

TEKSTİL ATIKSULARINDAN BOYAR MADDELERİN  
ELEKTROKİMYASAL YÜKSELTGEME  
İLE GİDERİMİ

Canan GÜREL  
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü  
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı  
Şubat-2006

**“Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri  
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir.**

**Proje No: 030234”**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Canan Gürel'in "Tekstil Atıksularından Boyar Maddelerin Elektrokimyasal Yükseltgeme İle Giderimi" başlıklı Çevre Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek lisans tezi 17.01.2006 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye(Tez Danışmanı)	: Doç. Dr. A. Savaş KOPARAL	.....
Üye	: Yard. Doç. Dr. H. Ferdi GERÇEL	.....
Üye	: Yard. Doç. Dr. Yusuf YAVUZ	.....

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

Enstitü Müdürü

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## TEKSTİL ATIKSULARINDAN BOYAR MADDELERİN ELEKTROKİMYASAL YÜKSELTGEME İLE GİDERİMİ

Canan GÜREL

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. A. Savaş KOPARAL  
2006, 80 sayfa

Bu tezde, tıkaç akım reaktörde, bor katkılı elmas elektrotlar kullanılarak Basic Red-29 boyar maddesinin elektrokimyasal yükseltgeme ile sudan giderimi araştırılmıştır. Bütün deneysel çalışmalarda %99 civarında boyar madde giderim verimi elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonunda elde edilen en iyi şartlarda model atıksuda ve tekstil atıksuyunda zehirlilik testleri yapılmış, toksisitenin yüksek oranlarda giderildiği görülmüştür. Tekstil atıksuyunda gerçekleştirilen çalışmada %90'nin üzerinde KOİ giderimi sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrokimyasal yükseltgeme, Boyar madde, Bor katkılı elmas, Toksikite, Tekstil atıksuyu

## **ABSTRACT**

**Master of Science Thesis**

### **DYE STUFF REMOVAL FROM TEXTILE WASTE WATER BY ELECTROCHEMICAL OXIDATION**

**Canan GÜREL**

**Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Environmental Engineering Program**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. A. Savaş KOPARAL  
2006, 80 pages**

In this thesis, electrochemical oxidation removal of Basic Red dye stuff from textile waste water was investigated in a plug flow reactor using boron doped diamond electrode. Dyestuff removal of 99% has been achieved in all experiment. In model waste water and textile waste water, toxicity tests were performed under optimum conditions and high removal efficiency for toxicity was obtained. COD removal was achieved over 90% in textile waste water.

**Keywords:** Electrochemical Oxidation, Dye stuff, Boron Doped Diamond, Toxicity, Textile Waste Water

## TEŞEKKÜR

Tezimin baŐından beri tecrübe, bilgi ve hoŐgörüŐüyle daima bana destek olan sayın hocam Doç. Dr. A. Savaş KOPARAL'a,

Deneysel çalıŐmalarım süresince bilgi, anlayıŐ ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Yard. Doç. Dr. Yusuf YAVUZ'a,

ÇalıŐmamın her aŐamasında dostluğuyla hep yanımda olan AyŐe Gülhan KOYUNCU'ya,

Laboratuvar çalıŐmalarımda dahi beni yalnız bırakmayan sevgili kardeŐlerim Ceylan ve Serkan'a,

Manevi desteğini hiç esirgemeyen sevgili arkadaŐım İbrahim EVREN'e,

Hayatımın her aŐamasında maddi ve manevi destekleriyle hep arkamda duran sevgili anne ve babama sonsuz teşekkür ederim.

Canan GÜREL

Şubat, 2006

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
<b>1.KONU VE AMAÇ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARI VE BOYAR MADDELER.....</b>	<b>3</b>
2.1.Tekstil Atıksularının Karakteristikleri.....	3
2.2. Renk.....	5
2.3. Boyarmaddeler5 2.4.Boyar Madde Atıksularının Alıcı Ortamlardaki Etkileri.....	6
<b>3. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ KLASİK YÖNTEMLERLE ARITIMI.....</b>	<b>8</b>
3.1.Mekanik arıtım.....	9
3.2.Kimyasal arıtım.....	9
3.3.Biyolojik arıtım.....	10
3.4.Klasik Yöntemlerle Daha Önceden Yapılmış Renk Giderim Çalışmaları.....	12
<b>4. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE ARITIMI.....</b>	<b>14</b>
4.1. Elektrokimyasal Atıksu Arıtımı.....	14

4.2. Elektrokimya ve Elektrokimya Mühendisliği.....	14
4.3. Boyar Maddelerin Elektrokimyasal Yöntemlerle Giderimi.....	20
4.3.1. Elektrokimyasal yükseltgeme.....	21
4.3.2. Elektrokimyasal çöktürme.....	22
4.3.3. Elektroflotasyon.....	24
4.3.4. Elektrokimyasal yöntemlerle daha önceden yapılmış arıtımı ve renk giderim çalışmaları.....	24
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>29</b>
5.1. Kullanılan Elektrot Malzemesi.....	30
5.2. Kullanılan Kimyasal Maddeler.....	32
5.3. Kullanılan Yardımcı Araçlar.....	33
5.4. Hesaplamalarda Kullanılan Eşitlikler.....	33
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI.....</b>	<b>35</b>
6.1. Model Atıksularla Gerçekleştirilen Çalışmalar.....	35
6.2. Tekstil Atıksuyu İle Gerçekleştirilen Çalışmalar.....	66
<b>7. BULGULARIN TARTIŞILMASI.....</b>	<b>71</b>
<b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>72</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>73</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>76</b>
EK -1 Standart Çalışma Doğrusu Ve Derişim Hesabı.....	76
EK-2 Peristaltik Pompa Kalibrasyonu.....	78
EK-3 Örnek Hesaplamalar.....	79
EK-4 İki Kutuplu Tıkaç Akım Reaktörün Anot Yüzey Alanı Hesabı.....	80

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

4.1. Elektrokimyasal reaktörde gerçekleşen olaylar ve kütle denklilikleri.....	17
5.1. Tıkaç akım reaktör ve deneysel çalışma düzeneği.....	30
6.1. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=44$ mA, $i=0,25$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,03 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.= 5,54 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal ).....	45
6.2. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I= 88$ mA, $i=0.5$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.= 0,01 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ,E.İ.=2,82mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	45
6.3. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=88$ mA, $i=0,5$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,02 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.= 3,64 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	46
6.4. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=88$ mA, $i=0,5$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,03 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.= 5,54 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	46
6.5. $C_0=$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=132$ mA, $i=0.75$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,03 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.=5,54 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	47
6.6. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=132$ mA, $i=0.75$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.= 8,92 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	47



- 6.7.  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada  
 boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi  
 ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  
 D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.=5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal).....48
- 6.8.  $C_0=40$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada  
 boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi  
 ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  
 D.E.=0,04 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.=7,38mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal).....48
- 6.9.  $C_0=40$  mg/L BR çözeltisi ile yapılan çalışmada  
 boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi  
 ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  
 D.E.=0,05 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.=8,92 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal).....49
- 6.10.  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada  
 boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi  
 ( $I=704$ mA,  $i=4$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=,36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  
 D.E.=0,2 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.=29,1 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal).....49
- 6.11.  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada  
 boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi  
 ( $I=1760$  mA,  $i=10$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  
 D.E.=0,5 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 58 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal).....50
- 6.12.  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada  
 boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi  
 ( $I=176$ mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=24,8 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  
 D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal).....50
- 6.13.  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada  
 boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi  
 ( $I=176$ mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=47,8 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  
 D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal).....51
- 6.14.  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada  
 boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi  
 ( $I=176$ mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  
 D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH=3).....51

- 6.15.  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada  
 boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi  
 ( $I=176$ mA,  $i=1$ mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  
 D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH=11).....52
- 6.16.  $C_0=20$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada  
 boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi  
 ( $I=176$ mA,  $i=1$ mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  
 D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.=5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal).....52
- 6.17.  $C_0=60$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada  
 boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi  
 ( $I=176$ mA,  $i=1$ mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  
 D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal).....53
- 6.18.  $C_0=40$  mg/L'lik BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada  
 toksisitenin zamanla değişimi.....53
- 6.19. pH'ın akım yoğunluğuna göre değişimi  
 ( $C_0=40$  mg/L, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,  
 $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ ,L/dak,pH<sub>0</sub>=doğal).....54
- 6.20. pH'ın destek elektrolit miktarına göre değişimi  
 ( $C_0=40$  mg/L,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ ,L/dak, pH<sub>0</sub>=doğal).....54
- 6.21. pH'ın debiye göre değişimi  
 ( $C_0=40$  mg/L, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>, pH<sub>0</sub>=doğal).....55
- 6.22. pH'ın başlangıç pH'ına göre değişimi  
 ( $C_0=40$  mg/L, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>).....55
- 6.23. pH'ın başlangıç derişimine göre değişimi  
 (D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,  $i=1$ mA/cm<sup>2</sup>, pH<sub>0</sub>=doğal).....56
- 6.24. Enerji tüketiminin akım yoğunluğuna göre değişimi  
 ( $C_0=40$  mg/L, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,  
 $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, pH<sub>0</sub>=doğal).....56
- 6.25. Enerji tüketiminin destek elektrolit miktarına göre değişimi  
 ( $C_0=40$  mg/L,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  
 $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, pH<sub>0</sub>=doğal).....57

6.26. Enerji tüketiminin debiye göre değişimi ( $C_0=40$ mg/L, D.E.=0,03 M $Na_2SO_4$ , $i=1$ mA/cm <sup>2</sup> , pH <sub>0</sub> =doğal).....	57
6.27. Enerji tüketiminin başlangıç pH'sına göre değişimi ( $C_0=40$ mg/L, D.E.=0,03 M $Na_2SO_4$ , $i=1$ mA/cm <sup>2</sup> , pH <sub>0</sub> =doğal).....	58
6.28. Enerji tüketiminin başlangıç derişimine göre değişimi (D.E.=0,03 M $Na_2SO_4$ , $i=1$ mA/cm <sup>2</sup> , pH <sub>0</sub> =doğal).....	58
6.29. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözteli ile yapılan çalışmalarda renk gideriminin akış hızına göre değişimi ( $I=176$ mA, $i=1$ mA/cm <sup>2</sup> , D.E.=0,03 M $Na_2SO_4$ , E.İ.= 5,54 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	59
6.30. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözteli ile yapılan çalışmalarda renk gideriminin akım yoğunluğuna göre değişimi ( $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,03 M $Na_2SO_4$ , E.İ.= 5,54 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	60
6.31. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözteli ile yapılan çalışmalarda renk gideriminin akım yoğunluğuna göre değişimi ( $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,03 M $Na_2SO_4$ , E.İ.= 5,54 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	61
6.32. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözteli ile yapılan çalışmalarda renk gideriminin başlangıç pH'ına göre değişimi ( $I=176$ mA, $i=1$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,03 M $Na_2SO_4$ , E.İ.= 5,54 mS/cm).....	62
6.33. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözteli ile yapılan çalışmalarda renk gideriminin destek elektrolit derişimine göre değişimi ( $I=88$ mA, $i=0,5$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, pH <sub>0</sub> =doğal).....	63
6.34. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözteli ile yapılan çalışmalarda renk gideriminin destek elektrolit derişimine göre değişimi ( $I=176$ mA, $i=1$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, pH <sub>0</sub> =doğal).....	64

6.35. BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalarda renk gideriminin başlangıç derişimine göre değişimi ( $I=176\text{mA}$ , $i=1\text{ mA/cm}^2$ , $Q=36,3\cdot 10^{-3}\text{ L/dak}$ , $D.E.=0,03\text{ M Na}_2\text{SO}_4$ , $E.\dot{I}.= 5,54\text{ mS/cm}$ , $\text{pH}_0=\text{doğal}$ ).....	65
6.36. Tekstil atıksuyu ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=176\text{ mA}$ , $i=1\text{mA/cm}^2$ , $Q=36,3\cdot 10^{-3}\text{ L/dak}$ , $\text{pH}_0=\text{doğal}$ ).....	68
6.37. Tekstil atıksuyu ile yapılan çalışmada toksisitenin zamanla değişimi.....	69
6.38. Tekstil atıksuyu ile yapılan çalışmada KOİ'nin zamanla değişimi( $I=176\text{ mA}$ , $i=1\text{ mA/cm}^2$ , $Q=36,3\cdot 10^{-3}\text{ L/dak}$ , $\text{pH}_0=\text{doğal}$ ).....	69
6.39. Tekstil atıksuyu ile yapılan çalışmada pH'ın zamanla değişimi ( $I=176\text{ mA}$ , $i=1\text{ mA/cm}^2$ , $Q=36,3\cdot 10^{-3}\text{ L/dak}$ , $\text{pH}_0=\text{doğal}$ ).....	70
6.40. Tekstil atıksuyu ile yapılan çalışmada enerji tüketiminin zamanla değişimi ( $I=176\text{ mA}$ , $i=1\text{ mA/cm}^2$ , $Q=36,3\cdot 10^{-3}\text{ L/dak}$ ).....	70

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Tekstil Atıksularının Ortalama Özellikleri.....	4
2.2. Balıklar Üzerinde Çeşitli Boyaların Etkileri .....	7
3.1. Arıtma sistemlerindeki süreçlerin tahmini kirletici	giderme
verimleri.....	11
4.1. Elektrotlarda oluşan tepkime mekanizmaları .....	23
5.1. Bazı kimyasal yükseltgenlerin oluşum gerilimleri .....	32
6.1. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma ( $I=4$ mA, $i=0,25$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,03 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.= 5,54 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal) .....	36
6.2. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma ( $I=88$ mA, $i=0,5$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,01 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.= 2,82mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	37
6.3. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma ( $I=44$ mA, $i=0,5$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,02 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.= 3.64 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	37
6.4. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma ( $I=88$ mA, $i=0,5$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,03 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.= 5,54 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal) .....	38
6.5. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma ( $I=132$ mA, $i=0,75$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,03 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.=5,54mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	38
6.6. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma ( $I=132$ mA, $i=0,75$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.= 8,92 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	39
6.7. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma ( $I=176$ mA, $i=1$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak, D.E.=0,03 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.=5,54 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	39
6.8. $C_0=40$ mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma ( $I=176$ mA, $i=1$ mA/cm <sup>2</sup> , $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$ L/dak,	

D.E.=0,04 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.=7,38mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	40
6.9. C <sub>0</sub> =40 mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma (I=176 mA, i=1mA/cm <sup>2</sup> , Q=36,3.10 <sup>-3</sup> L/dak, D.E.=0,05M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.=8,92 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	40
6.10. C <sub>0</sub> =40 mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma (I=704mA, i=4mA/cm <sup>2</sup> , Q=,36,3.10 <sup>-3</sup> L/dak, D.E.=0,2 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.=29,1 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	41
6.11. C <sub>0</sub> =40 mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma (I=1760 mA, i=10 mA/cm <sup>2</sup> , Q=36,3.10 <sup>-3</sup> L/dak, D.E.=0,5 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.= 58 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	41
6.12. C <sub>0</sub> =40 mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma (I=176mA, i=1mA/cm <sup>2</sup> , Q=24,8.10 <sup>-3</sup> L/dak, D.E.=0,03 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ,E.İ.= 5,54 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	42
6.13. C <sub>0</sub> =40 mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma (I=176mA, i=1mA/cm <sup>2</sup> , Q=47,8.10 <sup>-3</sup> L/dak, D.E.=0,03 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ,E.İ.= 5,54 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	42
6.14. C <sub>0</sub> =40 mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma (I=176mA, i=1mA/cm <sup>2</sup> , Q=36,3.10 <sup>-3</sup> L/dak, D.E.=0,03 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.= 5,54 mS/cm, pH=3).....	43
6.15. C <sub>0</sub> =40 mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma (I=176mA, i=1mA/cm <sup>2</sup> , Q=36,3.10 <sup>-3</sup> L/dak, D.E.=0,03 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ,E.İ.= 5,54 mS/cm, pH=11).....	43
6.16. C <sub>0</sub> =20 mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma (I=176mA, i=1mA/cm <sup>2</sup> , Q=36,3.10 <sup>-3</sup> L/dak, D.E.=0,03 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.= 5,54 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	44
6.17. C <sub>0</sub> =60 mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışma (I=176mA, i=1mA/cm <sup>2</sup> , Q=36,3.10 <sup>-3</sup> L/dak, D.E.=0,03 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , E.İ.= 5,54 mS/cm, pH <sub>0</sub> =doğal).....	44
6.18. Tekstil atıksuyu ile yapılan çalışma (I=176 mA, i=1 mA/ cm <sup>2</sup> , Q=36,3.10 L/dak.).....	67

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Amper
BDD	: Bor Katkılı Elmas
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
BR	: Basic Red
C <sub>0</sub>	: Başlangıç derişimi
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
DE	: Destek elektrolit
EC <sub>50</sub>	: %50 ölüme neden olan konsantrasyon değeri
Eİ	: Elektriksel iletkenlik
g	: Gram
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	: Hidrojen Peroksit
I	: Akım
i	: Akım yoğunluğu
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
kW	: Kilowatt
kWh	: Kilowatt saat
L	: Litre
mA	: Mili Amper
mg	: Miligram
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	: Sodyum sülfat
nm	: Nano metre
Q	: Debi
t	: Zaman
TOC	: Toplam Organik Karbon
UV	: Ultra viyole
V	: Gerilim, Volt

## 1.KONU VE AMAÇ

Elektrokimyasal yöntemlerle organik ve inorganik maddelerin giderimi bir çok araştırmaya konu olmuştur. Özellikle biyolojik parçalanmaya direnç gösteren organik maddelerin sulara karışması, geleneksel su ve atıksu arıtım yöntemlerinin yetersiz kalmasına neden olmakta ve çalışmaları ileri arıtım tekniklerine yönlendirmektedir.

Bu çalışmada, elektrokimyasal yöntemle boyar madde giderimi araştırılmıştır. Yapılan deneylerde, model atıksulardan boyar maddelerin elektrokimyasal yükseltgeme ile giderimi çalışılmıştır. Optimum koşulların elde edilmesinden sonra tekstil endüstrisi atıksularının arıtılabilirliği araştırılmıştır.

Elektrokimyasal yükseltgemedede başlangıç boyar madde derişimi, akım yoğunluğu, akış hızı, destek elektrolit derişimi, başlangıç pH'ının giderim verimine etkilerinin incelendiği parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda Rashig halkası şeklindeki bor katkılı elmas elektrotlar kullanılmıştır. Parametrik çalışmalar model atıksularla yapılmıştır. Model atıksular hazırlanırken Basic Red-29 adlı boyar madde kullanılmıştır. Kullanılan bu boyar madde kronik maruziyette toksik olduğundan (http-1) iyi şartlarda model atıksularda ve tekstil atıksuyunda toksisitenin zamanla değişimi gözlenmiştir.

Toksisite, zehirli olarak tanımlanan bir maddenin bir ortamda belirli bir derişimden fazla bulunmasıyla insan sağlığının, çeşitli indikatör organizmaların sağlığının ve ekosistem dengesinin tehdit edilmesi; akut veya kronik hastalıklara, teratojenik (anne karnındaki embriyoda kalıtsal bozulmalar), kalıtımsal bozulmalara ve ölümlere yol açması özelliğidir.

Zehirli madde içeren atıksular, verildikleri alıcı ortamlara yansıttıkları zehirli etkilerin yanı sıra bu tip atıksuları arıtan biyolojik arıtma tesislerindeki mikroorganizmaları da olumsuz etkileyerek solunum hızlarının düşmesine, besin kullanım hızlarının azalmasına ve dolayısıyla arıtma veriminin düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle arıtımı yapılacak tekstil atıksuyunu karakterize eden parametrelerin yanı sıra toksisite belirlenmesi çalışmaları da yapılmıştır

Giderim çalışmaları öncesinde, esnasında ve sonrasında, belirli zamanlarda reaktörden alınan numunelerin 200-700 nm dalga boyunda spektrumları alınarak



boyar madde giderim verimleri belirlenmiş ve optimum şartlarda KOİ analizleri ve toksisite testleri gerçekleştirilmiştir

## 2. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARI VE BOYAR MADDELER

### 2.1. Tekstil Atıksularının Karakteristikleri

Tekstil atıksularının en belirgin özelliği renkleridir. Kullanılan boyar maddenin tipine bağlı olarak tekstil atıksularının rengi, baskılarına göre, kırmızı, kahve rengi, mavi, mor ve siyah olarak değişir. Tekstil atıksuları günden güne renk değiştirir, hatta bazen, müşteri isteklerini karşılayabilmek üzere, boyama sürecinde kullanılan boyar madde günde birkaç kez değişir. Renk değişimleri aynı zamanda tekstil atıksularının KOİ'si üzerinde de dalgalanmalara neden olur. Boyar maddece zengin bu tür sular arıtılmadan deşarj edilirse alıcı ortam ekosisteminde olumsuz etkiler oluşturacaktır (Lin ve Peng 1994).

Tekstil endüstrisinden alıcı ortama verilen boyama atıkları alıcı suyun renginin değişmesine, boyalı hale gelmesine neden olur. Kullanılan boyaya göre bitki ve hayvan yaşamı üzerinde toksik etki yaparlar, nehrin kendi kendini arıtma kapasitesini (özümleme kapasitesi) engellerler (Şengül 1991).

Boya banyoları atıkları alıcı suyun renklenmesine, suyun ışık geçirgenliğinin azalmasına, akuatik floranın fotosentez hızının azalmasına neden olurlar. Bazı anilin boyaları düşük derişimlerde olsalar da balık organizmalarında birikirler ve balık dokuları üzerinde belirgin renk oluştururlar. Tekstil atıksularıyla renklenmiş alıcı sular, diğer endüstriler (kağıt, bira vb.) için su kaynağı olarak kullanılamazlar.

Tekstil atıksularındaki büyük pH dalgalanmaları diğer önemli dezavantajlarından birisidir. PH değişimi, öncelikle boyama sürecinde farklı tiplerde boyar madde kullanımından kaynaklanır. Atıksuyun pH'ı 2'den 12'yi aşan değerlere kadar değişebilir. Böylesine büyük pH değişimi, özellikle aktif çamur ve kimyasal arıtım süreçlerinin oldukça kısıtlı pH değerleri nedeniyle önemli bir sorundur. Bu nedenle uygun pH ayarlaması tekstil atıksuları arıtım süreçlerinde gerekli bir parça haline gelmiştir (Lin ve Peng 1994).

Endüstriyel atıksuların bir çoğuna kıyasla tekstil atıksularının sıcaklığı yüksektir. Boyama sürecinde, değişik basamaklarda sıcaklığı 90<sup>0</sup>C'ye kadar varan

yıkama suları kullanılır. Tekstil atıksularının ~ 40<sup>0</sup>C'ye kadar varan sıcaklığı, bu yıkama sularının bir sonucudur. Yüksek sıcaklık, direkt boyama sürecinden gelen tekstil atıksularının arıtımını gerçekleştirilemez hale getirir ve bu nedenle 30<sup>0</sup>C veya daha düşük sıcaklıkta ön ısı giderimi gerekir.

Tekstil atıksularının içerdiği diğer önemli kirleticiler az miktarlarda polivinil alkol (PVA), karboksimetil selüloz (CMC), kimyasal maddeleri parçalamak için nişasta ve sentetik liflerdir. Tekstil malzemelerinin üretiminde kullanılan bu lifler; doğal olanlar (Bitkisel-pamuk, Hayvansal-yün) ve sentetik olanlar (akrilik, naylon, vb.) şeklinde ikiye ayrılabilir (Singleton 1983).

Kaplama maddeleri derişimlerine bağılı olarak 10000 mg/L'nin üstünde yüksek KOİ değerlerine sahip olduklarından tekstil atıksularının KOİ içeriğine önemli ölçüde katkıda bulunurlar.

PH, BOİ, toplam katılar ve üretilen atıksu miktarı bir süreçten diğerine büyük farklılık göstermesine karşın, bu atıksuların dengeleme tankında karıştırılması ile fiziksel ve kimyasal özellikler açısından daha kararlı atıksu elde edilebilir. Genel olarak tekstil atıksuları, KOİ içeriği ve renk yoğunluklarına göre 3 sınıfa ayrılabilir: yüksek, orta ve düşük şiddette atıksular. Yüksek şiddetli atıksular 1600 mg/L'nin üzerinde KOİ derişimi ve çok düşük ışık geçirgenliğine sahip, koyu renkli sulardır. Orta şiddetli atıksular 800-1600 mg/L KOİ içerirken, düşük şiddetli atıksuyun KOİ içeriği <800 mg/L'dir. Çizelge 2.1'de bu üç tekstil atıksuyunun ortalama özellikleri gösterilmiştir. Atıksuyun rengi, yoğunluk açısından, bu üç sınıflandırmayla doğru orantılı olarak değişir. Ancak, bazı durumlarda düşük ya da orta şiddetli kirli atıksu çok koyu renge sahip olabilir. Bu atıksuların arıtımındaki zorluk derecesi, bağılı kirlilik derecesiyle yakından ilgilidir. Genel olarak tekstil atıksularının pek çoğunun orta ve düşük şiddette kirli atıksu sınıfına girdiği söylenebilir (Lin ve Peng 1994).

