

## Eurasian Journal of Biological and Chemical Sciences

Journal homepage: [www.dergipark.org.tr/ejbcsc](http://www.dergipark.org.tr/ejbcsc)



### Ti/RuO<sub>2</sub> karışık metaloksit elektrot kullanılarak elektrokimyasal oksidasyon ile boyarmadde giderimine NaCl destek elektrolitinin etkisi ve toksik etkilerin değerlendirilmesi

Elif Deliktaş\*<sup>1</sup>, Yusuf Yavuz

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

\*Corresponding author : elifdeliktas@eskisehir.edu.tr  
Orcid No: <https://orcid.org/0000-0002-5289-1285>

Received : 04/05/2020  
Accepted : 01/04/2021

**Özet:** Endüstriyel kirlenmede önemli bir paya sahip olan tekstil endüstrisi yalnız gelişmiş ülkelerde değil gelişmekte olan ülkelerde de ekonomik açıdan önemli rol almaktadır. Sanayi su ihtiyacının önemli bir kısmı tekstil endüstrisinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte tekstil atıksuları geleneksel arıtma yöntemleri ile giderimi güç zehirli kimyasal bileşikler içermektedir. Ayrıca renkli boyahane atıksuları alıcı ortamda organik kirliliğin yanı sıra güneş ışığı geçirimini engellemesi sebebi ile canlı yaşamını da engellemektedir. Tekstil atıksularının arıtılarak proses suyu olarak kullanılması gerek akademik gerekse de sektör bazında büyük ilgi çekmektedir.

Bu çalışmada Ti/RuO<sub>2</sub> karışık metaloksit elektrot ile Reaktif Orange 16 (RO16) boyarmadde sinin elektrokimyasal oksidasyon yöntemi ile renk giderimine NaCl destek elektrolitinin katkısı araştırılmış ve analiz sonuçlarında toksik etkiler değerlendirilmiştir. NaCl destek elektroliti ile yapılan optimizasyon çalışmalarında akım yoğunluğu, akış hızı, pH, başlangıç kirlilik derişimleri gibi parametreler çalışılmıştır. Elde edilen optimum koşullar farklı kirlilik derişimlerine uygulanmış, renk ve toksisite değerlendirilerek çalışma sonlandırılmıştır.

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> (6,12) ve 0,06 M elektrolit varlığında 25 dk'lık bir arıtım süresi sonunda ~%100 renk giderimi ve 0,8008 kwh/m<sup>3</sup> enerji tüketimi elde edilmiştir. Başlangıç kirlilik derişiminin 125 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> (6,03) ve 0,06 M elektrolit varlığında 40 dk'lık bir arıtım süresi sonunda ~%100 renk giderimi ve 0,9240 kwh/m<sup>3</sup> enerji tüketimi elde edilmiştir. Elde edilen optimum koşullarda başlangıç kirlilik derişiminin 125 mg/L olduğu deneysel çalışmada %80 toksisite giderimi elde edilmiştir.

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

### *Effect of NaCl support electrolyte on dyestuff removal with electrochemical oxidation method using Ti/RuO<sub>2</sub> mixed metaloxide electrode and investigation of toxic effects*

**Abstract:** Textile industry, which has an important share in industrial pollution, plays an important role economically not only in developed countries but also in developing countries. A significant part of the industry water need arises from the textile industry. However, textile wastewater contains toxic chemical compounds that are difficult to remove by traditional treatment methods. In addition, colored dyehouse wastewater prevents organic living as well as organic pollution in the receiving environment, as it prevents the transmission of sunlight. The treatment of textile wastewater and its use as process water attracts great interest both academically and industry.

In this study, the contribution of NaCl support electrolyte to the color removal with the electrochemical oxidation method of Reactive Orange 16 (RO16) dyestuff by Ti/RuO<sub>2</sub> mixed metaloxide coated electrode was investigated and toxic effects were evaluated in the analysis results. In optimization studies with NaCl support electrolyte, parameters such as current density, flow rate, pH and initial pollution concentrations were studied. The study was terminated by applying the optimum conditions obtained to different pollution concentrations, evaluating the color and toxicity.

