

Hibrit Elektrokoagülasyon/Elektrooksidasyon Prosesleri ile Denim Ürün Üretim Atıksularının Arıtımı

Murat SOLAK*¹ 

¹Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, Türkiye

(Alınış / Received: 27.02.2019, Kabul / Accepted: 11.10.2019, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2019)

Anahtar Kelimeler

Elektrokoagülasyon,
Elektrooksidasyon,
Denim ürün üretim atıksuyu,
Al elektrot,
Titanyum elektrot,
Paslanmaz çelik elektrot

Özet: Çalışmada, denim ürün işleme atıksularının hibrit Elektrokoagülasyon (EK) ve Elektrooksidasyon (EO) Prosesleri ile arıtımı incelenmiştir. pH, akım yoğunluğu ve elektroliz süresi gibi işletme parametrelerinin KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) ve TÇK (Toplam Çözünmüş Katı) giderimi üzerindeki etkileri belirlenmiştir. pH değerinin 7,48, akım yoğunluğunun 120 A/m² ve elektroliz süresinin 49,5 dakika olduğu Al (Alüminyum) elektrotlarının kullanıldığı EK prosesi ile >% 65 KOİ ve % 51 TÇK giderimi sağlanmıştır. Aynı koşullarda, EO işleminin KOİ ve TÇK için Ti (Titanyum)/PÇ (Paslanmaz Çelik) elektrotları ile giderim verimleri sırasıyla % >70 ve % 45 olarak bulunmuştur. Optimum koşullarda EK/EO hibrit prosesinin renk giderim verimi % 84 (436 nm), % 93 (525 nm), % 97 (620 nm) olarak elde edilirken, EK ve EO prosesinin enerji tüketimi sırasıyla 14,26 kWsa/m³ ve 22,71 kWsa/m³ olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, istatistiksel analiz sonucunda elde edilen R² ve R²_{adj} değerlerinin 1'e yakın olması, deney sonuçlarının ve istatistiksel çıkarımların uyumlu olduğunu ve işlem parametrelerinin etkilerinin belirlenmesinde Box-Behnken istatistiksel tasarımının etkili olduğunu göstermiştir.

Treatment of Denim Product Manufacturing Wastewater by Hybrid Electrocoagulation/Electrooxidation Processes

Keywords

Electrocoagulation
Electrooxidation,
Denim product processing wastewater,
Al electrode,
Titanium electrode,
Stainless steel electrode

Abstract: In this study, treatment of denim product processing wastewaters by hybrid electrocoagulation (EC) and electrooxidation (EOx) process were investigated. Effects of operating parameters such as pH, current density and electrolysis time on removal of COD (Chemical Oxygen Demand) and TDS (Total Dissolved Solids) were determined. EC process with Al electrodes where the pH value was 7,48, current density was 120 A/m², and electrolysis time was 49,5 min resulted in > 65 % COD and 51 % TDS removal. At the same conditions removal efficiencies of EOx process for COD and TDS with Ti/SS electrodes were found to be > % 70 and % 45, respectively. The color removal efficiency of EC / EO hybrid process at optimum conditions was obtained as 84 % (436 nm), 93 % (525 nm), 97 % (620 nm), while the energy consumption of EC and EO process was 14,26 kWh/ m³ and 22 kWh/m³ respectively. The coefficient of determination (R²) value for removal of COD and TDS in the EC and EOx reactor, was found to be 0.99 and 0.97, and R²_{Adj} value was found to be 0,96 and 0,92, respectively. In addition, the results of the statistical analysis indicated that the R² and R²_{adj} values were close to 1 indicates that the experimental results and statistical inferences were compatible and the Box-Behnken statistical design was effective in order to determine the effects of process parameters.

1. Giriş

Denim ürün üretim sektörü, kot pantolon (jeans), kot ceket, kot etek gibi tekstil ürünlerinin üretimini kapsamaktadır. Üretim süreçlerinde, sözkonusu tekstil ürününe istenen özellikleri kazandırmak adına boyama, kot ürünün çekmemesi, eski görünümünün kazandırılması adına çeşitli kompleks kimyasallar kullanılmaktadır. Ayrıca, üretim süreçlerinde oldukça fazla miktarda su tüketimi gerçekleşmektedir. Yüksek su tüketimi ile birlikte yüksek kirletici içeriğine sahip atıksular oluşmaktadır.

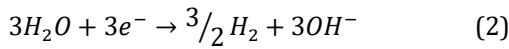
İlk yatırım, işletme ve bakım süreçlerindeki kolaylıkları bakımından tekstil atıksularının arıtımında genellikle koagülasyon-flokülasyon prosesleri kullanılmaktadır. Bu tür konvansiyonel arıtma tekniklerine alternatif teknolojiler üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Gelişen çevre teknolojileri alanında elektrokimyasal prosesler de yerini almaktadır. Elektrokimyasal proseslerden biri olan EK prosesi Al ve Fe gibi çözünen elektrotların kullanılarak redoks reaksiyonlarına bağlı olarak anot materyalinde gerçekleşen çözünme ve oluşan hidroksit iyonları ile kirleticilerin koagüle edilerek giderildiği proseslerdir. EK prosesinin 3 aşamada gerçekleştiği kabul edilmektedir. i) Kullanılan elektrodun, elektrolitik oksidasyonu ile koagülantların oluşturulması, ii) Kirleticilerin, askıdaki partiküllerin destabilizasyonu ve emülsiyonların kırılması, iii) Flokları oluşturmak için stabilize fazların birleşmesi ya da toplanması [1-3].