**Çizelge2.1.** Tekstil atıksularının ortalama özellikleri (Lin ve Peng1994)

Tip	BOİ (mg/L)	KOİ (mg/L)	PH	Askıda Katı Madde(mg/L)	Sıcaklık ( <sup>0</sup> C)	Yağ (mg/L)	İletkenlik (µS)
Yüksek Şiddetli	500	1500	10	250	28	50	2900
Orta Şiddetli	270	970	9	137	28	21	2500
Düşük Şiddetli	100	460	10	91	31	10	2100

Tekstil atıksularında bulunan ve kükürtlü maddelerin kullanımından oluşan sülfür bileşikleri özellikle beton borular üzerinde zararlı etki yapar. 300 mg/L'nin üzerindeki sülfat derişimleri, beton kanalizasyon borularında korozyona yol açarlar. Ayrıca, yünlü tekstil atıklarında bulunan yağların ve sabunların bozunmasından oluşan yağ asitlerinin de kanalizasyon kanallarında korozyon etkisi vardır (Şengül 1991).

## **2.2. Renk**

Renk kelimesi birkaç anlamda kullanılmaktadır. Psikolojik renk; gözleri ve beyni normal olan herkesin aynı tür ışık tarafından uyarıldığında aynı tür duyguları hissetmesini tanımlamak için kullanılır. Fizyolojik renk; değişik ışık türleri tarafından göz retinasında ve görme sinirlerinde oluşturulan fizyolojik olaydır. Beyinde psikolojik renk duygusunu doğurur. Fiziksel renk; fiziksel bir olay olup belirli bir ışığın hangi dalga uzunluklarını hangi oranda içerdiğinin kesin ve rakamsal olarak belirlenmesidir. Fiziksel renk, spektroskopik yöntemle söz konusu olan ışığın her dalga uzunluğuna düşen enerji payını ölçmek suretiyle incelenebilir. Psikolojik renk, fiziksel renk hakkında kesin bir fikir veremez.

## **2.3. Boyarmaddeler**

Boya veya boyarmadde; ışığı yansıtarak veya seçici geçirerek, uygulandığı cisme renk veren maddelere denilmektedir. Boya ve pigment arasında ayrım yapılmıştır. Boya çözüldüğünde renk, boyanmak amacıyla boyalı çözeltiliye daldırılmış maddeye kendiliğinden yönelerek onu sarar. Pigmentler ise çözünmezler, maddeye dağılarak renk verirler. Bilinen en eski boyarmaddeler, Indigofero bitkilerinden elde edilen indigo, Rubiotinctorium'dan elde edilen alizarin ve bir tür salyangozdan elde edilen karmin asitidir. Ayrıca, topraktan elde edilen krom sarısı, zencefre (HgS) ve schweifurt yeşili de ilk doğal boyarmaddelerdendir. Perkin'in 1856 yılında ilk sentetik boyarmadde olan

Mauvein'i sentezlemesi ile boyarmaddelerin endüstriyel üretimi başlamış oldu. Günümüz endüstrisinde boyamacılıkta kullanılan boyarmaddelerin hemen hepsi sentetik olarak üretilmektedir (Koparal 1991).

#### **2.4. Boyar Madde Atıksularının Alıcı Ortamlardaki Etkileri**

Atıksularda çok çeşitli bileşikler bulunabildiğinden alıcı sulardaki etkileri farklı olabilmektedir. Alkoller ve doymuş karboksilik asitler biyolojik olarak yükseltgenebildiklerinden alıcı sulardaki çözülmüş oksijenin tükenmesine yol açarlar. Alkoller de dahil olmak üzere çeşitli organik bileşikler biyokimyasal ayrışma süreçlerine etki ederler (Şengül 1991).

Bazı bileşikler 2,5 mg/L derişimlerinde mikroorganizmalara karşı toksik olmadıkları halde, ikisi ya da üçü bir arada bulunduğunda biyolojik ayrışmayı tamamen engelleyebilmektedir. İzopropil eter, iminoetil alkol, etilendiamin ve trietanolamin gibi bileşiklerin ayrışması için 50 günden uzun bir süreye gerek olduğu bulunmuştur. Sülfürler, polisülfürler ve hidrosülfürler gibi bazı bileşikler ise alıcı su ortamlarında ani ve büyük bir oksijen tüketimine neden olurlar (Şengül 1991).

İnorganik asitler, ağır metal tuzları ve toksik organik bileşikler yüzeysel sulardaki biyolojik dengeyi tamamen bozar, bazen de kısa veya uzun mesafelerde biyolojik yaşamı tamamen ortadan kaldırabilir. Organik maddelerin ve boyar maddelerin balıklar üzerinde toksik etkiler yaptığı çeşitli araştırmacılar tarafından gösterilmiştir. Hidrazin 0,7 mg/L gibi çok düşük derişimlerde bile çok toksiktir. Diğer bileşikler için belirlenen sınır derişimler; sodyum bisülfid 4 mg/L, diamilamin 5 mg/L, fenol 10 mg/L, dimetilamin 30 mg/L, amilasetat 50 mg/L, asetik asit 100 mg/L şeklindedir. Boyalar için verilen sınır derişimler ise viktorya mavisi 10 mg/L, metil viyolet 6B 10 mg/L, parlak yeşil boyalar 10 mg/L'dir. Boyaların balıklar üzerindeki etkileri Çizelge 2.2'de özetlenmiştir ( Şengül 1991).

**Çizelge 2.2.** Balıklar üzerinde çeşitli boya ların etkileri (Şengül 1991)

Boya	Derişim (mg/L)	İnceleme Periyodu (gün)	Etki
Metilen Mavisi	217,5-177,5	7	Belirgin
Metilen Mavisi	157,5-57,5	7	Belirgin
Krizoidin	5	0,3	Belirgin
Bismark Krizoidini	8	4	Belirgin
Bismark Krizoidini	5	4	Hiçbir etki yok
Nortensa Sarısı	85	4	Belirgin

### 3. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ KLASİK YÖNTEMLERLE ARITIMI

Tekstil atıksularının deşarj standartlarını sağlayacak şekilde arıtılması için genellikle birden fazla temel sürecin uygulanmasına gerek vardır. Bu süreçlerin seçimi için, tesis ve işletme masrafları, arazi gereksinimi, atıksu özelliklerindeki değişikliklere karşı istenilen çıkış suyu kalitesinin sağlanması gibi hususlar göz önüne alınmalıdır.

Tekstil endüstrisinde kirletici bileşiklerin arıtılmasında kullanılan teknolojiler;

1. Askıda katı madde giderimi
  - Izgaradan geçirme
  - Çökeltme
  - Filtrasyon
  - Flotasyon
2. BOİ/KOİ azaltma yöntemleri
  - Lagünler
  - Aktif çamur
  - Besi maddesi ilavesi
  - Sabit yataklı biyolojik reaktörler
    - Damlatmalı filtreler
    - Döner diskler
  - Aktif karbon adsorpsiyonu
  - Kimyasal pıhtılaştırma
3. Yağ ve gres giderme
4. Krom giderme
5. Renk giderme
6. Fenolik bileşiklerin giderilmesi
7. Fosfat azaltma
8. Azot azaltma
9. Çamur azaltma

Tekstil fabrikaları atıksularının arıtılmaları genellikle üç ana etkene bağı olarak geliştirilmiştir. Bunlarda fiziksel olaylara dayanan mekanik arıtımda, atıksulardaki bazı maddeler çökelme yoluyla giderilmektedir. İkincisi, fiziksel veya kimyasal olaylara bağı arıtım, üçüncüsü ise mikroorganizmaların temizleme özelliğine dayalı biyolojik arıtımdır (Yavuz 1998).

### **3.1.Mekanik Arıtım**

Mekanik arıtımda, kendi ağırlığıyla tabana çöken veya yüzeye çıkan katı maddeler ile yağ veya benzeri yüzücü maddeler tutularak sudan ayrılır. İri maddeleri tutmak için ızgaralar, kum ve benzeri maddeleri tutmak için kum tutucular, yüzen maddeleri ayırmak için yağ ayırıcılar, kendi halinde çökebilen maddeleri ayırmak için ise çöktürme havuzları kullanılır.

Tekstil fabrikalarında mekanik arıtım, atıksuyun özelliklerini dengelemeye ve ayarlamaya yarayan havuzlarla birlikte uygulandığı zaman önem kazanmaktadır.

Mekanik arıtımda, dengeleme havuzlarının yanı sıra çöktürme havuzları da önemli yer tutar. Çöktürme havuzlarında suyun iki saat kalması genellikle yeterli olmaktadır. Eğer, yalnızca, mekanik arıtım Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ndeki sınır değerleri sağlamaya yeterli değilse daha ileri arıtım işlemleri gerekir (Yavuz 1998).

### **3.2.Kimyasal Arıtım**

Tekstil fabrikası atıksularının arıtılmasında mekanik arıtım yeterli olmadığı için kimyasal arıtım da uygulanabilir. Kimyasal arıtımda kendi ağırlığıyla çökemeyen katı maddelerle, kolloidler ve çözünmüş maddelerin, suya pıhtılaştırıcı ve pıhtılaştırmaya yardımcı maddeler ilave etmek ve karıştırmak suretiyle yumaklar halinde çökelmeleri sağlanır.

Kimyasal arıtım sistemleri bir seri fiziksel ve kimyasal süreçlerin birleşmesinden meydana gelmiştir. Bu sistem içerisinde dengeleme, hızlı



karıştırma, yumaklaştırma, çöktürme, çamur giderme, filtrasyon ve dezenfeksiyon birimleri bulunabilir.

Kimyasal arıtım özellikle renkli veya ince dağılmış katı tanecikler içeren atıksulara uygulanmaktadır. Kimyasal arıtım sonucunda genellikle büyük hacimlerde çamur oluşur.

Kimyasal arıtım ile biyolojik arıtımda BOİ ve organik katı maddelerin farklı yollarla giderilmeleri sağlanır. Biyolojik süreçlerden aerobik arıtımda organik maddeleri artık oksijen tüketemeyecekleri bir düzeye getirir ve kararlı kılar. Kimyasal arıtım yöntemlerinden biri olan çöktürmede ise organik maddeler ilave edilen pıhtılaştırıcılarla birlikte çöker (Yavuz 1998).

### **3.3.Biyolojik Arıtım**

Yüzyılımızın başında geliştirilmeye başlanan biyolojik arıtım, organik kirleticileri içeren evsel ve endüstriyel atıksulara uygulanır. Günümüzde yüksek arıtım gücüne sahip biyolojik yöntemler geniş çapta kullanılmaktadır.

Biyolojik arıtımda atıksudaki organik maddeler, organizmalar tarafında besin ve enerji kaynağı olarak kullanılır. Atıksuda gelişen ve arıtımda önemli olan başlıca organizmalar; bakteriler, mantarlar, algler, protozoalar, rotiferler, kabuklular ve virüslerdir. Organizmalar ve buna bağlı olarak arıtma, oksijen kullanımına göre ikiye ayrılır. Birinci grup moleküller oksijen kullanan ve oksijenli ortamda yaşayabilen organizmalar, diğeri oksijenin bulunmadığı yerlerde yaşayabilen organizmalardır. Mikroorganizmaların gelişmesi yaşadıkları çevreye bağlıdır. Yaşamalarına etki eden başlıca faktörler; pH, sıcaklık, gerekli besi maddelerinin, eser elementlerin, yeterli oksijenin bulunması ve uygun karıştırma.

Tekstil atıksularının geniş alan gereksinmesi olan yöntemlerle arıtımında olumlu sonuçlar alınmamıştır. Atıksuyun büyük havuzlarda uzun süre bekletilerek biyolojik olarak arıtımı beklenen sınır değerleri sağlayacak yeterlikte olmamıştır. Bu nedenle biyolojik arıtım yöntemlerinden, daha küçük yer kaplayan ve daha yüksek arıtma verimi sağlayan damlatmalı filtre ve aktif çamur yöntemi geniş uygulama alanı bulmuştur.

Belirli bir sürecin kirleticiyi giderebilmesi, atıksuyun özelliklerine bağlıdır. Tekstil atıksularının arıtılması için kullanılan arıtma sistemlerindeki süreçler ve arıtma verimleri Çizelge 3.1’de verilmiştir (Yavuz 1998).

**Çizelge 3.1.** Arıtma sistemlerindeki süreçlerin tahmini kirleticici giderme verimleri

Arıtma prosesi	BOİ5 (%)	KOİ (%)	TAM (%)	GRES (%)	RENK (%)
<b>ÖN ARITMA</b>					
Izgaradan geçirme	0-5	-	5-20	-	-
Dengeleme	0-20	-	-	-	-
Nötralizasyon	-	-	-	-	-
Kimyasal pıhtılaştırma(*)	40-70	40-70	30-50	90-97	0-70
Flotasyon	30-50	20-40	50-60	90-98	-
<b>BİYOLOJİK ARITMA</b>					
Konvansiyonel aktif çamur	70-95	50-70	85-95	0-15	-
Uzatmalı havalandırma	70-94	50-70	65-95	0-15	-
Havalandırma lagün	60-90	45-80	85-95	0-10	-
Aerobik lagün	50-80	35-60	50-80	0-10	-
Damlatmalı filtre	40-60	20-30	-	-	-
<b>ÜÇÜNCÜ KADEME ARITMA</b>					
Kimyasal pıhtılaştırma(*)	40-70	40-70	30-90	90-97	0-70
Karışık ortamli filtrasyon	25-40	25-40	80	-	-
Karbon adsorpsiyonu	25-40	25-60	25-40	-	80-90
Klorlama	0-5	0-5	-	0-5	0-5
Ozonlama	-	30-40	50-70	-	70-80
<b>İLERİ ARITMA</b>					
Sprey sulama	90-95	80-90	95-98	-	-
Buharlaştırma	98-99	95-98	99	-	-
Ters osmoz	93-95	90-95	95-98	-	-
(*) Giderme verimleri kimyasal madde ve kullanılan dozaj ile ilgilidir.					

### 3.4.Klasik Yöntemlerle Daha Önceden Yapılmış Renk Giderim Çalışmaları

İdil Arslan Alaton ve Işıl Akmehtmet Balcıoğlu (2001) tarafından hidrolize olmuş Reactive Black 5 ile bir pilot çalışma yapılmıştır. Hidrolize olmuş Reactive Black 5'in sulu çözeltileri sırasıyla H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV-C ve TiO<sub>2</sub>/UV-A ileri radyasyon sistemleri kullanılarak fotokimyasal ve fotokatalitik olarak arıtılmıştır. OH<sup>-</sup> iyonlarının sebep olduğu renk giderim kinetiklerini deneysel olarak anlatmak için reaksiyon pH'nın, oksidant dozunun ve başlangıç boya konsantrasyonunun gözlemlenen etkileri kullanılmıştır. Buna dayanarak, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV-C sistem kullanılarak renk tamamen giderilirken en iyi şartlarda 120 dakikalık ileri yükseltgeme ile ortalama %78 TOC giderimi elde edilmiştir. Arıtım direkt UV-C veya UV-A fotolizlerindenise çoğunlukla OH<sup>-</sup> yükseltgemesi tarafından H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV-C yöntemiyle yürütülmüştür.

Tezcanlı-Guyer ve İnce (2003) tarafından ultrasaundla tekstil boyalarının ağartılması ve toksisite giderimi çalışılmıştır. 520 kHz ultrasonik radyasyonla diiyonize su çözeltilerinde dört tekstil boyasının giderimi araştırılmıştır. Bütün boyalar için boyanın görünür absorbandsında giderim oranı bulunmuştur. Boya moleküllerinde nitelendirilmiş kromoforları fonksiyonel grup tipiyle ilişkilendirilmiştir. Azo boyalarda aromatik/olofinik karbonların yıkımının N=N bağlarındaki hidroksil radikallerinin önceliğine ve boya giderim süreci boyunca organik karakterlerin pek çok yükseltgeme biçimine bağlı olarak rengin gideriminden daha yavaş olduğu görülmüştür. Boya çözeltilerinin toksisite analizleri yapılmış ve çalışmada kullanılan konsantrasyonlarda reaktif boyaların toksik olmadığı fakat bazik boyalardan birinin toksik olduğu belirlenmiştir.

Costa ve ark. (2004) tarafından solar ve ultraviyole radyasyon ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile tekstil boyalarında renk giderimi ve ağartılması çalışılmıştır. Yellow Procion H-4R, Bright Blue Remazol (Blue Reagent-19), Red Procion HE7B ve son iki boyanın karışımının fotoyükseltgemesi araştırılmıştır. Katı olmayan katalizlerin, kuarts örnekleme tüplerinin, borosilikat camın, solar ve ultraviyole radyasyonun ve ağartıcı olarak H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'nin fotoyükseltgemeye etkisi karşılaştırılmıştır. Mavi ve kırmızı boyanın karışımı ve mavi boyanın rengi 3 saatte hem solar hem de ultraviyole radyasyon kullanılarak uzaklaştırılmıştır. Kırmızı ve sarı boyalar için

en iyi sonuçlar (%93) kuarts tüplerle, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve ultraviyole radyasyon kullanarak 6 saatte elde edilmiştir.

## **4. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE ARITIMI**

### **4.1. Elektrokimyasal Atıksu Arıtımı**

Elektrokimyasal atıksu arıtımı, Elektrokimya ve elektrokimya Mühendisliğinin temel ilkelerinin kullanıldığı arıtım yöntemidir. Bu nedenle elektrokimyasal atıksu arıtımı hem atıksu arıtımı tekniklerinin hem de elektrokimyasal tekniklerin iyi bilinerek bir araya getirilmesini gerektirmektedir.

Elektrokimyasal reaktörler modern toplumlarda hayati derecede önemli rol oynamaktadırlar. Günlük yaşamda elektriğin geniş ölçüde kullanılması ve yeni teknolojilerin uygulanmasındaki artış elektrokimyasal reaktörlerin sayısı, tip ve uygulamalarında da son derece büyük artışa neden olmuştur. Öyle ki 1900'lerden önce sadece Galvanik pillerde geniş kullanım olanağı bulan elektrokimyasal reaktörler, günümüzde, metal ve kimyasal madde üretimi, taşınabilir sabit güç kaynakları, metal kaplama, korozyon kontrolü, çevresel amaçlı arıtım, saflaştırma, sensörler ve tıbbi cihazlar gibi değişik amaçlarda kullanılmaya başlanmıştır (Yavuz 1998).

### **4.2. Elektrokimya ve Elektrokimya Mühendisliği**

Elektrokimya elektrik enerjisi ile oluşan kimyasal tepkimeler veya kimyasal tepkimeler sonucu üretilen elektrik enerjisi ile ilgilenen bir bilim dalıdır. Endüstride uygulanmak istenen elektrokimyasal süreçler, ilk önce laboratuvar boyutundaki reaktörlerde yapılmaktadır. Bu boyuttan endüstri boyutuna geçilirken, ortaya çıkan sorunların çözümünde yalnızca elektrokimyanın ilkeleri yeterli olmamaktadır. Elektrokimya mühendisliği bu aşamada devreye girerek, süreçlerin endüstriye uygulanmaları esnasında ortaya çıkan problemleri çözmeye çalışır.

Elektrokimya mühendisliği; kimya mühendisliği ve elektrokimyadan ortaya çıkan kavramların uygulamalarından doğar. Elektrokimya mühendisliği teorisi, başlıca elektrokimyasal reaktörler üzerinde odaklanır. Elektrokimyasal reaktör, içinde elektrokimyasal süreçlerin gerçekleştiği bir sistem olarak düşünülebilir.

Elektrokimyanın ilkeleri dört grupta toplanabilir;

1. Elektrokimyasal termodinamik
2. Elektrot kinetiği
3. Elektrolitik kütle aktarımı
4. Reaktör gerilimi

Elektrokimya mühendisliğinin ilkeleri ise, elektrokimyanın ilkeleri ile birlikte şunlardır;

1. Isı aktarımı
2. Hidrodinamik ve kütle aktarımı
3. Reaktör tasarımı ve malzeme bilimi
4. Ölçek büyütme
5. Optimizasyon ve maliyet

Ayrıca bir elektrokimyasal tepkime hızı, sürecin temel sıralayanıdır. Hız;

- a. Tepkimeye girenlerin elektrot yüzeyine ulaşma hızı
- b. Ara ve son ürünlerin uzaklaştırma hızı
- c. Ara yüzey tepkime hızı

tarafından belirlenir. Ayrıca, hız belirleyen basamak, kütle aktarımı ile aynı zamanda yer alan ara yüzey tepkimelerinin bir bileşimi olabilir. Bu 'karışık kontrol' olarak bilinir. Bu kontrol endüstriyel elektrokimyasal süreçler için tipiktir. Genelde, proses ve tepkime mühendisliğinin amacı kütle aktarımını kontrol edebilmektir. Çünkü bu, belli hidrodinamik koşullarda en büyük dönüşüm hızı demektir. Konvektif difüzyonun sınır akımı bu basamağı karakterize eder. Sınır akımı aynı zamanda etkin elektrot yüzeyi ve elektrokimyasal hücrenin boyutlarını da belirler (Yavuz 1998).

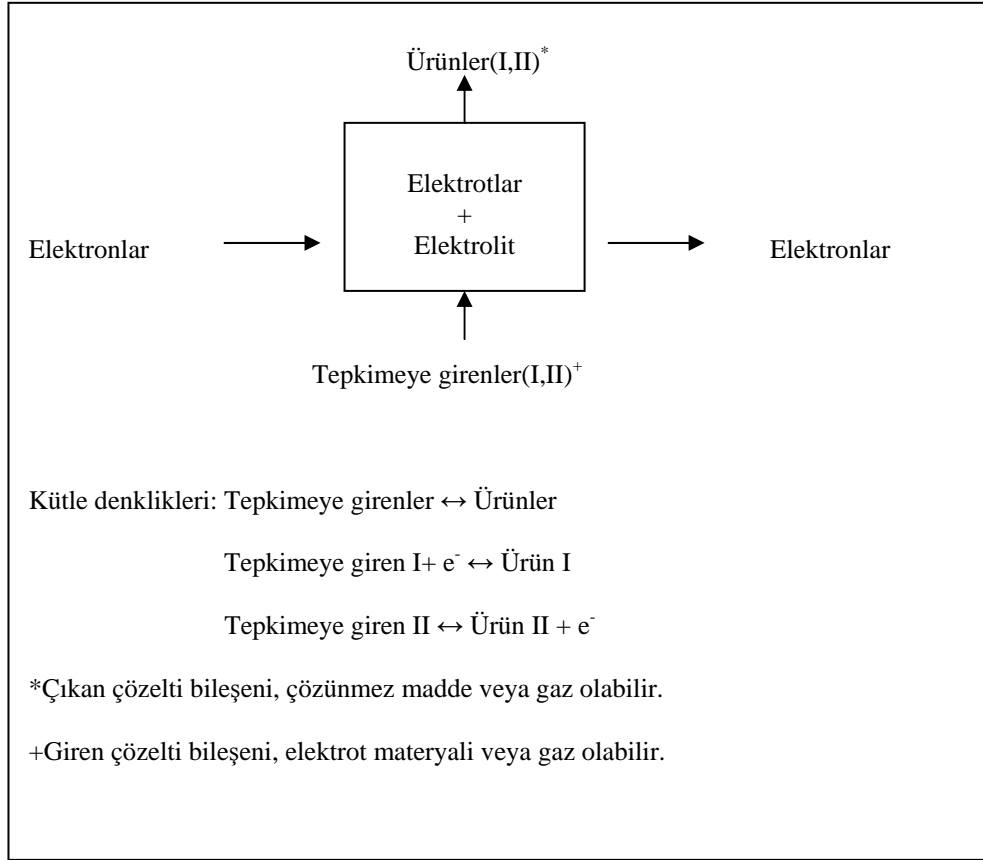
Bir elektrokimyasal reaktör; kimyasal reaktöre ek olarak elektrot içerir. Böyle bir sistemde elektrokimyasal tepkimeler elektrotlar arasında gerilim farkı yaratılarak gerçekleştirilir. Genellikle, elektrokimyasal reaktörde elektrotlarda elektrolit çözeltisini oluşturan bileşenlerin ayrışması söz konusudur. Bu ilke, farklı yollardan uygulanabilir. Elektrokimyasal reaktörler daha çok saf maddeler elde etmek için karışımların ayrılmasında kullanılır. Alüminyum, magnezyum yada sodyum gibi saf metal ve klor gibi ametallerin üretimi endüstriyel uygulamalara örnek gösterilebilir. Diğer önemli uygulama alanlarında biri elektrolit bileşenlerinin elektrotlarda tutularak ayrılmasıdır. Elektrokimyasal reaktörlerde üretilen maddelerin, diğer bazı kimyasal yada teknik süreçlerle üretilmesi de mümkündür. Ancak, elektrokimyasal reaktörlerin kullanılmasının bir çok avantajı vardır.; bunlardan biri, elektrokimyasal reaktörlerin aynı anda gerçekleşen paralel tepkimelere karşı yüksek derecede seçicilikle karakterize edilmesidir. Bu, tepkimelerin sabit bir sıcaklıkta sürdürülmesi ile başarılabilir. Bu yolla son derece yüksek saflıkta elektroliz ürünleri elde edilebilir (Yavuz 1998).

Elektrokimyasal reaktörlerde gerçekleşen elektrot tepkimeleri, katı-sıvı ara yüzeyinde yer alan heterojen indirgenme ve yükseltgeme tepkimeleridir. Elektrot tepkimeleri, ana çözeltiden ara yüzeye madde difüzyonu, elektrotta bir yüzey tepkimesi ve ara yüzeyden ana çözeltiliye doğru ürünün difüzyonu şeklinde üç kademedede gerçekleşir. Ara yüzeyde, kalınlığı çözeltinin hareketine bağlı olan bir difüzyon tabakası bulunur.

