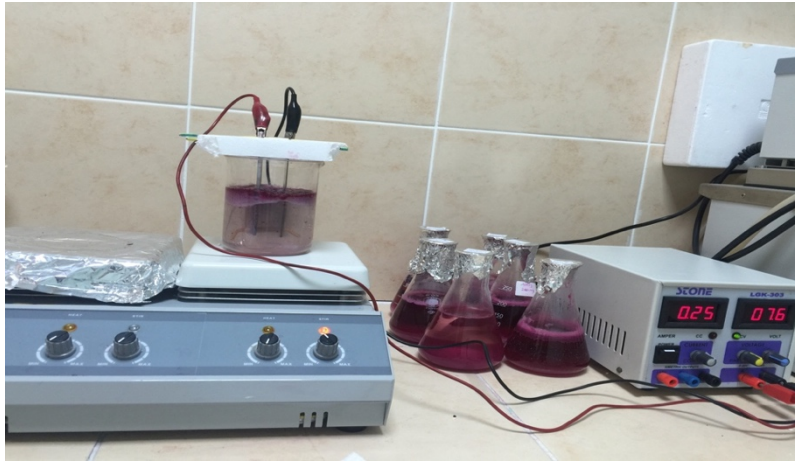
Reaktör dolgu maddesi toz demir talaşı ile aktif karbon olan sistemde pompa hızı 30 rpm, pH değeri 3 ve çözelti derişimi 100 mg/L olan çözeltilerin elektriksel iletkenlikleri sırasıyla 3 mS/cm, 6 mS/cm, 8 mS/cm ve 11 mS/cm olarak ayarlandı ve giderime olan etkisi incelendi.

#### **4.3.1.6.Besleme hızı**

Dört ayrı erlene stok çözülden 20 mL alınıp 200 mL 'ye saf su ile seyreltilerek 100 mg/L 'lik çözeltiler elde edildi. Hazırlanan çözeltinin HCl ilavesi ile pH değeri 3 olarak ayarlandı. Reaktöre hava beslemesi yapıp pompa hızı sırasıyla 10 rpm, 20 rpm, 30 rpm ve 40 rpm hızına ayarlanarak deneyler gerçekleştirildi. Her 15 dakikada bir çözeltinin rengi açılıncaya kadar küvetlere numune alındı. Alınan bu numunelerin derişimleri UV Spektroskopi cihazında okundu.

#### 4.4. Elektrokoagülasyon Deney Düzeneği

EC deneyleri aşağıdaki şekilde gösterilen deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir.



şekil 4.6. EC deney düzeneği

Deneyisel çalışmalarda akım ve voltaj kontrolü güç kaynağı ile sağlanmıştır. Karıştırma işlemi karıştırıcıda gerçekleştirilmiştir. EC deneylerinde kullanılan reaktör 250 mL' lik beher ve elektrot bağlantı sisteminden oluşmaktadır. Elektrot bağlantı sisteminde elektrotlar arası mesafe  $cm^2$  olarak tasarlanmıştır. Elektrot materyalinin boyutları  $5*6 cm^2$ ' dir. Deneylerde  $60 cm^2$  aktif yüzey alanına sahip alüminyum ve demir plakalar kullanılmıştır.

##### 4.4.1. Elektrokoagülasyon deneylerinin yapılışı

Bütün deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her bir deneyde elektrolitik hücreye 250 mL Deep Red içeren ozelti eklenmiştir. Elektrotlar tasarlanan elektrot bağlantı sistemine yerleştirildikten sonra elektroliz işlemine başlanmıştır. Elektroliz işlemi ile eş zamanlı olarak hızlı karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney ncesi elektrotların yüzeyleri zımparalanmış ve saf su ile yıkanmış, her deneyden sonra demir ve alüminyum elektrotların yüzeyinde birikebilecek olan kalıntılar saf su ile yıkanmıştır



**Şekil 4.7.** Arıtım sonrası elektrotların durumu

#### **4.4.2. Elektrokoagülasyon prosesinin verimini etkileyen parametreler**

##### **4.4.2.1. Elektrot tipi**

Yapılan çalışmada elektrokoagülasyon için önemli olan 2 elektrot tipi için karşılaştırma yapılmıştır. Bu amaçla Demir-Demir ve Alüminyum-Demir elektrot çiftleri ayrı ayrı kullanılmıştır. Sonuçlara bağlı olarak çalışılan boyar maddeli atık su için alüminyum-demir elektrotların demir-demir elektroda oranla daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Çalışmanın takip eden adımlarına daha yüksek verimli sonuçlar elde edildiği için alüminyum elektrotlar kullanılarak devam edilmiştir.

##### **4.4.2.2.pH**

EC verimi üzerine pH değerinin etkisini belirlemek amacıyla koagülant olarak Al ve Fe elektrot bağlantıları kullanılarak, elektroliz süresinin 90 dk, başlangıç akım yoğunluğunun  $25 \text{ A/m}^2$  seçilen şartlarda farklı pH değerlerinde (pH 6,35 (orijinal pH), 5, 4, 3, 2) deneyler gerçekleştirilmiştir.

#### **4.4.2.3. Elektriksel iletkenlik**

EC verimi üzerine elektriksel iletkenliğin etkisini belirlemek amacıyla paralel bağlı Al ve Fe elektrot bağlantıları kullanılarak, ilk aşamada belirlenen optimum pH değerlerinde ve pH ile voltaj (5V) sabit tutularak, elektriksel iletkenliği sağlayacak  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve NaCl tuzları kullanılmıştır.

Destek elektrolit olarak  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  belirlendikten sonra EC üzerine elektriksel iletkenliğin etkisini belirlemek amacıyla Al ve Fe elektrot bağlantıları kullanılarak, ilk aşamada belirlenen optimum pH değerlerinde ve pH ile voltaj (5V) sabit tutularak, elektriksel iletkenliği sağlayacak farklı miktarlarda  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ile (0,15625; 0,3125; 0,625 ve 1,25 g) deneyler gerçekleştirilmiştir.

#### **4.4.2.4. Gerilim değeri optimizasyonu**

EC verimi üzerine voltajın etkisini belirlemek amacıyla paralel bağlı Al ve Fe elektrot bağlantıları kullanılarak, ilk aşamada belirlenen optimum pH değerlerinde ve elektriksel iletkenlikte ve farklı voltaj değerlerinde (5; 7,5; 10 V) deneyler gerçekleştirilmiştir.

#### **4.4.2.5. Derişim optimizasyonu**

Elektrokoagülasyon prosesinde derişimin etkisini incelemek amacıyla 50-150 mg/L derişim aralığında, sabit 7,5 V gerilimde ve pH:2'de gerçekleştirilmiştir.

### **4.5. Elektro-Fenton Deney Düzenegi**

EF deneyleri de EC deneylerinin yapıldığı deney düzenegine benzer bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda akım ve voltaj kontrolü güç kaynağı ile sağlanmıştır. Karıştırma işlemi karıştırıcı ile gerçekleştirilmiştir. EF deneylerinde kullanılan reaktör 250 mL'lik beher ve elektrot bağlantı sisteminden oluşmaktadır. Elektrot bağlantı sisteminde elektrotlar arası mesafe 1cm olarak tasarlanmıştır. Elektrot materyalinin boyutları 5\*6 cm'dir. Deneylerde 60 cm<sup>2</sup> aktif yüzey alanına sahip demir

plakalar kullanılmıştır. Reaktörde her bir deney için 250 ml atıksu numunesi kullanılmıştır.



**Şekil 4.8.** EF deney düzeneği

#### **4.5.1. Elektro-Fenton deneyinin yapılışı**

Bütün deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her bir deneyde elektrolitik hücreye 250 mL Deep Red içeren çözelti eklenmiştir. Elektrotlar tasarlanan elektrot bağlantı sistemine yerleştirildikten sonra elektroliz işlemine başlanmıştır. Elektroliz işlemi ile eşzamanlı olarak hızlı karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney öncesi elektrotların yüzeyleri zımparalanmış ve saf su ile yıkanmış, her deneyden sonra demir elektrotların yüzeyinde birikebilecek olan kalıntılar saf su ile yıkanmıştır. Elektroliz işlemi devam ederken tüm deneylerde % 35' lik  $H_2O_2$  (Merck) çözeltisi ilave edilmiştir.  $H_2O_2$  ilave edilerek  $OH^\cdot$  radikallerinin üretimi sağlanmıştır. pH ayarlamaları için HCl çözeltisi kullanılmıştır. İletkenlik sağlamak için  $Na_2SO_4$  kullanılmıştır.



#### **4.5.2.Elektro-Fenton prosesinin verimini etkileyen parametreler**

Bu çalışma kapsamında en iyi arıtma verimini elde etmek için yapılan deneyler sonucu uygulanan optimizasyon çalışmaları aşağıdaki gibidir;

##### **4.5.2.1.Aritma süresi**

Çalışma kapsamında Elektro-Fenton prosesinin en etkili olduğu pH değeri olan pH 3’de, farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında 5, 10, 15, 20, 25 dk’lık reaksiyon sürelerinde çalışılmıştır.

##### **4.5.2.2. pH optimizasyonu**

Çalışma kapsamında süre 25 dk, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dozu 25 mM’ye ayarlanarak pH 2 ve 5 aralığında denenmiş ve en uygun pH belirlenmeye çalışılmıştır.

##### **4.5.2.3. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dozu optimizasyonu**

Çalışma kapsamında süre 25 dk ve pH 3’te sabit tutularak, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dozu 25-100 mM aralığında denenmiş ve en uygun H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dozu belirlenmeye çalışılmıştır.

##### **4.5.2.4. Gerilim değeri optimizasyonu**

Çalışma kapsamında süre 25 dk, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dozu 25mm’ye ayarlanarak gerilim değeri 5 V ile 12,5 V aralığında denenmiş ve en uygun gerilim değeri belirlenmeye çalışılmıştır.

#### **4.6. Hesaplamalarda Kullanılan Eşitlikler**

Deep Red giderim verimi aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır:

$$Giderim (\%) = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Burada C<sub>0</sub> ve C sırasıyla t=0 ve t anındaki mg/L olarak boya derişimidir.

Enerji tüketimi ise:

$$Enerji Tüketimi (Wh/L) = E.I.t/V \quad (4.2)$$

eşitliğinden hesaplanacaktır. Burada E, uygulanan gerilim (V); I, akım şiddeti (A); t, zaman (h) ve işlem gören boya çözelti hacmidir (L).

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde adsorpsiyon, mikroeletroliz, elektrokoagülasyon ve elektro-Fenton yöntemleri ile yapılan deneylerin sonuçları verilmiştir.

### 5.1. Adsorpsiyon deneylerinin sonuçları

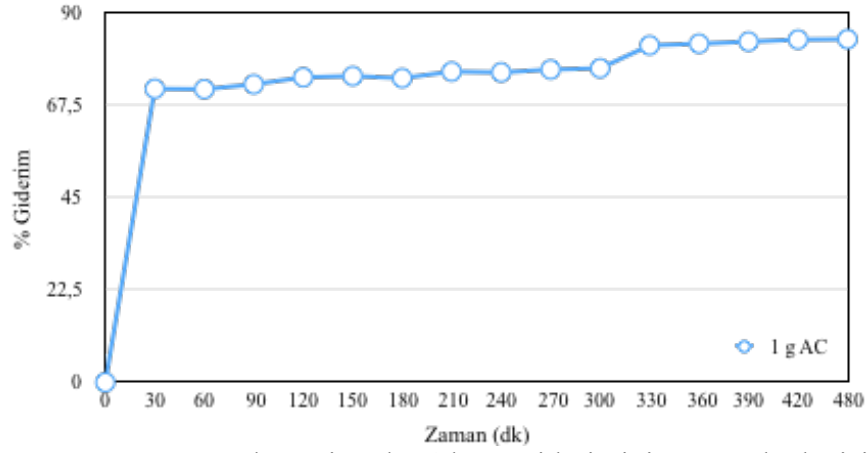
Çizelge 5.1 ve Şekil 5.1.' de kesikli adsorpsiyon deneyleri için zamana karşı yüzde boya giderimi değerleri verilmiştir. Çizelge 5.2, 5.3, 5.4 ve Şekil 5.2.' de ise granül aktif karbonla doldurulmuş kolonda kesikli geri dolaşımli adsorpsiyon deneyleri için farklı boya derişimlerdeki zamanla % boya giderimindeki değişim verilmiştir.

**Çizelge 5.1.** Kesikli adsorpsiyon deney sonuçları  
(Co: 100 mg/L, V: 200 mL, m: 1 g AC, pH: 3)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Adsorplama Kapasitesi (mg/g) |
|------------|----------------|-------------|------------------------------|
| 0          | 100            | 0           | 0                            |
| 30         | 28,40          | 71,6        | 28,7                         |
| 60         | 28,46          | 71,5        | 28,6                         |
| 90         | 27,29          | 72,7        | 29,1                         |
| 120        | 25,53          | 74,4        | 29,8                         |
| 150        | 25,23          | 74,7        | 29,9                         |
| 180        | 25,79          | 74,2        | 29,7                         |
| 210        | 24,19          | 75,8        | 30,3                         |
| 240        | 24,39          | 75,6        | 30,2                         |
| 270        | 23,69          | 76,3        | 30,5                         |
| 300        | 23,35          | 76,6        | 30,6                         |
| 330        | 17,76          | 82,2        | 32,9                         |
| 360        | 17,32          | 82,6        | 33,1                         |
| 390        | 16,83          | 83,1        | 33,2                         |
| 420        | 16,34          | 83,6        | 33,4                         |
| 480        | 16,30          | 83,7        | 33,5                         |

Adsorpsiyonla aktif karbonun yüzde boya giderimi Şekil 5.1.' de görüldüğü gibi

ilk 30 dakikada ani olarak artış göstermiştir ve boya giderimi % 84,7' ye kadar çıkmıştır.