Al elektrot kullanılması durumunda anot ve katotta elektrotlarda gerçekleşen reaksiyonlar Eşitlik 1-3'te görülmektedir [4].

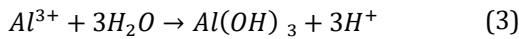
Anodik Reaksiyonlar



Katodik Reaksiyonlar



Çözeltide

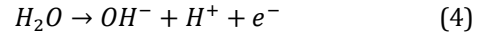


Elektrokimyasal proseslerden biri olan elektrooksidasyon prosesi ise kullanılan titanyum, platin, rubidyum, grafit gibi çözünmez elektrotlar ile atıksu ortamındaki kirleticilerin hidroksi radikallerinin oluşumu ile okside edildiği prostestir. Elektrooksidasyon prosesinde kirletici giderimi iki temel mekanizma ile gerçekleşmektedir. Birincisi, kullanılan anot elektrotta gerçekleşen doğrudan oksidasyon ve atıksu ortamında oksitleyiciler ile gerçekleşen dolaylı oksidasyondur. Elektrooksidasyon prosesi sırasında her iki mekanizma da çalışmaktadır [5, 6]. Doğrudan

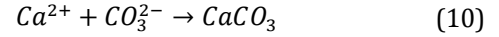
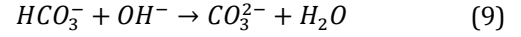
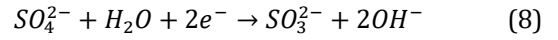
oksidasyon prosesinde kirleticiler anot yüzeyine adsorbe olurlar ve anodik elektron transferi reaksiyonu ile giderilirler. Dolaylı oksidasyon prosesinde hipoklorit/klor, ozon ve hidrojen peroksit gibi kuvvetli oksitleyiciler elektrokimyasal olarak üretilir. Kirleticiler ise üretilen bu oksitleyici maddeler ile okside edilerek giderilir [7, 8].

EO prosesinde atıksu ortamında anodik ve katodik olarak gerçekleşen reaksiyonlar Eşitlik 4-10'da görülmektedir. EO prosesi atıksu ortamında bulunan organik kirleticileri tamamen karbondioksite mineralize eder ve bu organik maddeler anodik elektron transfer reaksiyonu ve arıtma sırasında üretilen hidroksiradikaller, hidrojen peroksit ve hipoklorit, klor gibi kirletici giderim verimini artıran kuvvetli oksidantların üretimi ile okside edilir [8].

Anodik Reaksiyonlar



Katodik Reaksiyonlar



Bu çalışmada da elektrokimyasal proseslerden EK ve EO prosesleri ile denim ürün üretimi atıksularının arıtımı gerçekleştirilmiştir. Literatürde elektrokimyasal prosesler ile tekstil atıksularının arıtımı üzerine oldukça fazla çalışma bulunmaktadır [9-15]. Bu çalışmada hibrit bir proses olarak EK/EO proseslerinin denim ürün üretim atıksularından KOİ ve TÇK gideriminin etkinliği araştırılmıştır. Atıksu ilk aşamada Al elektrodunun kullanıldığı EK prosesine, ikinci aşamada da EK prosesinden çıkan atıksuya Ti (Titanyum)/PÇ (Paslanmaz Çelik) elektrotların kullanıldığı elektrooksidasyon prosesi uygulanmıştır. Proses işletme şartlarını belirleyen pH, akım yoğunluğu ve elektroliz süresi gibi parametreler optimize edilerek, elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

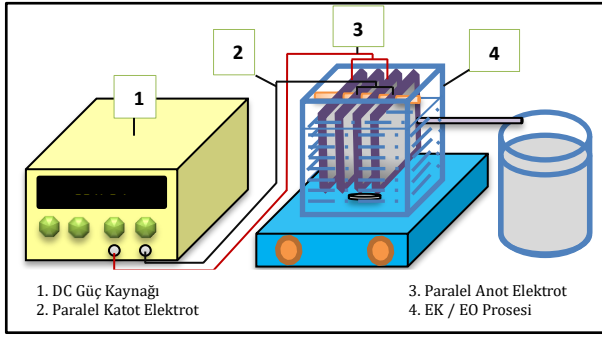
Ham atıksuyun karakterizasyonu Tablo 1'de görülmektedir. Ham atıksu denim ürün üretimi yapan bir tekstil firmasının atıksu arıtma tesisi girişinden alınmıştır.