In the presence of 50 A/m<sup>2</sup> current density, 155.84 mL/min flow rate, pH<sub>0</sub> and 0.06 M NaCl electrolyte in the electrochemical oxidation of the model working solution with the initial pollution concentration of 30 mg/L after a 25 minute treatment period, ~100% color and 0,8008 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 0.06 M NaCl electrolyte in the electrochemical oxidation of the model working solution with the initial pollution concentration of 125 mg/L after a 40 minute treatment period, ~100% color and 0,9240 kwh/m<sup>3</sup> energy consumption was obtained. In the experimental study where the initial pollution concentration was 125 mg/L in the optimum conditions obtained, 80% toxicity removal was obtained.

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

## 1. Giriş

Artan nüfus ve gelişen teknoloji ile her geçen gün yeni endüstri dalları ortaya çıkmış ve mevcut endüstri dalları da kapasitelerini arttırmıştır. Bu durum mevcut doğal kaynakların en başta da suyun kullanımında artışa neden olmuştur. Endüstriyel kirlenmede önemli paya sahip olan kaynaklarından birisi de tekstildir. Tekstil endüstrisi yalnız gelişmiş ülkelerde değil gelişmekte olan ülkelerde de ekonomik açıdan önemli rol almaktadır.

Sanayi su ihtiyacının önemli bir kısmı tekstil endüstrisinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte tekstil atıksuları geleneksel arıtma yöntemleri ile giderimi güç zehirli kimyasal bileşikler içermektedir. Ayrıca renkli boyahane atıksuları alıcı ortamda organik kirliliğin yansırı güneş ışığı geçirimini engellemesi sebebi ile canlı yaşamını da engellemektedir. Tekstil atıksuların arıtılarak proses suyu olarak kullanılması gerek akademik gerekse de sektör bazında büyük ilgi çekmektedir.

Adsorpsiyon, kimyasal ve biyolojik arıtma gibi geleneksel yöntemlerin avantajları yanında arıtım ve enerji verimliliklerinin yetersiz olması ve su geri kazanımında tek başlarına kullanılamamaları bilim dünyasını yeni arıtma teknolojilerinin araştırılmasına yöneltmektedir. Geleneksel arıtma tekniklerinin başında gelen biyolojik arıtma ve adsorpsiyon süreçlerinin neticesinde oluşan arıtma çamurlarının tehlikeli atık sınıfında yer alması ve bertarafı için ilave işlemler gerektirmesi diğer bir önemli dezavantajdır (Kaygusuz 2013).

Biyolojik arıtma sistemleri avantajlı gibi gözükse de bununla birlikte prosesi etkileyecek olan tekstil atıksuyu içerisindeki zor ayrışabilir ya da toksik bileşikler prosesi kısmen ya da tamamen bozabilmektedir. Bununla birlikte artan çevre bilinci ve sıkılaştırılan yasal düzenlemeler tekstil atıksularının arıtımı için ileri oksidasyon süreçlerinin (İOS) kullanılmasını ön plana çıkarmaktadır. İOS kirlenici bileşiklerin karbondioksit ve su gibi zararsız inorganik bileşiklere kadar parçalanmasını sağlamaktadır. Ayrıca süreç toksik ve biyolojik olarak ayrışamayan bileşikler ayrışabilir ve daha zararsız kirlenici formlarına dönüştürmektedir. İOS fotokimyasal oksidasyon (UV-O<sub>3</sub>, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>/UV, photo-Fenton) ve elektrokimyasal oksidasyon (EKO) gibi arıtım tekniklerinden oluşmaktadır. Bu süreçlerin tamamında yüksek oksitleme kapasitesine sahip hidroksil (OH•), klor, süperoksit gibi radikaller üretilir. Reaksiyon sürecinde oluşan bu oksidantlar kirlenici bileşikler bertaraf ederler (Tran ve ark. 2009, Canizares ve ark. 2009).

Elektrokimyasal oksidasyon yönteminin (EKO) enerji verimliliği, otomasyon imkânı ve arıtım 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 arıtım sisteminde elektrolit içerisinde bulunan mevcut oksijen kirlenici bileşiklere aktarılır. Tepkimeler doğrudan anodik yükseltme ve

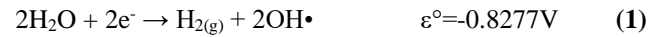
dolaylı redoks tepkimelerinden oluşur (Rajeshwar ve ark. 1995, Fernandes ve ark. 2004).

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 KOİ 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).