**Şekil 5.1.** Adsorpsiyonla % boya gideriminin zamanla değişimi  
( Co: 100 mg/L, V: 200 ml, m: 1 g AC, pH:3)

**Çizelge 5.2.** 50 mg/L boya çözeltisi ile yapılan kesikli geri dolaşımli adsorpsiyon deneyleri  
(Akış Hızı: 11,5 mL/s, V: 250 mL, pH: 3, Dolgu Maddesi: GAC)

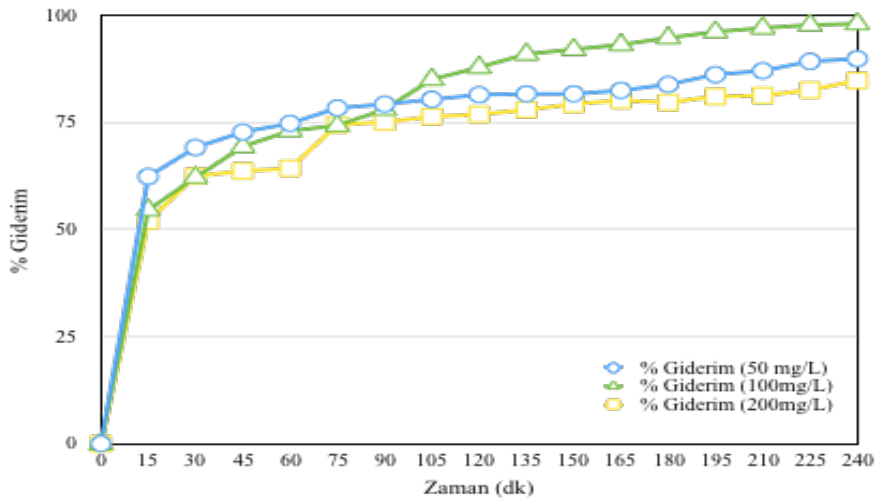
| Zaman (dk) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) |
|------------|----------------|-------------|
| 0          | 50             | 0           |
| 15         | 18,78          | 62,4        |
| 30         | 15,39          | 69,2        |
| 45         | 13,58          | 72,8        |
| 60         | 12,59          | 74,8        |
| 75         | 10,77          | 78,4        |
| 90         | 10,31          | 79,3        |
| 105        | 9,76           | 80,4        |
| 120        | 9,24           | 81,5        |
| 135        | 9,14           | 81,7        |
| 150        | 9,12           | 81,7        |
| 165        | 8,70           | 82,5        |
| 180        | 8,03           | 83,9        |
| 195        | 6,89           | 86,2        |
| 210        | 6,43           | 87,1        |
| 225        | 5,31           | 89,3        |
| 240        | 5,01           | 89,9        |

**Çizelge 5.3.** 100 mg/L boya çözültüsü ile yapılan kesikli geri dolaşımli adsorpsiyon deneyleri (Akış Hızı: 11,6 mL/s, V: 250 mL, pH: 3, Dolgu Maddesi: Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/L) | % Giderim |
|------------|----------------|-----------|
| 0          | 100            | 0         |
| 15         | 45,36          | 54,6      |
| 30         | 37,75          | 62,2      |
| 45         | 30,52          | 69,4      |
| 60         | 26,84          | 73,1      |
| 75         | 25,69          | 74,3      |
| 90         | 21,93          | 78,1      |
| 105        | 14,91          | 85,1      |
| 120        | 12,05          | 87,9      |
| 135        | 8,98           | 91,0      |
| 150        | 7,92           | 92,1      |
| 165        | 6,75           | 93,2      |
| 180        | 5,10           | 94,8      |
| 195        | 3,79           | 96,2      |
| 210        | 2,89           | 97,1      |
| 225        | 2,18           | 97,8      |
| 240        | 1,88           | 98,1      |

**Çizelge 5.4.**200 mg/L boya çözeltisi ile yapılan kesikli geri dolaşimli adsorpsiyon deneyleri (Akış Hızı: 11,1 mL/s, V: 250 mL, pH: 3, Dolgu Maddesi: AC)

| Zaman (dk) | Derişim(mg/L) | % Giderim |
|------------|---------------|-----------|
| 0          | 200           | 0         |
| 15         | 95,9          | 52,0      |
| 30         | 74,9          | 62,5      |
| 45         | 72,4          | 63,7      |
| 60         | 71,2          | 64,3      |
| 75         | 50,8          | 74,5      |
| 90         | 49,6          | 75,1      |
| 105        | 47,1          | 76,4      |
| 120        | 46,1          | 76,9      |
| 135        | 43,8          | 78,0      |
| 150        | 41,3          | 79,3      |
| 165        | 39,4          | 80,2      |
| 180        | 40,4          | 79,7      |
| 195        | 37,6          | 81,1      |
| 210        | 37,2          | 81,3      |
| 225        | 34,7          | 82,6      |
| 240        | 30,2          | 84,8      |



**Şekil 5.2.**Kesikli geri dolaşimli adsorpsiyonla % boya gideriminin zamanla değişimi (Akış Hızı: 11,4 mL/s, V: 250 mL, pH: 3, Dolgu Maddesi: AC)

En iyi boya giderimi Şekil 5.2.' de görüldüğü gibi 100 mg/L çözelti derişiminde 240 dakikada %98 olarak elde edilmiştir.

## 5.2. Mikroelektroliz Deneylerinin Sonuçları

Spiral demir talaşı-granül aktif karbon (Fe/AC) ve toz demir talaşı-granül aktif karbon (Fe/AC) karışımlarının ME reaktörü dolgusu olarak kullanıldığı deneylerde boya derişiminin (50-100-150-200 mg/L), çözelti pH değerinin (1-6), çözelti iletkenlik değerinin (3-11 mS/cm) ve çözelti besleme hızının (10-40 rpm) boya giderim yüzdesine etkileri incelenerek çizelgeler halinde verilmiştir

Spiral demir talaşı-aktif karbon dolgu maddesi kullanılan reaktörde, Çizelge 5.5, 5.6 ve Şekil 5.3.' de farklı boya derişimleri için zamana karşı yüzde boya giderimi, Çizelge 5.11, 12, 13, 14, 15, 16 ve Şekil 5.5.'de farklı pH değerlerinde zamana karşı yüzde boya giderimi gösterilmiştir. Toz demir talaşı-aktif karbon dolgu maddesi kullanılan reaktörde, Çizelge 5.7, 8, 9, 10 ve Şekil 5.4' de farklı boya derişimi için zamana karşı yüzde boya giderimi, Çizelge 5.17, 18, 19, 20, 21, 22 ve Şekil 5.6' da farklı pH değerlerinde zamana karşı yüzde boya giderimi, Çizelge 5.23, 24, 25, 26 ve Şekil 5.7' de farklı elektriksel iletkenlik değerleri için zamana karşı yüzde boya giderimi, Çizelge 5.27, 28, 29, 30 ve Şekil 5.8' de farklı besleme hızlarında zamana karşı yüzde boya giderimi gösterilmiştir.

### 5.2.1. Boya derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları

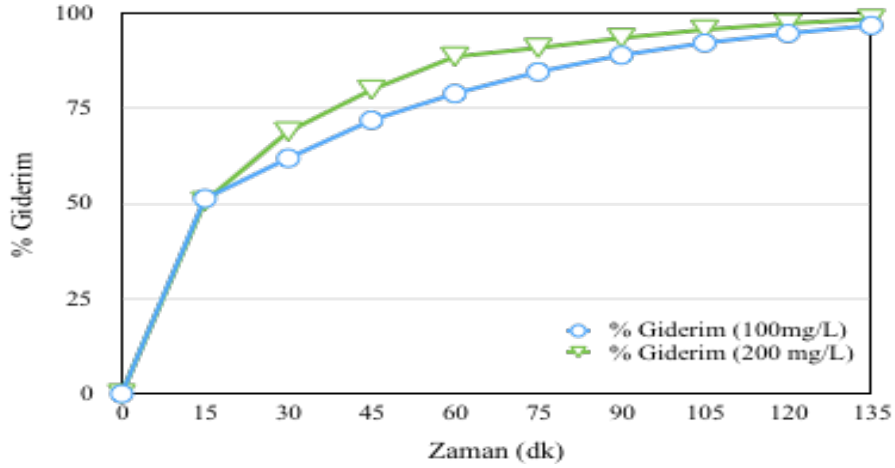
Çizelge 5.5, 6 ve Şekil 5.3.' de farklı derişimler için dolgu maddesi spiral demir talaşı-aktif karbon olan reaktörde mikroelektroliz yöntemiyle yüzde boya giderimi, Çizelge 5.7, 8, 9, 10 ve Şekil 5.4.' de farklı derişimler için dolgu maddesi toz demir talaşı-aktif karbon olan reaktörde mikroelektroliz yöntemiyle yüzde boya giderimi gösterilmiştir.

**Çizelge 5.5.** 100 mg/L boya derişimi ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları(Akış Hızı:10,8 mL/s, V: 250 mL, pH: 3, m: 15 mL Demir ve Aktif Karbon, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim(mg/L) | % Giderim |
|------------|---------------|-----------|
| 0          | 100           | 0         |
| 15         | 48,65         | 51,3      |
| 30         | 38,01         | 61,9      |
| 45         | 28,09         | 71,9      |
| 60         | 21,05         | 78,9      |
| 75         | 15,35         | 84,6      |
| 90         | 10,99         | 89,0      |
| 105        | 7,71          | 92,2      |
| 120        | 5,29          | 94,7      |
| 135        | 3,13          | 96,8      |

**Çizelge 5.6.** 200 mg/L boya derişimi ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları(Akış Hızı: 10,8 mL/s, V: 250 mL, pH: 3, m: 15 mL Demir ve Aktif Karbon, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/L) | % Giderim |
|------------|----------------|-----------|
| 0          | 200            | 0         |
| 15         | 98,62          | 50,6      |
| 30         | 62,05          | 68,9      |
| 45         | 40,20          | 79,9      |
| 60         | 22,77          | 88,6      |
| 75         | 18,06          | 90,9      |
| 90         | 12,81          | 93,5      |
| 105        | 8,41           | 95,7      |
| 120        | 5,25           | 97,3      |
| 135        | 2,93           | 98,5      |



**Şekil 5.3.** Farklı derişim değerleri için zamana karşı % giderim değerleri (Akış Hızı: 11,4 mL/s, V: 250 mL, pH: 3, Dolgu Maddesi:Spiral Demir Talaşı- Aktif Karbon)

Derişim arttıkça boya giderimi Şekil 5.3.' de görüldüğü gibi bir miktar artış sağlanmıştır.

**Çizelge 5.7.** 50 mg/L boya derişiminde % giderim değerleri (Akış Hızı: 10,9 mL/s, V: 200 mL, pH 3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 50              | 0         |
| 15         | 10,07           | 79,8      |
| 30         | 2,00            | 96,0      |
| 45         | 1,04            | 97,9      |
| 60         | 1,16            | 97,6      |

**Çizelge 5.8.** 100 mg/L boya derişiminde % giderim değerleri (Akış Hızı:10,7 mL/s, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 29,53           | 70,4      |
| 30         | 4,56            | 95,4      |
| 45         | 1,42            | 98,5      |
| 60         | 0,98            | 99,0      |

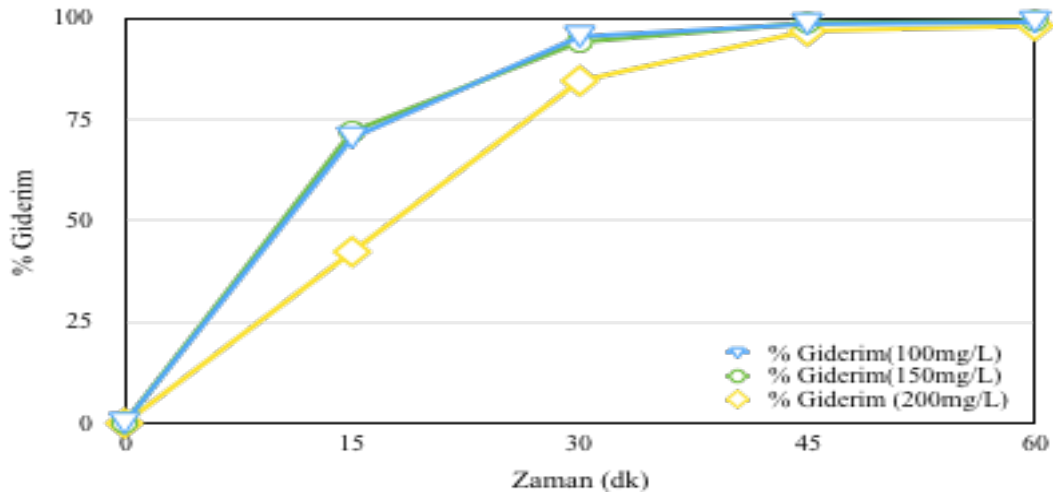


**Çizelge 5.9.** 150 mg/L boya derişiminde % giderim değerleri  
(Akış Hızı:10,1 mL/s, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi:  
Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 150             | 0         |
| 15         | 41,99           | 72,0      |
| 30         | 8,80            | 94,1      |
| 45         | 1,79            | 98,8      |
| 60         | 0,95            | 99,3      |

**Çizelge 5.10.** 200 mg/L boya derişiminde % giderim değerleri  
(Akış Hızı:10,8 mL/s, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi:  
Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 200             | 0         |
| 15         | 115,30          | 42,3      |
| 30         | 30,94           | 84,5      |
| 45         | 6,32            | 96,8      |
| 60         | 3,71            | 98,1      |



**Şekil 5.4.** Farklı derişim değerleri için zamana karşı % giderim değerleri  
(Akış Hızı: 11,4 mL/s, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi:  
Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon)

Farklı boya derişimlerinin Şekil 5.4.'te görüldüğü üzere yüzde boya giderimine çok fazla etkisi olmadığı gözlenmiştir. Ancak ilk 45 dakikaya kadar 200 mg/L boya derişiminde giderim hızı biraz düşük seyretmektedir.