Tablo 1. Ham atıksu karakterizasyonu

Parametre	Değer/Konsantrasyon
pH	8,37±0,2
KOİ	380 ± 25 mg/L
TÇK	3,17 ± 0,2 g/L
İletkenlik	6,22± 0,3 mS/cm
Renk	436 nm-1,04 m ⁻¹ 525 nm-1,27 m ⁻¹ 620 nm-2,45 m ⁻¹

2.1. Elektrokoagülasyon ve Elektrooksidasyon Prosesi Model Reaktörleri

EK/EO prosesinin deney düzeneğinin gösterimi Şekil 1'de görülmektedir. Model reaktörün boyutları HxBXL 85x80x80 mm, hacmi 500 mL olarak tasarlanmıştır. Model reaktörde kullanılan Al, Ti ve PÇ elektrotlarının boyutları sırasıyla 40*80*1 mm, 40*80*0,1 mm ve 40*80*2 mm'dir.

**Şekil 1.** EK-EOx Deney Düzeneği

2.2. Deneysel Çalışmalar

Kesikli şartlarda işletilen reaktöre 350 mL atıksu numunesi eklenerek deneysel çalışmalara başlanmıştır. Çalışmada EK ve EO prosesini etkileyen pH, akım yoğunluğu ve elektroliz süresi parametrelerinin KOİ ve TÇK giderim verimine etkileri incelenmiştir. Elektrotlar, tasarlanan elektrot bağlantı sistemine yerleştirildikten sonra elektroliz işlemine başlanmıştır. Reaktör içerisinde çökme olmaması ve giderim veriminin yükseltilmesi amacı ile çözelti içerisindeki anyon ve katyon temasını artırmak için 200 devir/dakika karıştırma hızında sürekli olarak karıştırılmıştır. EK prosesi sonrası alınan çıkış suyu, 0,45 µm gözenek çapına sahip filtreden süzülükten sonra parametre analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra aynı reaktöre Ti/PÇ elektrotlar daldırılarak EOx prosesi uygulanmıştır. EOx prosesinden alınan çıkış suyu, 0,45 µm gözenek çapına sahip filtreden süzülükten sonra parametre analizleri gerçekleştirilmiştir.

2.3. Metot

Deneysel çalışmalarda, giriş ve çıkış suyu örneklerinde KOİ konsantrasyonlarının belirlenmesi için Standart Metot (5220 D) metot kullanılmıştır. pH ve iletkenlik, elektrometrik metoda (SM 4500-H+) göre Hanna model cihazı kullanılarak belirlenmiştir

[16]. Akım ve voltaj kontrolü Gwinstek GPS 3303 DC Power Supply (0-30V, 0-3A) model güç kaynağı ile sağlanmıştır. Karıştırma işleminde SCIllogex MSH 280-Pro model karıştırıcı kullanılmıştır. pH ölçümleri Hanna HI 2211 model pH metre ile elektrometrik, iletkenlik ve TÇK ölçümleri Hach İletkenlik-TÇK metre ile elektrometrik yöntem ile gerçekleştirilmiştir. pH ayarlamaları için H₂SO₄ ve NaOH çözeltileri kullanılmıştır. İletkenlik ayarlaması NaCl ile yapılmıştır.

2.4. İstatistiksel Analiz

Deneysel çalışmaların sonuçlarının değerlendirilmesi amacıyla, Box-Behnken istatistiksel modeli kullanılmıştır. Box-Behnken, dizaynı yanıt yüzey dizaynlarından biri olup, ikinci derecedir.

Atıksuyun pH değeri, akım yoğunluğu ve elektroliz süresi bağımsız değişkenler olarak ele alınmıştır. Box-Behnken istatistiksel analizi, Design Expert (trial) programı kullanılarak; ANOVA tablosu çıkarılarak, P, R², F değerleri elde edilmiştir.

Dizayn tablosuna göre yapılan deneyler sonucunda bulunan KOİ ve TÇK giderim verileri kullanılarak aşağıda verilen eşitlikte b₁, b₂, b₃... katsayıları belirlenmiştir (Eşitlik 11). Bu katsayılar kullanılarak KOİ ve TÇK giderim değerini maksimum seviyeye getirecek bağımsız parametrelerin alabileceği optimum değerler tespit edilmiştir.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 \quad (11)$$

pH, akım yoğunluğu ve elektroliz süresi olmak üzere 3 adet bağımsız değişken için ön çalışmalarda elde edilen aralıklar Tablo 2'de görülmektedir. Proseste uygulanan işletme şartlarına göre değişkenlere yanıt değişken olarak, işlem sonrası numunede KOİ ve TÇK giderim verimleri (%) belirlenmiştir.

Tablo 2. Optimizasyon çalışması için proses faktörleri ve seviyeleri

Faktörler	Birim	Seviyeler		
		-1	0	+1
pH		4	7,5	9
Akım Yoğunluğu	A/m ²	30	75	120
Elektroliz Süresi	dk.	5	27,5	50

3. Bulgular

3.1. EK/EOx Prosesi Analiz Sonuçları ve İstatistiksel Analizi

EK ve EOx prosesi ile yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 3'te görülmektedir. Katot elektrottaki suyun indirgenme reaksiyonu sonucunda oluşan hidroksitler atıksu pH değerini artırmıştır.