Elektrokimyasal işlemler sürekli ve kesikli olmak üzere iki farklı yolla gerçekleştirilir. Birçok elektrokimyasal reaktör sürekli şekilde işletilir; yani, reaktöre sürekli yeni elektrolit beslenir ve işlem görmüş elektrolit uzaklaştırılır. Elektrokimyasal kesikli reaktörler, elektrolitteki derişimin atmasıyla karakterize edilirler. Kesikli tepkime bittikten sonra, genellikle, elektrolit ve elektrotlar değiştirilir. Sürekli ve kesikli çalışma sistemlerinde, elektrolitin bir kısmı tekrar reaktöre döndürülebilir.

Ayrıca elektrokimyasal süreçlerde sabit ve akışkan yatak gibi diğer reaktör tipleri de uygulanabilir. Bu reaktörler iyi türbülans sağlanabilmesi nedeniyle yüksek ısı ve kütle aktarım hızları ile karakterize edilirler. Sabit ve akışkan yataklı reaktörler yükseltgeme-indirgeme tepkimelerinde kullanılırlar.

Bir elektrokimyasal reaktörde gerçekleşen olaylar ve kütle denklilikleri Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1. Elektrokimyasal reaktörde gerçekleşen olaylar ve kütle denklilikleri

Elektrokimyasal reaktörlerde kütle aktarımı konvektif difüzyon sistemi ile gösterilebilir. Tepkimeye giren bileşenin molar kütle akısı ( $N_i$ ) göç terimi ihmal edilerek şöyle yazılır:

$$N_i = -D_i \nabla C_i + UC_i \quad (4.1)$$

Endüstriyel boyutta, çalışılan çözeltiler çoğunlukla düşük çözelti direnci sağlamak üzere, destek elektrolit içerdiği için göç teriminin ihmal edilmesi doğru olmaktadır. Bu eşitlik I. Fick yasasının bir şeklidir ve konveksiyon (ulaşım) terimi ( $UC_i$ ) eklenmiştir. Yani toplam akış, difüzyonel ve ulaşım kütle aktarımının toplamına eşittir. Kimyasal tepkimelerin elektrot yüzeyi ile sınırlı olduğu kabulü ile, bu eşitlik bir elementin kütle denkliği şeklinde ifade edilir (Yavuz 1998).



$$\frac{dC_i}{dt} = -\nabla \cdot N_i \quad (4.2)$$

(4-1) eşitliği (4-2)'de yerine konulursa;

$$\frac{dC_i}{dt} = -D_i \cdot \nabla^2 \cdot C_i - U \nabla C_i \quad (4.3)$$

şeklını alır.

Bu ifade ise II.Fick yasasının genişletilmiş şeklidir. Newton yasasına uyan akışlar için (birçok elektrolitik çözelti gibi) hız V, Navier-Stokes eşitliği ile verilir ve sıkıştırılmayan bir akışkan için vektörel gösterim ile

$$\frac{dV}{dt} + U(\nabla U) = -\frac{1}{g} \nabla P + \nu \nabla^2 U + \rho \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilir.

Buna göre birim hacimde, kütle ve ivmenin çarpımı, tüm kuvvetlerin (basınç gradyanı gibi hidrolik kuvvetler + iç sürtünme kuvvetleri, U + yoğunluk,  $\rho$  gibi dış kuvvetler) toplamına eşittir. Sıkıştırılmayan akışkanlar için kütle korunumu ile

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (4.5)$$

eşitliği de yazılabilir. Bu diferansiyel eşitlikler, konvektif kütle aktarımının tüm faktörlerini belirler.

Geometrik olarak karmaşık sistemlerde ve özellikle türbülent akışın bazı durumlarında, bu eşitlikler analitik olarak çözülemez. Bu durumlarda, kütle aktarım katsayısı veya difüzyon tabakası kalınlığına ilişkin bağıntılar, genel boyutsuz eşitliklerle açıklanır. Bu eşitlikler benzerlik teorisinden alınabilir, sabitler ve üsleri ise deneysel olarak hesaplanır.

Kimyasal reaktörlerin hidrodinamiği, elektrokimyasal reaktörlere, bazı durumlarda doğrudan uygulanabilir, fakat çoğu durumda elektrik alanının kütle aktarımına etkisi ihmal edilemez. Laminer ve türbülent akışlarda girişe yakın ve uzak yerleştirilmiş değişik tip ve boyuttaki elektrotların dinamiği Pickett tarafından incelenmiştir (Yavuz 1998).

Elektrokimyasal reaktörlerin tasarımı termodinamik, elektrot kinetiği ve taşınım özellikleri temeline dayanır. Bu üç temel açıdan elektrokimyasal reaktörlerin işleyişi oldukça karmaşıktır, ancak, bu ilkeler reaktörlerin davranışını en iyi şekilde açıklamaya yardımcı olurlar.

Termodinamik, elektrokimyasal reaktörlerde ısı etkilerinin ve tepkime denklemlerinin temelini oluşturur. Aynı zamanda, elektrolitlerdeki taşınım özellikleri için itici gücün tanımlanmasında ve elektrolit çözeltilerinin özelliklerinin belirlenmesinde de temeldir.

Elektrot kinetiği, denge durumunda elektrot tepkime hızı ile ilgilidir. Bu, itici güç olarak ele alınan yüzey aşırı geriliminin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Bir elektrot tepkimesinin hızı, aynı zamanda, elektrot/elektrolit ara yüzünün yapısı ve bileşiminden de etkilenir.

Laboratuvar koşullarında, elektrokimyasal deneyler için kullanılacak reaktörlerin tasarımında, aşağıdaki etkenlerin göz önünde tutulması gerekmektedir.

1. Çalışma elektrodunun gerilimi doğru ölçülebilmelidir.
2. Çalışma elektrodunun bütün yüzeyi boyunca akım yoğunluğu ve dolayısıyla gerilim düzgün dağılmış olmalıdır.
3. Çalışma elektrodu ve yardımcı elektrot hücre direncini azaltmak için mümkün olduğunca birbirine yakın olmalıdır.

Endüstride ise elektrokimyasal süreçler için daha büyük reaktör ve değişik tasarım kavramları gerekliliği ortaya çıkar. İdeal bir endüstriyel reaktör için tasarım koşulları çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

1. Yüzey alanının reaktör hacmine oranının yükseltilmesinin, endüstriyel elektrosentezler için daha uygun olacağı belirtilmiştir.
2. Elektrot gerilimi her yerde aynı olmalıdır. Reaktördeki akım verimi elektrot gerilimine bağlıdır. Elektrot gerilimi tepkime seçiciliğini de belirler. Bu nedenle hem kimyasal hem enerji verimi hem de hacim-zaman verimi elektrot geriliminden etkilenmektedir.

3. Isı ve kütle aktarımı iyi olmalıdır. Kütle aktarım hızı kimyasal verim ve hacim-zaman veriminde etkindir. Uzaklaştırılması gereken ısı ise akım verimini etkileyeceğinden uygun ısı ve kütle aktarımının sağlanması reaktör tasarımında çok önemli yer tutar.

4. Sürekli sürece uygun olmalıdır. Süreç sürekli ise, ürünler başka bir tepkime vermeden ortamdan alınabilir. Değişim zamanla değişmediğinden yatışkın hale ulaşır ve sürekli kalite kontrol olanağı doğar.

5. Yapı basit olmalıdır.; Elektrotlar kolay çıkarılıp takılabilmelidir. Bakım onarım işleri kolaylaşacağı gibi basit yapı her zaman maliyetin düşük olmasını sağlar.

6. Gaz halindeki maddelerle veya ürünlerle çalışılabilir.

7. Yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında çalışmaya uygun olmalıdır.

8. İlk yatırım maliyeti düşük olmalıdır.

9. Hücre gerilimi düşük, yani hücre direnci küçük olmalıdır.

10. Tüm parçaların ömrü uzun olmalı ve kolay sağlanabilmelidir.

11. Değişik fazlar arasında iyi bir temas sağlanabilmelidir.

12. Diğer süreçlerle birleştirilmelidir (Yavuz 1998).

### **4.3. Boyar Maddelerin Elektrokimyasal Yöntemlerle Giderimi**

Flotasyon, çöktürme, filtrasyon, açık buharlaştırma lagünleri ve yakma gibi fiziksel-kimyasal metodlar, problemin ancak kısmi çözümünü sağlayabilmekte ve ardından bir biyolojik arıtma metodu gerektirmektedir. Ters osmos ve ultrafiltrasyon yüksek maliyet ve düşük verim dolayısıyla dezavantajlıdır. Tekstil atıksularının arıtımında sürekli kimyasal tüketmeyen, atık oluşturmayan alternatif bir yöntem olan elektrokimyasal yöntemler kullanılabilir. Elektrokimyasal yöntemler temel olarak yükseltgemenin olduğu anot ve indirgenmenin gerçekleştiği katottan oluşmaktadır (İnan ve ark. 2002). Elektrokimyasal arıtım çeşitli yöntemler ile gerçekleştirilebilir. Bunlar,

elektroyükseltgeme, elektroflotasyon ve elektrokimyasal çöktürme olarak sıralanabilir.

#### 4.3.1. Elektrokimyasal yükseltgeme

Literatürde istenmeyen organiklerin elektrokimyasal yükseltgemesi için iki ayrı yol tarif edilmiştir; 1) elektrokimyasal dönüşüm, 2) elektrokimyasal yanma. Bunlar;

1) Elektrokimyasal dönüşümde toksik biyolojik uyumsuzluğu olan kirleticilerin, biyolojik uygunluğu olan organiklere dönüşümü söz konusudur, ancak elektrokimyasal yükseltgeme sonrası yine de biyolojik arıtım gereksinimi vardır.

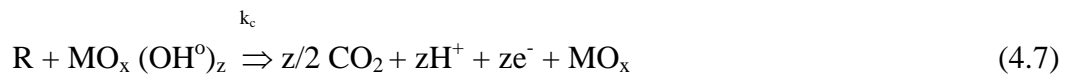
2) Elektrokimyasal yanmada CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O oluşur ve daha fazla giderim gerektirmez (Grimm ve ark. 2000).

Daha önce yapılmış çalışmalar; elektrot dokusuna (lattice) oksijen girişinin dönüşüm ile sonuçlandığını, OH<sup>o</sup> radikallerinin oluşumunun ise yanma reaksiyonunu teşvik ettiğini ortaya koymaktadır (Grimm ve ark. 2000).

Literatürde (Tahar ve Savall 1999) tarafından, bir oksit anotta MO<sub>x</sub>(OH<sup>o</sup>) radikallerinin oluşum mekanizması aşağıdaki gibi tarif edilmiştir;



Organiklerin parçalanması aşağıdaki tepkime uyarınca devam eder;



Elektrokimyasal yükseltgeme süreçlerinde, boyar maddelerin anotta yükseltgemesi gerçekleşir. Araştırmalar, boyar maddelerin elektrokimyasal yükseltgemesinin elektrot materyaline, tepkime süresine ve boyar maddenin cinsine bağlı olduğunu ve en iyi sonuçların metal oksit anotlarla (rutenyum oksit, kalay dioksit, kobalt oksit, vb.) elde edildiğini göstermektedir. Bununla beraber, kurşuni grafit anotlarla da iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Elektrokimyasal yükseltgeme ile renk giderimi sürecinde;

1. Boyar madde anotta yükseltgenir,
2. Anotta oksijen açığa çıkar.

Pratikte en iyi renk giderme verimlerine pH 6-8 arasında ulaşılırken, elektrokimyasal yükseltgeme ile %99-100 arasında giderme verimleri elde edilmektedir.

#### 4.3.2. Elektrokimyasal çöktürme

Elektrokimyasal çöktürme; çözünebilen ve pıhtılaştırıcı özelliğe sahip metal bir elektrotun (alüminyum ve demir gibi) kullanıldığı elektrokimyasal atıksu arıtım sürecidir. Elektrokimyasal çöktürmede pıhtılaşma ve çökeltme mekanizmaları sisteme kimyasal madde ilavesiyle değil, elektrokimyasal reaktördeki elektrotlar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Elektrokimyasal çöktürmede anot olarak kullanılan metal, iyon şeklinde çözünür. Örneğin anodun demir olması durumunda,  $Fe^{+2}$  iyonları oluşacaktır. Suyun elektrolizi ile katotta hidrojen gazı yanında  $OH^-$  iyonları da oluşacaktır (Filibeli ve Büyükkamacı 2002).

Katotta:



Anotta:



Anotta üretilen demir iyonları ile katotta üretilen hidroksil iyonlarının tepkimesi sonucu  $Fe(OH)_2$  oluşur.



Sudaki  $OH^-$  iyonları ile;



Bu aşamada sudaki kirleticiler, oluşan  $Fe(OH)_3$  yumağına tutunarak çökelirler.

Elektrokimyasal çöktürme, su ve atıksu arıtımında etkili ve basit bir methodur. Bu metod tekstil atıksuları, içme suları, lokanta atıksuları, metal endüstrisi, galvanize sanayi, gıda endüstrisi, otomobil endüstrisi, yem endüstrisi,

petrol rafinerileri ve petrokimya endüstrileri atıksularının arıtılmasında başarı ile uygulanan bir yöntemdir. Bu süreç, kirliliklerin gideriminde hızlı ve kompakt boyutlarda, işletilmesi kolay, düşük yatırım ve işletme maliyeti olan bir süreçtir. Çizelge 4.1’de elektrotlarda oluşan tepkime mekanizmaları verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Elektrolarda oluşan tepkime mekanizmaları

<b>ELEKTROLİZ ÖRNEKLERİ</b>		
<b>Tepkimeler</b>	<b>Katot</b>	<b>Anot</b>
Genel olarak	İndirgenme Tepkimesi $Ox + ze^- = Red$	Yükseltgeme Tepkimesi $Red - ze^- = Ox$
Suyun Elektrolizi $H_2O \leftrightarrow H^+ + OH^-$	Hidrojen Oluşumu $H^+ + e^- = H$ $H + H = H_2 (g)$	Oksijen Oluşumu $4OH^- - 4e^- = 2H_2O + O_2(g)$
Metal		$Fe - 2e^- = Fe^{+2}$ $Fe^{+2} - e^- = Fe^{+3}$ $Al - 3e^- = Al^{+3}$

Çizelge 4.1’den de görüleceği gibi; doğru akımda anot olarak demir veya alüminyum elektrotlar çözülerek çözeltiye  $Al^{+3}$  ve  $Fe^{+2}$ ,  $Fe^{+3}$  iyonları vermekte, bu iyonlar sudaki hidroksil iyonları ile birleşerek çözünmeyen  $Al(OH)_3$ ,  $Fe(OH)_2$ ,  $Fe(OH)_3$  gibi metal hidroksilleri oluşturmaktadır. Elektrokimyasal çöktürme anında oluşan metal hidroksil partiküllerinin adsorpsiyon özellikleri çok yüksektir. Pıhtılaşan partiküller atıksularda bulunan mikro kollodial partikülleri ve iyonları kendilerine doğru çekerek adsorbe etmektedir.

### 4.3.3. Elektroflotasyon

Elektroflotasyon yöntemi endüstriyel atıksuların arıtımı yanında evsel atıksuların arıtımında da kullanılmaya başlanmıştır. Atıksu arıtımında ön arıtma veya ikinci kademe, evsel atıksuyun arıtımında ise üçüncü kademe arıtma ünitesi olarak kullanılabilir. Bu süreçte sıvı ortamdan elektriksel akım geçirilmekte ve elektrolitlerde oluşan hidrojen ve oksijen gazları kolloidlere yapışarak bunları sıvı yüzeyine doğru çıkarmaktadır. Yüzeydeki köpük, köpük sıyrıcılar vasıtasıyla alınabilmektedir (İnan ve ark. 2002).

Bu süreçte elektrotlar tepkimelerin gerçekleşmesinde kullanılan esas malzemedir. Bu nedenle uygun elektrot seçimi önemlidir. Elektrokimyasal çöktürmede yaygın olarak kullanılan demir ve alüminyum elektrotlar elektroflotasyonda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu elektrotlar ucuz, temini kolay ve etkisi kanıtlanmış elektrotlardır.

### 4.3.4. Elektrokimyasal yöntemlerle daha önceden yapılmış arıtım ve renk giderim çalışmaları

Reaktif azo boyama sürecinden kaynaklanan ve tekstil boyası içeren atıksuların, Ti/Pt anot ve paslanmaz çelik katot kullanılan bir elektrokimyasal yükseltgeme metodu ile arıtımı Vlyssides ve ark. (1999) tarafından çalışılmıştır. Üretilen kuvvetli yükseltgeme potansiyeli olan kimyasal maddeler (klor, oksijen, hidroksil radikalleri ve diğer yükseltgeyiciler) nedeniyle, atıksu elektrolitik hücreden geçerken organik maddeler, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O'ya yükseltgenmiştir. Kesikli, laboratuvar ölçekli ve pilot tesis çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar alıkonma süresi ve başlangıçta ham atıksuya ilave edilen HCl miktarına göre rapor edilmiştir. 2 ml %36'lık HCl ilavesi ve 0,89 A/cm<sup>2</sup>'lik akım yoğunluğunda 18 dakika elektroliz sonrası KOİ %86, BOİ %71, TKN (toplam kjeldahl azotu) % 35 ve renk %100 oranında giderilmiştir. Ortalama enerji tüketimi 21 kWh/kg KOİ'dir.

Szpyrkowicz ve ark. (2001) tarafından elektrokimyasal proses, ozon, hipoklorit ve fenton ajanı ile dispers boyaların yükseltgemesi adında karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır. Ozon, hipoklorit ve fenton ayırıcı kullanılan kimyasal yükseltgeme ile dispers boyaların giderildiği bir deneysel çalışmanın sonuçları elektrokimyasal yükseltgeme ile elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Hipoklorit yükseltgemesi boyunca meydana gelen sonuçlar yeterli değilken (6 g/dm<sup>3</sup>'lük dozlamada sadece %35'lik renk giderimi sağlandı.) ozonizasyonla (0,5 g/ dm<sup>3</sup>'lük dozlamada) %90'a yakın renk giderimi sağlanmıştır. Yüksek bir renk giderimine düşük bir KOİ giderimi ile eşlik edilmiştir. Elektrokimyasal yükseltgeme denemeleri bu prosesin çok etkili olduğunu kanıtlamıştır. Elektrolizin 40. dakikasında asidik pH koşulları altında test edilmiş 7 farklı materyalin en iyisi olduğu kanıtlanan Ti/Pt-Ir anotla KOİ'de %79'luk bir giderim sağlanmıştır. Aynı zamanda %90 oranında renk giderilmiştir. Klor bileşikleri vasıtasıyla indirekt yükseltgemenin kirlilik giderimine öncülük eden en baskın proses olduğu görülmüştür. En iyi arıtım sonuçları pH=3'te sırayla 600 ve 550 g/dm<sup>3</sup>'lük H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve FeSO<sub>4</sub> dozlamasında fenton prosesle elde edilmiştir. Bu prosesle renk tamamen giderilmiş ve 100 g/dm<sup>3</sup>'lük artan KOİ elde edilmiştir.

Kim ve ark. (2002) tarafından, tekstil atıksularının arıtımı için akışkan biyofilm süreci, kimyasal çöktürme ve elektrokimyasal yükseltgemedен oluşan pilot ölçekli kombine bir sistem denenmiştir. Biyolojik arıtımın verimini artırmak için tekstil atıksularındaki kirleticileri başarılı bir şekilde parçalayan iki mikrop türü izole edilmiş ve sisteme uygulanmıştır. FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O, pH=6 ve 3,25x10<sup>-3</sup> mol/L kimyasal çöktürme ve 25 mM NaCl elektrolit derişimi, 2,1 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu ve 0,7 L/dak akış hızı elektrokimyasal yükseltgeme için optimum şartlar olarak belirlenmiştir. Nispeten düşük MLSS konsantrasyonu ve kısa çamur alıkonma sürelerine rağmen akışkan biyofilm sürecinde %68,8 KOİ ve %54,5 renk giderim verimine ulaşılmıştır. Kombine sürecin tamamında %95,4 KOİ ve %98,5 renk giderme verimleri elde edilmiştir.

Koparal ve ark. (2002) tarafından aktif karbon ve perlit karışımlar kullanılarak tekstil atıksularından Acilan Blau boyarmaddesinin elektro adsorpsiyonla giderilmesi çalışılmıştır. Elektroadsorpsiyonla tekstil atıksularından



boyarmaddelerin giderilebilirliği araştırılmıştır. Adsorbant olarak 8:1 oranında bipolar aktif karbon-perlit karışımı kullanılmıştır. Geleneksel adsorpsiyon deneyleri aynı zamanda karşılaştırma için yürütülmüştür. Elektroadsorpsiyon deneylerinde bipolar bir damlatmalı reaktör kullanılmıştır. Acilan Blau boyar maddesi kullanılarak model atıksular hazırlanmıştır. Başlangıç boya derişimi, elektrotlar arasındaki yatak yüksekliği, gerilim, akış hızı ve destek elektrolit konsantrasyonunun giderim verimine etkisi parametreler olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre en iyi şartlarda yerel bir tekstil fabrikasının atıksuyu arıtılmıştır. Maksimum giderim verimine ulaşmak için gerekli adsorbant miktarı ve adsorpsiyon kinetikleri araştırılmış ve adsorpsiyon ve elektroadsorpsiyon için kütle aktarım katsayıları hesaplanmıştır. Sonuçlar 1,58 kWh/m<sup>3</sup> enerji tüketim değeri ile %100'e yakın bir giderim verimine ulaşılabilceğini göstermiştir. Eğer 4,65 mg/L çıkış boya konsantrasyonu kabul edilirse 0,09 kWh/m<sup>3</sup> enerji tüketiminin artım için yerli olacağı görülmüştür. Bu çalışmadan, bu metodun atıksudan boyar maddenin uzaklaştırılması için aktif karbon adsorpsiyonu ve elektrolitik metodların bütün avantajlarını birleştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Fernandes ve ark. (2004) tarafından C.I Acid Orange 7 boyar maddesinin elektrokimyasal arıtımı çalışılmıştır. C.I Acid Orange 7 boyar maddesinin elektrokimyasal yükseltgemesi bir bor katkılı elmas (BDD) elektrotla yapılmıştır. İki farklı destek elektrolit kullanılarak çalışılmıştır. Bunlar KCl ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'tür. Elektrolit derişimi, başlangıç boyar madde derişimi ve akım yoğunluğunun giderim verimine etkisi araştırılmıştır. Önceden tayin edilmiş zaman dilimlerinde alınan örnekler biriktirilmiş ve absorbans ölçümleri ve KOİ testeri yapılmıştır. Her durum için KOİ ve renk giderim oranları belirlenmiştir. Elektroliz süresi boyunca ölçülen KOİ değerlerinden kütle transfer katsayıları hesaplanmıştır. Ayrıca akım verimliliği bir teorik model kullanılarak tahmini olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar %90'nın üzerinde KOİ ve renk gideriminin olduğunu göstermiştir. Acid Orange 7 ile kirlenmiş bir tekstil atıksuyun biyolojik arıtımında kullanılmış bir UASB reaktörden alınan bir atıksuyun ön elektro arıtımında %98 renk ve %77 KOİ giderimine ulaşılmıştır.

Grimau ve Gutierrez (2006) tarafından yapay reaktif boya banyosu atıksularından UV lambayla elektrokimyasal yükseltgeme yoluyla boyar madde giderilmesi çalışılmıştır. Bu çalışma bu metodun endüstriyel ölçekte teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir olması amacıyla reaktif boyalarla kirlenmiş atıksulardan elektrokimyasal boyar madde gideriminin en iyi şekilde kullanımına odaklanmıştır. Renkli sular elektrik tüketimini azaltmak için düşük akım yoğunluğunda arıtılmıştır. C.I. Reactive Orange 4 boyar maddesi ile hazırlanmış yapay boya banyolarının yükseltgemesi için Ti/PtO<sub>x</sub> elektrotlar kullanılmıştır. 0,5 g/L'den 20 g/L'ye NaCl ile kirlenmiş boyama atıksularında elektrokimyasal prosesler için doğrudan doğruya akım yoğunluğuna bağlı yüksek bir renk giderim verimi elde edilmiştir. Bu sonuçlara atıksular solar ışık altında saatlerce bekletildiğinde ulaşılmıştır. Elektrokimyasal arıtım için atıksular bir tank içinde ve farklı farklı ışıklandırma şartlarına maruz bırakılarak bekletilmiştir. Bunlar UV ışık, solar ışık ve karanlıktır. Bekleme zamanına karşı renk giderim evreleri kaydedilmiş ve kinetik sabitler hesaplanmıştır. UV ışığın kullanılmasıyla bekleme süresi özellikle araştırılmıştır. Aynı zamanda konsantre boya banyolarında bir boya mineralizasyon çalışması yapılmıştır. Geri döngülü uzun bir arıtım için yüksek akım yoğunluğu uygulandığında %81'lik TOC giderimi elde edilmiştir. Bu arıtım yüksek elektrik tüketimi gerektirmiştir.