### 5.2.2. pH etkisinin incelendiği deney sonuçları

Çizelge 5.11, 12, 13, 14, 15, 16 ve Şekil 5.5.' de farklı pH değerleri için dolgu maddesi spiral demir talaşı-aktif karbon olan reaktörde mikroeletroliz yöntemiyle yüzde boya giderimi, Çizelge 5.17, 18, 19, 20, 21, 22 ve Şekil 5.6.' da farklı pH değerleri için dolgu maddesi toz demir talaşı-aktif karbon olan reaktörde mikroeletroliz yöntemiyle yüzde boya giderimi gösterilmiştir.

**Çizelge 5.11.** pH:1 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı:11,5 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 13,34           | 86,6      |
| 30         | 12,55           | 87,4      |
| 45         | 12,40           | 87,6      |
| 60         | 10,79           | 89,2      |
| 75         | 10,78           | 89,2      |
| 90         | 10,67           | 89,3      |
| 105        | 10,46           | 89,5      |
| 120        | 9,73            | 90,2      |
| 135        | 9,32            | 90,6      |

**Çizelge 5.12.** pH:2 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları(Akış Hızı:11,2 mL/s,  
Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 46,73           | 53,2      |
| 30         | 41,58           | 58,4      |
| 45         | 41,52           | 58,4      |
| 60         | 40,87           | 59,1      |
| 75         | 38,53           | 61,4      |
| 90         | 36,21           | 63,7      |
| 105        | 32,92           | 67,1      |
| 120        | 29,36           | 70,6      |
| 135        | 27,25           | 72,7      |

**Çizelge 5.13.** pH:3 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları(Akış Hızı:11,2  
mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 45,07           | 54,9      |
| 30         | 36,14           | 63,8      |
| 45         | 25,74           | 74,2      |
| 60         | 19,43           | 80,5      |
| 75         | 14,14           | 85,8      |
| 90         | 10,15           | 89,8      |
| 105        | 7,97            | 92,0      |
| 120        | 5,94            | 94,0      |
| 135        | 3,81            | 96,1      |

**Çizelge 5.14.** pH:4 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı:11,5 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon)

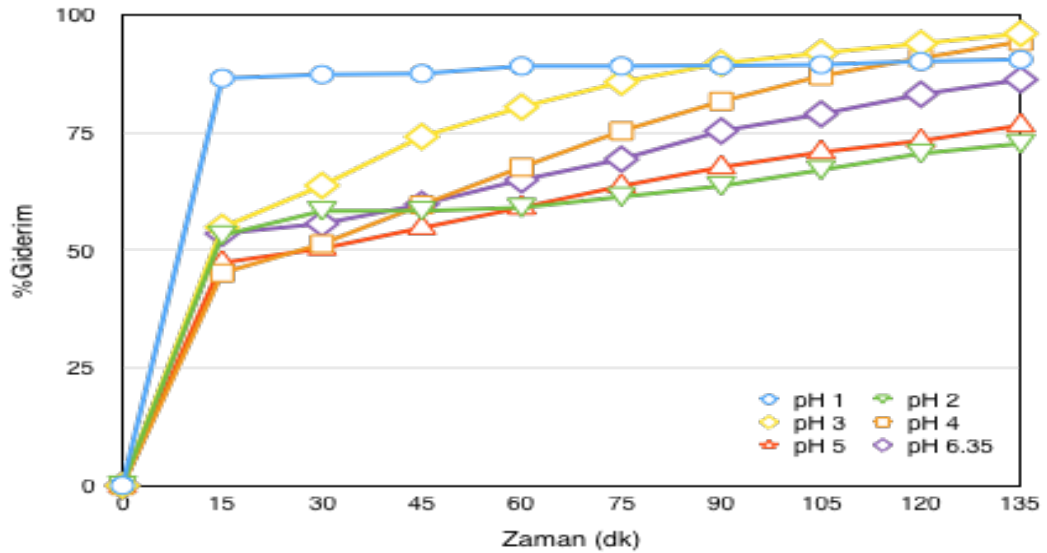
| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 54,79           | 45,2      |
| 30         | 48,58           | 51,4      |
| 45         | 40,26           | 59,7      |
| 60         | 32,23           | 67,7      |
| 75         | 24,51           | 75,4      |
| 105        | 12,93           | 81,7      |
| 105        | 12,93           | 87,1      |
| 120        | 9,08            | 90,9      |
| 135        | 5,51            | 94,4      |

**Çizelge 5.15.** pH: 5 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları(Akış Hızı:11,5 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 52,57           | 47,4      |
| 30         | 49,58           | 50,4      |
| 45         | 45,12           | 54,8      |
| 60         | 40,82           | 59,1      |
| 75         | 36,26           | 63,7      |
| 90         | 32,27           | 67,7      |
| 105        | 29,06           | 70,9      |
| 120        | 26,66           | 73,3      |
| 135        | 23,33           | 76,6      |

**Çizelge 5.16.** pH:6,35 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı:11,5 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 46,32           | 53,6      |
| 30         | 44,27           | 55,7      |
| 45         | 40,11           | 59,8      |
| 60         | 34,98           | 65,0      |
| 75         | 30,53           | 69,4      |
| 90         | 24,58           | 75,4      |
| 105        | 20,98           | 79        |
| 120        | 16,74           | 83,2      |
| 135        | 13,65           | 86,3      |



**Şekil 5.5.** Farklı pH değerleri için zamana karşı % giderim değerleri (Akış Hızı: 11,4 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Spiral Demir Talaşı-Aktif Karbon)

Farklı pH değerlerinde boya giderimi Şekil 5.5.'te görüldüğü üzere pH 3 değerinde 135 daikada en yüksek değeri olan %96' ya ulaşmıştır.

**Çizelge 5.17.** pH:1 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı : 10,2 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi:Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 9,30            | 90,7      |
| 30         | 7,48            | 92,5      |
| 45         | 6,95            | 93,1      |
| 60         | 4,49            | 95,5      |

**Çizelge 5.18.** pH:2 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı : 10,3 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi:Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 17,84           | 82,1      |
| 30         | 8,64            | 91,3      |
| 45         | 4,65            | 95,3      |
| 60         | 3,29            | 96,7      |

**Çizelge 5.19.** pH:3 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı: 10,3 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı- Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 7,72            | 92,2      |
| 30         | 3,14            | 96,8      |
| 45         | 0,94            | 99,0      |
| 60         | 0,85            | 99,2      |

**Çizelge 5.20.** pH:4 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı : 10,3 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı- Aktif Karbon)

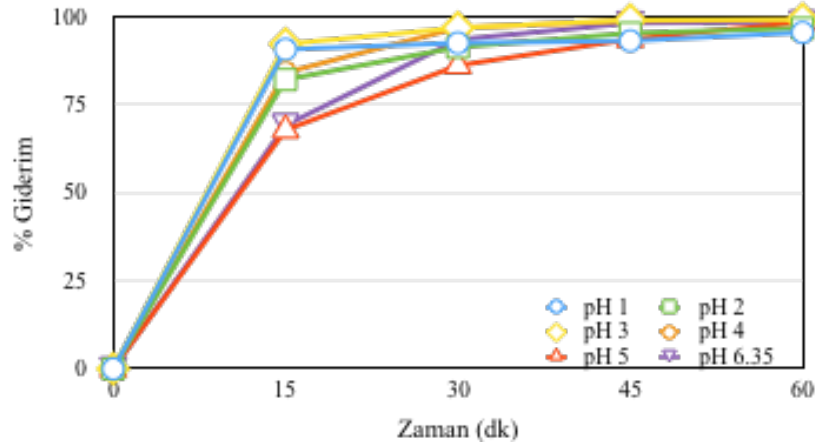
| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 15,81           | 84,1      |
| 30         | 3,11            | 96,8      |
| 45         | 1,20            | 98,8      |
| 60         | 0,79            | 99,1      |

**Çizelge 5.21.** pH:5 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı : 10,2 mL/s, Co:100 mg/L, V:200 mL, Dolgu Maddesi:Toz Demir Talaşı- Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 30,88           | 69,12     |
| 30         | 6,56            | 93,44     |
| 45         | 1,85            | 98,15     |
| 60         | 1,55            | 98,45     |

**Çizelge 5.22.** pH:6,35 ile yapılan mikroeletroliz deney sonuçları (Akış Hızı :10,2 mL/s, Co:100 mg/L, V:200 mL, Dolgu Maddesi:Toz DemirTalaşı- Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 30,88           | 69,12     |
| 30         | 6,56            | 93,44     |
| 45         | 1,85            | 98,15     |
| 60         | 1,55            | 98,45     |



**Şekil 5.6.** Farklı pH değerleri için % giderim değerleri (Akış Hızı: 11,4 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı- Aktif Karbon)

Farklı pH değerlerinde boya giderimi Şekil 5.6.' da görüldüğü üzere pH 3 değerinde en yüksek giderime ulaşmıştır.

### 5.2.3. Elektriksel iletkenliğin etkisinin incelendiği deney sonuçları

Çizelge 5.23, 24, 25, 26 ve Şekil 5.7.' de farklı elektriksel iletkenlik değerleri için dolgu maddesi toz demir talaşı-aktif karbon olan reaktörde mikroeletroliz yöntemiyle yüzde boya giderimi gösterilmiştir.

**Çizelge 5.23.** 3 mS/cm elektriksel iletkenlik için deney sonuçları (Akış Hızı :10,9 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi:Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon )

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 38,31           | 61,6      |
| 30         | 10,51           | 89,4      |
| 45         | 3,05            | 96,9      |
| 60         | 1,34            | 98,6      |
| 75         | 0,83            | 99,1      |



**Çizelge 5.24.** 6 mS/cm elektriksel iletkenlik için deney sonuçları (Akış Hızı :10,9 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı- Aktif Karbon )

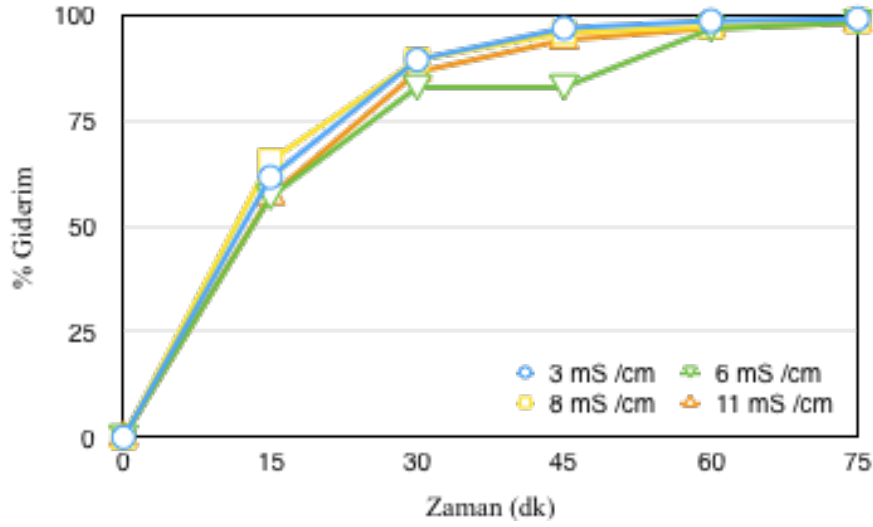
| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 43,07           | 56,9      |
| 30         | 17,09           | 82,9      |
| 45         | 17,09           | 82,9      |
| 60         | 3,27            | 96,7      |
| 75         | 1,76            | 98,2      |

**Çizelge 5.25.** 8 mS/cm elektriksel iletkenlik için deney sonuçları (Akış Hızı :10,3 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı- Aktif Karbon )

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 35,48           | 65,5      |
| 30         | 10,58           | 89,4      |
| 45         | 4,12            | 95,8      |
| 60         | 2,75            | 97,2      |
| 75         | 1,40            | 98,6      |

**Çizelge 5.26.** 11 mS/cm elektriksel iletkenlik için deney sonuçları (Akış Hızı :10,3 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 42,71           | 57,2      |
| 30         | 13,49           | 86,5      |
| 45         | 5,89            | 94,1      |
| 60         | 3,10            | 96,9      |
| 75         | 1,83            | 98,1      |



**Şekil 5.7.** Farklı elektriksel iletkenlik değerleri için zamana karşı % giderim değerleri (Akış Hızı: 11,4 mL/s, Co: 100 mg/L, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon )

Farklı elektriksel iletkenlik değerlerinde boya giderimi Şekil 5.7.' de görüldüğü gibi 3 mS/ cm değerinde yüksek giderime ulaşmıştır.