Elektrolit olarak NaCl kullanılması sonucunda; sodyum klorür suda çözüldüğünde, iyonlara ayrılır. Metal elektrotlar kullanılarak, yalın bir pilde (anot, katot ve elektrolit düzeni) tuzlu su elektroliz edilirse, klor (Cl<sup>-</sup>) iyonları anotta toplanır ve elektronlarını yitirerek, klor gazına dönüşürler. Klor gazı, çözücülerin, ağartıcıların ve bazı plastiklerin yapımında kullanılan değerli bir hammaddedir. Buna karşılık katottaki elektrik akımları, Na<sup>+</sup> (Sodyum) iyonlarının yüklerini boşaltamaz; çünkü su moleküllerinin elektron çekme gücü, sodyum iyonununkinden büyüktür. Su molekülü (H<sub>2</sub>O) bir elektron alıp bölünerek, hidrojen (H) atomları oluşturur. Bunlar da çözeltide hidroksil (OH•) anyonlarını yalnız bırakarak H<sub>2</sub> gazını oluştururlar. Giderek çözeltide, sodyum hidroksit ya da kostik soda (NaOH) yoğunluğu yükselir (Kaygusuz 2013).

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

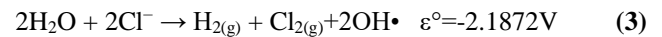
### Katot:



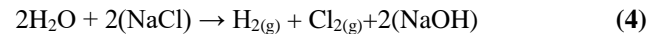
### Anot:



### 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;



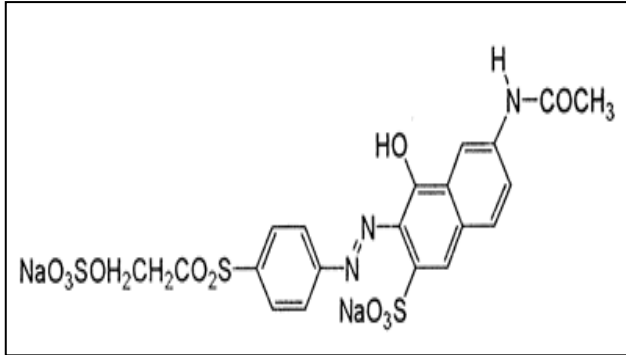
Elektrokimyasal yükseltme sistemine klor iyonu ilavesi yapıldığında ise genellikle daha yüksek klor/hipoklorit üretimi sayesinde sistemin verimi artsa da çıkışta klorlu organik madde oluşumu tehlikelere neden olabilmektedir (Deng ve Englehardt 2006). Naumczyk ve ark. (1996), yüksek derişimde Cl<sup>-</sup> içeren tekstil atıksuyunun elektro yükseltgenmesi esnasında yüksek derişimlerde klorlu organiklerin varlığını tespit etmişlerdir. Chiang ve ark. (1995), da koka bitkisi atıksuyunun elektrolizi sırasında büyük miktarda klorlu yan ürünün oluştuğunu bildirmiştir.

Parametre	Değer
<b>Başlangıç Kirlilik Derişimi</b>	20 – 30– 125 mg/L
<b>Elektrot</b>	Ti /RuO <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 /75/100/150/200/300
<b>pH</b>	pH <sub>0</sub> /pH <sub>3</sub> /pH <sub>11</sub>
<b>Elektrolitler</b>	NaCl
<b>Arıtım Süresi</b>	1-40 dk
<b>Analiz Parametreleri</b>	Renk, Toksikite, Enerji Tüketimi

Bu nedenle yapılan çalışma ile toksik etkiler değerlendirilmiştir.