EK prosesinde belirlenen 30, 75 ve 120A/m² akım yoğunluğu için atıksuya verilen akım değerlerinde (0,36 A, 0,9A 1,44 A), Voltaj 2,75-25 V aralığında değişim gösterirken, EO prosesinde aynı akım yoğunluğu parametreleri için 13,8-32 V aralığında değişim göstermiştir.

EK prosesinde elektrik tüketimi 0,24-53,6 kWsa/m³ aralığında değişim gösterirken, EO prosesinde ise 5,38-68,6 kWsa/m³ aralığında değişim göstermiştir. EO prosesinin enerji tüketimi, EK prosesinden fazladır.

Çalışmada başlangıç iletkenlik değerinin etkisini önlemek amacıyla, tüm deneysel çalışmalarda iletkenlik 7,5 mS/cm olarak ayarlanmıştır. EK ve EO proseslerinde iletkenlik tüm deneysel çalışmalarda azalmıştır. EK prosesinde oluşan hidroksitler

bağlanan iyonlardan dolayı ve EO prosesinde gerçekleşen reaksiyonlar ile iletkenlik düşmüştür.

EK prosesinin optimizasyonu için pH, akım yoğunluğu ve elektroliz süresi gibi işletme parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Optimizasyon sonucu ANOVA analizi Tablo 4'te verilmiştir. İstatistiksel analiz sonucunda kuadratik modele uyum sağladığı belirlenmiştir. Kuadratik model, basit doğrusal regresyonun bir uzantısıdır. Kuadratik model için elde edilen verilere göre etkin parametreler, p<0.05 değerlerine göre değerlendirilmiştir. Buna göre, kimyasal sprey atıksuyundan EK/EO hibrit prosesi ile KOİ ve TÇK giderim veriminde pH, akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin oldukça önemli parametreler olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3. Deneysel Sonuçlar

No	pH	A/m ²	dk.	Volt		pH		İletkenlik (mS/cm)		TÇK (mg/L)		KOİ (mg/L)		Enerji Tüketimi (kWsa/m ³)	
				EK	EO	EK Çıkış	EO Çıkış	EK Çıkış	EO Çıkış	EK Çıkış	EO Çıkış	EK Çıkış	EO Çıkış	EK	EO
1	4	30	27,5	3,2	13,8	5,91	5,960	6,03	5,67	2,96	2,83	280,00	263,00	1,51	6,51
2	4	120	27,5	12,6	20,4	7,07	7,780	2,46	2,22	2,2	2,15	223,00	192,00	23,8	38,5
3	4	75	5	5,5	25,1	5,57	7,12	5,92	5,75	2,95	2,86	272,00	250,00	1,18	5,38
4	4	75	50	6,1	14,9	7,47	6,65	5,07	4,22	2,52	2,1	222,00	202,00	13,1	31,9
5	6,5	30	5	2,75	17	7,26	7,01	6,35	6,13	2,8	3,06	279,00	270,00	0,24	1,46
6	6,5	120	5	7,2	26	6,85	6,76	6,3	6,22	3,15	3,1	264,00	220,00	2,4	8,91
7	6,5	30	50	4,2	14	8,13	6,95	6,04	5,48	3,01	2,74	261,00	223,00	3,6	12
8	6,5	120	50	9,8	17	7,50	3,78	4,46	3,8	2,23	1,9	132,00	105,00	33,6	58,3
9	6,5	75	27,5	17	17,5	7,41	7,77	5,15	4,97	2,57	2,38	212,00	165,00	20	20,6
10	6,5	75	27,5	16,9	17,2	7,32	7,54	5,1	4,87	2,46	2,4	210,00	168,00	19,9	20,3
11	6,5	75	27,5	16,8	17	7,38	7,65	5,12	4,84	2,52	2,35	216,00	163,00	19,8	20
12	6,5	75	27,5	17,1	17,4	7,40	7,62	5,1	4,85	2,49	2,37	215,00	158,00	20,2	20,5
13	6,5	75	27,5	17	17	7,00	7,9	5,13	4,84	2,56	2,36	215,00	162,00	20	20
14	9	30	27,5	9,9	15	8,92	9,15	5,92	5,24	2,96	2,62	246,00	210,00	4,67	7,07
15	9	120	27,5	17	18	9,09	7,24	4,42	3,2	2,2	2,6	180,00	140,00	32,1	33,9
16	9	75	5	18,5	24	8,89	8,21	5,55	4,52	2,77	2,25	260,00	220,00	3,96	5,14
17	9	75	50	25	32	8,60	8,24	5,32	4,32	2,17	2,01	196,00	182,00	53,6	68,6