#### 5.2.4. Besleme hızının etkisinin incelendiği deney sonuçları

Çizelge 5.27, 28, 29, 30 ve Şekil 5.8.' de farklı besleme hızı değerleri için dolgu maddesi toz demir talaşı-aktif karbon olan reaktörde mikroeletroliz yöntemiyle yüzde boya giderimi gösterilmiştir.

**Çizelge 5.27.** 33,1 mL/s besleme hızındaki deney sonuçları (Co:100 mg/L,V:200mL, pH:3,Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 41,25           | 58,7      |
| 30         | 20,48           | 79,5      |
| 45         | 10,65           | 89,3      |
| 60         | 3,53            | 96,4      |
| 75         | 1,35            | 98,6      |

**Çizelge 5.28.** 14,5 mL/s besleme hızındaki deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı Aktif Karbon)

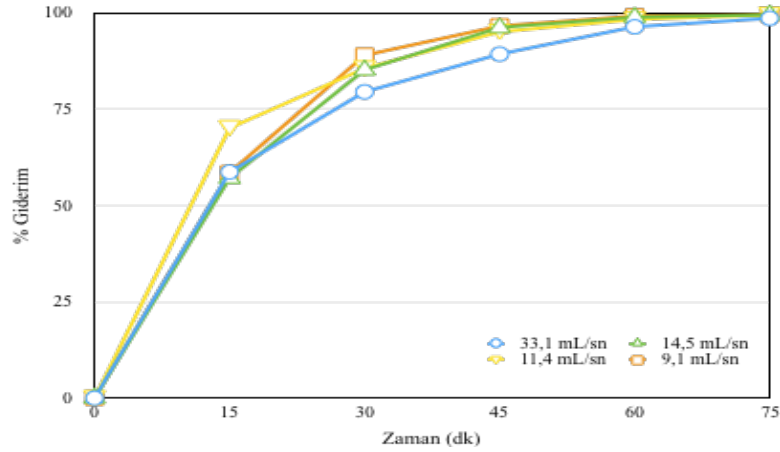
| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 42,93           | 57,1      |
| 30         | 14,76           | 85,2      |
| 45         | 3,74            | 96,2      |
| 60         | 1,08            | 98,9      |
| 75         | 0,43            | 99,5      |

**Çizelge 5.29.** 11,4 mL/s besleme hızındaki deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 29,83           | 70,1      |
| 30         | 14,39           | 85,6      |
| 45         | 4,86            | 95,1      |
| 60         | 1,61            | 98,3      |
| 75         | 0,43            | 99,5      |

**Çizelge 5.30.** 9,1 mL/s besleme hızındaki deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı Aktif Karbon)

| Zaman (dk) | Derişim (mg/ L) | % Giderim |
|------------|-----------------|-----------|
| 0          | 100             | 0         |
| 15         | 41,42           | 58,5      |
| 30         | 10,95           | 89,0      |
| 45         | 3,35            | 96,6      |
| 60         | 0,78            | 99,2      |
| 75         | 0,42            | 99,5      |



**Şekil 5.8.** Farklı besleme hızı değerleri için zamana karşı % giderim değerleri (Co: 100 mg/L, V: 200 mL, pH:3, Dolgu Maddesi: Toz Demir Talaşı-Aktif Karbon)

Farklı besleme hızı değerlerinde boya giderimi Şekil 5.8.' de görüldüğü gibi 33,1 mL/s değerinde en düşük giderime ulaşmıştır. Akış hızı arttıkça yüzde giderim değerleri her bir akış değeri için sabitlenmiştir.

### 5.3. Elektrokoagülasyon İle Yapılan Deney Sonuçları

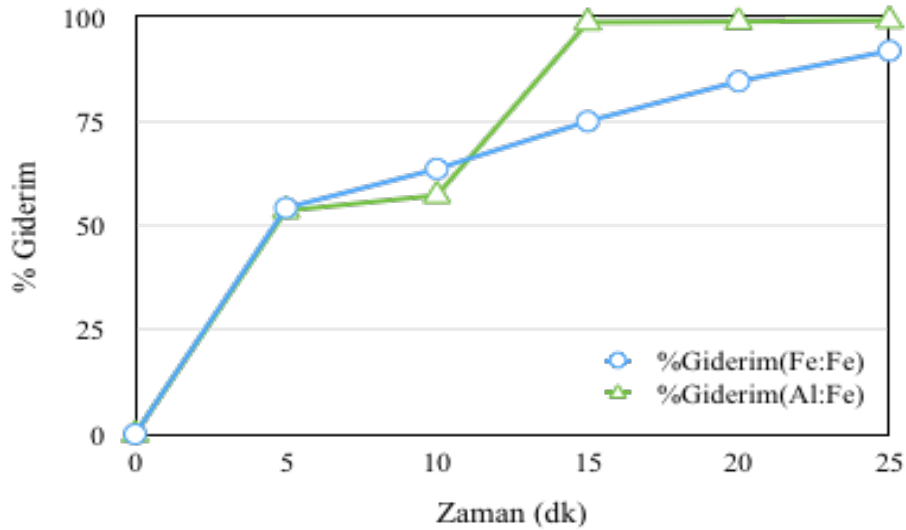
Yapılan deneylerde elektrot tipinin (Fe:Fe-Al:Fe), çözelti pH değerinin (1-6), elektriksel iletkenlerin ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  -NaCl), elektriksel iletken miktarının (0,15625-1,25 g) ve gerilim değerinin (5-12,5 V) boya giderim yüzdesine etkileri incelenerek çizelgeler halinde verilmiştir.

#### 5.3.1. Elektrot tipinin etkisinin incelendiği deney sonuçları

Yapılan çalışmada elektrokoagülasyon için önemli olan 2 elektrot tipi için karşılaştırma yapılmıştır. Bu amaçla Fe:Fe ve Al :Fe elektrot çiftleri ayrı ayrı kullanılmıştır.

**Çizelge 5.31.** Elektrot tiplerine göre % giderim değerleri  
(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2, V=5 Volt)

| Zaman(dk) | %Giderim(Fe:Fe) | %Giderim(Al:Fe) |
|-----------|-----------------|-----------------|
| 0         | 0               | 0               |
| 5         | 54,208          | 53,546          |
| 10        | 63,560          | 57,213          |
| 15        | 74,968          | 98,690          |
| 20        | 84,562          | 98,850          |
| 25        | 91,8713         | 99,1345         |



**Şekil 5.9.** Farklı 2 tip elektrot için zamana karşı % giderim değerleri  
(Co: 100 mg/L, V: 250mL, pH:2, V: 5 volt)

Bu sonuçlara bağlı olarak çalışılan boyar maddeli atık su için alüminyum -demir elektrotların demir-demir elektroda oranla daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Çalışmanın takip eden adımlarına daha yüksek verimli sonuçlar elde edildiği için alüminyum elektrotlar kullanılarak devam edilmiştir.

### 5.3.2. pH etkisinin incelendiği deney sonuçları

EC üzerine pH değerinin etkisini belirlemek amacıyla koagülant olarak Al ve Fe elektrot bağlantıları kullanılarak, elektroliz süresinin 90 dk, başlangıç akım yoğunluğunun 25 A/m<sup>2</sup> olarak seçilen şartlarda farklı pH değerlerinde (pH 6.35, 5.0, 4.0, 3.0, 2.0) deneyler gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 5.32.** pH:2 'de EC deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:5 Volt, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,625 g, Alüminyum kaybı:0,1138g )

| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 5           | 0,39     | 100            | 0           | 0                      |
| 15          | 4,9         | 0,39     | 37,36          | 62,64       | 1,92                   |
| 30          | 4,8         | 0,33     | 36,27          | 63,73       | 3,16                   |
| 45          | 4,7         | 0,28     | 34,92          | 65,08       | 3,96                   |
| 60          | 4,7         | 0,26     | 29,80          | 70,19       | 4,89                   |
| 75          | 4,8         | 0,25     | 4,42           | 95,58       | 6                      |
| 90          | 5,2         | 0,24     | 2,28           | 97,72       | 7,49                   |

**Çizelge 5.33.** pH:3 'de EC deney sonuçları(Co:100 mg/L, V: 250 mL, V:5 Volt , Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,625 g, Alüminyum kaybı:0,1132 g)

| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 5           | 0,22     | 100            | 0           | 0                      |
| 15          | 5,2         | 0,23     | 26,49          | 73,51       | 1,20                   |
| 30          | 5,2         | 0,23     | 20,56          | 79,44       | 2,40                   |
| 45          | 5,3         | 0,23     | 17,02          | 82,98       | 3,66                   |
| 60          | 5,3         | 0,23     | 16,73          | 83,28       | 4,88                   |
| 75          | 5,2         | 0,23     | 12,91          | 87,09       | 5,98                   |
| 90          | 5,2         | 0,23     | 8,76           | 91,25       | 7,18                   |

**Çizelge 5.34.** pH:4 'de EC deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:5 Volt  
Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,625 g ,Alüminyum kaybı:0,1071g )

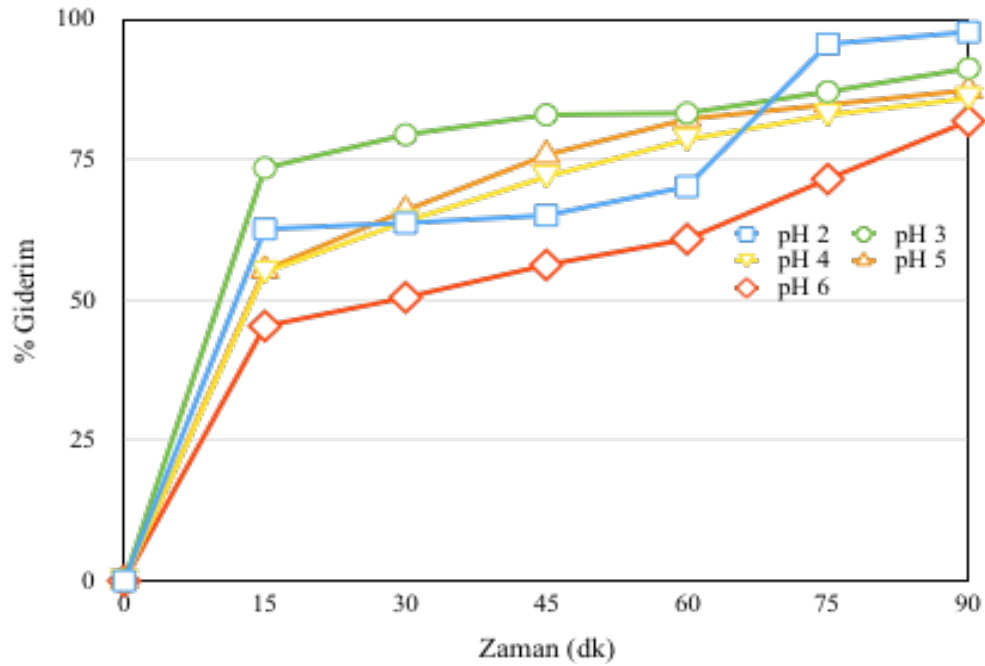
| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 5,1         | 0,22     | 100            | 0           | 0                      |
| 15          | 5,1         | 0,22     | 45,04          | 54,95       | 1,12                   |
| 30          | 5,2         | 0,23     | 36,01          | 63,98       | 2,39                   |
| 45          | 5,2         | 0,22     | 28,05          | 71,94       | 3,43                   |
| 60          | 5,2         | 0,22     | 21,44          | 78,56       | 4,58                   |
| 75          | 5,2         | 0,22     | 17,06          | 82,93       | 5,72                   |
| 90          | 5,2         | 0,21     | 14,09          | 85,91       | 6,55                   |

**Çizelge 5.35.** pH:5 'de EC deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:5 Volt,  
Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:0,625 g Alüminyum kaybı:0,1220g)

| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 5,1         | 0,20     | 100            | 0           | 0                      |
| 15          | 5,1         | 0,22     | 44,653         | 55,347      | 1,12                   |
| 30          | 5,2         | 0,22     | 34,047         | 65,953      | 2,29                   |
| 45          | 5,3         | 0,22     | 24,156         | 75,844      | 3,50                   |
| 60          | 5,2         | 0,21     | 17,783         | 82,217      | 4,37                   |
| 75          | 5,3         | 0,21     | 15,232         | 84,768      | 5,57                   |
| 90          | 5,3         | 0,20     | 12,645         | 87,355      | 6,36                   |

**Çizelge 5.36.** pH:6,35 'de EC deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:5 Volt Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,625 g Alüminyum kaybı:0,1821 g)

| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 5,2         | 0,21     | 100            | 0           | 0                      |
| 15          | 5,2         | 0,20     | 54,64          | 45,36       | 1,04                   |
| 30          | 5,2         | 0,20     | 49,54          | 50,46       | 2,08                   |
| 45          | 5,2         | 0,20     | 43,75          | 56,25       | 3,12                   |
| 60          | 5,3         | 0,19     | 39,16          | 60,84       | 4,31                   |
| 75          | 5,2         | 0,19     | 28,47          | 71,53       | 4,94                   |
| 90          | 5,1         | 0,18     | 18,13          | 81,87       | 5,51                   |



**Şekil 5.10.** Farklı pH değerleri için zamana karşı % giderim değerleri (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:5 Volt, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:0,625 g)



