

## Reaktif Orange 16 (RO16) boyarmaddesinin Ti/IrO<sub>2</sub> karışık metaloksit elektrot kullanılarak giderimine destek elektrolit türünün etkisi

Yusuf Yavuz<sup>1</sup>, Elif Deliktaş\*<sup>1</sup>, A. Savaş Koparal<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

<sup>2</sup>Anadolu Üniversitesi, Açıköğretim Fakültesi, Eskişehir, Türkiye

\*Corresponding author : [elifdeliktas@eskisehir.edu.tr](mailto:elifdeliktas@eskisehir.edu.tr)

Orcid No: <https://orcid.org/0000-0002-5289-1285>

Received : 26/06/2021

Accepted : 17/12.2021

**Özet:** Tekstil ürünlerine olan talebin her geçen gün artması ile tekstil endüstrileri ve buna paralel olarak tekstil endüstrisi atıksuları hızla artarak dünyadaki en önemli endüstriyel kaynaklı atıksulardan birini oluşturmaktadır. Tekstil endüstrisi atıksularında karşılaşılan en büyük problem atıksuların yüksek miktarlarda boyar madde içermesidir. Boyama sürecinde elyafa yapışmadan atık suya karışan boyalar arıtılmadan alıcı ortama verildiklerinde renk oluşturmada, estetik görünümü bozmakta ve suyun ışık geçirgenliğini azaltarak fotosentezi olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle bu atıksuların arıtılmaları daha da önemli hale gelmiştir.

Bu çalışmada Ti/IrO<sub>2</sub> karışık metaloksit elektrotlarla Reaktif Orange 16 (RO16) boyarmaddesinin elektrokimyasal oksidasyon yöntemi ile renk giderimine destek elektrolit tür ve derişiminin katkısı araştırılmıştır. Destek elektrolit olarak Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaNO<sub>3</sub> ve NaCl kullanılmıştır. Akım yoğunluğu, akış hızı, pH, başlangıç kirlilik derişimleri gibi parametreler belirlendikten sonra destek elektrolitlerin ortamdaki varlığı değerlendirilerek en uygun elektrolit türüne karar verilmiştir.

Başlangıç kirlilik derişiminin 30 mg/L olduğu model çalışma çözeltisinin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> elektroliti ile elektrokimyasal oksidasyonunda 50 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu, 155,84 mL/dk akış hızı, pH<sub>11</sub> ve 0,01 M elektrolit varlığında 90 dk'lık bir arıtım süresi sonunda %65 renk giderim verimi ve 1,7454 kwh/m<sup>3</sup> enerji tüketimi elde edilmiştir. Başlangıç kirlilik derişiminin 30 mg/L olduğu model çalışma çözeltisinin NaNO<sub>3</sub> elektroliti ile elektrokimyasal oksidasyonunda 50 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu, 155,84 mL/dk akış hızı, pH<sub>0</sub>(5,94) ve 0,01 M elektrolit varlığında 90 dk'lık bir arıtım süresi sonunda %51 renk giderim verimi ve 2,0534 kwh/m<sup>3</sup> enerji tüketimi elde edilmiştir. Başlangıç kirlilik derişiminin 30 mg/L olduğu model çalışma çözeltisinin NaCl elektroliti ile elektrokimyasal oksidasyonunda 50 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu, 155,84 mL/dk akış hızı, pH<sub>0</sub>(5,71) ve 0,05 M elektrolit varlığında 20 dk'lık bir arıtım süresi sonunda ~%100 renk giderim verimi ve 0,6557 kwh/m<sup>3</sup> enerji tüketimi elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrokimyasal oksidasyon, boyarmadde, destek elektrolit, Ti/IrO<sub>2</sub> elektrot

### *The effect of support electrolytes to the removal of Reactive Orange 16 (RO16) dyestuff by Ti/IrO<sub>2</sub> mixed metaloxide electrodes with electrochemical oxidation method*

**Abstract:** With the ever-increasing demand to textile products, the textile industries and the textile industry wastewater increases rapidly, making it one of the most important industrial source wastewater in the world. The biggest problem encountered in textile industry wastewater is that wastewater contains high amounts of dyestuff. The paints mixed with waste water without sticking to the fiber during the dyeing process create color when they are applied to the receiving environment without being purified, disrupt the aesthetic appearance and negatively affect the photosynthesis by reducing the light transmittance of the water. Therefore, the treatment of these wastewater has become even more important.

In this study, the effect of support electrolytes was investigated to the color removal of Reactive Orange 16 (RO16) dyestuffs by Ti/IrO<sub>2</sub> mixed metaloxide coated electrodes with electrochemical oxidation method. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaNO<sub>3</sub> and NaCl as support electrolytes were evaluated amount and contents. After determining the parameters such as current density, flow rate, pH and initial pollution concentrations, the most suitable electrolyte type was determined by evaluating the presence of the supporting electrolytes in the environment.

In the presence of 50 A/m<sup>2</sup> current density, 155.84 mL/min flow rate, pH<sub>11</sub> and 0.01 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> electrolyte in the electrochemical oxidation of the model working solution with the initial pollution concentration of 30 mg/L after a 90 minute treatment period, 65% color removal efficiency and 1,7454 kwh/m<sup>3</sup> energy consumption was obtained. In the presence of 50 A/m<sup>2</sup> current density, 155.84 mL/min flow rate, pH<sub>0</sub> and 0.01 M NaNO<sub>3</sub> electrolyte in the electrochemical oxidation of the model working solution with the initial pollution concentration of 30 mg/L after a 90 minute treatment period, 51% color removal efficiency and 2,0534 kwh/m<sup>3</sup> energy consumption was obtained. In the presence of 50 A/m<sup>2</sup> current density, 155.84 mL/min flow rate, pH<sub>0</sub> and 0.05 M NaCl electrolyte in the electrochemical oxidation of the model working solution with the initial pollution concentration of 30 mg/L after a 20 minute treatment period, ~100% color removal efficiency and 0,6557 kwh/m<sup>3</sup> energy consumption was obtained.