Tablo 4. ANOVA Analizi

Kaynak	EK Prosesi					EOx Prosesi				
	Kareler Ortalaması	S.D.	Ortalama Kareler	F Değeri	P Değeri	Kareler Ortalaması	S.D.	Ortalama Kareler	F Değeri	P Değeri
Model	0,10	9	0,011	56,44	< 0,0001	0,21	9	0,024	19,18	0,0004
pH	7,406E-003	1	7,406E-003	36,85	0,0005	0,021	1	0,021	16,87	0,0045
A.Y.	0,037	1	0,037	185,85	< 0,0001	0,083	1	0,083	67,05	< 0,0001
E.S.	0,037	1	0,037	184,75	< 0,0001	0,053	1	0,053	43,19	0,0003
AB	8,686E-007	1	8,686E-007	4,322E-003	0,9494	1,731E-006	1	1,731E-006	1,404E-003	0,9712
AC	1,232E-004	1	1,232E-004	0,61	0,4594	1,731E-004	1	1,731E-004	0,14	0,7189
BC	0,011	1	0,011	55,53	0,0001	8,006E-003	1	8,006E-003	6,49	0,0382
A ²	1,937E-003	1	1,937E-003	9,64	0,0172	0,016	1	0,016	13,09	0,0085
B ²	1,947E-003	1	1,947E-003	9,69	0,0170	6,152E-003	1	6,152E-003	4,99	0,0606
C ²	4,135E-003	1	4,135E-003	20,57	0,0027	0,021	1	0,021	16,96	0,0045
Artık	1,407E-003	7	2,010E-004			8,629E-003	7	1,233E-003		
Uyum Eksikliği	1,308E-003	3	4,359E-004	17,56	0,0091	8,250E-003	3	2,750E-003	28,98	0,0036
Hata	9,92n7E-005	4	2,482E-005			3,795E-004	4	9,488E-005		
Toplam	0,10	16				0,22	16			
R ²		0,99				R ²		0,96		
Adj R ²		0,97				Adj R ²		0,92		

S.D.: Serbestlik Derecesi

ANOVA analizi sonrası KOİ giderim verimi için EK ve EO prosesleri için proses parametrelerinin kendileri arasındaki ve birbirleriyle olan ilişkilerini belirleyen eşitlikler aşağıdaki gibi elde edilmiştir (Eşitlik 12-13).

$$\begin{aligned} \text{KOİ Giderim Verimi (\%)-EK} \\ = 0,66+0,03*\text{pH}+0,068*\text{A.Y.} + 0,068 * \text{E.S.}+ \\ 4,660\text{E-}004*\text{pH}*\text{A.Y.}+5,549\text{E-}003*\text{pH}*\text{E.S.} \\ +0,053*\text{A.Y.}*\text{E.S.} - 0,021*\text{pH}^2-0,022*\text{A.Y.}^2- \\ 0,031 \text{E.S.}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{KOİ Giderim Verimi (\%)-EO} \\ =+0,57+0,051*\text{pH}+0,1*\text{A.Y.} + 0,082 * \text{E.S.}- \\ 6,579\text{E-}004*\text{pH}*\text{A.Y.}-6,579\text{E-}003*\text{pH}*\text{E.S.} \\ +0,045*\text{A.Y.}*\text{E.S.} - 0,062*\text{pH}^2-0,062*\text{A.Y.}^2- \\ 0,038 \text{E.S.}^2 \end{aligned} \quad (13)$$

3.1. pH ve Akım Yoğunluğu parametrelerinin KOİ ve TÇK Giderim Verimini Etkisi

pH ve akım yoğunluğu parametreleri EK prosesi ile kirlenici gideriminde önemli rol oynamaktadır [9]. Atıksu içerisinde düşük pH değerlerinde Al^{3+} ve $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ gibi kationik monomerik Al türleri mevcuttur. pH değeri 4-9 aralığında $\text{Al}(\text{OH})_2$ gibi monomerik bileşikler, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ gibi polimerik bileşikler kompleks polimerizasyon ve/veya presipitasyon mekanizması ile çözünmez amorf $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ floğuna dönüşür. pH değeri 8'den büyük

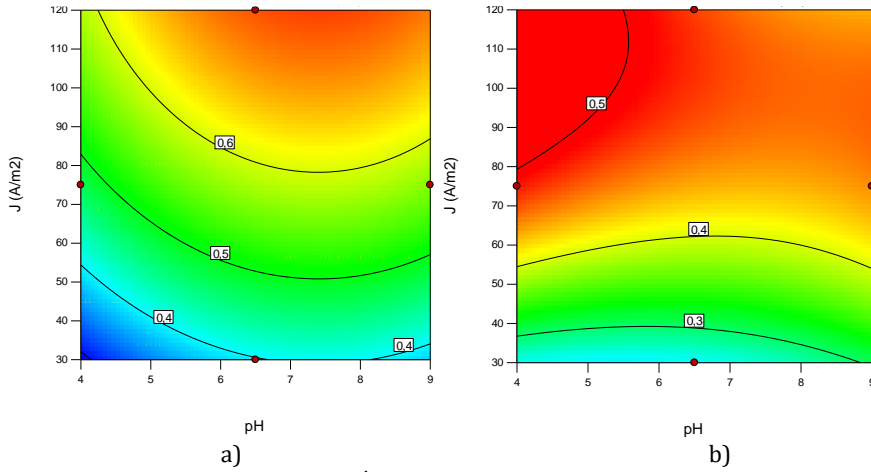
olması durumunda monomerik $\text{Al}(\text{OH})_4$ konsantrasyonu artar, çözünmez amorf $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ floğunun önemini azaltır [17].