## 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

Tablo 1. Kullanılan boyarmaddenin özellikleri

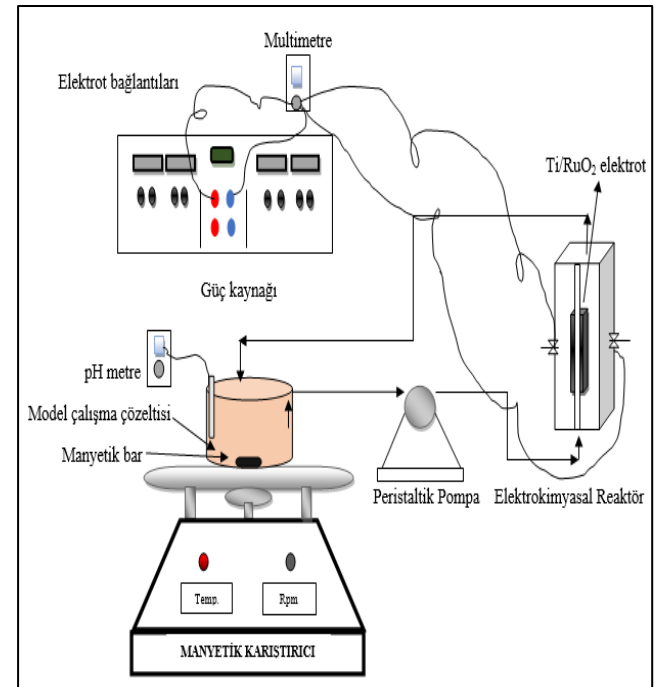
<b>Moleküler Formül</b>	C <sub>20</sub> H <sub>17</sub> N <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> O <sub>11</sub> S <sub>3</sub>
<b>Molekül ağırlığı (g/mol)</b>	617,54
<b>Kompozisyon</b>	Boya içeriği, ≥70%
<b>Absorpsiyon</b>	(1.) λ <sub>max</sub> 388 nm (2.) λ <sub>max</sub> 494 nm

Çalışmamızda elektrokimyasal arıtım işlemi, Ti/RuO<sub>2</sub> elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilmiş, sistemin verimliliği ve sürdürülebilirliği araştırılmıştır. Akım yoğunluğu, akış hızları, pH, başlangıç kirlilik derişimleri gibi parametrelerin optimizasyonu yapılarak renk ve toksisite giderimine NaCl elektrolitinin katkısı değerlendirilmiştir.

İncelenen parametreler Tablo 2’de gösterilmektedir.

Tablo 2. Model çalışma çözeltisinin optimizasyonunda kullanılan parametreler

- Elektrot boyutları 12,5cmx5cmx0,2 cm’dir. Elektrotlar arası mesafe 4 mm’dir.
- Çalışma çözeltisinin iletkenliği 20(±5) µs/cm ve pH’ı 6-7 aralığında değişiklik göstermektedir.
- Model çalışma çözeltilerini hazırlamak için deiyonize su, ters ozmos ve iyon değişimini birleştiren ultra saf su hazırlama ünitesi kullanılmıştır.
- 1000 mg/L’lik stok çözelti hazırlanarak, 500 mL hacimdeki standart çalışma çözeltisi ile deneyler yürütülmüştür. UV aralıklarında özel spektroskopik çalışmalar için UV/vis. spektrofotometrik cihazlar kullanılarak analizler yapılmış 10 mm ışın yollu kuvars küvetler kullanılmıştır. Renk giderimine bakılmıştır.
- İletkenlik ve pH iletken ölçer ve pH metre cihazı kullanılarak ölçülmüştür.
- Toksikite değerleri mikrotoksosite (Azur Environmental) cihazı ile analiz edilmiştir.



Şekil 2. Deneyler için kullanılan reaktör düzeneği

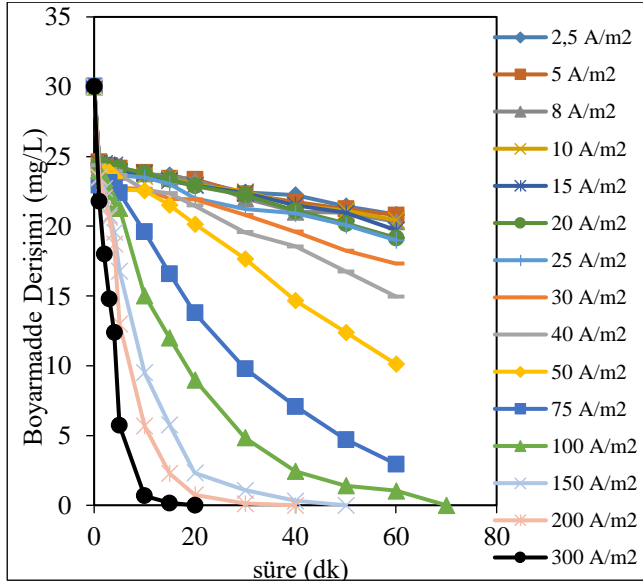
## 3. Bulgular ve Tartışma

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.