**Keywords:** Electrochemical oxidation, dyestuff, support electrolyte, Ti/IrO<sub>2</sub> electrode

## 1. Giriş

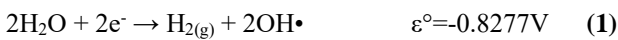
Tekstil ürünlerine olan talebin her geçen gün artması ile tekstil endüstrileri ve buna paralel olarak tekstil endüstrisi atıksuları hızla artarak dünyadaki en önemli endüstriyel kaynaklı atıksulardan birini oluşturmaktadır. Tekstil endüstrilerinde farklı teknolojiler paralelinde uygulanan her işlem açığa çıkan atıksuların standart bir arıtma yöntemi ile arıtılmasını olanaksız hale getirmektedir. Tekstil endüstrisi atıksuları süreç ve üretim sırasında kullanılan çok fazla çeşitliliğe sahip kimyasal madde ve boyar madde içermekte, buna bağlı olarak renkli ve yüksek hacimlerde atıksu açığa çıkarmaktadır. Tekstil endüstrisi atıksularında karşılaşılan en büyük problem atıksuların yüksek miktarlarda boyar madde içermesidir. Boyama sürecinde elyafa yapışmadan atık suya karışan boyalar arıtılmadan alıcı ortama verildiklerinde renk oluşturmada, estetik görünümü bozmakta ve suyun ışık geçirgenliğini azaltarak fotosentezi olumsuz yönde etkilemektedir. Aynı zamanda boyar maddelerin ve yan ürünlerinin doğada toksik etki, insanlar üzerinde mutajenik ve kanserojenik etki göstermesi arıtılmalarını zorunlu hale getirmektedir (Rajaguru ve ark. 2002, Weisburger 2002, Pandey ve ark. 2007).

Elektrokimyasal yükseltgenme yönteminin (EKO) enerji verimliliği, otomasyon imkânı ve artım neticesinde çamur oluşmaması son yıllarda özellikle tekstil endüstrisinde ilgi görmektedir. EKO süreçleri arıtım için herhangi bir ilave kimyasal madde ihtiyacı duymamaktadır ve bu nedenle de ikincil bir atık ürün oluşturmamaktadır. Böylece ikincil bir çevre kirliliğinin önüne geçilmesi ve etkin bir atıksu arıtımı da mümkün olmaktadır. Bu arıtma sisteminde elektrolit içerisinde bulunan mevcut oksijen kirlitici bileşiklere aktarılır. Tepkimeler doğrudan anodik yükseltgeme ve dolaylı redoks tepkimelerinden oluşur (Rajeshwar ve ark. 1995, Fernandes ve ark. 2004).

Deney sistemine elektrolit eklenmesinin amacı sistemin iletkenliğini artırarak sistemden daha fazla akımın geçmesini sağlamak ve kullanılan elektrolite bağlı olarak dolaylı yükseltgenmeyi desteklemektir. Elektrokimyasal parçalanmayı dolayısıyla da KOI giderimini etkilediği için elektrolit miktarı sistemi etkileyen parametrelerden biridir (Uğurlu 2004). Sisteme çeşitli elektrolitler (sülfat, hidrojen peroksit ve demir iyonu gibi) eklenebilir. İletken olmayan kimyasalların elektrokimyasal olarak parçalanması için ortama iletkenliği sağlayan tuzlar eklenmesi gerekmektedir (Özdemir 2005).

Genel olarak kullanılan NaCl elektrolitinin varlığında katot ve anotta gerçekleşen temel elektrolit reaksiyonları aşağıda gösterilmiştir.

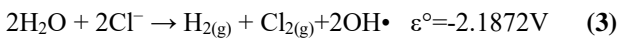
### Katot:



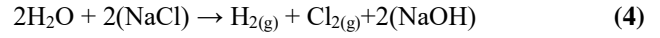
### Anot:



### Toplam:



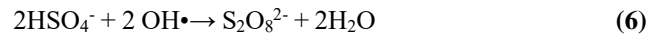
Eşitlik 1 ve 2'deki tepkimeler katot ve anotta gerçekleşen temel elektrolit tepkimeleridir. Katotta öncelikle su molekülleri indirgenir, su moleküllerinin elektron alma eğilimlerinin daha yüksek olması nedeniyle sodyum iyonu çözeltide herhangi bir değişime uğramaz ve Eşitlik 4'teki tepkime gerçekleşir;



Daha önce yapılan çalışmalarda sülfatın elektrooksidasyon tepkimelerinde bir etkisi olmadığı sadece sistemin elektriksel iletkenliğine fayda sağladığı konusunda bilgiler yer almasına rağmen yapılan son çalışmalar bu bilgiyi çürütmektedir. Sülfat varlığında oluşan peroksidisülfatların ( $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ) oksidant olarak etki gösterdikleri kanıtlanmıştır (Muruganathan ve ark. 2007, Li ve ark. 2010).

