



ELEKTROKİMYASAL ARITIM PROSESİ İLE KOT KUMAŞI ÜRETİM TESİSİ ATIKSUYUNDAN KOİ GİDERİMİ VE REGRESYON YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

Önder KAHRAMAN^{1,*} , İsmail ŞİMŞEK² 

^{1,2}Çevre Mühendisliği Bölümü, Aksaray Üniversitesi, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, tekstil atıksularının arıtımı ve deşarjında önemli bir parametre olan KOİ'nin (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) elektrokimyasal proses ile giderimi incelenmiştir. Bir kot kumaşı üretim tesisine ait gerçek atıksu farklı kombinasyonlarda demir, alüminyum, paslanmaz çelik ve grafit elektrotlar kullanılarak elektrokimyasal prosesle arıtılmıştır. Arıtma sürecinde etkili olan optimum işletme parametreleri belirlenmiştir.

Buna göre; en uygun elektrot çifti demir ve paslanmaz çelik, pH 8,27, akım 0,8 A, akım yoğunluğu 20,78 mA/cm², iletkenlik değeri 4000 µs/cm, elektrotlar arası mesafe 1 cm ve 15 dakika işletim süresi optimum koşullar olarak belirlenmiştir. Bu şartlar altında %91,25 KOİ giderim verimi elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar IBM SPSS Version 24 programı kullanılarak doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile modellenmiştir. pH, süre, akım, voltaj, elektrotlar arası mesafe ve iletkenlik parametrelerindeki değişime bağlı olarak KOİ giderim verimi matematiksel olarak ifade edilmiştir. Böylece, deneysel bir çalışma yapılmadan elektrokimyasal metotlar kullanarak benzer özellikteki tekstil atıksularından KOİ'nin hangi oranda giderilebileceği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Tekstil atıksuyu, Elektrokimyasal arıtım, Demir elektrot, Paslanmaz çelik elektrot, Doğrusal olmayan regresyon

COD REMOVAL FROM DENIM PRODUCTION PLANT WASTEWATER BY ELECTROCHEMICAL TREATMENT PROCESS AND OPTIMIZATION BY REGRESSION METHOD

ABSTRACT

In this study, the removal of COD (Chemical Oxygen Demand), which is an essential parameter in the treatment and discharge of textile wastewater by electrochemical process was investigated. A denim fabrication plant wastewater was treated using iron, aluminum, stainless steel and graphite electrodes in different combinations. The effective optimum operating parameters were determined at the treatment process.

The optimum operating parameters were determined as; iron and stainless steel electrode pairs, pH= 8.27, current = 0.8 A, current density= 20.78 mA/cm², conductivity= 4000 µs/cm, distance between electrodes= 1cm and operating time= 15 minutes. The COD removal efficiency was obtained 91.25% at these conditions. The experimental results were modeled by a non-linear regression method using IBM SPSS Version 24 program. The COD removal efficiency was conceived mathematically according to the variations of pH, time, current, voltage, the distance between electrodes and conductivity parameters. As a result, a COD removal efficiency can be determined by using electrochemical methods at similar textile wastewater without an experimental study.

Keywords: Textile wastewater, Electrochemical treatment, Iron electrode, Stainless steel electrode, Nonlinear regression

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: okahraman1878@gmail.com

Geliş / Recieved: 23.07.2019 Kabul / Accepted: 10.12.2019 doi: 10.28948/ngumuh.595642

1. GİRİŞ

Tekstil endüstrisi hammaddesi olan iplikler, dokuma, örme veya başka yöntemler kullanılarak kumaş, triko, halı gibi tekstil ürünleri haline getirilmektedir. Endüstrinin başlıca prosesleri, haşillama, haşıl sökme, ağartma, merserize etme, boyama, baskı ve aprelemedir [1]. Tekstil endüstrisi atıksu hacmi ve içeriği bakımından diğer endüstri kolları ile karşılaştırıldığında daha fazla kirletici içerir [2].