Yapılan deneylerde giderim hızı farklılık göstermekle birlikte, çalışılan aralıkta çözeltilerin pH'nın kademeli olarak yükseldiği görülmektedir. Sistemin bu davranışı daha önce yapılan çalışmalarda da gözlemlenmiştir (Merzouk vd., 2009; Bayar, 2012). Bunun sebebi katotta suyun indirgenmesi sonrası hidrojen gazı oluşumu ve hidroksit birikmesidir. Elektroliz sırasında anot ve katot reaksiyonlarının su içerisindeki reaksiyonları sonucu çözeltilerin pH değerinde değişimler olmaktadır. Akım yoğunluğunun  $25 \text{ A/m}^2$ , elektroliz süresinin 90 dk olduğu deney şartlarında başlangıç pH değerinin boya giderim verimine etkisi araştırılmıştır. Al elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda boya gideriminin %97'nin üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

### 5.3.3. Elektriksel iletken seçimi etkisinin incelendiği deney sonuçları

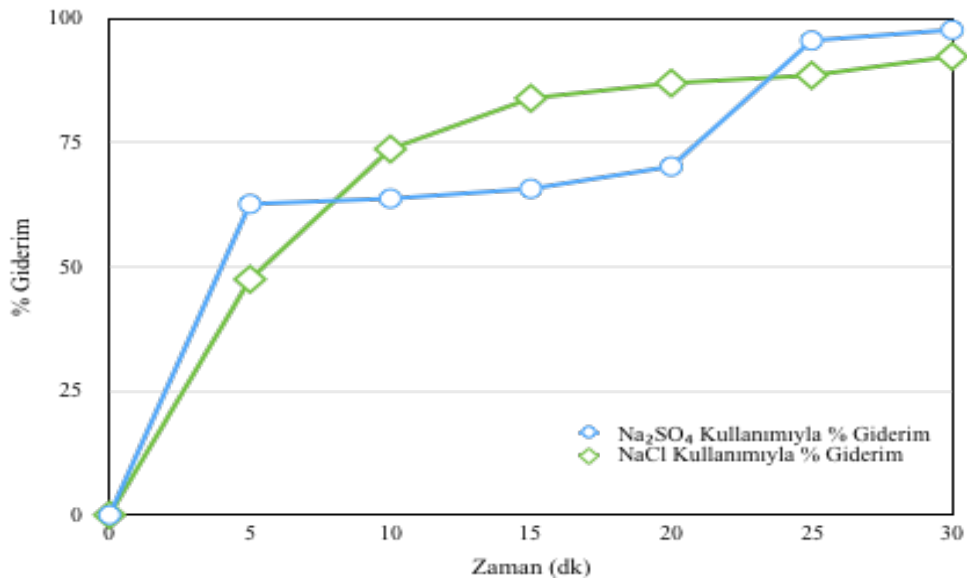
Yapılan çalışmada elektrokoagülasyon için önemli olan 2 elektriksel iletken için karşılaştırma yapılmıştır. Bu amaçla  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{NaCl}$  tuzları kullanılmıştır.

**Çizelge 5.37.**  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  tuzu kullanılarak yapılan deney sonuçları  
(Co:100 mg/L, V: 250 mL, pH :2,V:5 Volt,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ : 0,625 g,  
Alüminyum kaybı:0,1821 g )

| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 5           | 0,39     | 100            | 0           | 0                      |
| 5           | 5,1         | 0,39     | 37,35          | 62,64       | 0,66                   |
| 10          | 5,1         | 0,33     | 36,27          | 63,73       | 1,12                   |
| 15          | 5,1         | 0,28     | 34,92          | 65,71       | 1,43                   |
| 20          | 5,1         | 0,26     | 29,81          | 70,19       | 1,77                   |
| 25          | 5,2         | 0,25     | 4,42           | 95,58       | 2,17                   |
| 30          | 5,2         | 0,23     | 2,28           | 97,72       | 2,39                   |

**Çizelge 5.38.** NaCl tuzu kullanılarak yapılan deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2,V:5 Volt , NaCl: 0,625 g Alüminyum kaybı:0,1025 g )

| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 5,1         | 0,42     | 100            | 0           | 0                      |
| 5           | 5,2         | 0,38     | 52,53          | 47,47       | 0,66                   |
| 10          | 5,2         | 0,38     | 26,29          | 73,71       | 1,32                   |
| 15          | 5,1         | 0,37     | 16,06          | 83,94       | 1,89                   |
| 20          | 5,2         | 0,37     | 13,01          | 86,99       | 2,57                   |
| 25          | 5,2         | 0,37     | 11,44          | 88,56       | 3,21                   |
| 30          | 5,2         | 0,36     | 7,62           | 92,34       | 3,74                   |



**Şekil 5.11.** Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve NaCl tuzlarının % giderim değerlerinin karşılaştırılması (Co:100 mg/L, V: 250 mL, pH :2,V:5 Volt)

Yapılan deney sonuçları doğrultusunda Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'ın giderime katkısının daha fazla ve veriminin de NaCl'e göre daha yüksek olması nedeniyle elektriksel iletken olarak Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> seçilmiştir.

### 5.3.4. Gerilim etkisinin incelendiği deney sonuçları

EC üzerine gerilimin etkisini belirlemek amacıyla Al ve Fe elektrot bağlantıları kullanılarak, ilk aşamada belirlenen optimum pH değerlerinde ve elektriksel iletkenlikte ve farklı voltaj değerlerinde (5, 7.5, 10,12.5 V) deneyler gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 5.39.** 5 V gerilimde yapılan deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,625 g, Alüminyum kaybı:0,1138 g )

| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 5           | 0,39     | 100            | 0           | 0                      |
| 5           | 5,1         | 0,39     | 37,36          | 62,64       | 0,66                   |
| 10          | 5,1         | 0,33     | 36,27          | 63,73       | 1,12                   |
| 15          | 5,1         | 0,28     | 34,92          | 65,71       | 1,43                   |
| 20          | 5,1         | 0,26     | 29,80          | 70,19       | 1,77                   |
| 25          | 5,2         | 0,25     | 4,42           | 95,58       | 2,17                   |
| 30          | 5,2         | 0,23     | 2,28           | 97,72       | 2,39                   |

**Çizelge 5.40.** 7,5 V gerilimde yapılan deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,625 g, Alüminyum kaybı:0,1988g)

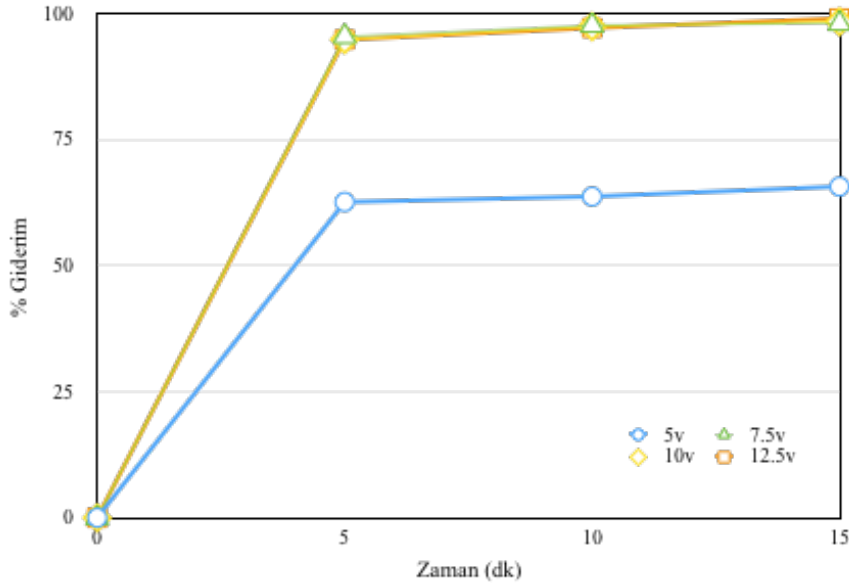
| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 7,5         | 0,82     | 100            | 0           | 0                      |
| 5           | 7,6         | 0,51     | 4,51           | 95,48       | 1,29                   |
| 10          | 7,7         | 0,50     | 2,29           | 97,71       | 2,57                   |
| 15          | 7,8         | 0,49     | 1,91           | 98,08       | 3,82                   |
| 20          | 7,8         | 0,50     | 0,91           | 99,08       | 5,2                    |
| 25          | 7,9         | 0,49     | -              | -           | -                      |
| 30          | 7,9         | 0,49     | -              | -           | -                      |

**Çizelge 5.41.** 10 V gerilimde yapılan deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,625 g,Alüminyum kaybı:0,3331 g).

| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 10,1        | 0,73     | 100            | 0           | 0                      |
| 5           | 10,2        | 0,73     | 5,13           | 94,86       | 2,48                   |
| 10          | 10,2        | 0,75     | 2,55           | 97,44       | 5,10                   |
| 15          | 10,3        | 0,74     | 1,60           | 98,39       | 7,62                   |
| 20          | 10,3        | 0,74     | 0,99           | 99,00       | 10,16                  |
| 25          | 10,3        | 0,74     | 0              | 100         | 12,7                   |

**Çizelge 5.42.** 12,5 V gerilimde yapılan deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,625 g , Alüminyum kaybı:0,3339 g)

| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 12,6        | 0,71     | 100            | 0           | 0                      |
| 5           | 12,7        | 0,51     | 5,14           | 94,85       | 2.16                   |
| 10          | 12,7        | 0,50     | 2,83           | 97,16       | 4,23                   |
| 15          | 12,7        | 0,50     | 0,94           | 99,05       | 6,35                   |
| 20          | 12,7        | 0,49     | 0              | 100         | 8,30                   |



**Şekil 5.12.** 100 mg/L boya çözeltisinin farklı gerilim değerleri için % giderimlerinin karşılaştırılması

Optimum pH değerinin 2.0, elektroliz süresinin 25 dk olduğu deney şartlarında, voltajın renk giderim verimine etkisinin araştırılmıştır. Al elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda renk giderim verimi %98'nin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Enerji maliyeti düşünüldüğünde 7.5 V ve 10 V'ta elde edilen giderim değerleri birbirine yakın olduğundan en uygun gerilim değeri olarak 7,5 V seçilmiştir.

### 5.3.5. Elektriksel iletkenlik miktarının etkisinin incelendiği deney sonuçları

EC üzerine elektriksel iletkenliğin etkisini belirlemek amacıyla Al ve Fe elektrot bağlantıları kullanılarak, ilk aşamada belirlenen optimum pH değerlerinde ve pH ile voltaj (7.5V) sabit tutularak, elektriksel iletkenliği sağlayacak farklı miktarlarda  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (0.1563, 0.3125, 0.625 ve 1.25 g) deneyler gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 5.43.** 0,1563 g Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile yapılan deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2 Gerilim: 7,5 V, Alüminyum kaybı:0,3404 g )

| Zaman (dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0          | 7,5         | 0,39     | 100            | 0           | 0                      |
| 5          | 7,6         | 0,26     | 46,45          | 53,54       | 0,66                   |
| 10         | 7,6         | 0,24     | 1,31           | 98,68       | 1,22                   |
| 15         | 7,6         | 0,23     | 1,14           | 98,85       | 1,75                   |
| 20         | 7,6         | 0,23     | 0,65           | 99,34       | 2,33                   |
| 25         | 7,6         | 0,23     | 0              | 100         | 2,91                   |

**Çizelge 5.44.** 0,3125 g Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile yapılan deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2 , Gerilim: 7,5 V, Alüminyum kaybı:0,2714 g)

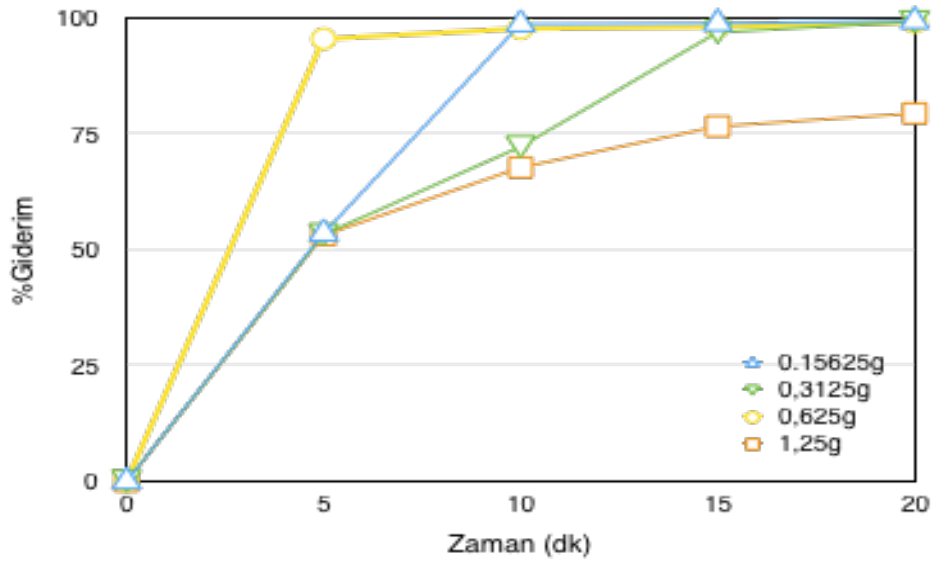
| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 7,6         | 0,47     | 100            | 0           | 0                      |
| 5           | 7,6         | 0,37     | 46,78          | 53,22       | 0,94                   |
| 10          | 7,6         | 0,31     | 27,26          | 72,24       | 1,57                   |
| 15          | 7,7         | 0,30     | 3,09           | 96,91       | 2,31                   |
| 20          | 7,6         | 0,29     | 0,86           | 99,14       | 2,93                   |
| 25          | 7,6         | 0,27     | 0              | 100         | 3,42                   |

**Çizelge 5.45.** 0,625 g Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile yapılan deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2 , Gerilim: 7,5 V, Alüminyum kaybı:0,2325 g)

| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 7,5         | 0,82     | 100            | 0           | 0                      |
| 5           | 7,6         | 0,51     | 4,51           | 95,4877     | 1,292                  |
| 10          | 7,7         | 0,50     | 2,29           | 97,706      | 2,57                   |
| 15          | 7,8         | 0,49     | 1,92           | 98,0844     | 3,82                   |
| 20          | 7,8         | 0,50     | 0,91           | 99,0894     | 5,20                   |
| 25          | 7,9         | 0,49     | 0              | 100         | 6,45                   |

**Çizelge 5.46.** 1,25 g Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile yapılan deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, Gerilim: 7,5 V pH :2, Alüminyum kaybı:0,1873 g)

| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 7,7         | 0,93     | 100            | 0           | 0                      |
| 5           | 7,7         | 0,88     | 46,88          | 53,12       | 2,26                   |
| 10          | 7,8         | 0,89     | 32,27          | 67,73       | 4,63                   |
| 15          | 7,9         | 0,89     | 23,40          | 76,59       | 7,03                   |
| 20          | 7,8         | 0,93     | 20,59          | 79,41       | 9,67                   |
| 25          | 7,8         | 0,96     | 16,50          | 83,49       | 12,48                  |
| 30          | 7,8         | 0,94     | 12,94          | 87,06       | 14,66                  |



Şekil 5.13. Farklı  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  değerleri için % giderimlerinin karşılaştırılması

Bu deneyler sonucunda en iyi ve en hızlı giderimin 45 dk içerisinde 0,1563 g  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ile renk gideriminin %99 olduğu gözlemlenmiştir.