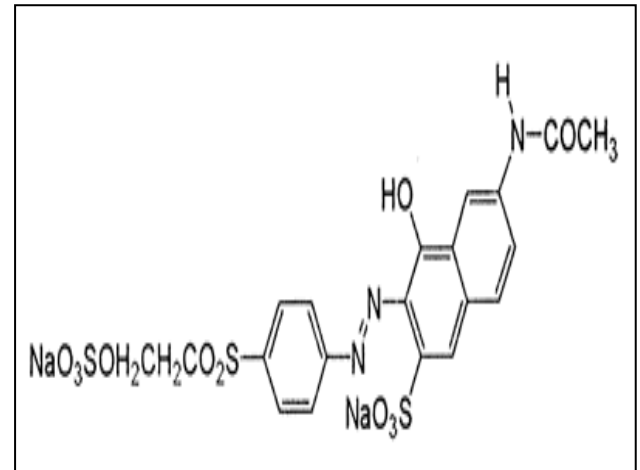


Ayrıca  $\text{OH}^\bullet$  radikalının peroksidisülfat oluşturmak için sülfat oksidasyonunda yer aldığı da kanıtlanmıştır (Muruganathan ve ark. 2007, Bechtold ve ark. 2006).



## 2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada Reaktif Orange 16 (RO16) boyar maddesi kullanılarak model çalışma çözeltisi hazırlanmıştır. Aşağıda kullanılan boyar maddenin özellikleri ve kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1. RO16 boyarmaddesinin kimyasal yapısı (http-1)

Tablo 1. Kullanılan boyarmaddenin özellikleri (http-1)

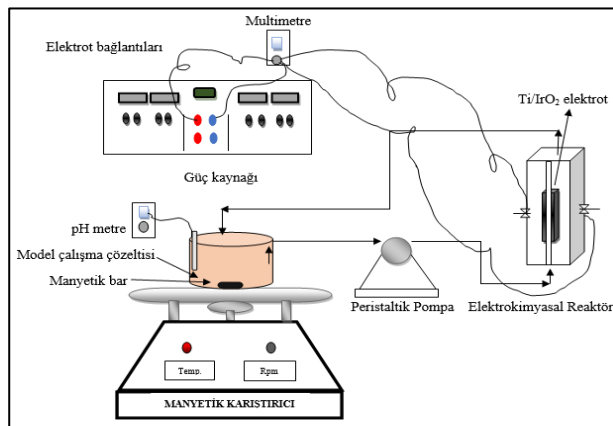
Moleküler Formül	$\text{C}_{20}\text{H}_{17}\text{N}_3\text{Na}_2\text{O}_{11}\text{S}_3$
Molekül ağırlığı (g/mol)	617,54
Kompozisyon	Boya içeriği, $\geq 70\%$
Absorpsiyon	(1.) $\lambda_{\text{max}}$ 388 nm (2.) $\lambda_{\text{max}}$ 494 nm

Çalışmamızda elektrokimyasal arıtım işlemi, Ti/IrO<sub>2</sub> karışık metal oksit kaplı titanyum elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilmiş, sistemin verimliliği ve sürdürülebilirliği araştırılmıştır. Anot materyalleri, akım yoğunluğu, akış hızları, pH gibi parametrelerin optimizasyonu yapılarak renk giderimine destek elektrolitlerin katkısı değerlendirilmiştir. Renk parametresi için UV Spektrofotometre cihazı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. İncelenen parametreler Tablo 2’de gösterilmektedir.

**Tablo 2.** Model çalışma çözeltisinin optimizasyonunda kullanılan parametreler

Parametre	Değer
<b>Başlangıç Kirlilik Derişimi</b>	20 – 30– 125 mg/L
<b>Elektrot</b>	Ti /IrO <sub>2</sub>
<b>Akış hızları (mL/dk)</b>	155,84/ 175,7/ 234,2/ 324,3
<b>Akım Yoğunluğu (A/m<sup>2</sup>)</b>	1,6/5/8/10/15/20/25/30/40/50/75/100/150
<b>pH</b>	pH <sub>0</sub> /pH <sub>3</sub> /pH <sub>11</sub>
<b>Elektrolitler</b>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NaNO <sub>3</sub> , NaCl
<b>Arıtım Süresi</b>	1-90 dk
<b>Analiz Parametreleri</b>	Renk, Enerji Tüketimi

- 1000 mg/L’lik stok çözelti hazırlanarak, 500 mL hacimdeki standart çalışma çözeltisi ile deneyler yürütülmüştür.
- Elektrot boyutları 12,5cmx5cmx0,2 cm’dir. Elektrotlar arası mesafe 4 mm’dir.
- Çalışma çözeltisinin iletkenliği ~25µs/cm ve pH’ı 6-7 aralığında değişiklik göstermektedir.
- UV aralıklarında özel spektroskopik çalışmalar için UV/vis. spektrofotometrik cihazlar kullanılarak analizler yapılmış 10 mm ışın yollu kuvars küvetler kullanılmıştır. Renk giderimlerine bakılmıştır.
- İletkenlik ve pH iletken ölçer ve pH metre cihazı kullanılarak ölçülmüştür.
- Model çalışma çözeltilerini hazırlamak için deiyonize su, ters ozmos ve iyon değişimini birleştiren ultra saf su hazırlama ünitesi kullanılmıştır.



**Şekil 2.** Deneyler için kullanılan reaktör düzeni

### 3. Bulgular ve Tartışma

Başlangıç kirlilik derişimi 30 mg/L olan çalışma çözeltisi ile optimizasyon çalışmaları yürütülmüş ve elde edilen optimum koşullar 20 ve 125 mg/L’lik kirlilik derişimlerine uygulanarak arıtım verimleri elde edilmiştir. Akım yoğunluğu değerleri 1,6/2,5/5/8/10/15/20/25/30/40/50/75/100/150 A/m<sup>2</sup>, akış hızları 155,84, 175,7, 234,2 ve 324,3 mL/dk, model çalışma çözeltisinin doğal pH’nın yanı sıra (6-7) pH<sub>3</sub> ve pH<sub>11</sub>, destek elektrolit olarak Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaNO<sub>3</sub> ve NaCl’nin miktar ve etkisi araştırılmıştır. Elektrolit miktarı olarak 0.01/0,02/0,03/0,04/0,05/0.1 M derişimleri tercih edilmiştir.