Awad ve Galwa (2005) tarafından Acid Blue ve Basic Brown boya banyolarının çeşitli çalışma koşulları ve farklı iletken elektrolit varlığında Pb/PbO<sub>2</sub> elektrotla elektrokimyasal arıtımı çalışılmıştır. PbO<sub>2</sub> anotla yapay atıksudan Acid Blue ve Basic Brown boya banyolarının elektrokatalitik arıtımı farklı iletken elektrolitlerle araştırılmıştır. Araştırma, bu boyaların tamamen arıtımının esasen iletken elektrolitin tipine ve derişimine bağlı olduğunu göstermiştir. En yüksek elektrokatalitik etkinlik 2 g/L NaCl varlığında elde edilmiştir. En yüksek elektrokatalitik etkinliğin, araştırılan boya banyolarının klorit yükseltgemenin oluştuğu elektrokimyasal olarak üretilmiş hipoklorit iyonları vasıtasıyla indirekt yükseltgemeye bağlı olabileceği görülmüştür. NaOH varlığında kullanılan anotun elektrokatalitik etkinliği kloritin bulunmaması nedeniyle NaCl'dekine benzememiştir. Bu da NaOH varlığında boyar madde gideriminin sadece elektrokimyasal prosesler yoluyla oluştuğunu göstermiştir. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> varlığında

iletken çözeltilerden klorun uzaklaşması nedeniyle elektrot performansı düşmüştür. Anot yüzeyindeki film tabakasının büyümesi ve  $H_2SO_4$  varlığında direkt elektrolizle kolayca oksitlenemeyen kararlı ara ürünlerin üretiminin sonucunda elektrot zehirlenmesi ihtimali de bu iletken elektrolitin düşük performans göstermesine neden olmuştur. Pb/PbO<sub>2</sub> elektrotla Acid Blue ve Basic Brown boyalarının etkili elektrokimyasal arıtımını sağlayan en iyi şartlar bütün arıtma koşullarının kontrolünü gerektirmiştir.

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

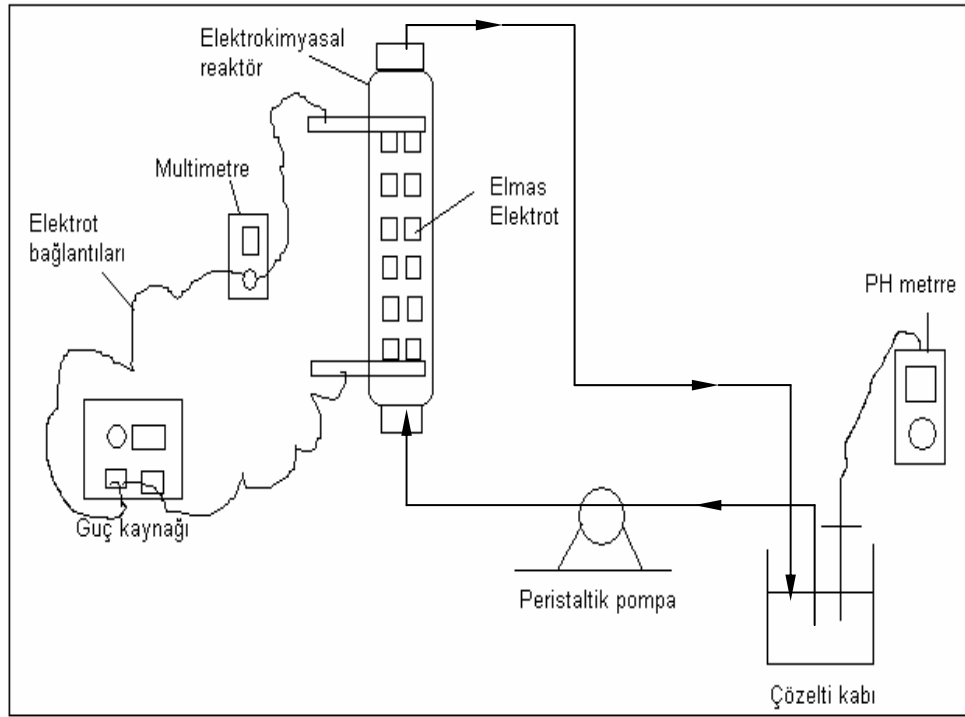
RASHİG halkası şeklindeki bor katkılı elmas elektrotlarla gerçekleştirilen elektrokimyasal yükseltgeme çalışmasında iç içe yerleştirilmiş 2,5 ve 4 cm çapında ve 21,5 cm uzunluğunda iki adet cam borudan oluşan iki kutuplu tıkaç akım reaktör kullanılmıştır (Bkz. Şekil 5.1 ). Bor katkılı elmas elektrotların dış çapı 0,8 cm, iç çapı 0,55 cm ve yüksekliği 0,8 cm'dir. Elektrokimyasal reaktör, her biri 4 elektrot içeren 26 tabakadan oluşmaktadır. Tabakaların arasına yalıtkan polyesterler yerleştirilerek elektrotlar birbirinden ayrılmış ve reaktörde iki kutupluluk sağlanmıştır. Anot ve katot bağlantısı için iki adet grafit çubuk kullanılmıştır.

Reaktörden çıkan çözelti, bir peristaltik pompa yardımıyla reaktöre geri döndürülmüştür. Çözelti reaktörden  $24,8 \times 10^{-3}$ ,  $36,3 \times 10^{-3}$ ,  $47,8 \times 10^{-3}$  L/dak ( $1,49 \times 10^{-3}$ ,  $2,18 \times 10^{-3}$ ,  $2,87 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/saat) akış hızlarında geçirilmiştir ve 0,25, 0,5, 0,75, 1, 4, 10 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu değerlerinde çalışılmıştır. Başlangıç pH'ının etkisini incelemek amacıyla 3, 11 ve çözeltinin doğal pH değerlerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca destek elektrolit derişiminin etkisini incelemek üzere 0,01, 0,02, 0,03, 0,04, 0,05, 0,2 ve 0,5 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içeren çözeltiler kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar süresince çalışma çözeltisinin pH'ı düzenli olarak ölçülmüştür. Deneysel çalışmalardan elde edilen iyi şartlarda model atıksuyun ve gerçek atıksuyun toksisite testleri yapılmıştır. Toksisitenin belirlenmesinde MICROTOX testi kullanılmıştır.

### **Toksisitenin belirlenmesi;**

Toksisitenin belirlenmesinde SDI MICROTOX 500 cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz ile 30 dakika gibi kısa bir sürede toksisite ölçülmektedir. MICROTOX testinde numunenin toksisiteninin ölçülmesinde Vibrio fischeri olarak adlandırılan luminescent bakterilerden yararlanılmaktadır. Luminescent bakteriler uygun çevre koşullarında ışık yayma özelliğine sahiptirler. Bu testte bakterilerin yaydığı ışık

bir çeşit spektrofotometre olan özel bir aletle ölçülmektedir. Eğer numune zararlı madde içeriyor ise bu ışımaya azalır. Toksikite miktarı arttıkça ışık yayma o oranda azalmaktadır. 5 ve 15 dakika gibi belli zaman aralıklarında ölçülen ışık şiddetindeki azalma numunenin toksisitesini gösterir. Cihaza bağlı bir istatistik programı yardımıyla numunenin toksisitesi % olarak belirlenir. Bu değer EC50, %50 ölüme neden olan konsantrasyon değeri, olarak adlandırılır. Numune yüksek toksisite içeriyorsa bu değer düşük, düşük toksisite içeriyorsa yüksektir. Örneğin, EC50 değeri %70 olan bir numune, %12 olan bir numuneden daha az toksisite içerir (Azur Enviromental 1998).



Şekil 5.1. Tıkaç akım reaktör ve deneysel çalışma düzeneği

### 5.1. Kullanılan Elektrot Malzemesi

Bütün elektrokimyasal süreçlerde olduğu gibi organik maddelerin elektrokimyasal yükseltgemesinde de elektrot malzemesi sistemin en önemli

parçalarından biridir. Elektrot malzemesi yükseltgeme mekanizmasını ve sonuçta oluşan anodik tepkime ürünlerini direkt olarak etkilemektedir.

Deneysel çalışmalarda Rashig halkası şeklindeki bor katkılı elmas kaplı niyobyum elektrotlar kullanılmıştır.

Bor katkılı elmas anotlar, suyun elektroliziyle yüksek akım verimlerinde direkt olarak hidroksil radikali oluşumuna imkan vermektedir. Bu olay, elmas anotların oksijen üretimi ve daha bir çok anodik süreç için çok yüksek gerilime sahip olması ile açıklanabilmektedir (Kraft ve ark. 2002). Elmas çok iyi bir yalıtkan olmasına rağmen, bor ilave edildiğinde elektrokimyasal çalışmalar için uygun bir malzeme haline gelmektedir. Böylece film yüzeyin elektriksel iletkenliği, bor katkısı miktarından ve diğer safsızlıklardan etkilenmektedir. Elmas filmler titanyum, tantal, niyobyum, molibden, ve grafit gibi farklı endüstriyel elektrot malzemeleri üzerine ve silikon veya silikon karbür üzerine kaplanabilmektedir. Yoğun kimyasal ortamlarda elmasın son derece kararlı olması, derişik asidik (HCl, HF) elektrolit ortamların da kullanımını sağlamaktadır (Fujishma ve Rao 2001).

Elmasın önemli özellikleri arasında;

- son derece yüksek mekanik sertlik,
- bilinen en sert malzeme,
- oda sıcaklığında bilinen en yüksek ısı iletkenlik (bakırdan 2-4 kat fazla),
- çok geniş bir dalga boyu aralığında geçirimsizlik (UV'den uzak IR'ye),
- kimyasal korozyona karşı çok dirençli, kimyasal olarak inert (özellikle şiddetli yükseltgen ortamlarda ve yüksek sıcaklıkta),
- biyolojik uyumluluk,
- çok düşük ısı iletkenlik katsayısı sayılabilir.

Elmasın elektrokimyasal özellikleri ise şu şekilde sıralanabilir;

- sıra dışı elektrokimyasal penceresi (>3V) nedeniyle hem anodik hem de katodik tepkimelerde yeni olasılıklar sunar, bu geniş aralık Çizelge 5.1'de yer alan yükseltgenlerin oluşumuna imkan verir.

- hidroksil radikallerinin oluşumuyla organik maddelerin kinonlar gibi toksik ara ürünler oluşturmadan CO<sub>2</sub>'ye yükseltgemesini ve siyanürün tamamen yükseltgemesini sağlar,
- elektrot yüzeyinde bozunma olmaksızın klor üretimi, yüzeydeki elmas tabakasını tüketmeden ozon üretimi sağlar (http-2).

**Çizelge 5.1.** Bazı kimyasal yükseltgenlerin oluşum gerilimleri (Tröster ve ark. 2002)

Yükseltgen	Oluşum gerilimi(V)
Hidroksil Radikali(H <sub>2</sub> O / OH <sup>0</sup> )	2,80
Ozon(O <sub>2</sub> / O <sub>3</sub> )	2,07
Peroksidisülfat(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> <sup>2-</sup> )	2,01
Hidrojen peroksit(H <sub>2</sub> O / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	1,77
Permanganat iyonu(MnO <sub>2</sub> / MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	1,67
Klor dioksit(Cl <sup>-</sup> / ClO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	1,57
Klor(Cl <sup>-</sup> / Cl <sub>2</sub> )	1,36
Dikromat(Cr <sup>3+</sup> / Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	1,23
Oksijen(H <sub>2</sub> O / O <sub>2</sub> )	1,23

## 5.2. Kullanılan Kimyasal Maddeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan model atıksuları hazırlamak üzere fareler üzerinde yapılan deneylerde kronik toksisitesi olduğu belirlenen Basic Red 29 boyar maddesi kullanılmıştır (http-1). Kullanılan boyar maddenin malzeme güvenlik bilgi formu (MSDS) http1'de verilmiştir. Destek elektrolitin etkisinin incelendiği çalışmalarda sodyum sülfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MERCK), gerektiğinde pH ayarlamalarında sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MERCK) ve sodyum hidroksit (NaOH, MERCK) kullanılmıştır. Ayrıca KOİ analizlerinde potasyum dikromat (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>,

MERCK), gümüş sülfat ( $Ag_2SO_4$ , MERCK), sülfirik asit ( $H_2SO_4$ , MERCK) kullanılmıştır.

### 5.3. Kullanılan Yardımcı Araçlar

Deneysel çalışmalarda yardımcı araç olarak; Statron marka 3234.4 model güç kaynağı, multifix MC 1000 PEC model peristaltik pompa, tartım işlemlerinde Ohaus marka Explorer Pro model analitik terazi, Orion 420 A model pH metre, Shimadzu UV-1700-Pharma Spec model spektrofotometre, Elektromag M 615M model santrifüj, Hach marka KOİ reaktörü, SDI Microtox 500 toksisite cihazı kullanılmıştır.

### 5.4. Hesaplamalarda Kullanılan Eşitlikler

#### *Boyar Madde Derişimi;*

$$mg \text{ boyar madde/L} = \frac{x}{z} 1000 \quad (5.1)$$

x= mg olarak numunedeki boyar madde miktarı

z= mL orijinal numune hacmi

#### *Yüzde Giderim;*

$$\%Giderim = \frac{(C_0 - C)}{C_0} 100 \quad (5.2)$$

$C_0$ =Başlangıçtaki boyarmadde ve KOİ derişimleri (mg/L)

C=Reaktörden çıkan çözeltideki boyarmadde ve KOİ derişimleri (mg/L)



***Enerji Tüketimi;***

$$(\text{kWhm}^{-3}) = \frac{I.V}{Q.1000} \quad (5.3)$$

$$(\text{kWhg}^{-1}) = \frac{I.V}{(C_0 - C).Q.1000} \quad (5.4)$$

I=Akım(amper)

V=Gerilim(V)

Q=Akış hızı(m<sup>3</sup>/saat)

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

### 6.1. Model Atıksularla Gerçekleştirilen Çalışmalar

Bu çalışmada, Rashig halkası şeklindeki bor katkılı elmas elektrotlar kullanılarak Basic Red boyar maddesinin elektrokimyasal yükseltgemesi çalışılmıştır. 20, 40, 60 mg/L başlangıç boyar madde derişimlerine sahip çözeltilerin tıkaç akım reaktörle elektrokimyasal giderimi araştırılmıştır. Kesikli geri döngülü çalıştırılan elektrokimyasal reaktörde, başlangıç derişimi, akım yoğunluğu, destek elektrolit derişimi, akış hızı ve başlangıç pH'ının giderim verimine etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar laboratuvar sıcaklığında yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları Çizelge 6.1-17'de ve Şekil 6.1-35'de verilmiştir.

Deneysel çalışmalarda, öncelikle herhangi bir destek elektrolit ilavesi olmaksızın 40 mg/L başlangıç derişiminde çalışılmış, ancak çözeltilerin iletkenliğinin düşük olması nedeniyle değişik derişimlerde destek elektrolit ilaveleriyle çalışmalara devam edilmiştir.

**Çizelge 6.1.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar ( $I=44$  mA,  $i=0,25$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	95	5,04	40	-	-
1	97	5,53	25,97	35,0	0,540
2	98	5,57	24,73	38,1	0,502
3	96	5,58	23,90	40,3	0,466
4	95	6,00	20,36	49,1	0,378
5	94	5,92	19,25	51,8	0,354
10	96	7,50	18,75	53,1	0,353
15	93	8,54	17,90	55,2	0,329
20	98	8,72	17,75	55,6	0,344
30	94	8,81	14,02	64,9	0,283
40	95	8,49	10,47	73,8	0,251
50	93	7,41	7,98	80,1	0,227
60	94	5,62	6,74	83,2	0,221
70	96	5,59	5,62	85,9	0,218
90	93	8,24	4,43	88,9	0,204
110	97	7,75	2,95	92,6	0,204
130	95	6,99	2,48	93,8	0,198
150	94	6,81	2,01	94,9	0,193
180	95	6,59	1,54	96,2	0,195
210	96	6,52	1,18	97,1	0,194

**Çizelge 6.2.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar ( $I= 88$ mA,  $i= 0,5$ mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.= 0,01 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 2,82mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal )

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	173	5,66	40	-	-
1	176	5,80	11,00	73,4	0,466
2	175	6,06	5,96	85,5	0,402
3	174	6,21	5,38	86,9	0,393
4	177	6,35	2,72	93,4	0,370
5	175	6,51	2,48	93,9	0,364
10	176	7,95	2,42	94,1	0,366
20	178	9,70	0,60	98,5	0,353
30	177	9,96	0,35	99,1	0,349

**Çizelge 6.3.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar ( $I=88$  mA,  $i=0,5$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,02 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 3,64 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	148	5,60	40	-	-
5	149	7,07	3,90	90,3	0,322
10	146	8,79	1,89	95,2	0,299
15	147	9,61	1,42	96,5	0,298
20	143	9,30	0,53	98,6	0,283

**Çizelge 6.4.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar ( $I=88$ mA,  $i=0,5$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal )

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	123	5,25	40	-	-
1	125	5,43	15,80	60,5	0,404
2	122	5,44	7,63	80,9	0,294
3	122	5,46	6,39	84,0	0,283
4	120	5,48	4,02	89,9	0,260
5	121	5,50	3,96	90,1	0,262
10	123	5,78	3,32	91,7	0,262
15	124	8,29	2,66	93,3	0,259
20	121	8,67	1,65	95,8	0,246
30	120	8,82	1,12	97,2	0,241
40	123	8,13	0,07	99,8	0,244
50	125	9,05	0,07	99,8	(0,248)*

\* Bu değer %99,8 renk giderimi dikkate alınarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 6.5.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar ( $I=132$ mA,  $i=0,75$ mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.=5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal )

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	151	4,93	-	-	-
1	151	5,01	9,17	77,5	0,383
2	149	6,56	4,91	87,9	0,332
3	150	7,01	3,55	91,3	0,321
4	152	8,42	3,31	91,8	0,324
5	155	8,92	2,84	93,0	0,326
10	151	9,82	2,36	94,2	0,316
20	153	10,13	0,35	99,1	0,301
30	150	10,24	0,35	99,1	(0,293)*

\* Bu değer %99,1 renk giderimi dikkate alınarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 6.6.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar ( $I=132$ mA,  $i=0,75$ mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,05 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 8,92 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal )

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	129	5,61	40	-	-
1	129	9,61	2,54	93,7	0,269
2	132	9,92	1,30	96,8	0,266
3	130	9,95	1,18	97,0	0,261
4	132	10,07	0,88	97,8	0,263
5	132	10,08	0,71	98,2	0,262
10	130	10,13	0,53	99,0	0,257
20	128	9,92	0,41	99,1	0,252
30	130	9,86	0,29	99,3	0,256

**Çizelge 6.7.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar ( $I=176$  mA,  $i=1$ mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.=5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal )

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	167	6,07	40	-	-
1	172	7,40	0,71	98,2	0,342
2	172	9,57	0,53	98,7	0,340
3	171	9,95	0,47	98,8	0,338
4	173	10,09	0,47	98,8	(0,338)*
5	173	10,25	0,47	98,8	(0,338)*

\* Bu değer %98,8 renk giderimi dikkate alınarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 6.8.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,04 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.=7,38mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal )

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	161	5,85	40	-	-
1	157	7,05	0,59	98,5	0,311
2	157	8,22	0,17	99,6	0,308
3	158	9,44	0,17	99,6	(0,309)*
4	157	8,55	0,17	99,6	(0,307)*
5	160	9,09	0,17	99,6	(0,312)*
* Bu değer %99,6 renk giderimi dikkate alınarak hesaplanmıştır.					

**Çizelge 6.9.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,05 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.=8,92 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	152	5,78	40	-	-
1	151	7,71	1,06	97,3	0,303
2	151	8,44	0,60	98,5	0,299
3	154	8,45	0,41	99,0	0,304
4	152	8,48	0,41	99,0	(0,297)*
5	152	9,13	0,41	99,0	(0,297)*
10	151	10,28	0,41	99,0	(0,295)*
* Bu değer %99 renk giderimi dikkate alınarak hesaplanmıştır.					

**Çizelge 6.10.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar ( $I=704$  mA,  $i=4$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,2 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.=29,1 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	172	5,97	40	-	-
1	164	6,67	0,17	99,5	0,322
2	161	6,67	0,17	99,5	(0,314)*
3	152	11,24	0,17	99,5	(0,297)*
4	149	11,28	0,17	99,5	(0,291)*
5	150	11,28	0,17	99,5	(0,293)*

\* Bu değer %99,5 renk giderimi dikkate alınarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 6.11.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar( $I=1760$  mA,  $i=10$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,5 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 58 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	171	5,84	40	-	-
1	170	6,70	0,41	99,0	0,335
2	164	6,70	0,41	99,0	0,324
3	165	6,89	0,23	99,4	0,324
4	169	11,65	0,23	99,4	(0,330)*
5	169	11,76	0,23	99,4	(0,330)*

\* Bu değer %99,4 renk giderimi dikkate alınarak hesaplanmıştır.



**Çizelge 6.12.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=24,8 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	171	5,81	40	-	-
1	172	5,79	2,48	93,9	0,358
2	170	5,93	1,47	96,3	0,345
3	168	6,15	0,88	97,8	0,335
4	167	6,30	0,65	98,3	0,331
5	167	6,37	0,59	98,6	0,331
10	175	9,24	0,35	99,1	0,347
20	170	10,14	0,35	99,1	(0,332)*

\* Bu değer %99,1 renk giderimi dikkate alınarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 6.13.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=47,8 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	173	5,84	40	-	-
1	172	6,36	1,36	96,6	0,348
2	174	6,78	0,82	97,9	0,347
3	174	7,82	0,76	98,1	0,346
4	173	8,62	0,65	98,3	0,343
5	173	9,16	0,59	98,6	0,343
10	174	9,91	0,23	99,4	0,342
20	174	10,28	0,23	99,4	(0,340)*

\* Bu değer %99,4 renk giderimi dikkate alınarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 6.14.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=3)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	176	3	40	-	-
1	175	3,22	15,26	61,8	0,553
2	172	3,23	10,94	72,6	0,463
3	172	3,25	9,46	76,4	0,442
4	172	3,27	8,57	78,6	0,428
5	171	3,28	7,75	80,6	0,414
10	173	3,56	5,68	85,8	0,394
20	172	4,17	1,42	96,4	0,349
30	175	6,66	0,71	98,2	0,348
45	171	9,68	0,41	99,0	0,337
60	174	10,08	0,41	99,0	(0,340)*

\* Bu değer %99 renk giderimi dikkate alınarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 6.15.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalar ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=11)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	177	11	23,31	41,7	-
1	174	10,70	0,76	98,1	0,346
2	171	10,73	0,65	98,3	0,339
3	172	10,73	0,47	98,8	0,340
4	169	10,78	0,47	98,8	(0,330)*
5	171	10,77	0,47	98,8	(0,334)*

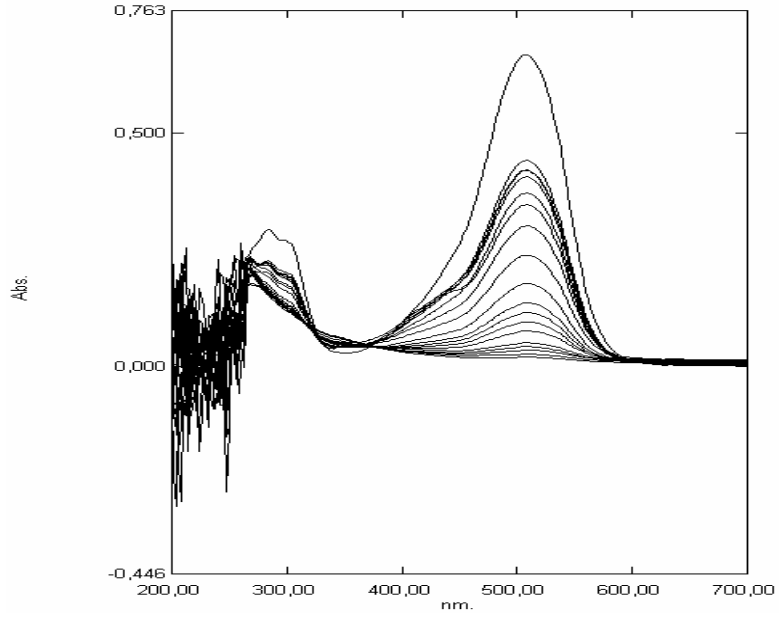
\* Bu değer %98,8 renk giderimi dikkate alınarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 6.16.**  $C_0=20$  mg/L BR-29 çözültüsü ile yapılan çalışmalar ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal )

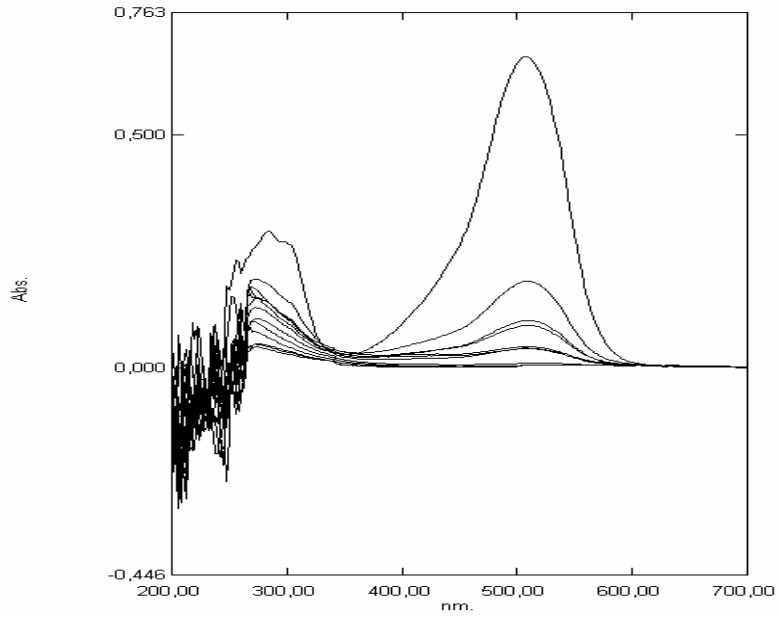
Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	172	5,86	20	-	-
1	174	5,88	1,12	97,2	0,350
2	172	6,02	0,59	98,5	0,341
3	178	6,29	0,35	99,1	0,351
4	177	7,84	0,35	99,1	(0,346)*
5	172	8,57	0,35	99,1	(0,336)*
* Bu değer %99,1 renk giderimi dikkate alınarak hesaplanmıştır.					