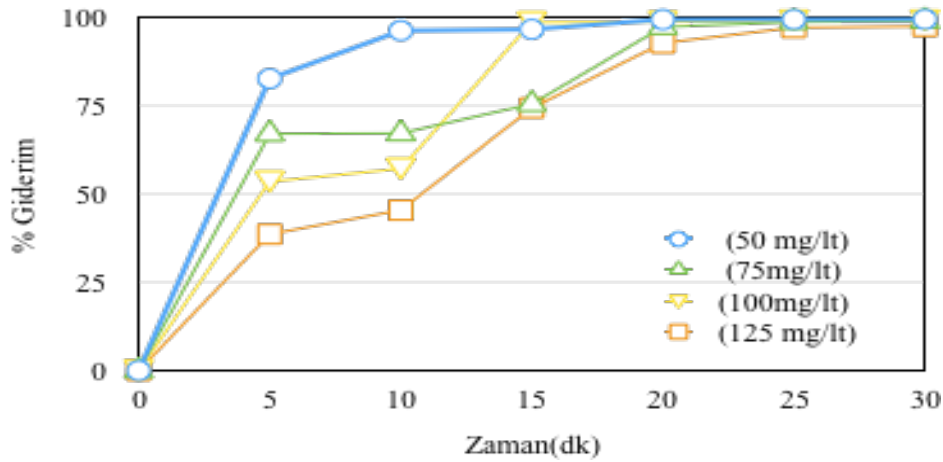
### 5.3.6. Başlangıç konsantrasyon miktarının etkisinin incelendiği deney sonuçları

Elektrokoagülasyon prosesinde derişimin etkisini incelemek amacıyla sabit 7,5 V ve pH:2’de deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.47. Farklı boya konsantrasyonları için % giderim değerleri  
(V: 250 mL, Gerilim: 7,5 V ,pH :2,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ :0,1563 g)

| Zaman (dk) | Boya giderimi (%) |           |             |             |
|------------|-------------------|-----------|-------------|-------------|
|            | (50 mg/L)         | (75 mg/L) | (100 mg/L ) | (125 mg/L ) |
| 0          | 0                 | 0         | 0           | 0           |
| 5          | 82,73             | 67,11     | 53,55       | 38,66       |
| 10         | 96,32             | 67,24     | 57,21       | 45,46       |
| 15         | 96,72             | 75,54     | 98,69       | 74,43       |
| 20         | 99,47             | 97,39     | 98,85       | 92,82       |
| 25         | 99,52             | 98,78     | 99,14       | 97,19       |
| 30         | 99,56             | 99,14     | 99,15       | 97,53       |





**Şekil 5.14.** Farklı boya konsantrasyonları için % giderimlerin karşılaştırılması (V: 250 mL, Gerilim: 7,5 V ,pH :2, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:0,1563 g)

Bu deneyler sonucunda 100 mg/L boya derişimine kadar birbirine yakın sonuçlar elde edilmesine rağmen 125 mg/L'de giderimde çok az bir düşüş gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar bu gerilim ve pH değerinde EC yönteminin derişim aralığından fazla etkilenmediğini göstermektedir.

### 5.3.7. Elektrotlar arası mesafenin etkisinin incelendiği deney sonuçları

EC üzerine gerilimin etkisini belirlemek amacıyla Al ve Fe elektrot bağlantıları kullanılarak, belirlenen optimum pH ,elektriksel iletkenlik ve gerilim değerlerinde elektrotlar arası mesafenin etkisi değerlerinde (1,1.5ve 2 cm) deneyler gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 5.48.** Elektrotlar arası mesafenin 1 cm olduğu deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V:250 mL, pH :2, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:0,1563 g Alüminyum kaybı:0,1356 g )

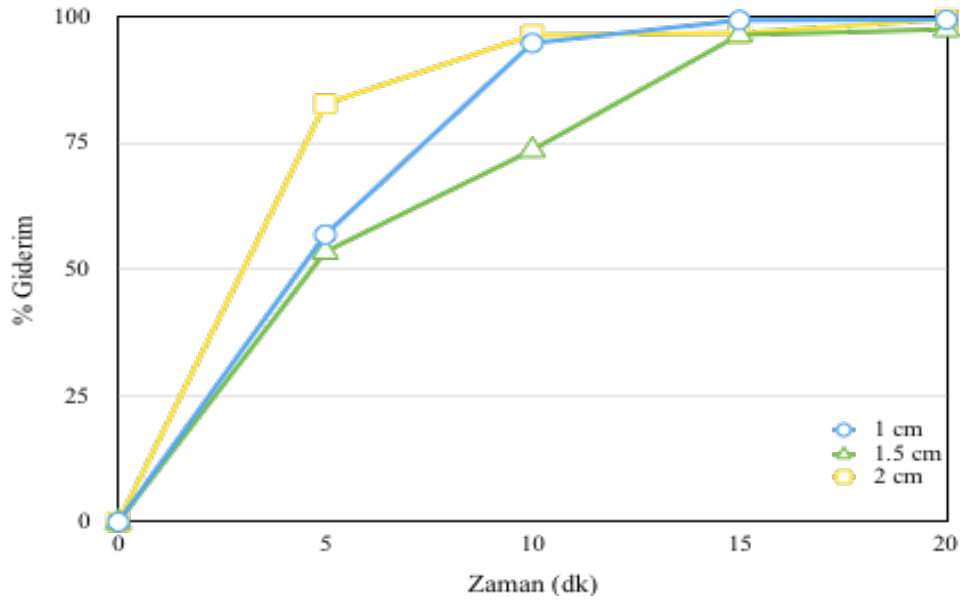
| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 7,7         | 0,52     | 100            | 0           | 0                      |
| 5           | 7,7         | 0,46     | 43,18          | 56,82       | 1,18                   |
| 10          | 7,7         | 0,46     | 5,26           | 94,74       | 2,36                   |
| 15          | 7,8         | 0,46     | 0,75           | 99,25       | 3,56                   |
| 20          | 7,8         | 0,46     | 0,65           | 99,35       | 4,78                   |
| 25          | 7,7         | 0,45     | 0              | 100         | 5,78                   |

**Çizelge 5.49.** Elektrotlar arası mesafenin 1,5 cm olduğu deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,1563 g Alüminyum kaybı:0,12 g )

| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 7,7         | 0,61     | 100            | 0           | 0                      |
| 5           | 7,7         | 0,37     | 46,55          | 53,45       | 0,95                   |
| 10          | 7,7         | 0,37     | 26,43          | 73,57       | 1,90                   |
| 15          | 7,7         | 0,35     | 3,64           | 96,36       | 2,85                   |
| 20          | 7,7         | 0,33     | 2,57           | 97,43       | 3,39                   |
| 25          | 7,7         | 0,33     | 2,17           | 97,83       | 4,23                   |
| 30          | 7,7         | 0,33     | 1,44           | 98,56       | 5,082                  |

**Çizelge 5.50.** Elektrotlar arası mesafenin 2 cm olduğu deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :2, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,1563 g Alüminyum kaybı:0,1192 g )

| Zaman ( dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|-------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0           | 7,5         | 0,41     | 100            | 0           | 0                      |
| 5           | 7,7         | 0,37     | 17,28          | 82,72       | 0,95                   |
| 10          | 7,7         | 0,36     | 3,68           | 96,32       | 1,85                   |
| 15          | 7,7         | 0,35     | 3,28           | 96,72       | 2,70                   |
| 20          | 7,7         | 0,35     | 0,53           | 99,47       | 3,60                   |
| 25          | 7,8         | 0,35     | 0,48           | 99,52       | 4,55                   |
| 30          | 7,8         | 0,35     | 0,44           | 99,56       | 5,46                   |



**Şekil 5.15.** Farklı elektrot mesafe değerleri için % giderimlerinin karşılaştırılması

Bu deneyler sonucunda en yüksek ve en hızlı giderimin elektrotlar arası mesafenin 1 cm olduğu durumda % 99 olduğu gözlenmiştir. Elektrotlar arası mesafe arttıkça direnç artacağından aynı gerilim değeri için daha düşük akım şiddeti gözlenmiştir. Bu durum giderim veriminin bir miktar değişmesine yol açmıştır.

#### 5.4. Elektro-Fenton Prosesi İle Yapılan Deney Sonuçları

Yapılan deneylerde çözelti pH değerinin (2-5), gerilim değerinin (5-12,5 V) ve  $H_2O_2$  derişiminin(25-100 mM) boya giderim yüzdesine etkileri incelenerek çizelgeler halinde verilmiştir.

##### 5.4.1. pH etkisinin incelendiği deney sonuçları

EF üzerine pH değerinin etkisini belirlemek amacıyla Fe:Fe elektrot bağlantıları kullanılarak 25 dakikalık elektroliz süresinde farklı pH değerlerinde (pH 5.0, 4.0, 3.0, 2.0) deneyler gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 5.51.** pH:2 için EF deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:10 Volt, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,1563 g, Anot kaybı:0,502 g )

| Zaman (dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0          | 5,1         | 0,27     | 100            | 0           | 0                      |
| 5          | 5,1         | 0,26     | 1,53           | 98,47       | 0,44                   |
| 10         | 5,2         | 0,26     | 0,13           | 99,87       | 1,02                   |
| 15         | 5,2         | 0,26     | 0,01           | 99,99       | 1,35                   |
| 20         | 5,2         | 0,26     | -              | 100         | -                      |
| 25         | 5,2         | 0,26     | -              | 100         | -                      |

**Çizelge 5.52.** pH:3 için EF deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:10 Volt, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,1563 g, Anot kaybı:0,492 g )

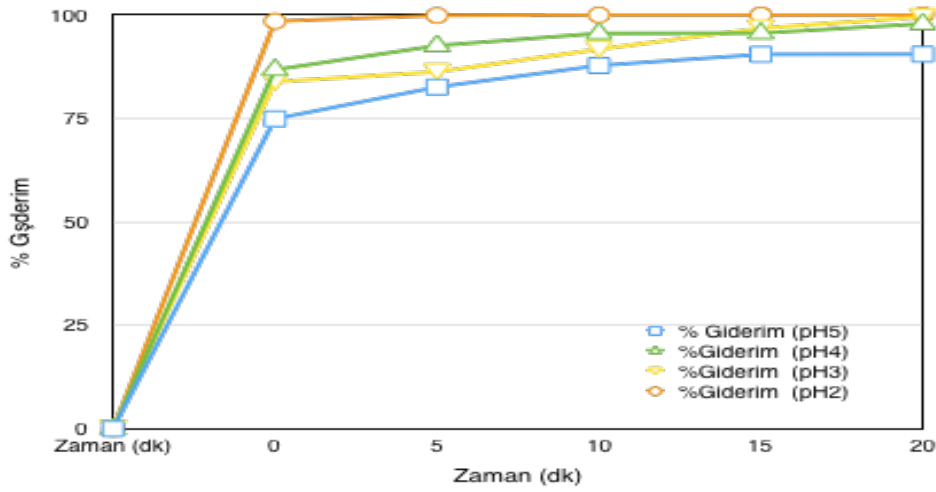
| Zaman (dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0          | 5,1         | 0,32     | 100            | 0           | 0                      |
| 5          | 5,1         | 0,33     | 13,24          | 86,76       | 0,56                   |
| 10         | 5,2         | 0,32     | 7,43           | 92,57       | 1,11                   |
| 15         | 5,2         | 0,31     | 4,45           | 95,55       | 1,61                   |
| 20         | 5,2         | 0,31     | 4,39           | 95,61       | 2,15                   |
| 25         | 5,2         | 0,31     | 2,15           | 97,85       | 2,69                   |

**Çizelge 5.53.** pH:4 için EF deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:10 Volt, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,1563 g, Anot kaybı:0,357 g )

| Zaman (dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0          | 5,1         | 0,32     | 100            | 0           | 0                      |
| 5          | 5,1         | 0,33     | 13,24          | 86,76       | 0,56                   |
| 10         | 5,2         | 0,32     | 7,43           | 92,57       | 1,11                   |
| 15         | 5,2         | 0,31     | 4,45           | 95,55       | 1,61                   |
| 20         | 5,2         | 0,31     | 4,39           | 95,61       | 2,15                   |
| 25         | 5,2         | 0,31     | 2,15           | 97,85       | 2,69                   |

**Çizelge 5.54.** pH:5 için EF deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, V:10 Volt, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,1563 g, Anot kaybı:0,332g )

| Zaman (dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0          | 5           | 0,39     | 100            | 0           | 0                      |
| 5          | 5,1         | 0,39     | 25,12          | 74,88       | 0,66                   |
| 10         | 5,1         | 0,33     | 17,43          | 82,57       | 1,12                   |
| 15         | 5,1         | 0,33     | 12,23          | 87,77       | 1,68                   |
| 20         | 5,1         | 0,33     | 9,54           | 90,46       | 2,24                   |
| 25         | 5,2         | 0,32     | 9,50           | 90,50       | 2,77                   |



**Şekil 5.16** Farklı pH değerleri için zamana karşı % giderim değerleri

Şekil 5.16'dan görüldüğü gibi pH 2 değerinde yaklaşık %100 bir giderime 15 dakika da ulaşılmıştır. Diğer pH'larda giderim biraz daha yavaş olmaktadır.