#### 3.1. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> elektroliti ile elde edilen veriler

Tablo 3’te Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> elektroliti kullanılarak optimum koşullarda elde edilen sonuçlar verilmiştir.

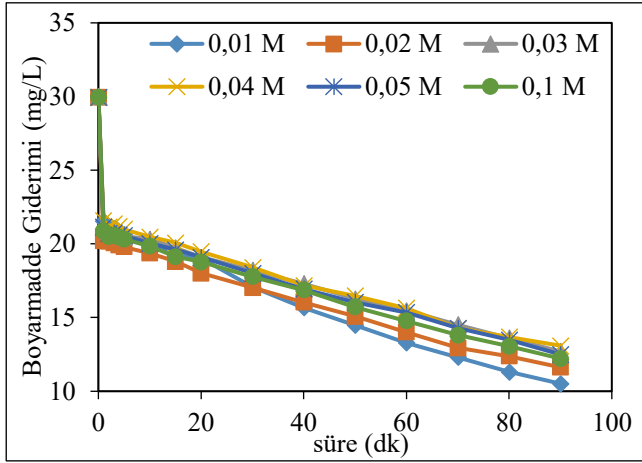
**Tablo 3.** Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> elektroliti ile optimum koşullarda elde edilen deney sonuçları

Zaman (dk)	Voltaaj (V)	Renk Giderimi (mg/L)	Renk Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> )	Kümülatif Enerji Tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> )
0	0	0	0	0	0
1	3,4	21,55	28	0,1164	0,1164
2	3,4	21,19	29	0,1164	0,2327
3	3,4	21,03	30	0,1164	0,3491
4	3,4	20,83	30	0,1164	0,4654
5	3,4	20,64	31	0,1164	0,5818
10	3,4	20	33	0,1164	0,6982
15	3,4	19,24	36	0,1164	0,8145
20	3,4	19,05	36	0,1164	0,9309
30	3,4	17,06	43	0,1164	1,0472
40	3,4	15,67	48	0,1164	1,1636
50	3,4	14,48	52	0,1164	1,2799
60	3,4	13,29	56	0,1164	1,3963
70	3,4	12,30	59	0,1164	1,5127
80	3,4	11,31	62	0,1164	1,6290
90	3,4	10,52	65	0,1164	1,7454

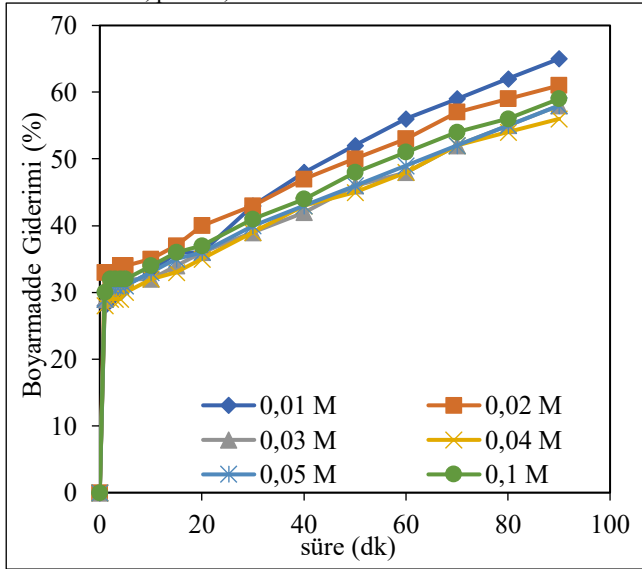
Co: 30 mg/L, I=50A/m<sup>2</sup>, Q=155,84 mL/dk, D.E.=0,01 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH<sub>11</sub>:11/pHson:11, E<sub>0</sub>:2194µs/cm, E<sub>son</sub>:1900µs/cm

Elektrolit miktarının araştırıldığı optimizasyon çalışmalarında 0.01/0,02/0,03/0,04/0,05/0,1 M’lik Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> miktarları deneyerek deneysel çalışmalar sürdürülmüştür.

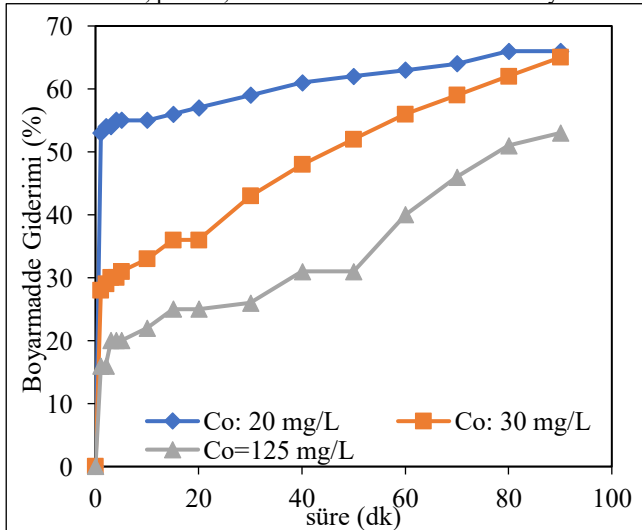
Başlangıç kirlilik derişimi 30 mg/L, 155,84 mL/dk akış hızı, 0,01 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH<sub>11</sub>’de yapılan akım yoğunluğu optimizasyonunda 90 dk’lık bir süre sonunda 50 A/m<sup>2</sup>’de %65 boyarmadde giderimi ile en iyi sonucu vermiştir. Bundan sonraki deneyler bu veriler baz alınarak devam ettirilmiştir. Son olarak elde edilen bütün optimum koşullar 20 ve 125 mg/L’lik başlangıç kirlilik derişimlerine uygulanmıştır.