### 3.1. Akım yoğunluğunun etkisi

Başlangıç kirlilik derişiminin 30 mg/L olduğu model çalışma çözeltisi ile kesikli geri döngülü bir paralel plaka reaktörde elektrokimyasal oksidasyon yöntemi ile çalışmalar yürütülmüştür. Akım yoğunluğu değerleri olarak

2,5/5/8/10/15/20/25/30/40/50/75/100/150/200/300 A/m<sup>2</sup> seçilmiş ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

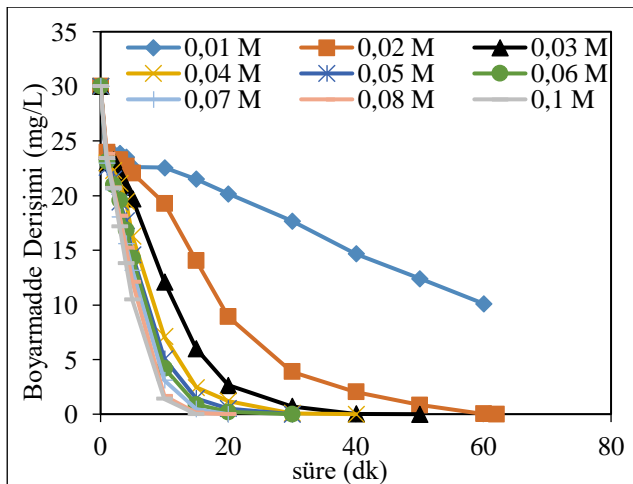


**Şekil 3.** Ti/RuO<sub>2</sub> elektrotlarla elde edilen arıtım verimleri ( $C_0=30$  mg/L,  $Q=155,84$  mL/dk, D.E.=0,01 M NaCl,  $pH_0= 5,13-6,51$ )

Yapılan çalışmada en iyi arıtım verimine 300 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 20 dk gibi kısa bir sürede ulaşılmıştır. Akım yoğunluğunu arttırmak sistem içerisindeki aktif klor bileşiklerinin artmasına önemli miktarda katkı sağlamaktadır. Arıtım verimleri daha yüksek akım yoğunlukları ile daha yüksek elektrokimyasal kapasite ve muhtemelen yükseltgenmiş oksidanların (örneğin, klorür-oksiklorür radikalleri) oluşumuna bağlıdır (Chiang ve ark. 1995, Deng ve Englehardt 2007). Ancak, elektrik sarfiyatları göz önüne alındığında NaCl elektroliti için biraz daha destek elektrolitle arıtım verimlerinin artacağı göz önüne alındığında sonraki deneyler için 50 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda çalışılmaya karar verilmiştir.

### 3.2. Elektrolit miktarının etkisi

0,01/0,02/0,03/0,04/0,05/0,06/0,07/0,08/0,1 mol/L (M) NaCl,  $pH_0$ 'da optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür.

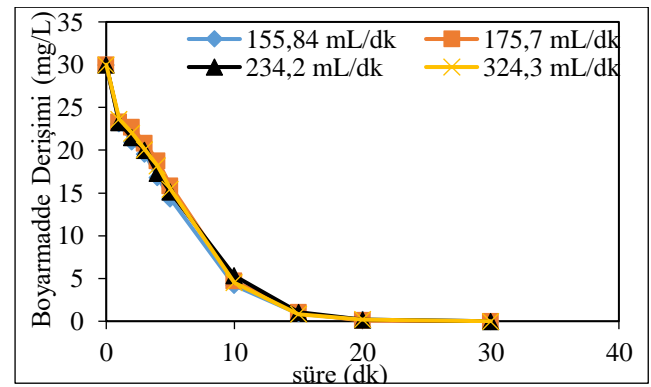


**Şekil 4.** Ti/RuO<sub>2</sub> elektrotlarla elde edilen arıtım verimleri ( $C_0=30$  mg/L,  $I=50$  A/m<sup>2</sup>,  $Q=155,84$  mL/dk,  $pH_0= 6-6,28$ )

50 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda, başlangıç kirlilik derişiminin 30 mg/L olduğu durumda 0,06 M NaCl elektrolit varlığında, doğal  $pH_0$ 'da 25. dakika da rengin tamamı giderilmiştir. 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). Elektrolit miktarını arttırmak arıtım verimlerini arttırmaktadır. Yalnız, sistem içerisindeki fazla miktarda klor klorlu organik bileşiklerin oluşumuna da katkı sağladığından dolayı optimum miktarı belirlemek çok önemlidir.