Asidik koşullarda redoks sistemi daha iyi gerçekleşmektedir. pH değeri 3,5' den düşük olduğu zaman  $H_2O_2$  ve  $Fe^{2+}$  daha karardır.  $Fe^{3+}$  iyonları pH 4' ten yüksek olduğunda kararsızdır ve kolayca demir hidroksil kompleksleri üretmeye meyilli demir iyonları oluştururlar (Yıldırım, 2007). Yüksek pH' ta  $H_2O_2$  oksitleme yeteneği azaldığı için kararsızdır.  $Fe^{2+}$  iyonları ve  $H_2O_2$  kararsızlığı oksidasyon sürecinin verimini etkilemektedir.

#### 5.4.2. Gerilim etkisinin incelendiği deney sonuçları

EF üzerine gerilimin etkisini belirlemek amacıyla Fe:Fe elektrot bağlantıları kullanılarak, ilk aşamada belirlenen optimum pH değerinde, elektriksel iletkenlikte ve farklı voltaj değerlerinde (5, 7.5, 10, 12.5 V) deneyler gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 5.55.** 5 V için EF deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,15625 g, Anot kaybı:0,168 g )

| Zaman (dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0          | 5,1         | 0,29     | 100            | 0           | 0                      |
| 5          | 5,1         | 0,29     | 16,45          | 83,54       | 0,49                   |
| 10         | 5,2         | 0,28     | 13,75          | 86,25       | 0,97                   |
| 15         | 5,2         | 0,28     | 8,30           | 91,70       | 1,46                   |
| 20         | 5,2         | 0,28     | 3,22           | 96,78       | 1,94                   |
| 25         | 5,2         | 0,28     | 0,47           | 99,52       | 2,43                   |

**Çizelge 5.56.** 7,5 V için EF deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,1563 g, Anot kaybı:0,196 g )

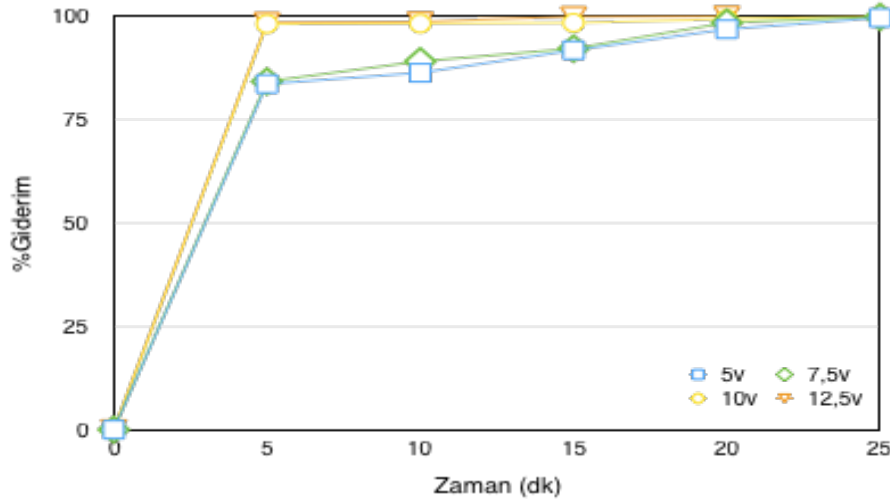
| Zaman (dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0          | 7,5         | 0,47     | 100            | 0           | 0                      |
| 5          | 7,6         | 0,46     | 15,85          | 84,15       | 1,17                   |
| 10         | 7,6         | 0,46     | 10,98          | 89,022      | 2,33                   |
| 15         | 7,6         | 0,45     | 7,91           | 92,09       | 3,42                   |
| 20         | 7,5         | 0,46     | 1,65           | 98,35       | 4,60                   |
| 25         | 7,4         | 0,45     | 0,25           | 99,75       | 5,55                   |

**Çizelge 5.57.** 10 V için EF deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,1563 g, Anot kaybı: 0,277g )

| Zaman (dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0          | 10          | 1,13     | 100            | 0           | 0                      |
| 5          | 10,1        | 1,12     | 1,95           | 98,05       | 3,77                   |
| 10         | 10,1        | 1,12     | 1,85           | 98,15       | 7,54                   |
| 15         | 10,1        | 1,11     | 1,68           | 98,32       | 11,21                  |
| 20         | 10,2        | 1,11     | 0,78           | 99,22       | 15,10                  |
| 25         | 10,2        | 1,11     | 0,02           | 99,98       | 18,87                  |

**Çizelge 5.58.** 12,5 V için EF deney sonuçları(Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,1563 g , Anot kaybı: 0,367g )

| Zaman (dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0          | 12,5        | 1,33     | 100            | 0           | 0                      |
| 5          | 12,5        | 1,33     | 1,55           | 98,45       | 5,54                   |
| 10         | 12,4        | 1,32     | 1,44           | 98,56       | 10,91                  |
| 15         | 12,5        | 1,33     | 0,15           | 99,85       | 16,63                  |
| 20         | 12,4        | 1,32     | 0,02           | 99,98       | 21,82                  |
| 25         | 12,4        | 1,32     | 0              | 100         | 27,28                  |



**Şekil 5.17.** Farklı gerilim değerleri için zamana karşı % giderim değerleri (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,1563 g)

Yüksek gerilim koşullarında, enerji tüketimi artarken, elde edilen verim çok fazla değişim göstermemektedir. Enerjiden kaynaklanan maliyetin artmaması için sistemde kullanılacak gerilimin değerinin iyi tespit edilmesi gerekmektedir. Deneysel çalışmalarda bu amaçla farklı gerilim uygulamaları için arıtma verimlerinde görülen değişimler belirlenmiş ve en uygun gerilim değerinin 10 volt olduğu gözlenmiştir.

#### 5.4.3. Başlangıç H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dozunun etkisinin incelendiği deney sonuçları

EF üzerine başlangıç H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dozunun etkisini belirlemek amacıyla Fe:Fe elektrot bağlantıları kullanılarak, ilk aşamada belirlenen optimum pH değerinde, elektriksel iletkenlikte ve farklı dozaj değerlerinde (25, 50, 75, 100 mM) deneyler gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 5.59.** 50 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> derişiminde elde edilen deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,1563 g , Anot kaybı:0,473g )

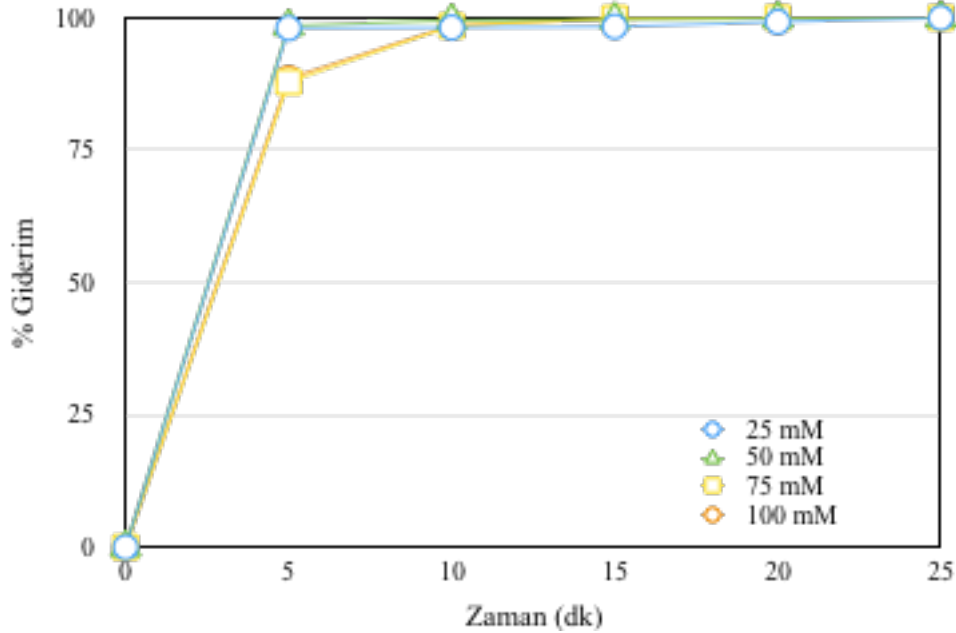
| Zaman (dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0          | 10          | 1,14     | 100            | 0           | 0                      |
| 5          | 10,1        | 1,14     | 1,56           | 98,44       | 3,84                   |
| 10         | 10,1        | 1,13     | 0,49           | 99,51       | 7,54                   |
| 15         | 10,1        | 1,12     | 0,28           | 99,72       | 11,31                  |
| 20         | 10,2        | 1,12     | 0,09           | 99,91       | 15,23                  |
| 25         | 10,2        | 1,11     | 0,001          | 99,99       | 18,87                  |

**Çizelge 5.60.** 75 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> derişiminde elde edilen deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,1563 g ,Anot kaybı:0,380g)

| Zaman (dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0          | 10          | 1,14     | 0              | 0           | 0                      |
| 5          | 10,1        | 1,14     | 12,13          | 87,87       | 3,84                   |
| 10         | 10,1        | 1,13     | 1,53           | 98,47       | 7,61                   |
| 15         | 10,1        | 1,12     | 0,01           | 99,99       | 11,31                  |
| 20         | 10,2        | 1,12     | 0              | 100         | 15,23                  |

**Çizelge 5.61.** 100 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> derişiminde elde edilen deney sonuçları (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,1563 g ,Anot kaybı:0,363 g)

| Zaman (dk) | Gerilim (V) | Akım (A) | Derişim (mg/L) | Giderim (%) | Enerji Tüketimi (Wh/L) |
|------------|-------------|----------|----------------|-------------|------------------------|
| 0          | 10          | 1,14     | 0              | 0           | 0                      |
| 5          | 10,1        | 1,14     | 11,49          | 88,51       | 3,84                   |
| 10         | 10,1        | 1,13     | 1,48           | 98,52       | 7,61                   |
| 15         | 10,1        | 1,12     | 0,13           | 99,87       | 11,31                  |
| 20         | 10,2        | 1,12     | 0              | 100         | 15,23                  |



**Şekil 5.18.** Farklı başlangıç H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> derişim değerleri için zamana karşı % giderim değerleri (Co: 100 mg/L, V: 250 mL, pH :3, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,15625 g)



Sisteme eklenen  $H_2O_2$  dozu arttıkça uygun olarak üretilen  $OH^\cdot$  radikalinin miktarının artması sonucu giderimde de artış gözlenmiştir. Çalışmada optimum başlangıç  $H_2O_2$  dozu 75 mM olarak belirlenmiştir.  $H_2O_2$  miktarının daha fazla artırılmasıyla gideriminde önemli bir artış sağlanamamıştır. Ayrıca aşırı miktarda  $H_2O_2$  ilavesi kirlilik yükünü arttıracaktır.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında bir azo boyanın sulu çözeltilerinden mikroeletroliz, elektrokoagülasyon ve elektro-Fenton prosesi kullanılarak arıtmaları gerçekleştirilmiş ve her üç prosesin boya giderimleri ve enerji tüketimlerine göre kıyaslamaları yapılmıştır.

Çalışma kapsamında, mikroeletroliz prosesi için giderim üzerine etki eden parametreler olarak çözelti derişimi (50-200 mg/L), pH (1-6), elektriksel iletkenlik (3-11 mS/cm), besleme hızı (10-40 rpm) ve kolon dolgu maddesi (spiral demir talaşı/AC ,toz demir talaşı/AC) çalışılmıştır. Elektrokoagülasyon prosesi için elektrot tipinin (Fe:Fe-Al:Fe), çözelti pH değerinin (1-6), destek elektrolit türünün ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ -NaCl), destek elektrolit miktarının (0,15625-1,25 g) ve gerilim değerinin (5-12,5 V) boya giderim yüzdesine ve enerji tüketimine etkileri incelenmiştir. Elektro-Fenton prosesi için ise pH (2-6), gerilim (5-12,5 V) ve  $\text{H}_2\text{O}_2$  dozu (25-100 mM)'nun boya giderim yüzdesine ve enerji tüketimine etkileri incelenmiştir.