Şekil 3. Ti/IrO<sub>2</sub> elektrotlarla, C<sub>0</sub>= 30 mg/L, Q=155,84 mL/dk, D.E.= Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH=11, I=50 A/m<sup>2</sup>'de elde edilen arıtım verimleri



Şekil 4. Ti/IrO<sub>2</sub> elektrotlarla, C<sub>0</sub>= 30 mg/L, Q=155,84 mL/dk, D.E.= Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH=11, I=50 A/m<sup>2</sup>'de elde edilen arıtım yüzdeleri



Şekil 5 Ti/IrO<sub>2</sub> elektrotlarla, Q=155,84 mL/dk, D.E.=0,01 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH=11, I=50 A/m<sup>2</sup>'de elde edilen arıtım yüzdeleri

Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> elektroliti ile yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen veriler tartışıldığında, pH<sub>11</sub> değerinde elde edilen arıtım verimleri pH<sub>0</sub> ve pH<sub>3</sub> değerlerinin üzerine çıkmıştır. Alkaline koşullarda enerji uyarımı ve elektron transferi ile sistem içerisindeki peroksidisülfat oluşumu aktive edilebilir (Lominchar ve ark. 2018). Sistem içerisinde alkaline pH etkisi ile peroksidisülfat oluşumlarının arttığı ve bu nedenle arıtım yüzdelерinin arttığı söylenebilir. Başlangıç kirlilik derişiminin 125 mg/L olduğu durumda yaklaşık %50 renk giderim verimleri elde edilmesi yüksek derişimlerde dahi sistemin arıtım kapasitesinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

### 3.2. NaNO<sub>3</sub> elektroliti ile elde edilen veriler

Tablo 4'te NaNO<sub>3</sub> elektroliti kullanılarak optimum koşullarda elde edilen sonuçlar verilmiştir.

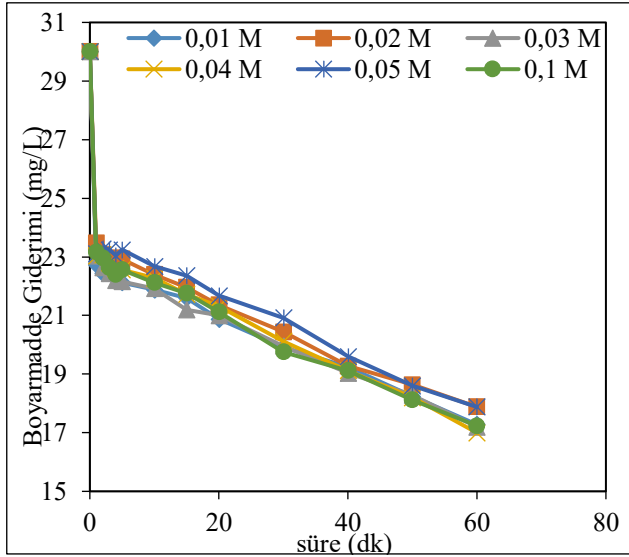
Tablo 4. NaNO<sub>3</sub> elektroliti ile optimum koşullarda elde edilen deney sonuçları

Zaman (dk)	Voltaj (V)	Renk Giderimi (mg/L)	Renk Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> )	Kümülatif Enerji Tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> )
0	0	0	0	0	0
1	4	22,72	24	0,1369	0,1369
2	4	22,44	25	0,1369	0,2738
3	4	22,6	25	0,1369	0,4107
4	4	22,28	26	0,1369	0,5476
5	4	22,12	26	0,1369	0,6845
10	4	21,88	27	0,1369	0,8214
15	4	21,6	28	0,1369	0,9582
20	4	20,88	30	0,1369	1,0951
30	4	19,92	34	0,1369	1,2320
40	4	19,24	36	0,1369	1,3689
50	4	18,24	39	0,1369	1,5058
60	4	17,28	42	0,1369	1,6427
70	4	16,76	44	0,1369	1,7796
80	4	15,88	47	0,1369	1,9165
90	4	14,80	51	0,1369	2,0534

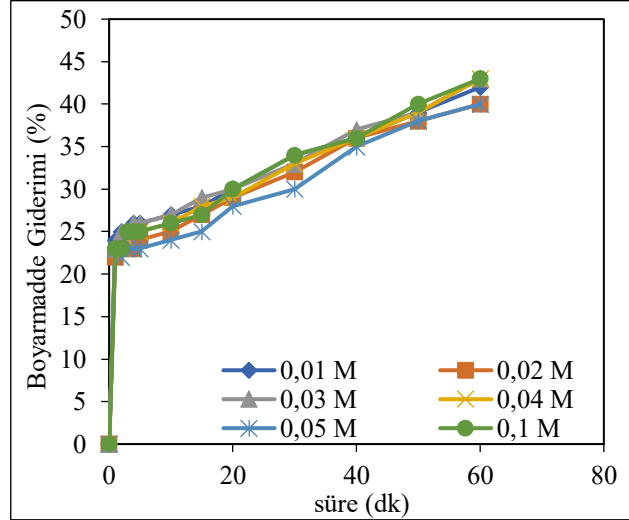
C<sub>0</sub>:30 mg/L D.E.=0,01 M NaNO<sub>3</sub>, I=50 A/m<sup>2</sup>, Q=155,84 mL/dk, pH<sub>0</sub>:5,94/pH<sub>son</sub>:5,70 Eİo:1241µs/cm Eİson:1016µs/cm

Elektrolit miktarının araştırıldığı optimizasyon çalışmalarında 0.01/0,02/0,03/0,04/0,05/0,1 M'lık NaNO<sub>3</sub> miktarları denenerek deneysel çalışmalar sürdürülmüştür.