pH değerinin nötral aralıkta olduğu, akım yoğunluğunun $100-120 \text{ A/m}^2$ olduğu şartlarda KOİ giderim verimi en yüksek seviyelere ulaşmıştır (Şekil 2a). Akım yoğunluğu atıksu ortamında salınan elektrot materyalini de artırarak süpürme etkisiyle kirlenicilerin daha kolay gitmesini sağlamaktadır. En yüksek TÇK giderim verimi akım yoğunluğunun $> 80-100 \text{ A/m}^2$ ve pH değerinin asidik olduğu şartlarda elde edilmiştir. TÇK giderim verimi açısından akım yoğunluğu oldukça geniş aralıklarda etkin giderim sağlamıştır (Şekil 2b).

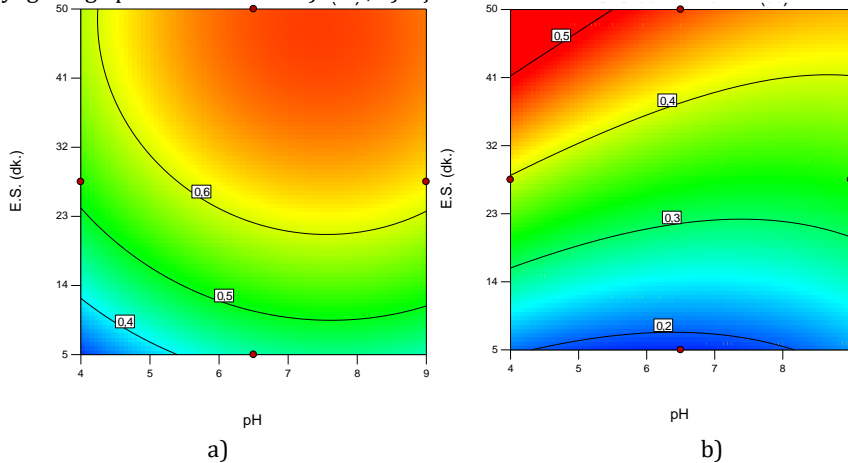
3.2. pH ve Elektroliz Süresi parametrelerinin KOİ ve TÇK Giderim Verimine Etkisi

pH ve elektroliz süresi parametrelerinin KOİ giderim verimine etkisine bakıldığında, elektroliz süresinin 25 dk.'nın üzerine ve geniş pH aralığında yüksek KOİ giderim verimleri elde edilmiştir (Şekil 3a).

TÇK giderim verimi açısından bakıldığında ise, elektroliz süresinin 30 dk.'nın üzerinde olduğu ve pH değerinin asidik şartlarda olduğu durumlarda elde edilmiştir. (Şekil 3b).



Şekil 2. pH ve Akım yoğunluğu parametrelerinin a) KOİ, b) TÇK Giderimi Verimine etkisi



Şekil 3. pH ve Elektroliz Süresi parametrelerinin a) KOİ, b) TÇK Giderimi Verimine etkisi J: Akım Yoğunluğu (A/m^2), E.S.: Elektroliz Süresi

3.3. Akım Yoğunluğu ve Elektroliz Süresi parametrelerinin KOİ ve TÇK Giderim Verimine Etkisi

Akım yoğunluğu Al iyonu çözünme hızını artırdığından EK prosesinde önemli bir parametredir [18]. Akım yoğunluğu, sadece koagülant dozunu değil, aynı zamanda oluşan kabarcık hızı ve boyutunu da etkilemektedir. Arıtım hızı akım yoğunluğunun yüksek olduğu değerlerde artmaktadır [8].

Çalışmada da akım yoğunluğunun $>90 \text{ A/m}^2$ olduğu ve elektroliz süresinin $>25 \text{ dk.}$ olduğu şartlarda KOİ giderim veriminin arttığı görülmektedir (Şekil 4a). Akım yoğunluğunun artması KOİ giderim verimini artırmıştır.

TÇK giderim verimi açısından en yüksek değerlere akım yoğunluğunun $70\text{-}120 \text{ A/m}^2$ ve elektroliz süresinin 35 dk olduğu şartlarda ulaşılmıştır (Şekil 4b).