**Çizelge 6.17.**  $C_0=60$  mg/L BR-29 çözültüsü ile yapılan çalışmalar ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal )

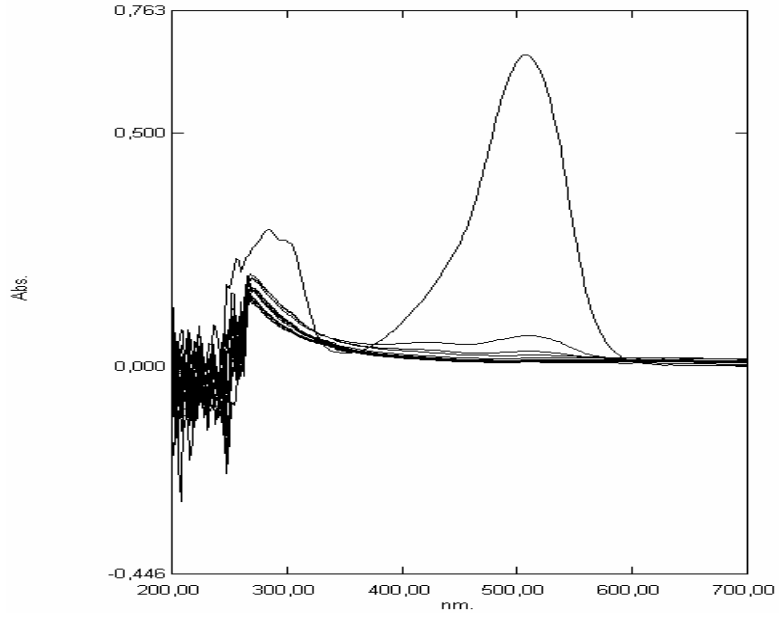
Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C <sub>son</sub> (mg/L)	Giderim(%)	Enerji Tüketimi (kWhg <sup>-1</sup> )
				Renk	
0	147	5,88	60	-	-
1	148	6,22	2,48	93,8	0,308
2	146	6,32	1,47	96,3	0,296
3	148	8,90	1,00	97,5	0,297
4	145	9,90	0,94	97,6	0,290
5	150	10,05	0,82	97,9	0,299
10	148	10,29	0,47	98,8	0,292
20	148	10,39	0,47	98,8	(0,289)*
* Bu değer %98,8 renk giderimi dikkate alınarak hesaplanmıştır.					



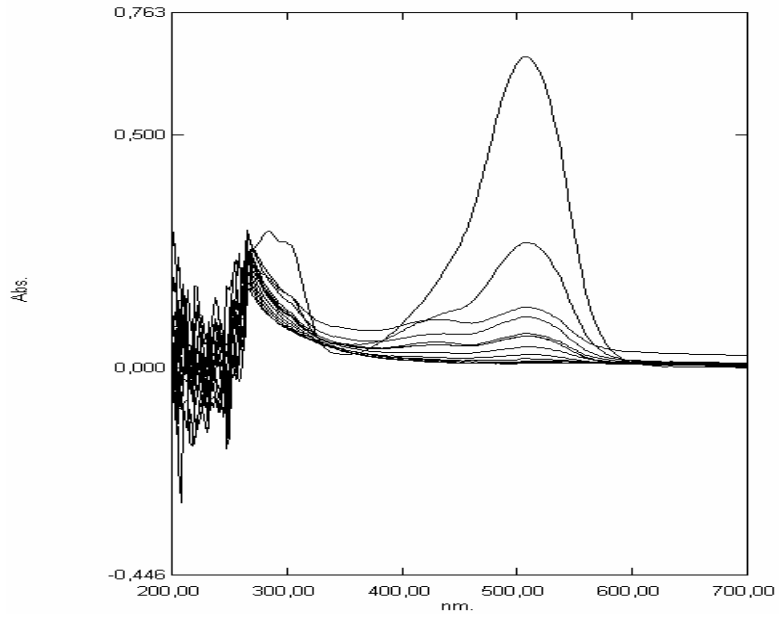
**Şekil 6.1.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=44$  mA,  $i=0,25$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>= doğal)



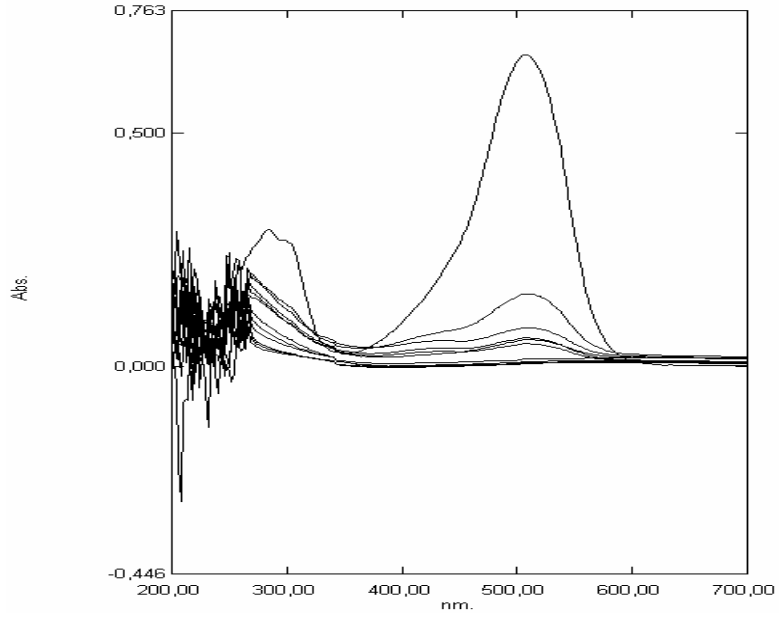
**Şekil 6.2.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I= 88$ mA,  $i= 0,5$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.= 0,01 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 2,82mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)



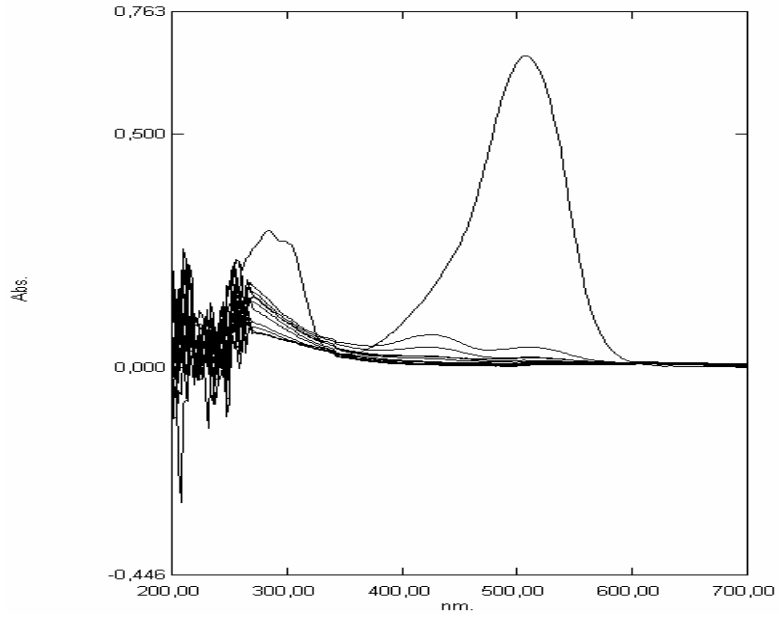
**Şekil 6.3.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=88$  mA,  $i=0,5$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,02 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 3,64 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal )



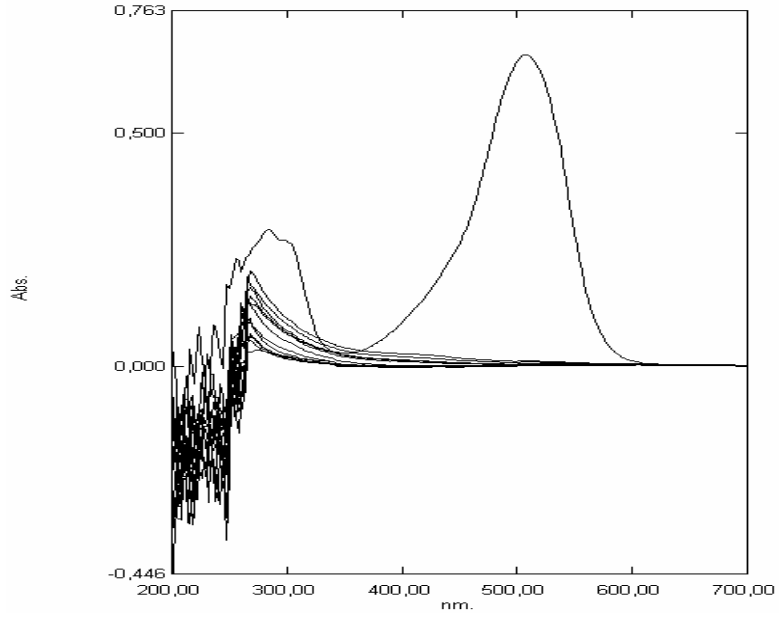
**Şekil 6.4.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=88$  mA,  $i=0,5$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)



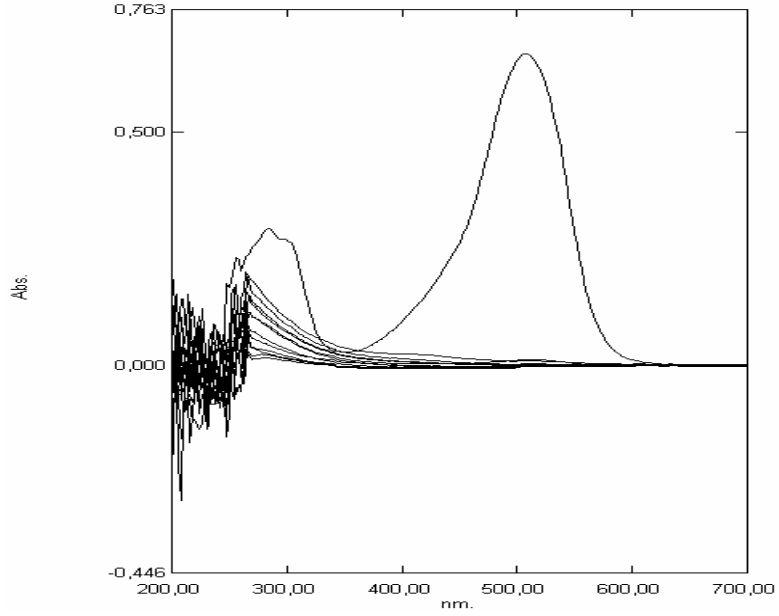
**Şekil 6.5.**  $C_0=40\text{mg/L}$  BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=132\text{mA}$ ,  $i=0,75\text{mA/cm}^2$ ,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}\text{ L/dak}$ ,  $D.E.=0,03\text{ M Na}_2\text{SO}_4$ ,  $E.I.=5,54\text{ mS/cm}$ ,  $\text{pH}_0=\text{doğal}$ )



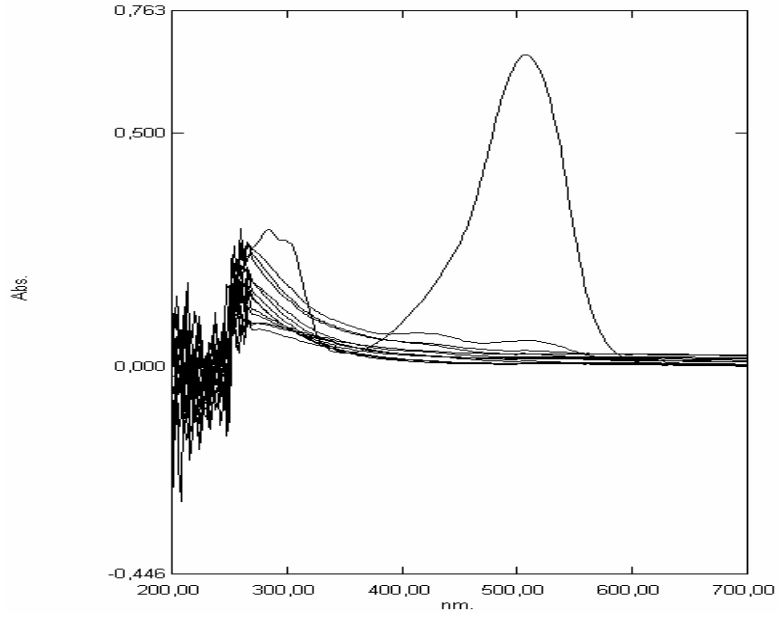
**Şekil 6.6.**  $C_0=40\text{ mg/L}$  BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=132\text{mA}$ ,  $i=0,75\text{mA/cm}^2$ ,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}\text{ L/dak}$ ,  $D.E.=0,05\text{ M Na}_2\text{SO}_4$ ,  $E.I.=8,92\text{ mS/cm}$ ,  $\text{pH}_0=\text{doğal}$ )



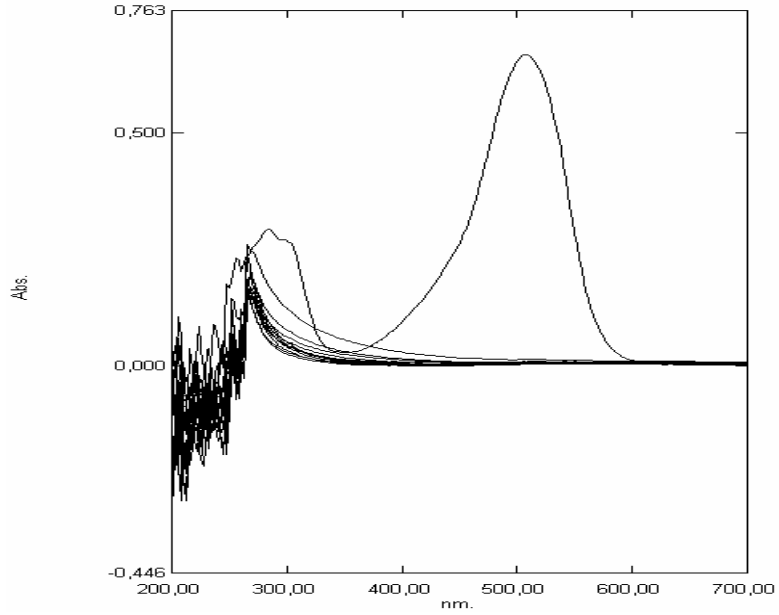
**Şekil 6.7.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.=5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)



**Şekil 6.8.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,04 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.=7,38 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)

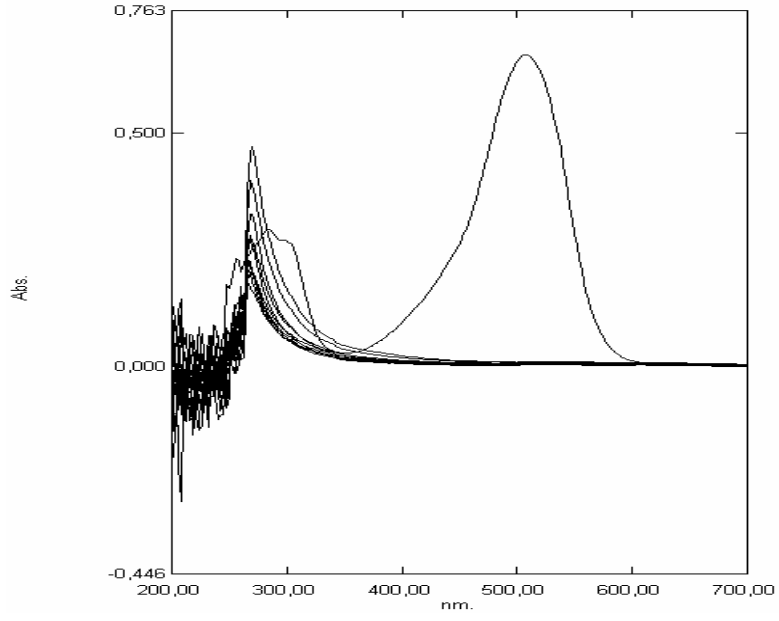


**Şekil 6.9.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,05 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.=8,92 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)

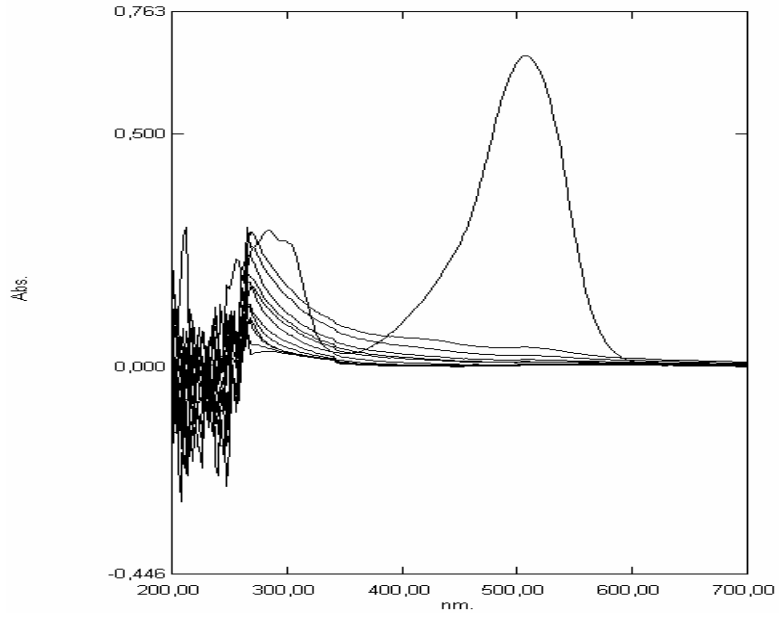


**Şekil 6.10.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=704$  mA,  $i=4$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,2 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.=29,1 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)

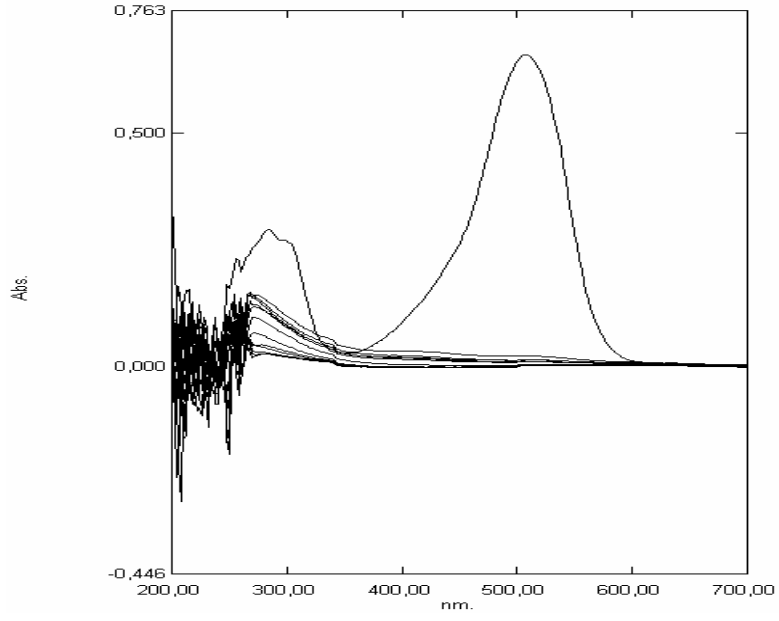




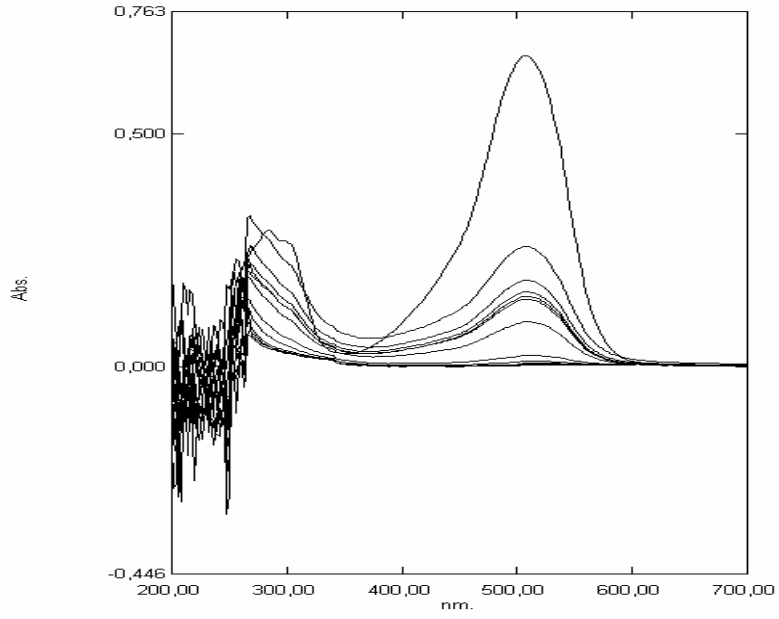
**Şekil 6.11.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=1760$  mA,  $i=10$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,5 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 58 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)



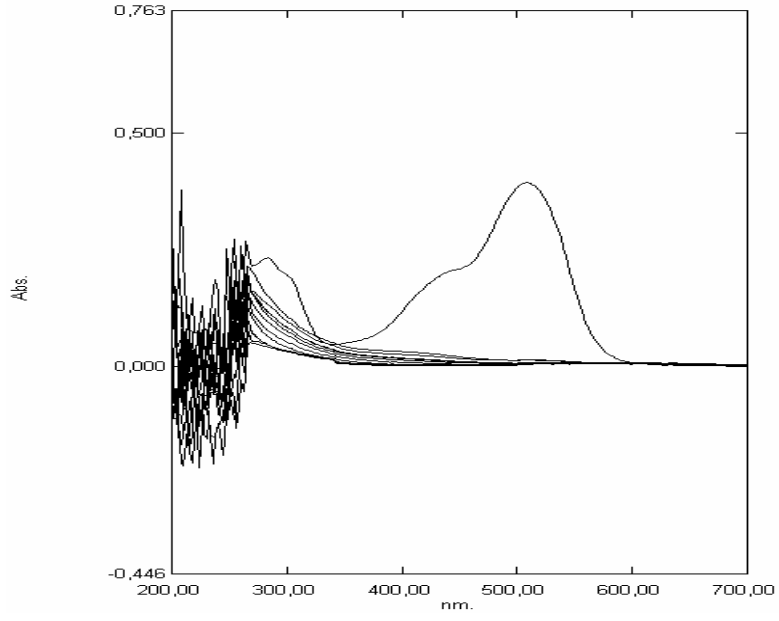
**Şekil 6.12.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=24,8 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)



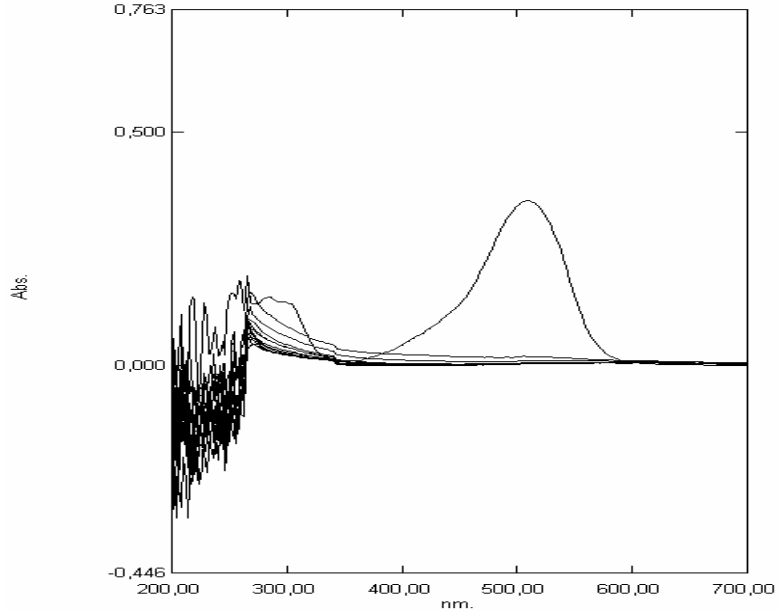
**Şekil 6.13.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=176$ mA,  $i=1$ mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=47,8 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)