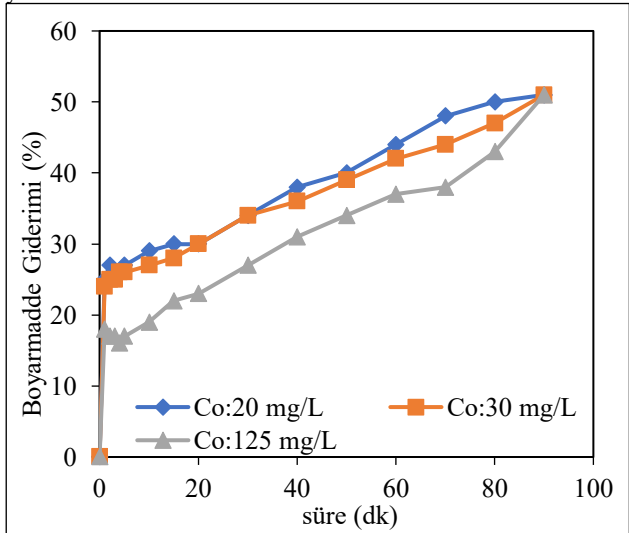
Bütün kirlilik derişimlerinde yaklaşık %51 renk giderim verimi elde edilmiştir. NaNO<sub>3</sub> elektroliti için pH ve akış hızı değerleri arıtım verimlerini etkilememiştir. Sistemin doğal pH'ı en yüksek arıtım verimlerini elde etmemizi sağlamıştır.



Şekil 6. Ti/IrO<sub>2</sub> elektrotlarla, C<sub>0</sub>=30 mg/L, Q=155,84 mL/dk, D.E.=NaNO<sub>3</sub>, pH<sub>0</sub> (5,94-6,41), I=50 A/m<sup>2</sup>'de elde edilen arıtım verimleri



Şekil 7. Ti/IrO<sub>2</sub> elektrotlarla, C<sub>0</sub>=30 mg/L, Q=155,84 mL/dk, D.E.=NaNO<sub>3</sub>, pH<sub>0</sub> (5,94-6,41), I=50 A/m<sup>2</sup>'de elde edilen arıtım yüzdeleri



Şekil 8. Ti/IrO<sub>2</sub> elektrotlarla, Q=155,84 mL/dk, D.E.=0,01 M NaNO<sub>3</sub>, pH<sub>0</sub>'da, I=50 A/m<sup>2</sup>'de elde edilen arıtım yüzdeleri

### 3.3. NaCl elektroliti ile elde edilen veriler

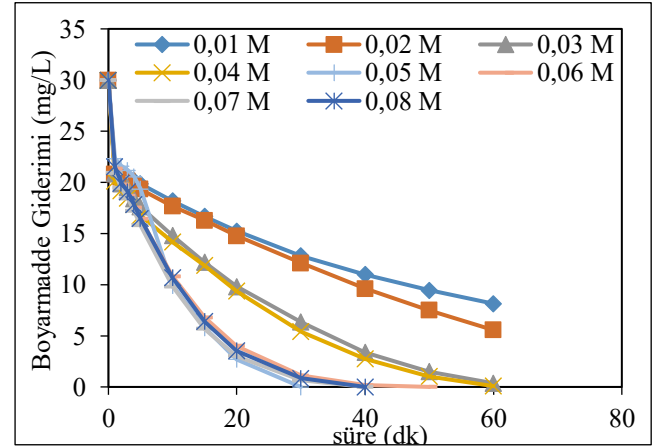
Tablo 5'te NaCl elektroliti kullanılarak optimum koşullarda elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 5. NaCl elektroliti ile optimum koşullarda elde edilen deney sonuçları

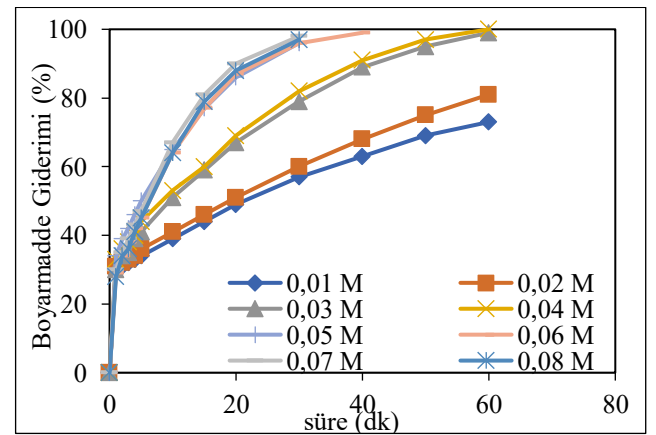
Zaman (dk)	Voltaj (V)	Renk Giderimi (mg/L)	Renk Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> )	Kümülatif Enerji Tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> )
0	0	0	0	0	0
1	2,7	20,67	31	0,0820	0,0820
2	2,7	19,40	35	0,0820	0,1639
3	2,7	17,38	42	0,0820	0,2459
4	2,7	14,88	50	0,0820	0,3278
5	2,7	11,31	62	0,0820	0,4098
10	2,7	4,56	85	0,0820	0,4917
15	2,7	1,39	95	0,0820	0,5737
20	2,7	~0	~100	0,0820	0,6557

C<sub>0</sub>:30 mg/L, D.E.=0,05 M NaCl, Q=175,7 mL/dk, I=50 A/m<sup>2</sup>, pH<sub>0</sub>:5,71/pHson:6,99, Elo:5,10ms/cm, Elson:4,22ms/cm

Elektrolit miktarının araştırıldığı optimizasyon çalışmalarında 0,01/0,02/0,03/0,04/0,05/0,06/0,07/0,08 M'lık NaCl miktarları deneyerek deneysel çalışmalar sürdürülmüştür.