### 3.3. Akış hızının etkisi

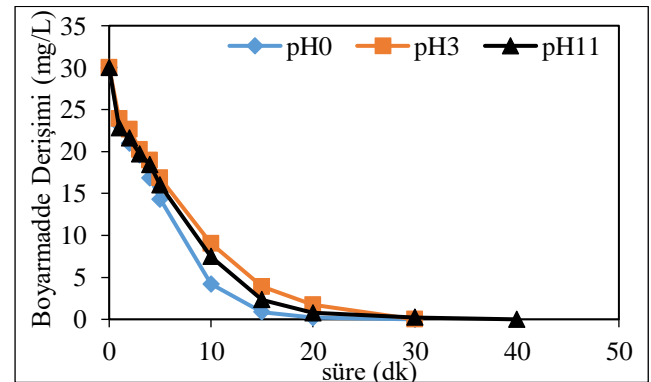
155,84, 175,7, 234,2 ve 324,3 mL/dk'lık debiler çalışılmıştır.



**Şekil 5.** Ti/RuO<sub>2</sub> elektrotlarla elde edilen arıtım verimleri ( $C_0=30$  mg/L,  $I=50$  A/m<sup>2</sup>, D.E.=0,06 M NaCl,  $pH_0= 6-6,27$ )

En iyi arıtım verimlerine 155,84 mL/dk akış hızında ulaşılmıştır. Akış hızını arttırmak arıtım verimlerini etkilememiştir. Akış hızını arttırmak çalışma çözeltilisinin elektrotlarla olan temasını azalttığından dolayı arıtım verimlerini arttırmamıştır sonucuna varılabilir.

### 3.4. pH'in etkisi

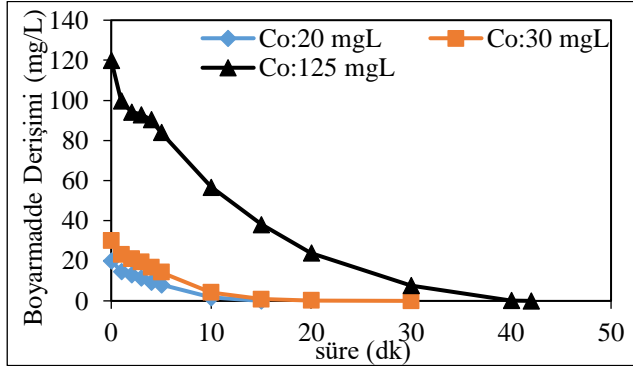


**Şekil 6.** Ti/RuO<sub>2</sub> elektrotlarla elde edilen arıtım verimleri ( $C_0=30$  mg/L,  $I=50$  A/m<sup>2</sup>,  $Q=155,84$  mL/dk, D.E.=0,06 M NaCl derişimlerinde,  $pH_0$  (6,12),  $pH_3$  ve  $pH_{11}$ )

En iyi arıtım verimlerine doğal pH'ta ulaşılmıştır. pH arıtım verimlerini etkileyen bir faktör olmamıştır. Ancak, çözeltide, hipokloritten daha yüksek oksidasyon potansiyeline sahip olan hipoklorik asit düşük pH'larda bulunur (Parsa ve ark. 2007). Bu nedenle, asidik koşullarda arıtım süreleri kısalarak enerji tüketimlerine katkıda

bulunmuştur. Aynı zamanda pH ayarlaması yapılmayarak ek kimyasal kullanımına gerek kalmamış ve sistem daha uygun maliyetli hale gelmiştir.

### 3.5. Başlangıç kirlilik derişiminin etkisi



Şekil 7. Ti/RuO<sub>2</sub> elektrotlarla elde edilen arıtım verimleri (I=50 A/m<sup>2</sup>, Q=155,84 mL/dk, D.E.=0,06 M NaCl, pH<sub>0</sub>=6-6,20)

Her üç başlangıç kirlilik derişimi için de rengin tamamı giderilmiştir. 125 mg/L başlangıç kirlilik derişimine sahip çalışma çözeltilisinin optimum koşullarda arıtımı 40 dk gibi nispeten kısa sürelerde gerçekleşmiştir. Sistem yüksek konsantrasyonlarda kirliliğe sahip çalışma çözeltilerinin arıtımında etkindir sonucuna varılabilir.