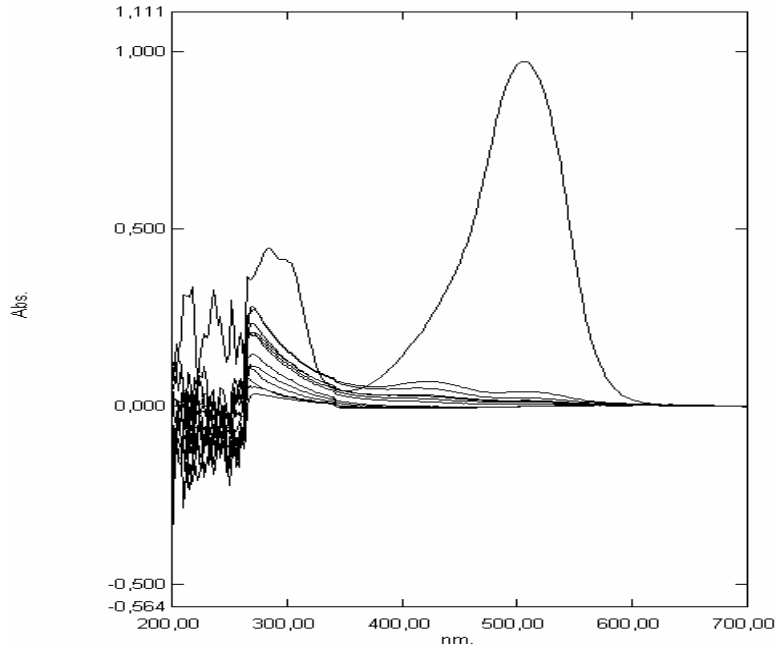
**Şekil 6.14.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=176$ mA,  $i=1$ mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=3)



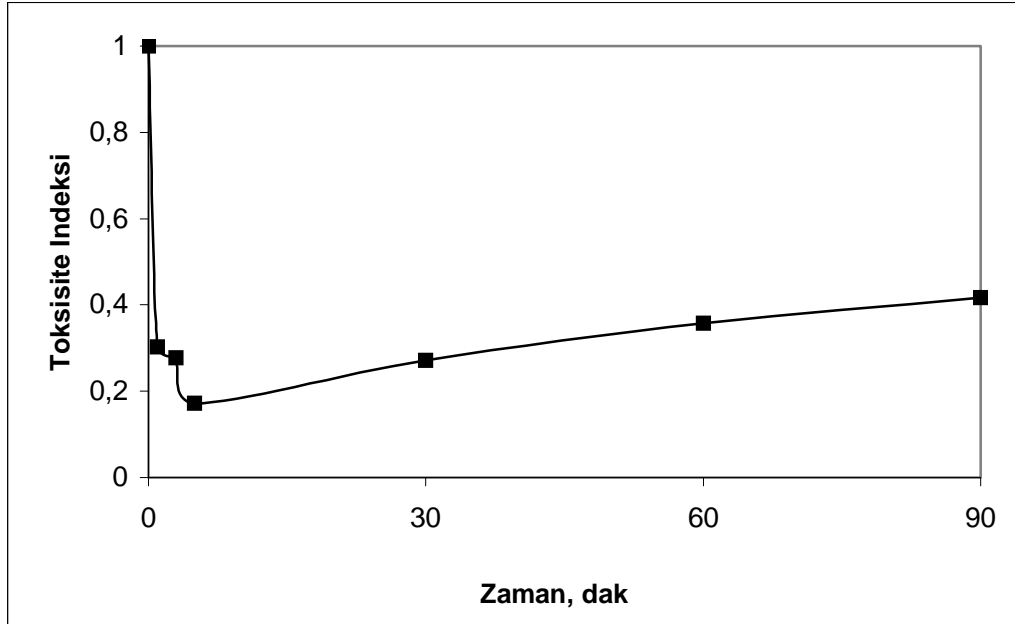
**Şekil 6.15.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=176$ mA,  $i=1$ mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=11)



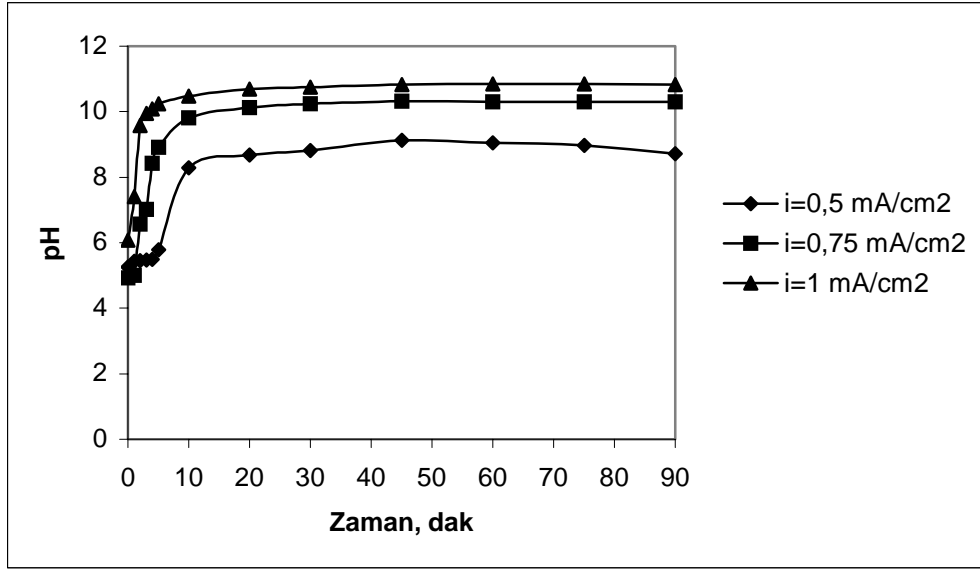
**Şekil 6.16.**  $C_0=20$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=176$ mA,  $i=1$ mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)



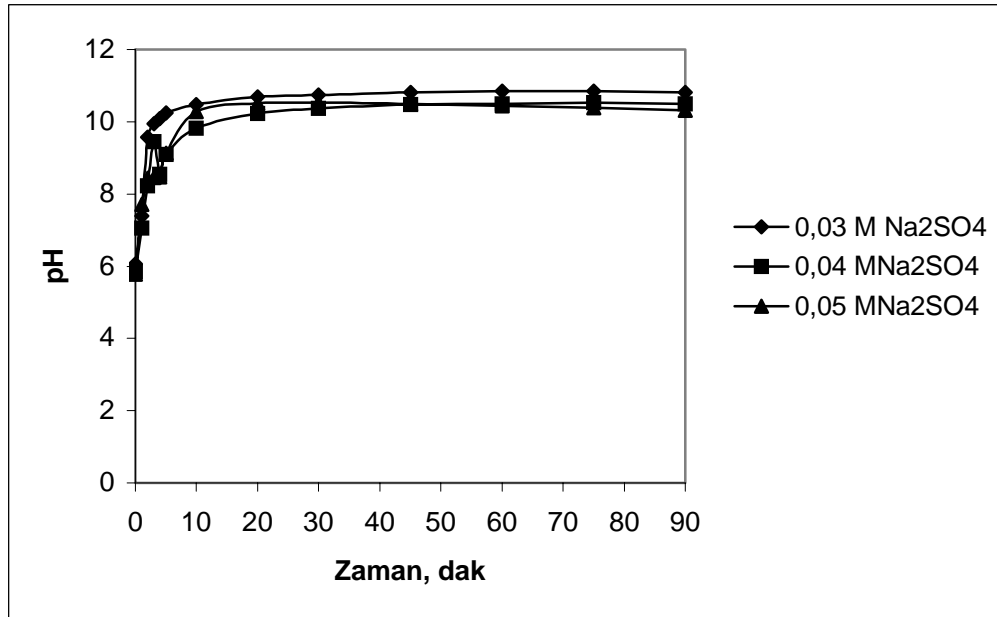
**Şekil 6.17.**  $C_0=60$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=176$ mA,  $i=1$ mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm, pH<sub>0</sub>=doğal)



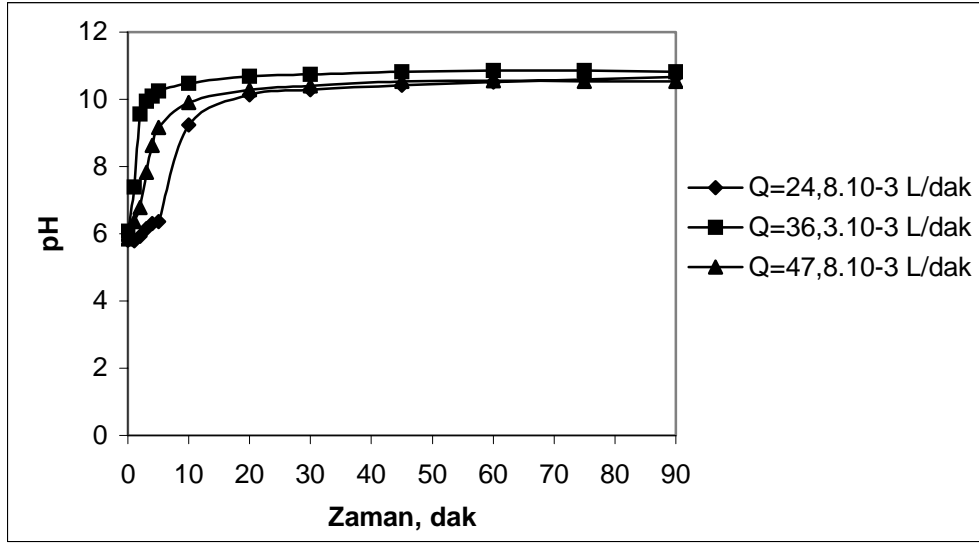
**Şekil 6.18.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmada toksisitenin zamanla değişimi



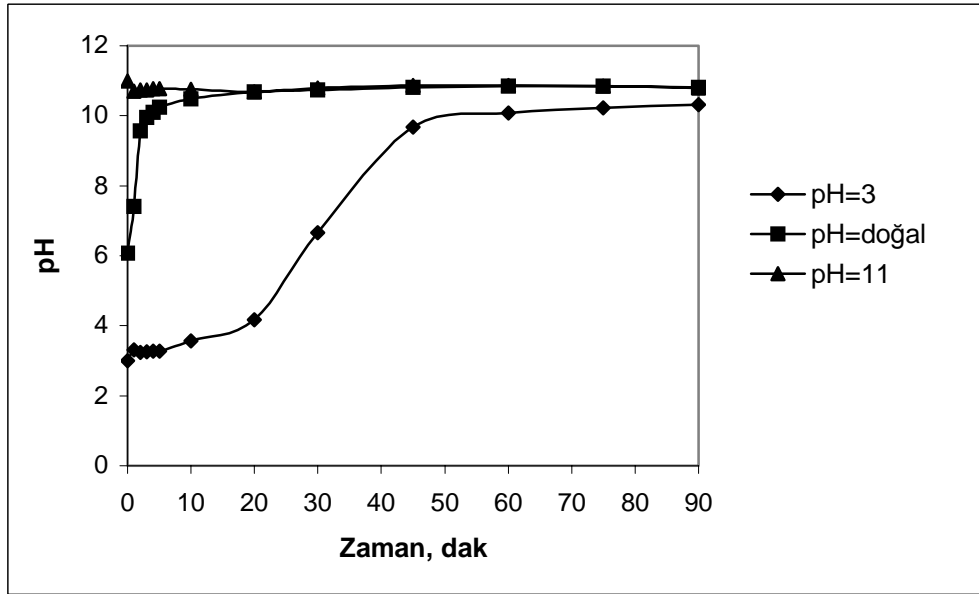
Şekil 6.19. pH'nin akım yoğunluğuna göre değişimi ( $C_0=40 \text{ mg/L}$ , D.E.= $0,03 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ ,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3} \text{ L/dak}$ ,  $\text{pH}_0=\text{doğal}$ )



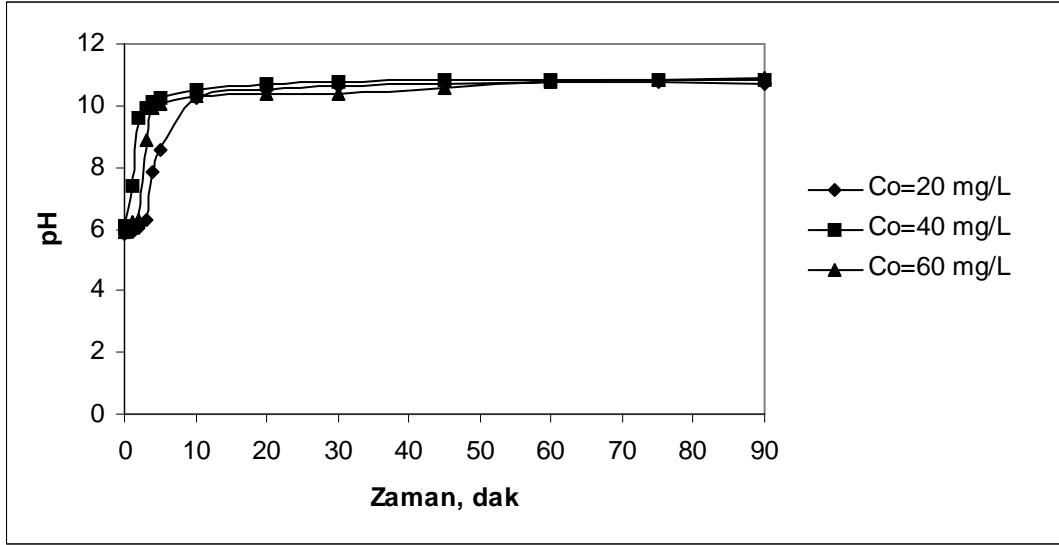
Şekil 6.20. pH'nin destek elektrolit miktarına göre değişimi ( $C_0=40 \text{ mg/L}$ ,  $i=1 \text{ mA/cm}^2$ ,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3} \text{ L/dak}$ ,  $\text{pH}_0=\text{doğal}$ )



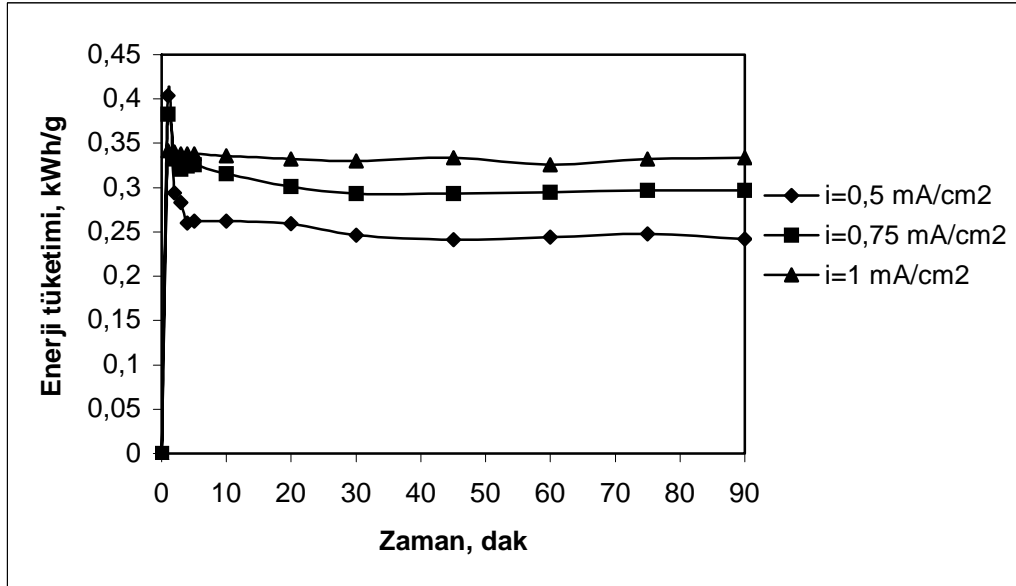
Şekil 6.21. pH'nin debiye göre değişimi ( $C_0=40$  mg/L, D.E.=0,03 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $\text{pH}_0=\text{doğal}$ )



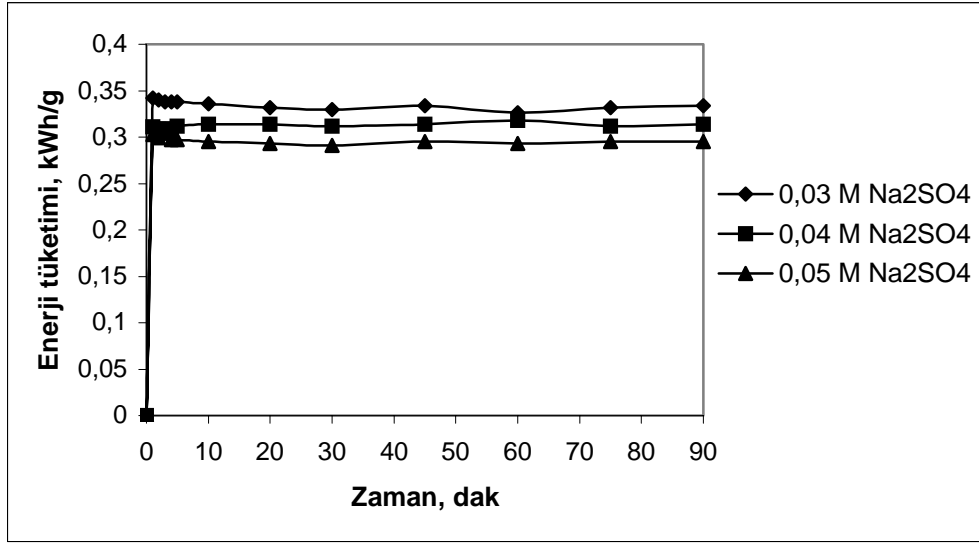
Şekil 6.22. pH'nin başlangıç pH'ına göre değişimi ( $C_0=40$  mg/L, D.E.=0,03 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>)



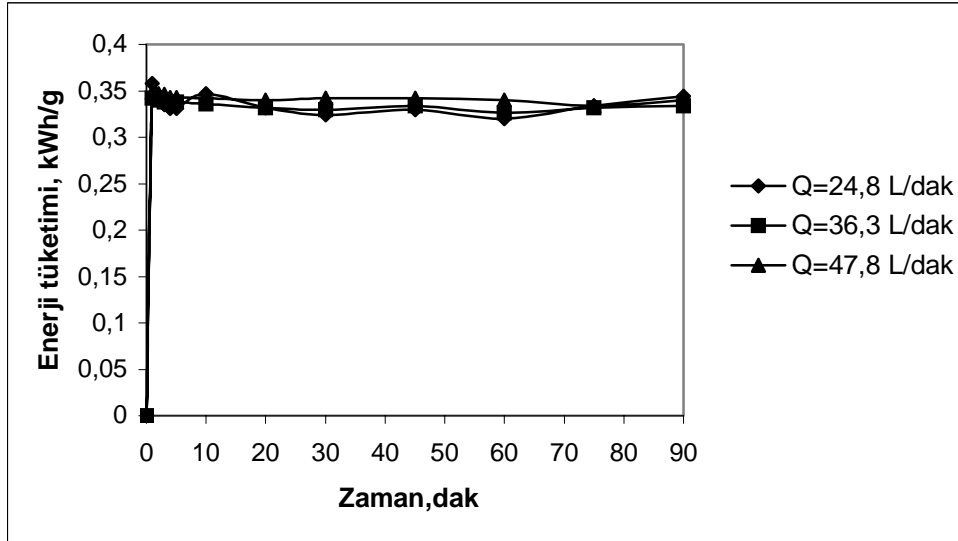
Şekil 6.23. pH'ın başlangıç derişimine göre değişimi ( $D=0,03$  M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $\text{pH}_0=\text{doğal}$ )



Şekil 6.24. Enerji tüketiminin akım yoğunluğuna göre değişimi ( $C_0=40$  mg/L, D.E.=0,03 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  $\text{pH}_0=\text{doğal}$ )

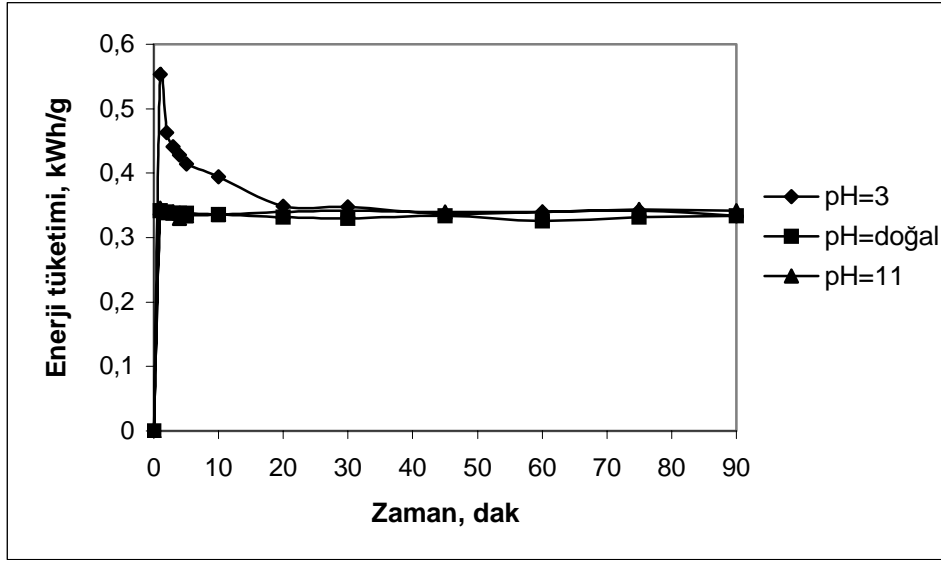


Şekil 6.25. Enerji tüketiminin destek elektrolit miktarına göre değişimi ( $C_0=40$  mg/L,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  $pH_0=\text{doğal}$ )

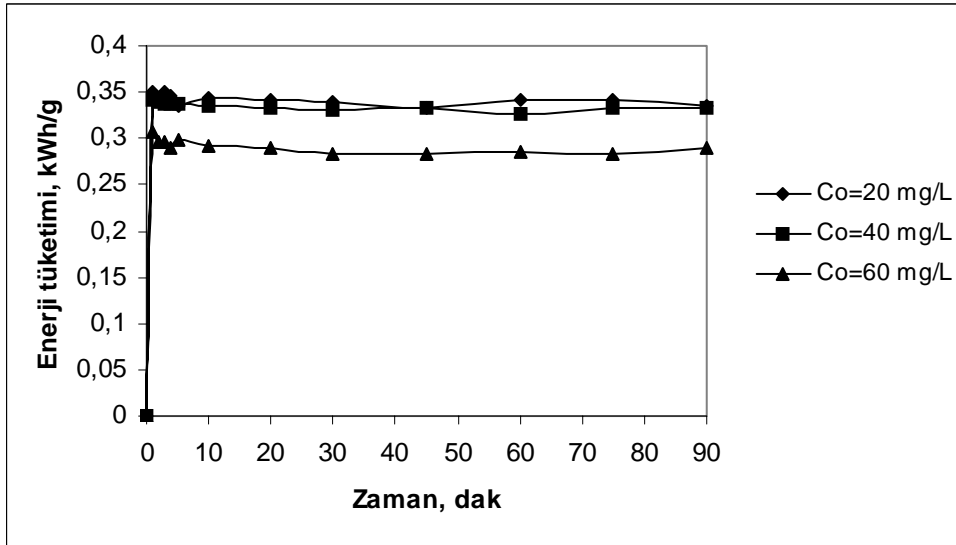


Şekil 6.26. Enerji tüketiminin debiye göre değişimi ( $C_0=40$  mg/L, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $pH_0=\text{doğal}$ )

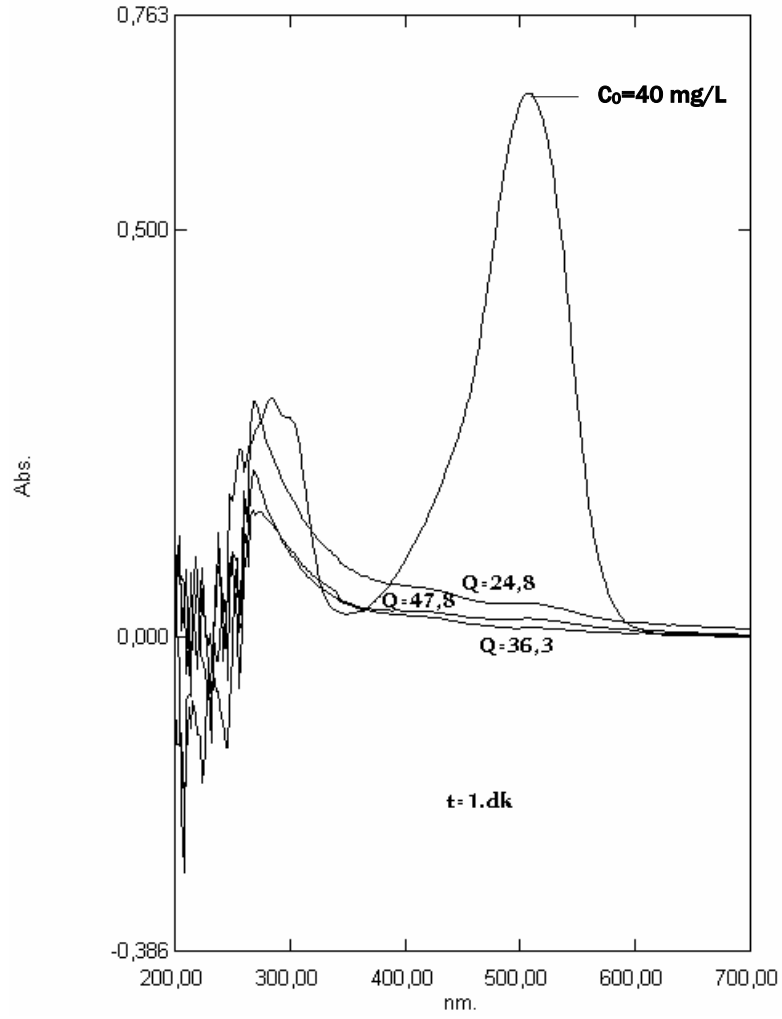




Şekil 6.27. Enerji tüketiminin başlangıç pH'ına göre değişimi ( $C_0=40$  mg/L, D.E.=0,03 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>)