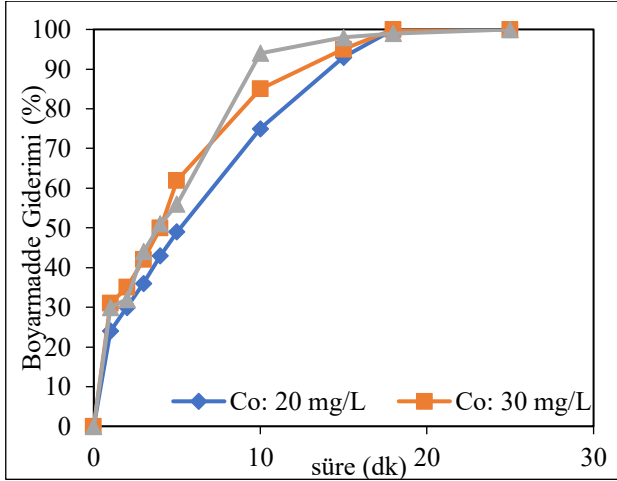


Şekil 9. Ti/IrO<sub>2</sub> elektrotlarla, C<sub>0</sub>=30 mg/L, Q=155,84 mL/dk, pH<sub>0</sub> (6,15-6,29), I=50 A/m<sup>2</sup>'de elde edilen arıtım verimleri



Şekil 10. Ti/IrO<sub>2</sub> elektrotlarla, C<sub>0</sub>=30 mg/L, Q=155,84 mL/dk, pH<sub>0</sub> (6,15-6,29), I=50 A/m<sup>2</sup>'de elde edilen arıtım yüzdeleri

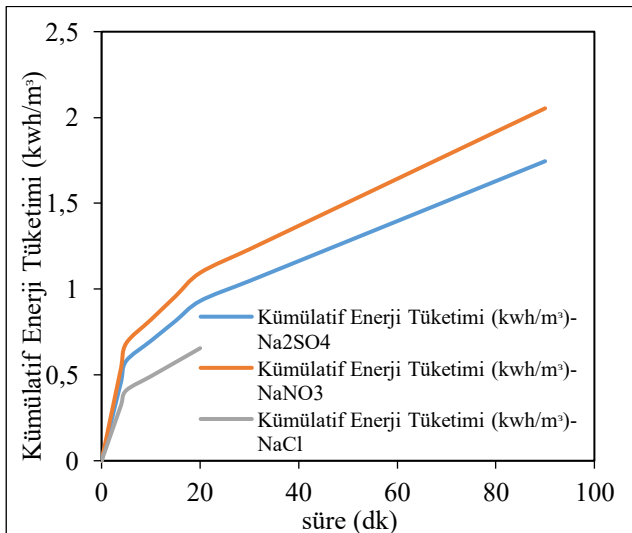
Başlangıç kirlilik derişimi 30 mg/L, 155,84 mL/dk akış hızı, 0,05 M NaCl, pH<sub>0</sub>'da yapılan akım yoğunluğu optimizasyonunda 20 dk'lık bir süre sonunda 50 A/m<sup>2</sup>'de ~%100 boyarmadde giderimi ile en iyi sonucu vermiştir. Bundan sonraki deneyler bu veri baz alınarak devam ettirilmiştir. Son olarak elde edilen bütün optimum koşullar 20 ve 125 mg/L'lik başlangıç kirlilik derişimlerine uygulanmıştır.



Şekil 11. Ti/IrO<sub>2</sub> elektrotlarla, Q=155,84 mL/dk, D.E.=0,05 M NaCl, pH<sub>0</sub> (5,71-6,15), I=50 A/m<sup>2</sup> de elde edilen arıtım yüzdeleri

NaCl içeren çözeltilerde, anot yüzeyi üzerinde klor, hipoklorik asit veya hipoklorit iyonu gibi aktif kloro-türler üretilebilir ve sonuç olarak organik maddeler oksitlenebilir (De Paiva Barreto ve ark. 2014, Rajkumar ve ark. 2005, Ramalho ve ark. 2010). NaCl elektrolitinde klorürün arıtım verimlerini arttırmasının yanısıra oluşturduğu aktif klor bileşikleri ile de oksidasyona katkı sağlamakta ve arıtım yüzdelerini arttırmaktadır. Yüksek molar konsantrasyonları daha yüksek arıtım verimleri elde etmemizi sağladığı için kısa sürelerde rengin tamamı giderilmiştir.

### 3.4. Enerji Tüketimi



Şekil 12. Ti/IrO<sub>2</sub> elektrotlarla, C<sub>0</sub>=30 mg/L, Q=155,84 mL/dk, D.E.=(0,01M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-pH<sub>11</sub>)-(0,01M NaNO<sub>3</sub> pH<sub>0</sub>)-(0,05M NaCl, pH<sub>0</sub>), I=50 A/m<sup>2</sup> de elde edilen enerji tüketim değerleri