Mikroeletroliz prosesinde dolgu maddesi olarak aktif karbon ve demir talaşı(toz ve spiral) kullanılmıştır. Bu deneylerde öncelikle kesikli adsorpsiyon deneyi ile aktif karbonun boyayı adsorplama kapasitesi incelendi. Buna göre kullanılan granül aktif karbon için adsorpsiyon kapasitesi 33,1 mg/g olarak belirlendi. Ayrıca mikroeletroliz kolonunda dolgu maddesi olarak sadece aktif karbon olduğunda boya çözeltisi 11,5 mL/sn akış hızı ile kolona kesikli geri dolaşımli olarak beslenerek boya giderimi incelendi. Buna göre 100 mg/L' lik boya çözeltisi (pH= 3) için 240 dk'nın sonunda giderim yüzdesi % 98,1 olarak elde edilmiştir.

Mikroeletroliz deneylerinde farklı dolgu maddeleri kullanılarak çözelti derişimi, pH, akış hızı ve iletkenlik değışiminin boya giderimine etkisi incelenmiştir. Boya derişiminin giderime etkisinin incelendiği deneylerde aktif karbon (AC) ve spiral demir (Fe) talaşı ile aktif karbon (AC) ve toz demir (Fe) talaşı için 100 mg/L derişiminde , yaklaşık 11 mL/s akış hızında ve pH 3'te sırasıyla 135 dakikada % 96,1 ve 60 dakikada da % 99 giderim elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aktif karbon (AC) ve toz demir (Fe) talaşının dolgu maddesinin kullanıldığı reaktörde, daha yüksek giderimin elde edildiği gözlemlenmiştir. ME çalışmalarımda verimi etkileyen en önemli değışken

çözelti pH değeridir. Atıksuyun pH'ı kirleticilerin kimyasal halini ve Fe(II)/Fe(III) molar oranını etkilemektedir (Wen-wu vd, 2012). pH aynı zamanda GAC'nin yüzey yükünü modifiye ederek elektrostatik etkileşimi de etkilemektedir (Lai vd., 2013). Mikroelektroliz işleminde kolonda aktif karbonun yanında demir bulunması boya giderimini arttırdığı gibi arıtım süresini kısaltmaktadır. Ayrıca mikroelektrolizde adsorpsiyon işlemindeki gibi aktif karbonun rejenerasyonuna ihtiyaç bulunmamaktadır.

Elektrokoagülasyon prosesi için yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, optimum koşul olarak Al:Fe elektrotlar, elektrot aralığı 1 cm, pH değeri 2, akım yoğunluğu  $25 \text{ A/m}^2$ , elektriksel iletken olarak 0,1563 g  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ilavesi ve 7,5 V gerilim değeri belirlenmiştir. Bu koşullarda 25 dakika sonunda enerji tüketimi 5,78 Wh/L ve boya giderimi %100 olarak bulunmuştur.

Elektro-Fenton prosesi için yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, belirlenen değişkenlerin optimum değerleri olarak; pH değeri 3, 5 V gerilim değeri 25mM  $\text{H}_2\text{O}_2$  derişimi belirlenmiştir. Bu koşullarda 25 dakika sonunda enerji tüketimi 2,43 Wh/L ve boya giderimi %99,5 olarak bulunmuştur.

EC ve EF prosesleri kıyaslandığında her iki yöntemde de düşük enerji tüketimi ile yüksek giderime ulaşılmıştır. Mikroelektroliz yönteminde ise elektrik akımı uygulanmadan ve atık malzemelerle yüksek verimde reaktif boyaların giderilebileceği görülmüştür. Diğer iki prosese göre işlem süresi daha uzun olmasına rağmen mikroelektroliz yönteminin atık suların arıtımı için büyük ölçekte uygulanması daha ekonomik görülmektedir. Ancak bunun için gerçek bir tekstil atıksuyu ile deneysel çalışmalarının yapılması yararlı olacaktır.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

Anonim, 2015, Chemical Trading Guide,

<http://www.guidechem.com/reference/dic-128918.html>, erişim tarihi: 13.07.2015

Akarsu, C., 2014, “Elektrokoagülasyon Prosesi İle Endüstriyel Atık Su Arıtımı” , Akademik Platform.

Alinsafi A., Khemis M., Pons M.N., Vd., “Electro-Coagulation Of Reactive Textile Dyes And Textile Wastewater”, Chemical Engineering And Processing 44, 461-470, 2005

Atmaca, E., 2009, Treatment of landfill leachate by using electro-Fenton method. J. Hazard. Mater. 163, 109–114.

Bozkan, H., 2012, Azo Boyalarının Zeytin Atığı (Pirina) Kullanılarak Adsorpsiyon Metodu İle Giderimi, (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Brillas, E., Martinez-Huitle, C., 2015. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review.

Cheng, H., Xu, W., Liu, J., Wang, H., He, Y., Chen, G., 2007. Pretreatment Of Wastewater From Triazine Manufacturing By Coagulation, Electrolysis, And İnternal Microelectrolysis, *J. Hazard. Mater.*, 146, 385–392.

Chen, X., Kuang, J., Chen, M., 2014. Effect Of Rare Earths On İron-Carbon Micro Electrolysis İs Dyeing Waswater Treatmen, *Advanced Materials Research Vols*, 1010-1012 (2014) Pp 190-194.

De Francesco, M. and Costamagna, P. , 2004, On the design of electrochemical reactors for the treatment of polluted water. Journal Of Cleaner Production, 12, 159–163.

Demirtaş, E., 2011, Kağıt Endüstrisi Atıksularının Elektro-Fenton Prosesi İle Arıtılması, (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Do, J.S., Chen, M.L., 1994. Decolourisations of Dye-Containing Solutions by Electrocoagulation. J. App. Electrochem., 24, 785-790.

Eyvaz, M., 2005. Farklı Demir ve Alüminyum Elektrot Bağlantıları ile Tekstil Atıksularının Elektrokoagülasyonu. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 172 s, Gebze.

Fan, L., Ni, J., Wu, Y., Zhang, Y., 2009. Treatment Of Bromoamine Acid Wastewater Using Combined Process Of Micro-Electrolysis And Biological Aerobic Filter, *J. Hazard. Mater.*, 162, 1204-1210.

### KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

- Guo, X., Cai, Y., Wei, Z. H., Hou Yang, X., Wang, Z., 2013. Treatment Of Di Azo Dye C.I. Reactive Black 5 İn Aqueous Solution By Combined Process Of Interior Micro Electrolysis And Ozonation, *Water Sci.& Technol.*, 67 1880-1885..
- Guo, X., Cai, Y., Wei, Z., Hou, H., Yang X., Wang, Z., 2013, “Treatment Of Diazo Dye C.I. Reactive Black 5 İn Aqueous Solution By Combined Process Of Interior Microelectrolysis And Ozonation”, *Water Science And Technology*, 67.8, 1880- 1885.
- Hanay, Ö., Hasar, H., 2007, “Fenton Oksidasyon Prosesi İle Tekstil Endüstrisi Atıksuyunda Renk Giderimi”, *Fırat Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19, 4, 505- 509.
- İlhan, F., Kurt, U., Apaydın, Ö., Arslankaya, E., Gönüllü, T., 2007, “Elektrokımyasal Arıtım Ve Uygulamaları: Katı Atık Sızıntı Suyu Çalışması”, *AB Sürecinde Katı Atık Yönetimi Ve Çevre Sorunları Sempozyumu*, TÜRKAY, 28-31 Mayıs.
- Kuşvuran E., Irmak S., Yavuz H.I., Samil A., Erbatur O., 2005. Comparison Of The Treatment Methods Efficiency For Decolorization And Mineralization Of Reactive Black 5 Azo Dye, *J. Hazard. Mater.*, 119, 109–116.
- Kocaer, O., Alkan, U., 2002, “Boyar Madde İçeren Tekstil Atıksularının Arıtım Alternatifleri”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7, 1, 47-55.
- Kapdan, İ., Kargı, F., 2000, “Atıksulardan Tekstil Boyar Maddelerinin Adsorpsiyonlu Biyolojik Arıtım İle Giderimi”, *Tübitak Dergisi*, 24, 161-169.
- Koçak, C., 2011, *Bacillus Subtilis İle Reaktif Black 5 Boyar Maddesinin Renk Giderim Kinetiğinin Araştırılması*, Çukurova Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, Adana.
- Lai, B., Zhou, Y., Yang, P., Yang, J., Wang, J., 2013. Degradation Of 3,3-İminobis-Propanenitrile İn Aqueous Solution By  $Fe^0$  /GAC Micro-Electrolysis System, *Chemosphere*, 90 1470-1477.
- Lan, S., Ju, F., Wu, X., 2012. Treatment Of Wastewater Containing EDTA-Cu(II) Using The Combined Process Of Interior Microelectrolysis And Fenton Oxidation– Coagulation, *Separation And Purification Technology*, 89, 117–124.
- Luo, J., Song, G., Liu, J., Qian, G., Xu, Z., 2014. Mechanism Of Enhanced Nitrate Reduction Via Micro-Electrolysis At The Powdered Zero-Valent Iron/Activated Carbon Interface, *Journal Of Colloid And Interface Science*, 435 21-25.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Modirshahla, N., Behnajady, M.A., Kooshaiian, S. 2006. Investigation of the Effect of Different Electrode Connections on the Removal Efficiency of Tartrazine from Aqueous Solutions by Electrocoagulation. *Dyes and Pigments*. Article in Press.
- Mollah M.Y.A., Schennach R., Parga J.R., “Electrocoagulation (EC) – Science And Application”, *Journal Of Hazardous Materials*, B84, 29-41, 2001
- Pazos, M., Sanroman, A.M., Rivera M., 2011. Development Of An Electrochemical Cell For The Removal Of Reactive Black 5, *Desalination*, 274, 39-43.
- Pouet, M.F., Grasmick, A., 1995. Urban Wastewater Treatment by Electrocoagulation and Flotation. *Water Science Technology*, 31, 275-283.
- Qiu, S., He, D., Ma, J., Liu, T., Waite, D., 2015. Kinetic Modeling of the Electro-Fenton Process: Quantification of Reactive Oxygen Species Generation.
- Qin, G., Gong, D., 2013. Pretreatment Of Petroleum Refinery Wastewater By Microwave-Enhanced Fe<sup>0</sup>/GAC Micro-Electrolysis, *Desalination And Water Treatment*, 52:13- 15, 2512-2518, DOI: 10.1080/19443994.2013.811120
- Rahman, A., Nemotallahi, D., Azarian, G., Godini, K., Berizi, Z.(2015). Activated Sludge Treatment By Electro-Fenton Process: Parameter Optimization And Degradation Mechanism.
- Solak, M., 2007, Elektrokoagülasyon Prosesi İle Mermer Atık Sularının Arıtılması, (Yüksek Lisans Tezi), Süleyma Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Şengil A., Özacar M., 2009. The Decolorization Of C.I. Reactive Black 5 İn Aqueous Solution By Electrocoagulation Using Sacrificial Iron Electrodes, *Journal Of Hazardous Materials*, 161, 1369–1376
- Taner, T., 2006, Katyonik Alkiltrimetilamonyum Bromür Sürfaktantlar İle C.I. Reactive Orange 16 Etkileşimi, (Yüksek Lisans Tezi), Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Üzdürmez, A., F.,2007. 3,8-Diaminobenzo[C]Sinnolinin Diazonyum Bileşiklerinin Fenolik Bileşiklerle Kenetlenme Reaksiyonları, (Yüksek Lisans Tezi), Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Xian-Bing, Z., Wen-Yi D., Fei-Yun, S., Wei, Y., Jiao, D., 2014, Degradation Efficiency And Mechanism Of Azo Dye RR2 By A Novel Ozone Aerated İnternal Micro- Electrolysis Filter”, *Journal Of Hazardous Materials*, 276, 77-87

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Yavuz Y., Shahbazi R.,2012. Anodic Oxidation Of Reactive Black 5 Dye Using Boron Doped Diamond Anodes İn A Bipolar Trickle Tower Reactor, *Separation And Purification Technology* 85 130–136.
- Yang, X. 2009, Interior Micro Electrolysis Oxidation Of Polyester Wastewater And Its Treatment Technology, *Journal Of Hazardous Materials*, 169, 480–485.
- Yıldız, C., 2013, Maxilon Yellow 4gl Boyar Maddesinin Bazı Oksit Mineralleri Yüzeyine Adsorpsiyonuna Ait Deneysel Dizayni Ve Optimizasyonu, (Yüksek Lisans Tezi), Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Ying, D., Peng, J., Xu, X., Li, K., Wang, Y., Jio, J., 2012, “Treatment Of Mature Landfill Leachate By İnternal Micro-Electrolysis İntegrated With Coagulation: A Comparative Study On A Novel Sequencing Batch Reactor Based On Zero Valent İron”, *Chemical Engineering Journal*, 426-433
- Yüce, M., 2007, Arıtımı Yapılmamış Atıksulardan İzole Edilen Mikroorganizmalarla Reaktif Black B ve Krom (VI) giderimi, (Yüksek Lisans Tezi), Ankara Üniversitesi Biyoteknoloji Enstitüsü, Ankara.
- Zaroual, Z., Azzi, M., Saib, N., Chainet, 2006. Contribution to the Study of Electrocoagulation Mechanism in Basic Textile Effluent. *Journal of Hazardous Materials*, B131, 73–78.
- Zhang, H., Choi, H.J. ve Huang, C.P., 2005a, Optimization of Fenton process for the treatment of landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, B125, pp, 166- 174.
- Zuo, Y., Ai, S., Ren, Q., Liu, J., Bian, D., 2011, “Study On Treatment Of Wastewater From The Production Of Poly THF With Iron-Carbon Micro-Electrolysis Biological Method”, *Advanced Materials Research*, 374-377, 698-701.