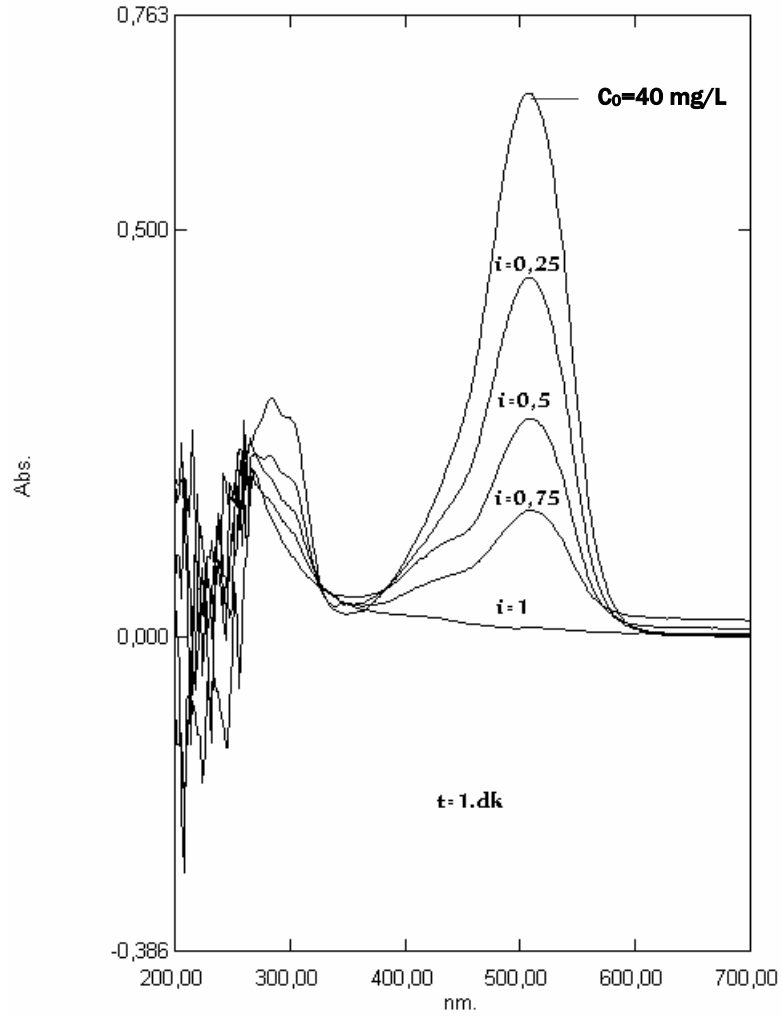


Şekil 6.28. Enerji tüketiminin başlangıç derişimine göre değişimi (D.E.=0,03 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>, pH<sub>0</sub>=doğal)



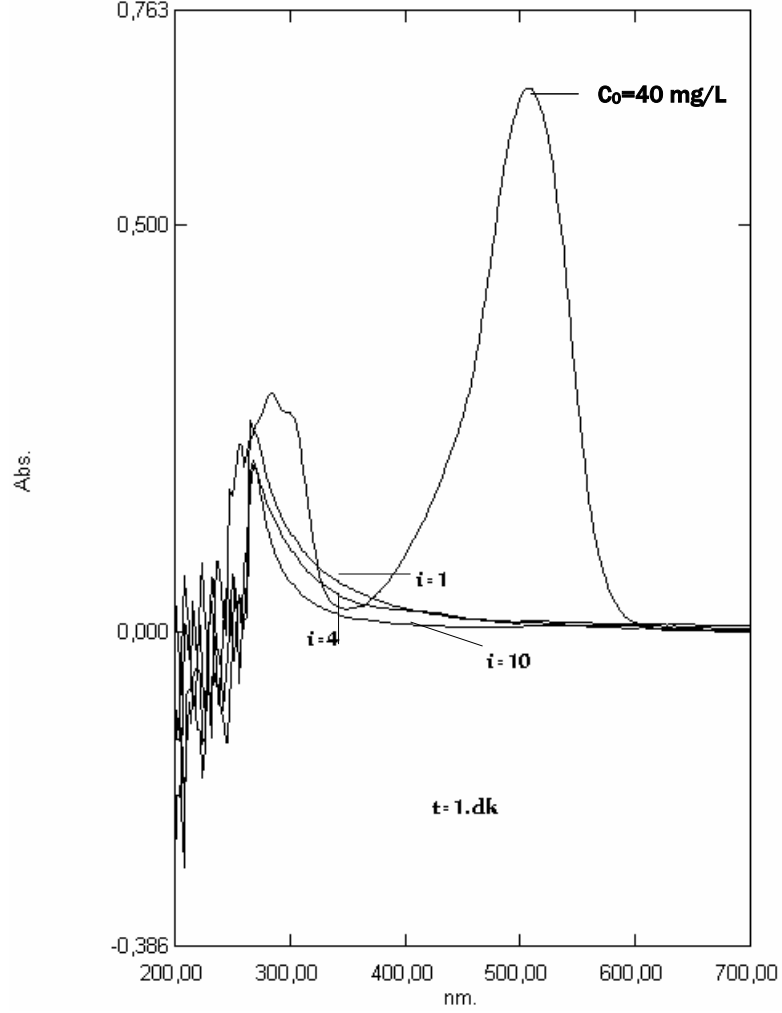
**Şekil 6.29.**  $C_0=40 \text{ mg/L}$  BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalarda renk gideriminin akış hızına göre değişimi ( $I=176 \text{ mA}$ ,  $i=1 \text{ mA/cm}^2$ ,  $D.E.=0,03 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ ,  $E.I.= 5,54 \text{ mS/cm}$ ,  $\text{pH}_0=\text{doğal}$ )

Deneysel çalışmalarda 3 farklı akış hızı denenmiştir. Şekil 6.29’da yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen 1.dakika spektrumları kullanılmıştır. 3 farklı akış hızı için alınan spektrumlar en iyi giderim verimine  $36,3 \cdot 10^{-3} \text{ L/dak}$  akış hızında ulaşıldığını göstermiştir.



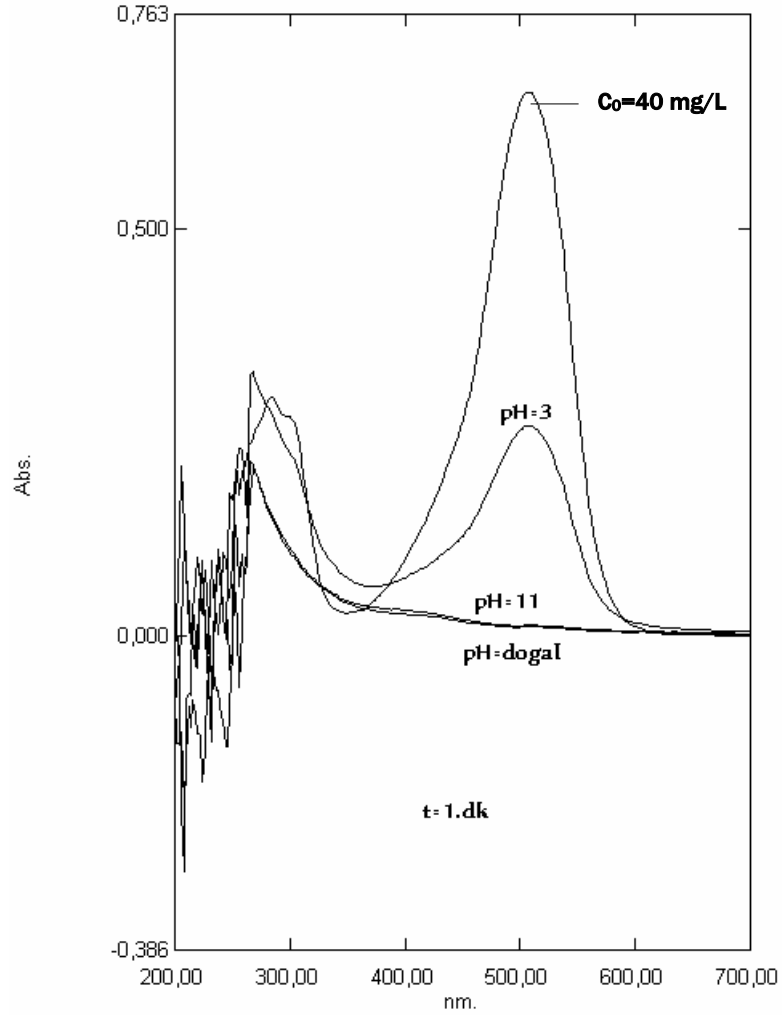
**Şekil 6.30.**  $C_0=40 \text{ mg/L}$  BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalarda renk gideriminin akım yoğunluğuna göre değişimi ( $Q=36,3 \cdot 10^{-3} \text{ L/dak}$ ,  $D.E.=0,03 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ ,  $E.I.=5,54 \text{ mS/cm}$ ,  $pH_0=\text{doğal}$ )

4 farklı akım yoğunluğunda çalışılan deneysel çalışma sonuçlarından elde edilen 1. dakika spektrumları Şekil 6.30'da verilmiştir. Alınan spektrumlar akım yoğunluğu arttıkça giderim veriminin arttığını göstermiştir. En iyi giderim verimi  $1 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğunda elde edilmiştir.



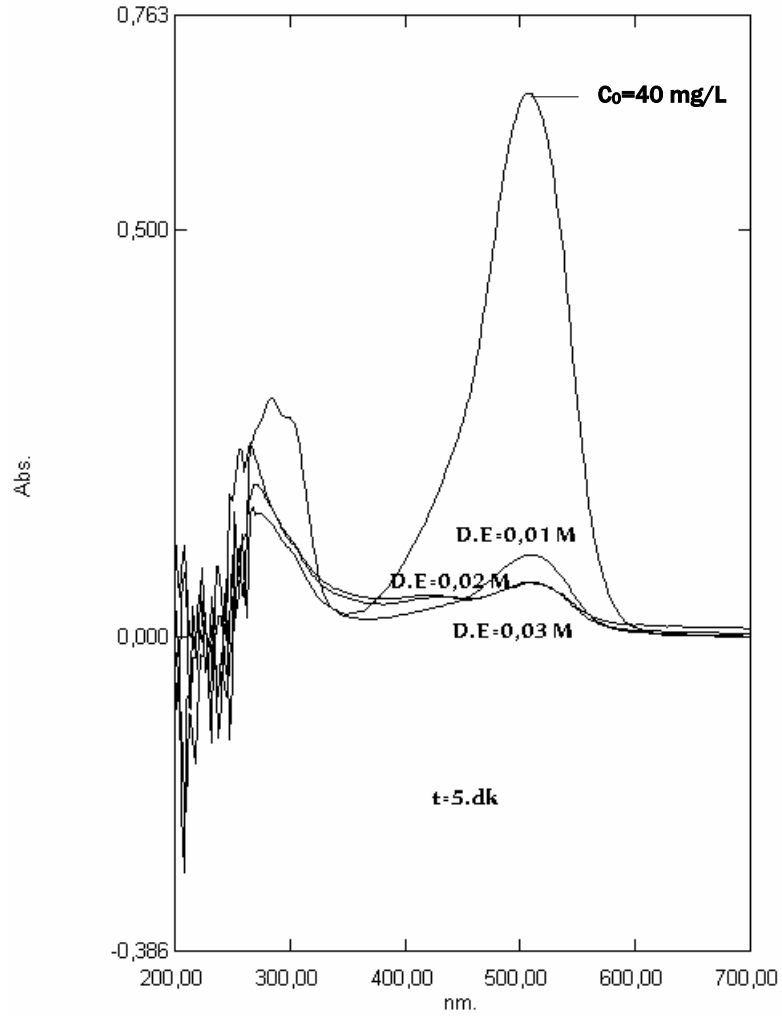
**Şekil 6.31.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalarda renk gideriminin akım yoğunluğuna göre değişimi ( $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak, D.E.=0,03 M  $Na_2SO_4$ , E.İ.= 5,54 mS/cm,  $pH_0$ =doğal)

Yüksek akım yoğunluklarında gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları Şekil 6.31’de verilmiştir. Şekilde 1. dakika spektrumları kullanılmıştır. Yüksek akım yoğunluklarında çalışılmasına rağmen  $1 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğunda elde edilen giderim veriminden daha iyi bir giderim verimi elde edilememiştir.



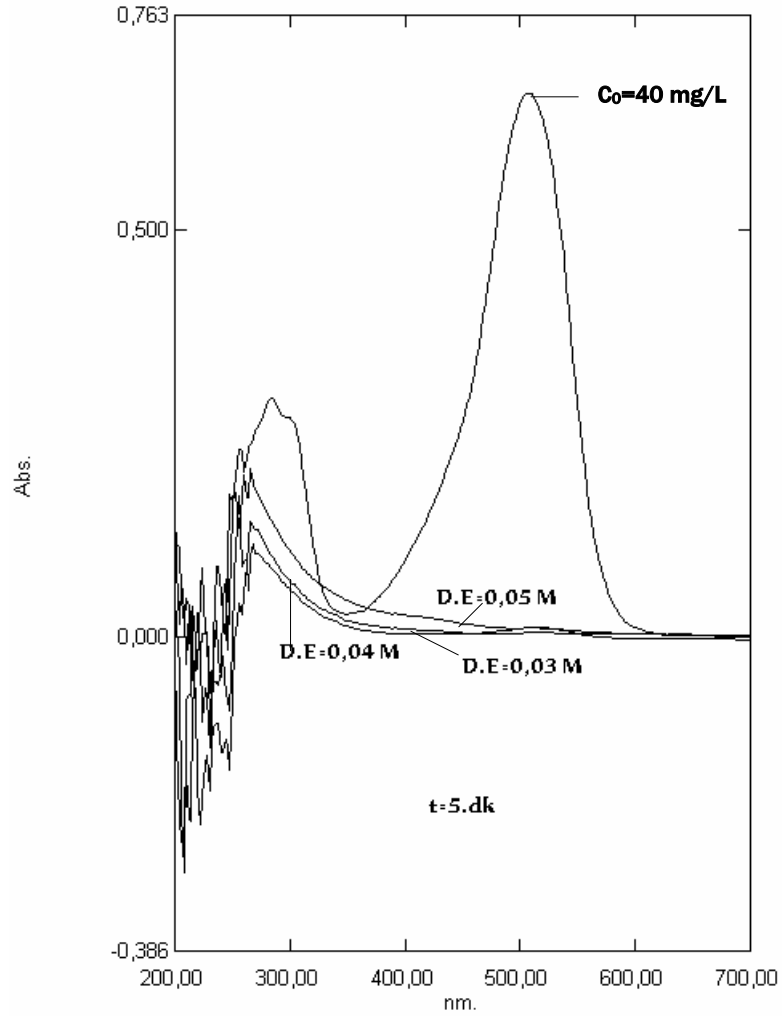
**Şekil 6.32.**  $C_0=40$  mg/L BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalarda renk gideriminin başlangıç pH'ına göre değişimi ( $I=176$ mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-5}$  L/dak, D.E.=0,03 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, E.İ.= 5,54 mS/cm)

PH'ın giderim verimine etkisinin incelendiği deneysel çalışmalar için başlangıç pH'ı 3 ve 11'ayarlanmıştır. Çözeltinin doğal pH'ında, pH=3'te ve pH=11'de gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen 1. dakika spektrumları Şekil 6.32'de verilmiştir. Bu çalışma sonuçlarına göre en iyi giderim verimi çözeltinin doğal pH'ında elde edilmiştir.



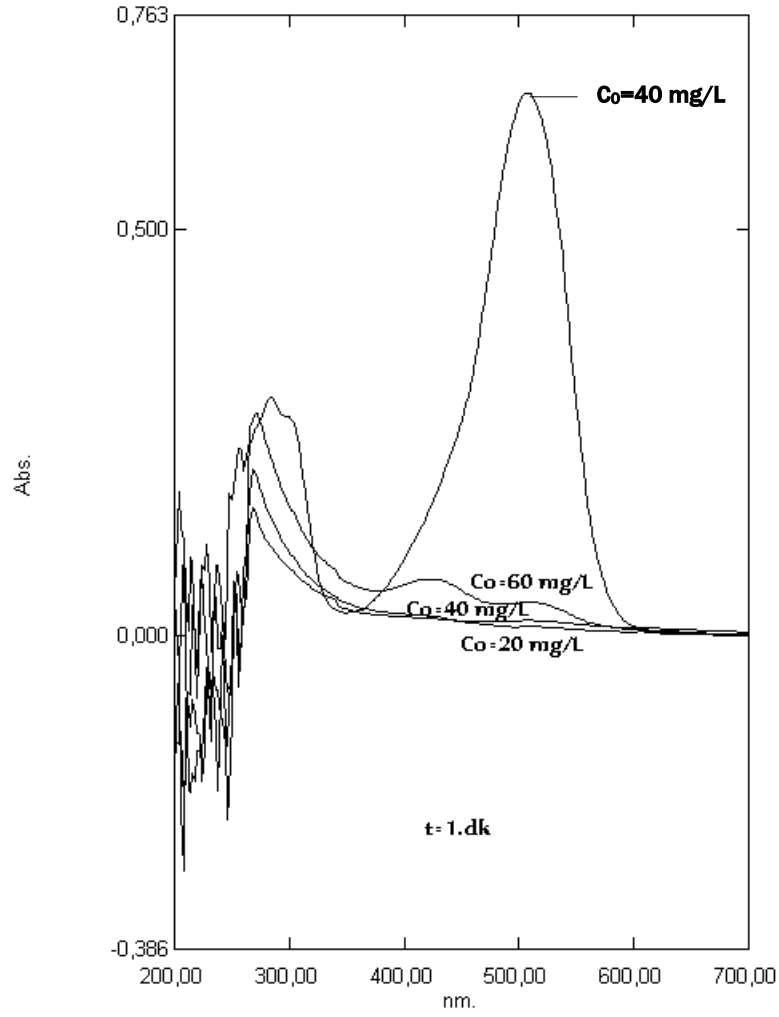
**Şekil 6.33.**  $C_0=40 \text{ mg/L}$  BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalarda renk gideriminin destek elektrolit derişimine göre değişimi ( $I=88\text{mA}$ ,  $i=0,5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3} \text{ L/dak}$ ,  $\text{pH}_0=\text{doğal}$ )

Şekil 6.33'te 3 farklı destek elektrolit derişiminde yapılan deneysel çalışmaların 5. dakika spektrumları verilmiştir. En iyi giderim verimine 0,03 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ilavesinde ulaşılmış olması destek elektrolit ilavesinin giderim verimini arttırdığını göstermiştir.



**Şekil 6.34.**  $C_0=40 \text{ mg/L}$  BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalarda renk gideriminin destek elektrolit derişimine göre değişimi ( $I=176\text{mA}$ ,  $i=1 \text{ mA/cm}^2$ ,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3} \text{ L/dak}$ ,  $\text{pH}_0=\text{doğal}$ )

Şekil 6.34'te 3 farklı destek elektrolit miktarının giderim verimine etkisi incelenmiştir. Bunun için 5. dakikada alınan spektrumlardan yararlanılmıştır. En iyi giderim verimine 0,03 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ilavesinde ulaşıldığı görülmüştür. Daha yüksek miktarlarda destek elektrolit ilave etmek akım verimini düşürmüştür.



**Şekil 6.35.** BR-29 çözeltisi ile yapılan çalışmalarda renk gideriminin başlangıç derişimine göre değişimi ( $I=176\text{mA}$ ,  $i=1\text{ mA/cm}^2$ ,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}\text{ L/dak}$ ,  $D.E.=0,03\text{ M Na}_2\text{SO}_4$ ,  $E.I.=5,54\text{ mS/cm}$ ,  $\text{pH}_0=\text{doğal}$ )

Deneysel çalışmalarda 3 farklı başlangıç derişiminde çalışılmıştır. Şekil 6.35'te deneysel çalışmalardan elde edilen 1. dakika spektrumları verilmiştir. En iyi giderim verimine 40mg/L başlangıç derişiminde ulaşılmıştır. Daha düşük ve daha yüksek başlangıç derişimlerinde çalışıldığında daha iyi bir giderim verimi elde edilememiştir.

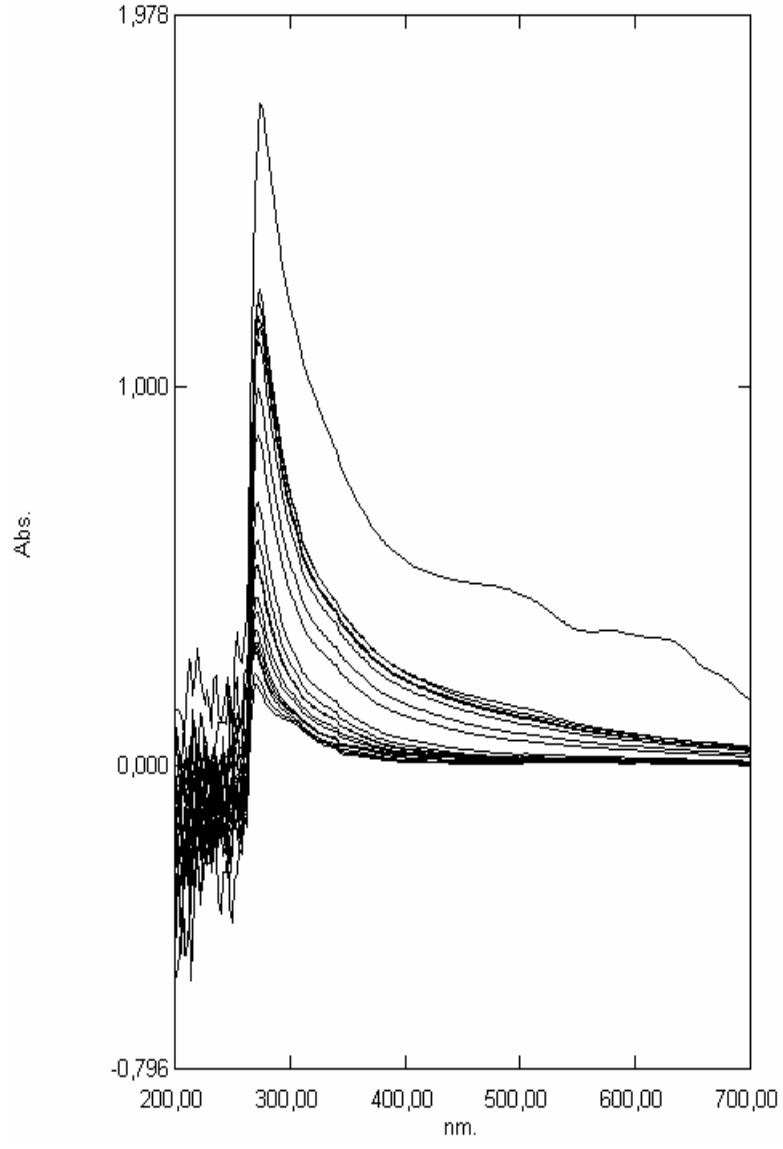


## 6.2. Tekstil Endüstrisi Atıksuyu İle Gerçekleştirilen Çalışmalar

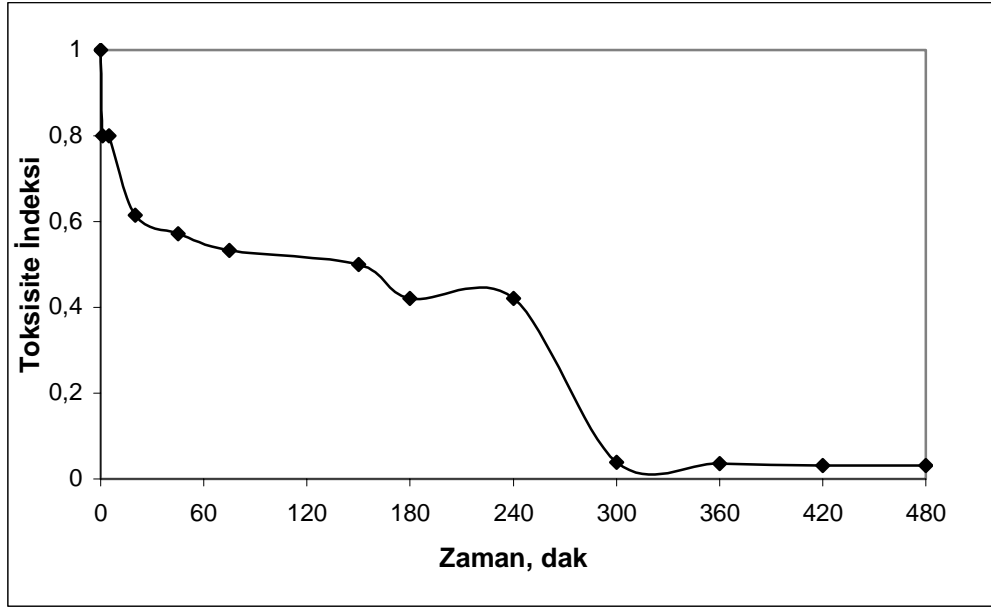
Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucu elde edilen optimum şartlarda tekstil endüstrisi atıksuyunun Rashig halkası şeklindeki bor katkılı elmas elektrotlarla elektrokimyasal yükseltgemesi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan tekstil endüstrisi atıksuyunun başlangıç KOİ'si 566,45 mg/L, maksimum dalga boyundaki absorbanı 0,357, elektriksel iletkenliği 5,74 mS/cm, pH'ı 12,51'dir. Deney sırasında belirli zaman aralıklarında alınan numunelerin 200-700nm arasında spektrumları alınarak boyar madde giderimleri belirlenmiş, KOİ'leri ölçülmüş ve toksisitenin zamanla değişimi gözlenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları Çizelge 6.18 ve Şekil 6.36-40'da verilmiştir.