Tekstil endüstrisi üretim sürecinde güçlü asitler, güçlü alkaliler, inorganik klorlu bileşikler, sodyum hipoklorit, boyarmadde gibi organik bileşikler, ağartıcılar, apre maddeleri, nişasta, sertleştirme maddesi, yüzey aktif kimyasallar, ıslatıcı ve yayıcı maddeler ve metal tuzları gibi farklı kimyasallar kullanılır. Baskı ve boyama ünitelerinden kaynaklanan renk açısından zengin atıksular, reaktif boya ve kimyasal kalıntıları, kompleks bileşenler, birçok aerosol, bozunması zor maddelerle birlikte yüksek KOİ ve BOİ içeriğine sahiptir. Bu atıksular alıcı ortamlarda ötrofikasyon ve bazı organik boyalardan kaynaklı toksisite ve karsinojenite gibi çevresel sorunlara yol açabilirler [3].

Tekstil atıksularının farklı boyarmadde ve kimyasal kirleticileri içermesi, biyolojik arıtmadaki zorluklar ve istenen deşarj limitlerinin sağlanamaması atıksu bileşenlerinin iyi karakterize edilmesini gerektirmektedir. Atıksu arıtımında kümülatif bir parametre olması ve BOİ'ye göre çok daha kolay belirlenebilmesi KOİ'nin ölçümünü öne plana çıkarmıştır [4].

Genel olarak tekstil atıksuları, KOİ içeriği ve renk yoğunluklarına göre yüksek, orta ve düşük şiddette atıksular olmak üzere 3 sınıfa ayrılabilir: 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 [5].

Tekstil endüstrisi atıksularının arıtımında çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler kullanılmaktadır. Fiziksel arıtım yöntemleri; adsorbsiyon, membran sistemleri, koagülasyon-flokülasyon. Kimyasal arıtım yöntemleri; ozonlama, kimyasal oksidasyon, kimyasal indirgeme, elektrokimyasal yöntemdir. İleri düzeyde arıtılması amacı ile kullanılan fizikokimyasal yöntemler ise adsorpsiyon, iyon değiştirme, ekstraksiyon, ters osmoz ve elektrokimyasal arıtmadır [6].

Elektrokimyasal arıtım yöntemleri, kolay kontrol edilebilmeleri, kısa sürede etkin verim elde edilebilirliği, işletme kolaylığı sağlaması, basit ve düşük maliyetli ekipmanlardan oluşması, kimyasal madde kullanımlarının sınırlı düzeyde olması ve daha az çamur oluşması gibi özelliklerinden dolayı, su ve atıksu arıtımında gün geçtikçe kullanımları yaygınlaşmaktadır [7].

Elektrokimyasal reaksiyonda yük, elektrot ile iletken sıvı içindeki reaktif türler arasındaki ara yüzeyde transfer olmaktadır. Reaktör anot, katot, iletken elektrolit ve güç kaynağından oluşmaktadır. Katotta yük reaksiyona giren türlere geçerek oksidasyon durumunda azalmaya neden olmaktadır. Anotta ise yük reaktif türlerden elektroda geçerek oksidasyon durumunu artırmaktadır. Oksidasyon durumundaki değişmeler türlerin kimyasal özelliklerinin ve formlarının değişmesine yol açmaktadır [8].

Elektrokimyasal atıksu arıtımında en çok elektrokoagülasyon (EC), elektrooksidasyon (EOx) ve elektroflotasyon (EF) prosesleri kullanılmaktadır. Bu arıtım yöntemleri birlikte veya ayrı olarak bir sistem içerisinde olabilmektedir. Atıksuda bulunan kirleticilerin bu prosesler ile okside olması, adsorbe olması veya reaktör yüzeyinde birikerek ayrılması sağlanmaktadır [9].

Elektrokimyasal arıtım proseslerini etkileyen faktörler arasında elektrot malzemesi, pH, akım yoğunluğu, arıtım süresi, sıcaklık, iletkenlik, elektrotlar arası mesafe ve elektrotların bağlantı şekli sayılabilir [10].

Bu çalışmada, kot kumaşı üretim tesis atıksularının arıtımında ve izlenmesinde önemli bir parametre olan Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ); demir, alüminyum, çelik ve grafit elektrotlar kullanarak elektrokimyasal proses ile arıtımı incelenmiştir. Arıtılan atıksuyun KOİ giderim verimine etki eden işletme parametreleri ile elektrot tüketim ve enerji maliyetleri dikkate alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Elde edilen deneysel sonuçlar IBM SPSS Version 24 programı kullanılarak doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile modellenerek pH, süre, akım, voltaj, elektrotlar arası mesafe ve iletkenlik parametrelerindeki değişime bağlı olarak KOİ giderim verimi matematiksel olarak ifade edilmiştir. Böylece elektrokimyasal metotlar kullanarak kot kumaşı üretim tesisi atıksuyundan KOİ'nin hangi oranda arıtılabileceği ortaya konulmuştur.