### 3.6. Toksikite

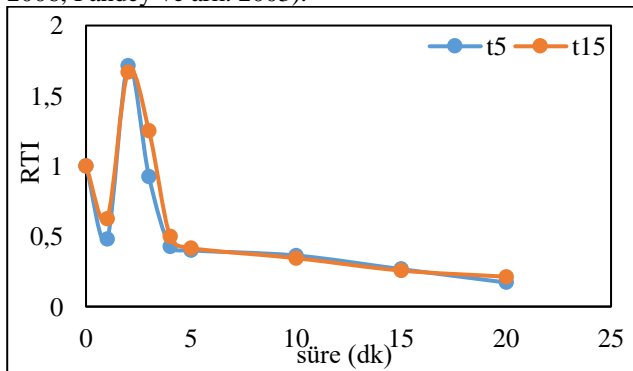
Başlangıç kirlilik derişiminin 30 mg/L olduğu çalışma çözeltilisi toksik etki göstermediğinden dolayı başlangıç kirlilik derişiminin 125 mg/L olduğu çalışma çözeltilisi ile optimum koşullarda elde edilen numunelerin toksisite değerlendirmesi yapılmıştır

Çalışmada toksisite değerleri relatif toksisite indeksi (RTI) olarak verilmiştir (Yavuz ve ark. 2006, Yavuz ve ark. 2011).

$$RTI = \frac{EC_{50} \% (t=0)}{EC_{50} \% (t=t)} \quad (5)$$

Burada; EC<sub>50</sub> % (t = 0) ve EC<sub>50</sub> % (t = t) 5. dakika ve 15. dakika numunelerin 0 ve t zamanlarındaki mikrotoks toksisite değerlerini göstermektedir.

Analizler sonucunda EC<sub>50</sub> ≤ 25= son derece toksik; 25-50= orta derecede toksik; 51-75= toksik; >75 hafif toksik ve >100= toksik değil sonucunu vermektedir (Yavuz ve ark. 2006, Pandey ve ark. 2003).



Şekil 8. Ti/RuO<sub>2</sub> elektrotlarla NaCl kullanılarak deneylerde toksisitenin zamanla değişimi (Co=125 mg/L)

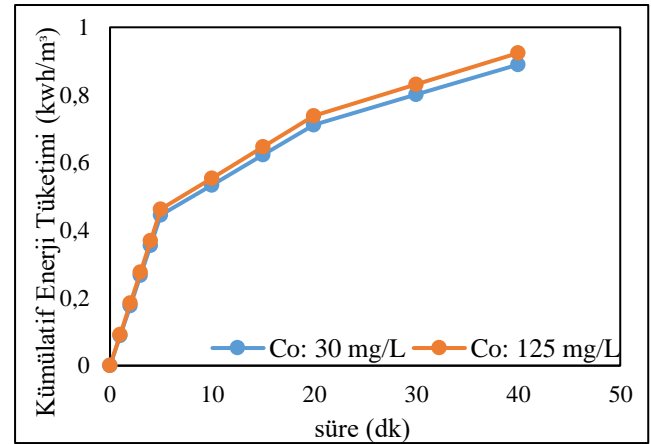
Toksosite sonuçları incelendiğinde başlangıç kirlilik derişiminin 125 mg/L olduğu çalışma çözeltilisi ile yapılan testlerde optimizasyon çalışmaları sonucunda %80'lik bir toksisite giderimi elde edilmiştir.

### 3.7. Enerji Tüketimi

Tablo 3. Kümülatif enerji tüketim değerleri

süre (dk)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> )	
	Co: 30 mg/L	Co: 125 mg/L
0	0	0
1	0,0890	0,0924
2	0,1780	0,1848
3	0,2669	0,2772
4	0,3559	0,3696
5	0,4449	0,4620
10	0,5339	0,5544
15	0,6229	0,6468
20	0,7118	0,7392
30	0,8008	0,8316
40	0,8898	0,9240

I: 50 A/m<sup>2</sup>, Q: 155,84 mL/dk, D.E.:0,06 M NaCl, pH<sub>0</sub> (6,12-6,03)



Şekil 9. Ti/RuO<sub>2</sub> elektrotlarla, NaCl elektroliti ile optimum koşullarda kümülatif enerji tüketimi

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 NaCl elektrolitinin kullanıldığı optimum koşullarda 30 mg/L başlangıç kirlilik derişimi için 40 dk'lık arıtım süresi sonunda 0,8 TL/m<sup>3</sup>, ve optimum koşullarda 125 mg/L başlangıç kirlilik derişimi için 40 dk'lık arıtım süresi sonunda 0,83 TL/m<sup>3</sup> enerji tüketim maliyetleri oluşmuştur. Grafikten de anlaşılacağı üzere enerji tüketim değerleri ve enerji maliyetleri değerlendirildiğinde çok büyük farklılıklar göstermemiştir.