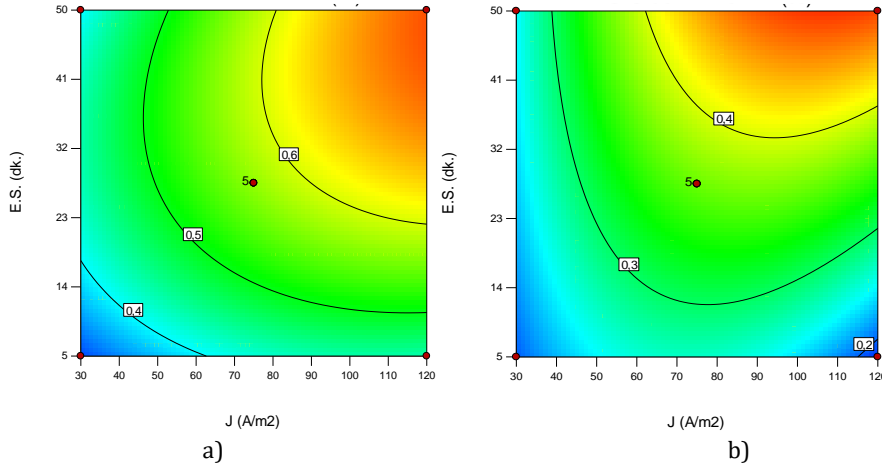
3.3. Akım Yoğunluğu ve Elektroliz Süresi parametrelerinin EK ve EO Proseslerinde Enerji Tüketimine Etkisi

EK ve EO gibi elektrokimyasal proseslerde akım yoğunluğu ve elektroliz süreleri enerji tüketimini

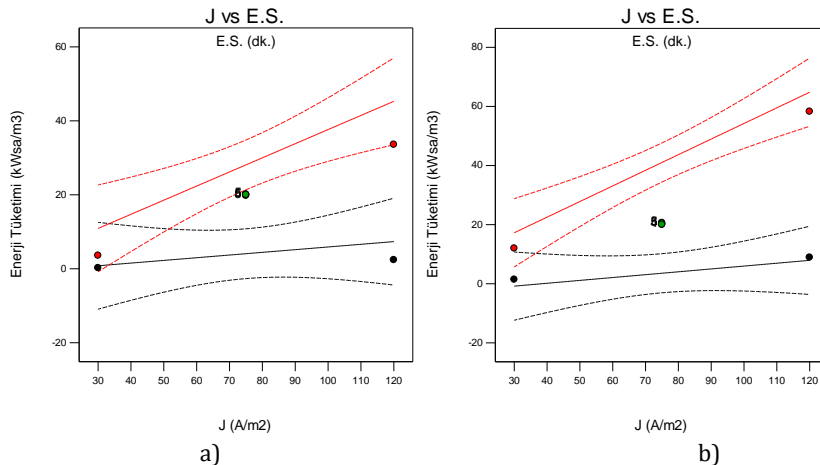
etkileyen en önemli parametrelerdir. EK prosesinde elektrik tüketimi $0,24\text{-}53,6 \text{ kWsa/m}^3$ aralığında değişim gösterirken, EO prosesinde ise $5,38\text{-}68,6 \text{ kWsa/m}^3$ olarak belirlenmiştir (Şekil 5a, b). Optimum koşullarda, EK ve EO prosesinin enerji tüketimi sırasıyla $14,26 \text{ kWsa/m}^3$ ve $22,71 \text{ kWsa/m}^3$ olarak tespit edilmiştir. EO prosesinin elektrik tüketimi EK prosesine göre yaklaşık % 60 daha fazladır.

4. Tartışma ve Sonuç

Çalışmada, Hibrit Elektrokoagülasyon ve Elektrooksidasyon prosesleri ile denim ürün işletme atıksularının arıtımında etkin işletme parametrelerinin KOİ ve TÇK madde giderimlerine etkileri incelenmiştir. pH değerinin 7,48, akım yoğunluğunun 120 A/m^2 ve elektroliz süresinin 49,5 dakika olduğu Al elektrotlarının kullanıldığı EK prosesi ile $>\% 65$ KOİ ve $\% 51$ TÇK giderimi sağlanmıştır. Aynı koşullarda, EO işleminin KOİ ve TÇK için Ti/SS elektrotları ile giderim verimlerinin sırasıyla $>\% 70$ ve $\% 45$ olduğu bulunmuştur. EK/EO hibrit prosesinin renk giderim verimi $\% 84$ (436 nm), $\% 93$ (525 nm), $\% 97$ (620 nm) olarak elde edilirken, EK ve EO prosesinin enerji tüketimleri sırasıyla $14,26 \text{ kWsa/m}^3$ ve $22,71 \text{ kWsa/m}^3$ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4. Akım Yoğunluğu ve Elektroliz Süresi parametrelerinin a) KOİ, b) TÇK Giderimi Verimine etkisi E.S. :Elektroliz Süresi, J: Akım Yoğunluğu (A/m^2)



Şekil 5. Enerji Tüketimi a) EK Prosesi, b) EOx Prosesi E.S. : Elektroliz Süresi, J: Akım Yoğunluğu (A/m^2)

EK prosesi sonrası elde edilen KOİ giderim verimleri % 60-65 düzeyinde iken, uygulanan aynı akım yoğunlukları ve elektroliz sürelerinde EK prosesi sonrası uygulanan EO prosesi toplam KOİ giderim verimini % 5-10 oranında artırmıştır. Ayrıca, EK prosesindeki enerji tüketimi EK prosesine göre yaklaşık % 60 daha yüksektir. Hibrit bir proses olarak EK/EO prosesi denim ürün üretim atıksularının arıtımında kullanımının uygun olduğu belirlenirken, atıksuyun tam anlamıyla geri kazanımı ile işletmede kullanımı açısından kısıtlı kalmıştır. Bu anlamda hibrit proses olarak EK prosesinin yanında daha kuvvetli oksitleyici özelliği olan elektrotların kullanıldığı EO prosesi uygulanmasının daha uygun olacağı düşünülmektedir.