**Çizelge 6.18.** Tekstil Endüstrisi atıksuyu ile yapılan çalışma (I=176 mA, i=1 mA/ cm<sup>2</sup>, Q=36,3.10<sup>-3</sup> L/dak, pH<sub>0</sub>=doğal)

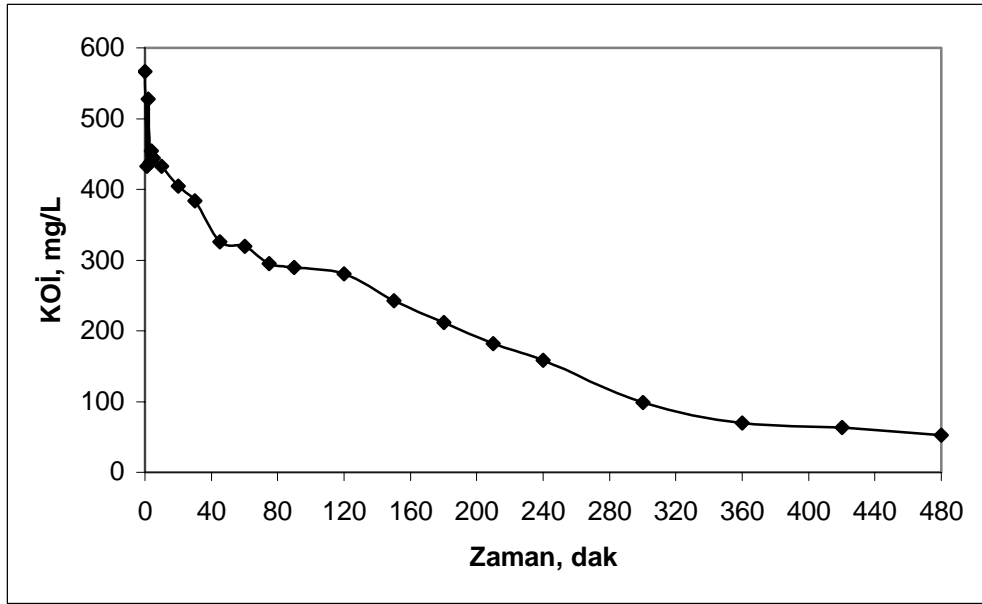
Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	KOİ (mg/L)	Giderim(%)		Enerji Tüketimi (kWh/gKOİ)
				Renk	KOİ	
0	178	12,51	566,45	-	-	-
1	180	6,84	432,42	73,0	23,6	0,108
2	179	7,02	527,34	76,0	7,0	0,370
3	182	12,36	437,82	76,2	23,0	0,114
4	180	12,34	454,10	76,2	20,0	0,130
5	183	12,36	444,34	76,4	21,5	0,121
10	183	12,31	432,47	79,0	23,6	0,110
20	175	12,23	404,46	83,4	28,6	0,087
30	172	12,18	383,30	87,0	32,3	0,075
45	171	12,12	325,52	93,0	42,5	0,057
60	170	12,05	319,36	94,3	44,0	0,055
75	180	12,00	295,40	95,2	48,0	0,053
90	176	11,96	289,58	95,2	49,0	0,051
120	178	11,86	280,30	95,2	50,5	0,050
150	178	11,72	242,52	95,2	57,2	0,044
180	186	11,27	212,21	96,6	62,5	0,042
210	184	11,35	182,34	96,6	68,0	0,038
240	186	11,13	158,41	96,6	72,0	0,036
300	195	11,11	98,32	97,2	82,6	0,033
360	193	10,96	70,02	97,2	87,6	0,031
420	188	10,85	63,25	97,2	89,0	0,030
480	180	10,84	52,38	97,2	91,0	0,028



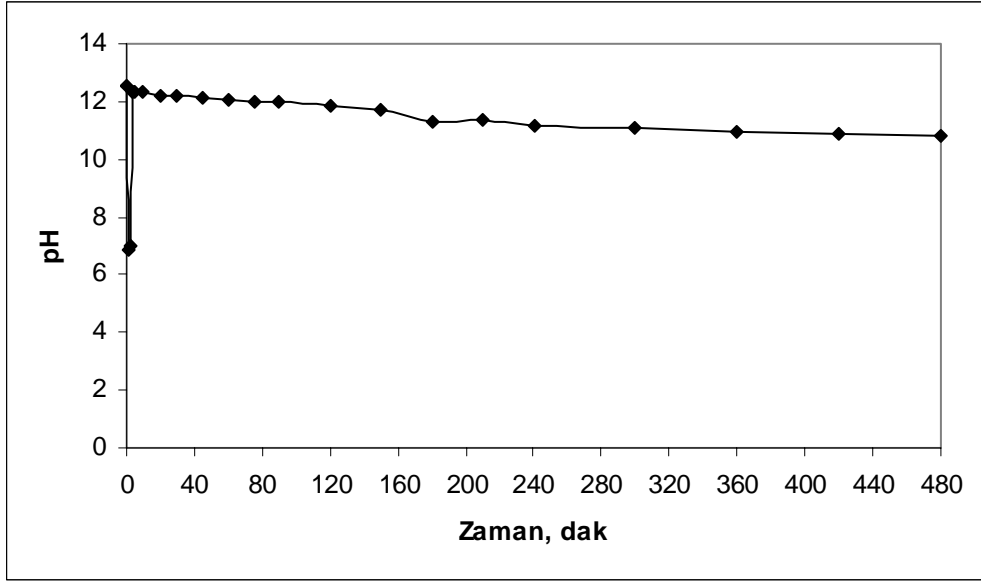
**Şekil 6.36.** Tekstil Endüstrisi atıksuyu ile yapılan çalışmada boyar madde spektrumlarının zamanla değişimi ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  $pH_0$ =doğal)



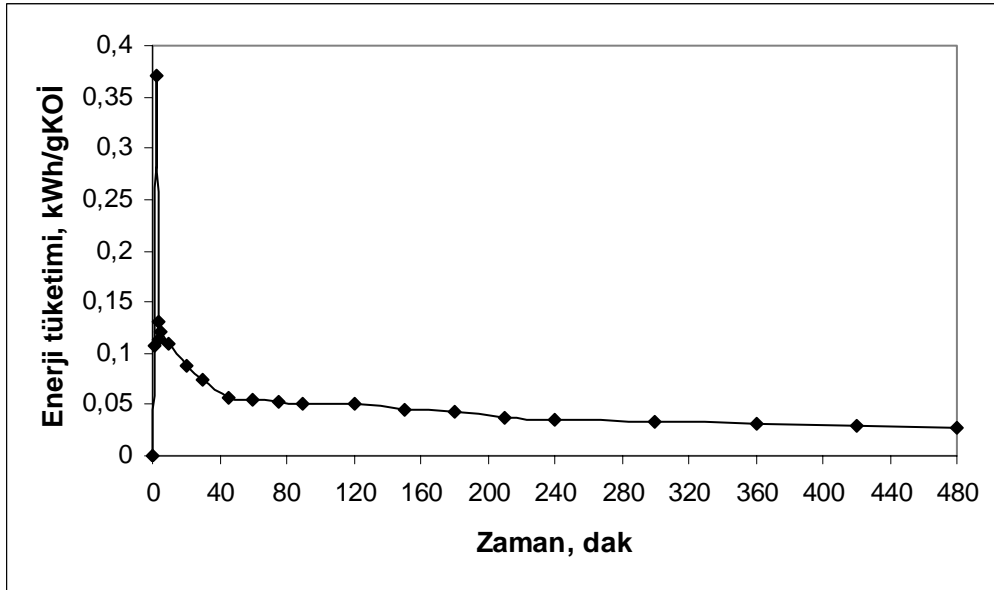
Şekil 6.37. Tekstil Endüstrisi atıksuyu ile yapılan çalışmada toksisitenin zamanla değişimi



Şekil 6.38. Tekstil Endüstrisi atıksuyu ile yapılan çalışmada KOİ'nin zamanla değişimi ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  $pH_0$ =doğal)



Şekil 6.39. Tekstil Endüstrisi atıksuyu ile yapılan çalışmada pH'ın zamanla değişimi ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  $pH_0$ =doğal)



Şekil 6.38. Tekstil Endüstrisi atıksuyu ile yapılan çalışmada enerji tüketiminin zamanla değişimi ( $I=176$  mA,  $i=1$  mA/cm<sup>2</sup>,  $Q=36,3 \cdot 10^{-3}$  L/dak,  $pH_0$ =doğal)

## 7. BULGULARIN TARTIŞILMASI

Kesikli geri döngülü çalıştırılan tıkaç akım reaktörde başlangıç derişimi, akım yoğunluğu, destek elektrolit derişimi, akış hızı ve başlangıç pH'ının giderim verimine etkileri incelenmiştir.

Orijinal çözelti düşük elektriksel iletkenliği ( $C_0=40$  mg/L boyar madde için  $45,4 \mu\text{S/cm}$ ) nedeniyle pratik çalışma fırsatı vermediği için sonraki çalışmalar destek elektrolit ilave edilerek gerçekleştirilmiştir. Destek elektrolit olarak  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  kullanılan çalışmalarda, çözelti pH'ında zamanla sürekli olarak artış gözlenmiştir (Bkz.Şekil 6.19,..., 23). Farklı destek elektrolit derişimlerinde gerçekleştirilen çalışmalarda, en iyi renk giderim verimine  $0,03 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$  ile ulaşılmıştır (Bkz.Şekil 6.33 ve 34).

Başlangıç pH'ının renk giderimine etkisi incelendiğinde en iyi giderim verimi çözeltinin doğal pH'ında gerçekleştiği için (Bkz.Şekil 6.32), deneyler çözeltinin doğal pH'ında yapılmıştır.

Akım yoğunluğunun artışı ile renk giderim verimi artış göstermiştir (Bkz.Şekil 6.30).  $0,25 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğunda %97 renk giderimine 210. dakikada ancak ulaşılrken,  $0,5 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğunda %99'un üzerinde renk giderimine 40. dakikada,  $0,75 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğunda aynı giderime 20. dakikada,  $1 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğunda 3. dakikada ulaşılmıştır. Ancak çok yüksek akım yoğunluklarında çalışıldığında  $1 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğunda ulaşılan giderim veriminden daha iyi bir giderim verimi elde edilememiştir.

Optimum şartlarda başlangıç derişiminin etkisi incelenmiş,  $20 \text{ mg/L}$  başlangıç boyar madde derişiminde 3. dakikada (Bkz. Şekil 6.16),  $40 \text{ mg/L}$  başlangıç boyar madde derişiminde 1. dakikada (Bkz. Şekil 6.7),  $60 \text{ mg/L}$  başlangıç boyar madde derişiminde yine 3. dakikada (Bkz. Şekil 6.17) %98'in üzerinde renk giderimi sağlanmıştır.

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, tıkaç akım reaktörde elmas elektrotlar kullanılarak elektrokimyasal yükseltgeme ile boyar maddenin sudan giderimi araştırılmıştır.

Model atıksularda gerçekleştirilen bütün çalışmalarda rengin tamamen giderimi sağlanmıştır. Model atıksuların hazırlanmasında kullanılan Basic Red-29 boyar maddesinin kronik maruziyette mutajenik etki göstermesinden dolayı çalışma süresince belirli zaman aralıklarda alınan numunelerde toksisitenin zamanla değişimini gözlemek için toksisite testleri yapılmıştır. Rengin yanı sıra toksisitenin de yüksek oranlarda giderilebileceği bulunmuştur.

Optimum şartlarda, çalışılan elektrokimyasal sistemde tekstil endüstrisi atıksuyunun arıtımı araştırılmış ve destek elektrolit ilavesi olmaksızın %97 renk, %91 KOİ (Bkz. Çizelge 6.18, Şekil 6.36, 38) ve yüksek oranlarda toksisite giderim verimi elde edilmiştir (Bkz. Şekil 6.39).

Bu çalışmalar sonunda elektrokimyasal yükseltgemenin renk, KOİ ve toksisitenin eşanlı olarak gideriminde etkin bir arıtım yöntemi olduğu görülmüştür.

## KAYNAKLAR

Alaton, A. I. ve Balcioğlu, İ.A., *Photochemical and heterogeneous photocatalytic degradation of waste vinylsulphone dyes; a case study with hydrolysed Reactive Black 5*, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, **141**, 247-254, (2001).

Azur Enviromental, *The Microtox Acute Basic, DIN, ISO and Wet Test Prosedures*, Azur Environmental, Carlsbad, CA, USA, (1998).

Awad, H.S. ve Galwa, N.A., *Electrochemical degradation of Acid Blue and Basic Brown dyes on Pb/PbO<sub>2</sub> electrode in the presence of different conductive electrolyte and effect of various operating factors*, Chemosphere, **61**, 1327, 1335 (2005).

Costa, A.P.F., Reis, M.E., Azevedo, J.C.R ve Nozaki, J., *Bleaching and photodegradation of textile dyes by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and solar or ultraviolet radiation*, Solar Energy, **46**, 29-35 (2005).

Fernandes, A., Morao, A., Magrinho, M., Lopes, A. ve Goncalves, I., *Electrochemical degradation of C. I. Acid Orange 7*, Dyes and Pigment, **61**, 287-296 (2004).

Filibeli, A. ve Büyükkamacı, M., *Karasuyun Anaerobik Yöntemlerle Arıtilabilirliğinin Değerlendirilmesi, 1.Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları ve Çözümleri Uluslar arası Çalıştayı Bildiriler Kitabı*, 67-77, Balıkesir, (2002).

Fujishma, A. ve Rao, T.N., *New directions in structuring and electrochemical applications of boron-doped diamond thin films*, Diamond and Related Materials, **10**, 1799-1803 (2001).



Grimau, V.L. ve Gutierrez, M.C., *Decolourisation of simulated reactive dyebath effluents by electrochemical oxidation assisted by UV light*, Chemosphere, **62**, 106-112 (2006).

Grimm, J.H., Bessarabov, D.G., Simon, U. ve Sanderson, R.D., “Characterization of doped Tin Dioxide Anodes Prepared by a Sol-gel Techniqua and Their application in an SPE Reactor”, Journal of Applied Electrochemistry, **30**, 293-302 (2000).

İnan, H., Şimşek, H., Karpuzcu, M. ve Domigla, A., *Elektrokimyasal Yöntemler İle Zeytin Yağı Endüstrisi Karasuyunun Arıtılabilirliği, 1. Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları Ve Çözümleri Uluslararası Çalıştayı Bildiriler Kitabı*, 165-178, Balıkesir, (2002).

Kim, T., Park, C., Lee, J. ve Shin, E., *Pilot Scale Treatment of Textile Wastewater by Combined Process (Fluidized Biofilm Process - Chemical Coagulation - Electrochemical Oxidation)*, Water Research, **36**, 3979-3988 (2002).

Koparal, A. S., *Sudaki Boyar Maddelerin Bir Elektrokimyasal Reaktörde Renklerin Giderilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, 6-7, Eskişehir, (1991).

Koparal, A.S., Yavuz, Y. ve Ögütveren, Ü.B., *Electroadsorption of acilan Blau Dye from textile effluents by Using Activated Carbon-Perlite Mixtures*, Water Environmental Research, **74**, 521-525 (2002).

Lin, S.H. ve Peng, C.F., *Treatment of Textile Wastewater by Electrochemical Method*, Water Research, **28**, No:2, 277-282, (1994).

Singleton, R.W., *Textiles*, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley&Sons, **22**,USA, (1983).

Szpyrkowicz, L., Juzzolino, C. ve Kaul, S.N., *A comparative study on oxidation of disperse dyes by electrochemical process, ozone, hypochlorite and fenton reagent*, Water Research, **35**, 2129-2136 (2001).

Şengül, F., Endüstriyel Atıksuların Özellikleri ve Arıtımı, Dokuz Eylül Üniv., Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Yayınları No. **172**, İkinci Baskı, İzmir, (1991).

Tahar, N. B. ve Savall, A., *Electrochemical Degradation of Phenol in Aqueous Solution on Bismuth doped Lead Dioxide: A Comparison of The Activies of Various Electrode Formulations*, Journal of Applied Electrochemistry, **29**, 277-283 (1999).

Tezcanlı, G., Guyer, N.H. ve İnce, N.H., *Degradation and toxicity reduction of textile dyestuff by ultrasound*, Ultrasonics Sonochemistry, **10**, 235-240 (2003).

Tröster, I., Fryda, M., Herrmann, D., Schäfer, L., Hänni, W., Perret, A., Blaschke, M., Kraft, A. ve Stadelmann, M., *Electrochemical advavced oxidation process for water treatment using DiaChem<sup>®</sup> electrodes*, Diamond and Related Materials, **11**, 640-645 (2002).

Yavuz, Y., *Tekstil Atıksularında Boyar maddelerin Elektroadsorpsiyonla Giderimi*, Yüksek Lisans Tezi, 12-24, Eskişehir, (1998).

Vlyssides, A.G., Loizidou, M., Karlis, P.K., Zorpas, P. ve Papaioannou, D., *Electrochemical Oxidation of a Textile Wastewater Using a Pt/Ti Electrode*, Journal of Hazardous Materials, **70**, 41-52 (1999).

http-1: Basic Red 29 boyar maddesine ait MSDS, [http:// www. sigma- aldrich.com](http://www.sigma-aldrich.com)

http-2: Diamond Electrodes For Electrochemistry,

[http://www.csem.ch/detailed/b\\_441-diam-electrodes.html](http://www.csem.ch/detailed/b_441-diam-electrodes.html)

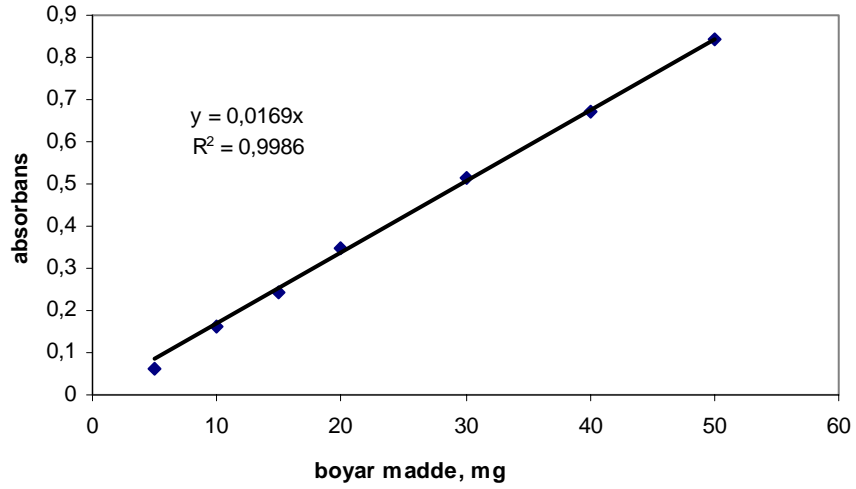
## STANDART ÇALIŞMA DOĞRUSU VE DERİŞİM HESABI

### EK 1.1. Standart Çalışma Doğrusu

Belirli derişimlerdeki boyar madde çözeltilerinin, spektrofotometrede 508 nm dalga boyunda absorbands değerleri okunmuş ve derişime karşı grafiğe geçirilerek standart çalışma doğrusu elde edilmiştir.

**Çizelge EK 1.1.** Derişim değerlerine karşı spektrofotometrede okunan absorbands değerleri

Derişim (mg/L)	5	10	15	20	30	40	50
Absorbans	0,064	0,162	0,244	0,346	0,514	0,673	0,841



**Şekil EK 1.1.** Basic Red için standart çalışma doğrusu

## EK 1.2. Derişim Hesabı

Şekil EK 1.1’de görülen standart çalışma doğrusunun denklemi

$$y=0,0169x \quad (\text{EK 1.1})$$

şeklindedir. Önce EK 1.1 eşitliği yardımıyla numunedeki boyar madde miktarı mg olarak hesaplanır. Daha sonra EK 1.2 eşitliği kullanılarak çözeltilinin boyar madde derişimi mg/L olarak hesaplanır.

$$\text{mg boyar madde/L} = \frac{x}{z} 1000 \quad (\text{EK 1.2})$$

Bu formülde; x= mg olarak numunedeki boyarmadde miktarı

z=mL orijinal numune hacmi

Örneğin absorbansı (y) 0,250 olarak ölçölmüş bir çözeltildeki boyar madde miktarı EK 1.1 eşitliği kullanılarak;

$$0,250=0,0169x$$

$x=14,80$  mg boyar madde olarak hesaplanır.

Bu  $x$  değeri orijinal numune hacmi 500 mL kabul edilerek EK 1.2 eşitliğinde yerine konursa,

$$\text{mg boyar madde/L} = \frac{14,80}{500} 1000 = 29,6 \text{ mg/L olarak bulunur.}$$

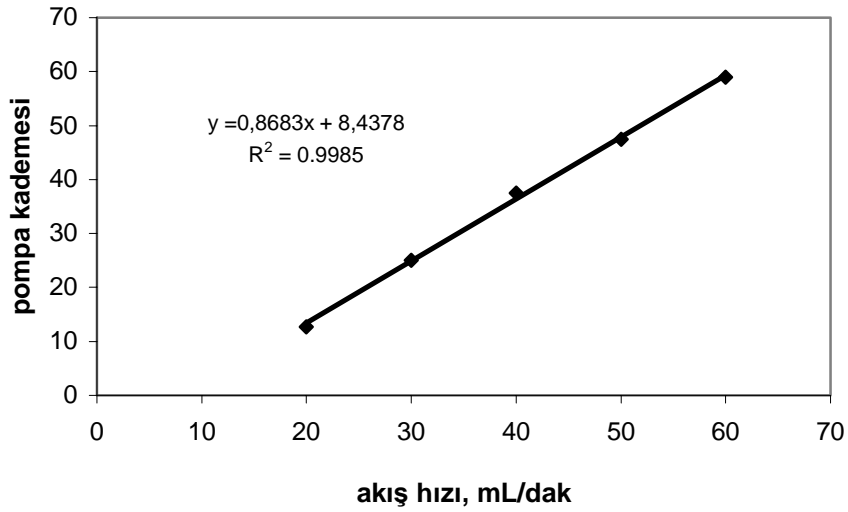
## PERİSTALTİK POMPA KALİBRASYONU

### EK 2.1. Peristaltik Pompa Kalibrasyonu

Değişik kademelere ayrılmış peristaltik pompadan belli zaman aralıklarında geçen çözelti hacimleri kaydedilmiş ve bu değerler grafiğe geçirilerek Standart çalışma doğrusu (Şekil EK 2.1) elde edilmiştir.

**Çizelge EK 2.1.** Peristaltik pompa kalibrasyonunda kullanılan veriler

Kademe	20	30	40	50	60
Akış hızı (mL/dak)	12,75	25	37,5	47,5	59



**Şekil EK 2.1.** Peristaltik pompa için standart çalışma doğrusu

## ÖRNEK HESAPLAMALAR

Örnek hesaplamalarda, Çizelge.6.14'de yer alan deneysel çalışma sonuçlarının verileri kullanılmıştır. 40 mg/L başlangıç boyar madde derişimine sahip 500 mL çözeltinin, 1 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda ve 36,3.10<sup>-3</sup> L/dak akış hızında reaktörden geçirilmesi durumunda 3. dakikadaki yüzde giderimi ve enerji tüketimi değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

### EK 3.1. Yüzde Giderimi

Yüzde gideri eşitlik (5.2) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Giderim} = \frac{C_0 - C}{C_0} 100$$

$$\% \text{ Giderim} = \frac{40 - 9,46}{40} 100 = \% 76,4$$

### EK 3.2. Enerji Tüketimi

Enerji tüketimi eşitlik (5.3 ve 5.4) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$(kWhm^{-3}) = \frac{I.V}{Q.1000} = \frac{0,176A.172V}{2,25.10^{-3} m^3 / h.1000} = 10,322 kWhm^{-3}$$

$$(kWhg^{-1}) = \frac{I.V}{(C_0 - C).Q.1000} = \frac{0,176A.172V}{(40 - 9,46).2,25.10^{-3} m^3 / h.1000} = 0,338 kWhg^{-1}$$

## İKİ KUTUPLU TIKAÇ AKIM REAKTÖRÜN ANOT YÜZEY ALANI HESABI

### EK 4.1. Anot Yüzey Alanı Hesabı

Anot, 0,8 cm yüksekliğindeki bir elektrotun yarısıdır. Elektrotun yüzey alanı, dış ve iç yanal yüzeylerin toplamına eşittir.

$$\text{Elektrotun dış yüzey alanı} = \frac{D_L}{2} D_d \pi \quad (\text{EK 4.1})$$

$$\text{Elektrotun iç yüzey alanı} = \frac{D_L}{2} D_e \pi \quad (\text{EK 4.2})$$

$$\text{Bir elektrotun yüzey alanı} = \frac{D_L}{2} D_d \pi + \frac{D_L}{2} D_e \pi = \frac{0,8}{2} 0,8\pi + \frac{0,8}{2} 0,55\pi = 1,696 \text{ cm}^2$$

$$\text{Toplam anot yüzey alanı} = 1,696 \text{ cm}^2 \times 26 \times 4 = 176,43 \text{ cm}^2 = 176,43 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$