### 4. Sonuç

NaCl destek elektrolitinin arıtım verimlerine olan katkılarının miktar ve içerik olarak değerlendirildiği

optimizasyon çalışmalarında NaCl elektroliti hem renk hem de toksisite giderimi açısından yüksek arıtım verimleri elde etmemizi sağlamıştır. Başlangıç kirlilik derişiminin 30 mg/L olduğu durumda 20 dk'lık arıtım süresi sonunda ~%100 renk giderimi elde edilmiştir. Başlangıç kirlilik derişiminin 125 mg/L olduğu durumda 40 dk'lık arıtım süresi sonunda ~%100 renk giderimi elde edilmiştir. Relatif toksisite indeksi olarak değerlendirilen toksik etkilere göre %80 oranında toksisite giderimi elde edilmiştir. Kümülatif enerji tüketimleri de gözönüne alındığında çok düşük miktarlarda elektrik tüketimi ve m<sup>3</sup> başına çok düşük enerji maliyetleri söz konusudur. Bütün sonuçlar değerlendirildiğinde sistemimiz yüksek kirlilik derişimlerinde bile yüksek arıtım verimleri elde etmek ve toksik etkileri azaltma yönünde verdiği sonuçlar ile oldukça başarılıdır kanaatini vermiştir.

### Teşekkür

Toksisite analizlerindeki katkıları nedeniyle Öğr.Gör.Dr. Fadime Karaer Özmen'e en içten teşekkürlerimizi sunarız. Bu çalışma ESTÜ BAP Komisyonu 1708F474 no'lu proje ile desteklenmiştir.

### Kaynaklar

- Canizares P, Paz R, Saez C, Rodrigo MA. 2009. Costs of the electrochemical oxidation of wastewaters a comparison with ozonation and fenton oxidation processes. *J Environ Manage.* 90:410-420.
- Chiang L.C, Chang JE, Wen TC. 1995. Indirect oxidation effect in electrochemical oxidation treatment of landfill leachate. *Water Res.* 29:671-678.
- 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.
- Deng Y, Englehardt JD. 2006. Treatment of landfill leachate by the fenton process. *Water Resear.* 40:3683-3694.
- Deng Y, Englehardt JD. 2007. Electrochemical oxidation for landfill leachate treatment. *Waste Manag.* 27:380-388.
- Fernandes A, Magrinho M, Lopes A, Goncalves I. 2004. Electrochemical degradation of C.I. acid orange 7. *Dyes and pigments.* 61:287-296.
- Kaygusuz T. 2013. Elektrokimyasal oksidasyon yönteminin tekstil atıksularının arıtılabilirliğine etkilerinin tam ölçekli araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Tekirdağ: Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Naumczyk J, Szpyrkowicz L, Zilio-Grandi F. 1996. Electrochemical treatment of textile wastewater. *Water Scien and Technol.* 34(17):17-24.
- Özdemir K. 2005. Meyve suyu fabrikası atıksularının elektrokimyasal olarak arıtılması. Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Pandey AK, Pandey SD, Misra V, Srimal A. 2003. Removal of chromium and reduction of toxicity to

Microtox system from tannery effluent by the use of calcium alginate beads containing humic acid. *Chemosphere.* 51:329-333.

- Parsa JB, Abbasib M. 2007. Decolorization of synthetic and real wastewater by indirect electrochemical oxidation process. *Acta Chim Slov.* 54:792-796.
- 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 Electroanalyt 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.
- Ramalho AMZ, Martínez-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.
- Tran LH, Drogui P, Mercier G. 2009. Electrochemical degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in creosote solution using ruthenium oxide on titanium expanded mesh anode. *J Hazard Mater.* 164:1118-1129.
- 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.
- Yavuz Y, Koparal AS. 2006. Electrochemical oxidation of phenol in a parallel plate reactor using ruthenium mix metal oxide electrode. *Journ of Hazard Materials.* 136:296-302.
- Yavuz Y, Koparal AS, Öğütveren ÜB. 2011. Electrochemical oxidation of basic blue 3 dye using a diamond anode: evaluation of colour, COD and toxicity removal. *J Chem Technol Biotechnol.* 86:261-265.
- [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 Ara. 2019.
- [http2: https://www.epdk.org.tr/](http2:https://www.epdk.org.tr/). Erişim tarihi 30 Nis. 2020.