İstatistiksel analiz sonucunda elde edilen R^2 ve R^2_{adj} değerlerinin 1'e yakın olması, deney sonuçlarının ve istatistiksel çıkarımların uyumlu olduğunu ve işlem parametrelerinin etkilerinin belirlenmesinde Box-Behnken istatistiksel tasarımının önemli olduğunu göstermiştir.

Kaynakça

- [1] Parekh, B. K. 1979. The role of hydrolyzed metal ions in charge reversal and flocculation phenomena, PhD Dissertation, Pennsylvania State University, State College, PA.
- [2] Joffe, L., Knieper, L. 2000. Electrocoagulation Technology Quickly Removes Barium, Total Suspended Solids from a Water-Retention Pond for Fractions of a Cent per Gallon, *Industrial Wastewater*, 5, 1-5.
- [3] Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., Cocke D.L. 2001. Electrocoagulation (EC) Science and Applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29-41.
- [4] Chen, X., Chen, G. C., Yue, P. L. 2000. Separation of Pollutants from Restaurant Wastewater by Electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 19(1-2), 65-76.
- [5] Chiang, L. C., Chang, J. E., We, T. C. 1995. Indirect Oxidation Effect in Electrochemical Oxidation Treatment of Landfill Leachate, *Water Res.* 29(2) 671-678.
- [6] Can, O. T., Gengeç, E., Kobya, M., 2019. TOC and COD Removal from Instant Coffee and Coffee Products Production Wastewater by Chemical Coagulation Assisted Electrooxidation, *Journal of Water Process Engineering*, 28, 28-35.
- [7] Rajkumar, D., Palanivelu, K. 2007. Electrochemical Treatment of Industrial Wastewater. *J Hazard Materials*, 113, 123-129.
- [8] García-García, A., Martínez-Miranda, V., Martínez-Cienfuegos, I. G., Almazán-Sánchez, P. T., Castañeda-Juárez, M., Linares-Hernández, I. 2015. *Industrial Wastewater Treatment by Electrocoagulation-Electrooxidation Processes Powered by Solar Cells*, *Fuel*, 149, 46-54.
- [9] Verma, A. K. 2017. Treatment of Textile Wastewaters by Electrocoagulation Employing Fe-Al Composite Electrode, *Journal of Water Process Engineering*, 20, 168-172.
- [10] Khorram, A. G., Fallah, N. 2018. Treatment of Textile Dyeing Factory Wastewater by Electrocoagulation with Low Sludge Settling Time: Optimization of Operating Parameters by RSM, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 635-642.
- [11] Kumar, A., Nidheesh, P. V., Kumar, M. S. 2018. Composite Wastewater Treatment by Aerated Electrocoagulation and Modified Peroxi-Coagulation Processes, *Chemosphere*, 205, 587-593.
- [12] Khemila, B., Merzouka, B., Chouder, A., Zidelkhir, R., Leclerc, J. P., Lopicqu, F. 2018. Removal of a Textile Dye Using Photovoltaic Electrocoagulation, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 7, 27-35.
- [13] Bilińska, L., Blusa, K., Gmurek, M., Ledakowicz, S. 2019. Coupling of Electrocoagulation and Ozone Treatment for Textile Wastewater Reuse, *Chemical Engineering Journal*, 358, 992-1001.
- [14] Tavangara, T., Jalali, K., Shahmirzadi, M. A. A., Karimi, M. 2019. Toward Real Textile Wastewater Treatment: Membrane Fouling Control and Effective Fractionation of Dyes/Inorganic Salts Using a Hybrid Electrocoagulation - Nanofiltration Process, *Separation and Purification Technology*, 216, 550-560.
- [15] GilPavas, E., Dobrosz-Gómez, I., Miguel-Ángel, Gómez-García, 2019. Optimization and Toxicity Assessment of a Combined Electrocoagulation, $H_2O_2/Fe^{2+}/UV$ and Activated Carbon Adsorption for Textile Wastewater Treatment, *Science of the Total Environment*, 651, 551-560.
- [16] APHA. 2005. American Public Health Association (APHA), *Standard Methods for the Examination of Waste and Wastewater (19th ed.)*, Washington.
- [17] Merzouk, K., Madani, A., 2010, Using Electrocoagulation-Electroflotation Technology to Treat Synthetic Solution and Textile Wastewater, Two Case Studies, *Desalination*, 250, 573-577.
- [18] Nawarkar, C. J., Salkar, V. D. 2019. Solar Powered Electrocoagulation System for Municipal Wastewater Treatment, *Fuel*, 237, 222-226.