Ülkemiz için tek terimli tek zamanlı ticarethane (Orta Gerilim) için kwh başına elektrik birim fiyatı 0,896979 TL/kwh+KDV(±10krş.)'dir (http-2). Buna göre Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> elektrolitinin kullanıldığı optimum koşullarda 30 mg/L başlangıç kirlilik derişimi için 90 dk'lık arıtım süresi sonunda 1,57 TL/m<sup>3</sup>, NaNO<sub>3</sub> elektrolitinin kullanıldığı optimum koşullarda 30 mg/L başlangıç kirlilik derişimi için 90 dk'lık arıtım süresi sonunda 1,84 TL/m<sup>3</sup>, NaCl elektrolitinin kullanıldığı optimum koşullarda 30 mg/L başlangıç kirlilik derişimi için 20 dk'lık arıtım süresi sonunda 0,59 TL/m<sup>3</sup> ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> elektrolitinin kullanıldığı optimum koşullarda 125 mg/L başlangıç kirlilik derişimi için 90 dk'lık arıtım süresi sonunda 1,61 TL/m<sup>3</sup>, NaNO<sub>3</sub> elektrolitinin kullanıldığı optimum koşullarda 125 mg/L başlangıç kirlilik derişimi için 90 dk'lık arıtım süresi sonunda 1,89 TL/m<sup>3</sup>, NaCl elektrolitinin kullanıldığı optimum koşullarda 125 mg/L başlangıç kirlilik derişimi için 40 dk'lık arıtım süresi sonunda 0,76 TL/m<sup>3</sup> enerji tüketim maliyetleri oluşmuştur. Enerji tüketim değerleri değerlendirildiğinde NaCl elektroliti en düşük enerji miktarını oluşturmuştur.

### 4. Sonuç

Destek elektrolitlerin arıtım verimlerine olan katkılarının miktar ve içerik olarak değerlendirildiği optimizasyon çalışmalarında NaCl elektrolitinin arıtım verimlerine olan katkısı Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve NaNO<sub>3</sub> elektrolitlerinin etkisinden çok daha fazladır sonucuna varılmıştır. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> elektroliti' de NaNO<sub>3</sub> elektrolitine göre çok daha iyi sonuç vermiştir. NaCl elektroliti için klorlu aktif bileşiklerin oluşarak oksidasyona katkı sağlamaları arıtım verimlerinin artmasını açıklamaktadır. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> elektroliti için yapılan araştırmalarda sülfatın peroksidisülfat oluşturma kapasitesi göz önüne alındığında oksidasyona katkı sağlaması arıtım verimlerinin artmasına yol açmıştır denilebilir. Enerji tüketim verileri de gözönüne alındığında NaCl elektroliti yüksek arıtım verimleri ve düşük enerji tüketim değerleri ile oldukça başarılı sonuç vermiştir.

### Teşekkür

Bu çalışma ESTÜ BAP Komisyonu 1708F474 no'lu proje ile desteklenmiştir.

### Kaynaklar

- Bechtold T, Turcanu A, Schrott W. 2006. Electrochemical decolourisation of dispersed indigo on boron-doped diamond anodes. *Diam Relat Mater.* 15:1513-1519.
- De Paiva Barreto JP, Viera dos Santos E, Medeiros Oliveira M, Ribeiro da Silva D, Fernandes de Souza J, Martinez-Huitle CA. 2014. Electrochemical mediated oxidation of phenol using Ti/IrO<sub>2</sub> and Ti/Pt-SnO<sub>2</sub>-Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> electrodes. *J Electrochem Sci Eng.* 4:259-270.
- Fernandes A, Magrinho M, Lopes A, Goncalves I. 2004. Electrochemical degradation of C.I. acid orange 7. *Dyes and pigments.* 61:287-296.



- Li H, Zhu X, Ni J. 2010. Inactivation of *Escherichia coli* in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> electrolyte using boron-doped diamond anode. *Electrochim Acta*. 56:448-453.
- Lominchar MA, Santos A, De Miguel E. 2018. Remediation of aged diesel contaminated soil by alkaline activated persulfate. *Sci Total Environ*. 622-6234:1-48.
- Muruganathan M, Yoshihara S, Rakuma T, Uehara N, Shirakashi T. 2007. Electrochemical degradation of 17 $\beta$ -estradiol (E2) at boron-doped diamond (Si/BDD) thin film electrode. *Electrochim Acta*. 52:3242-3249.
- Özdemir K. 2005. Meyve suyu fabrikası atıksularının elektrokimyasal olarak arıtılması. Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Pandey A, Singh P, Iyengar L. 2007. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes. *Int. Biodeter. Bio Degr*. 59:73-84.
- Ramalho AMZ, Martinez-Huitle CA, Silva DR. 2010. Application of electrochemical technology for removing petroleum hydrocarbons from produced water using a DSA-type anode at different flow rates. *Fuel*. 89:531-534.
- Rajaguru P, Vidya L, Baskarathupathi B, Kumar PA, Palanivel M, Kalaiselvi K. 2002. Genotoxicity evaluation of polluted groundwater in human peripheral blood lymphocytes using the comet assay. *Mutation Research*. 517:29-37.
- Rajeshwar K, Zhou M, Myung N, Chen X. 1995. Electrochemical deposition and stripping of copper, nickel and copper nickel alloy thin films at a polycrystalline gold surface: a combined voltammetry coulometry electrochemical quartz crystal micro gravimetry study. *Journ of Electroanal Chem*. 398(1-2):5-12.
- Rajkumar D, Kim JG, Palanivelu K. 2005. Indirect electrochemical oxidation of phenol in the presence of chloride for wastewater treatment. *Chem Eng Technol*. 28:98-105.
- Uğurlu M. 2004. The Removal of some inorganic compounds from paper mill effluents by the electrocoagulation method. *G.U. Journ of Scien*. 17(3):85-99.
- Weisburger JH. 2002. Comments on the history and importance of aromatic and heterocyclic amines in public health. *Mutation Res*. 506-507:9-20.
- [http1:www.sigmaaldrich.com/meetings/past/200/abstracts/symposia/fl/0841.pdf](http://www.sigmaaldrich.com/meetings/past/200/abstracts/symposia/fl/0841.pdf) . Erişim tarihi 2 Aral. 2019.
- [http2: https://www.epdk.org.tr/](http2:https://www.epdk.org.tr/). Erişim tarihi 30 Nis. 2020.