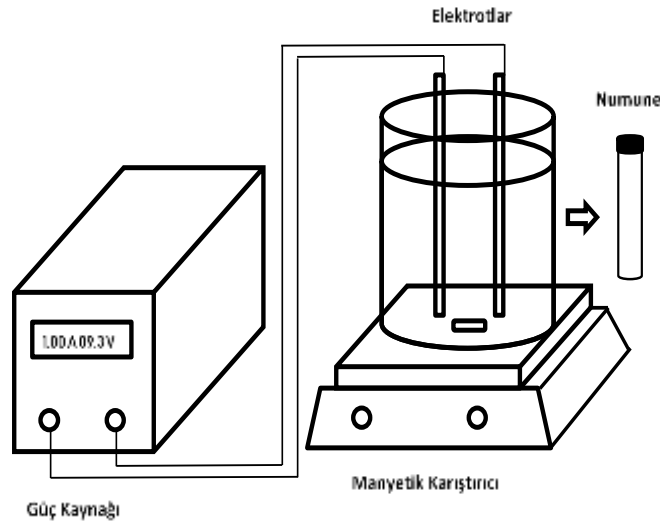
2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada Kayseri Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren bir kot kumaşı üretim tesisine ait atıksuyun elektrokimyasal metot kullanarak KOİ giderim verimi incelenmiştir. Atıksu karakterizasyonunun belirlenmesi sırasında KOİ (SM 5220 C), BOİ (SM 5210 B), Toplam Azot (EN ISO 12260), Amonyum NH₄-H (SM 4500), Toplam Krom (SM 3500-Cr C), Fosfat PO₄-P (SM 4500 P), Sülfür (SM 4500 S⁻² D), AKM (SM 2540 B), UAKM (SM 2540 C), Bulanıklık (SM 2130 B), iletkenlik (SM 2510 B), pH (SM 4500 H⁺ B), Renk (SM 2120 C) analizleri yapılmıştır [11]. Deneysel çalışmada kullanılan kot kumaşı üretim tesisi atıksu karakterizasyonu Tablo 1'de verilmiştir.

ELEKTROKİMYASAL ARITIM PROSESİ İLE KOT KUMAŞI ÜRETİM TESİSİ ATIKSUYUNDAN KOİ GİDERİMİ VE REGRESYON YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU**Tablo 1.** Deneysel çalışmada kullanılan atıksu karakterizasyonu

Parametreler	Değerler
KOİ (mg/L)	714,7
BOİ(mg/L)	285,0
Amonyum NH ₄ -N (mg/L)	2,1
Toplam Azot (mg/L)	7,9
Klor (mg/L)	1,8
Toplam Krom (mg/L)	0,06
Fosfat PO ₄ -P (mg/L)	14,5
Sülfür(S ⁻²) (mg/L)	0,3
UAKM (mg/L)	96,8
AKM (mg/L)	131,8
Bulanıklık (NTU)	14,6
İletkenlik (µS/cm)	4080
pH	8,27
Renk (Pt-Co)	1172

Elektrokimyasal arıtım deneyleri Şekil 1'de gösterilen deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Akım ve voltaj kontrolü dijital bir güç kaynağı (Zhaoxin RXN-305D) ile sağlanmıştır. Karıştırma manyetik bir karıştırıcı (WiseStir MSH- 20A) ile gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal arıtım deneylerinde 1000 ml hacimli 14,5 x 10,5 cm ebatlarında cam reaktör kullanılmıştır. Reaktörde her bir deneyde 500 mL atıksu ve monopolar seri bağlı şekilde 1 anot ve 1 katot olmak üzere 2 elektrot kullanılmıştır. Elektrotlar 10 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Anot ve Katotta boyutları 7x10 cm olup 7x5,5 cm'lik kısmı çözeltiliye batırılmış 38,5 cm² aktif yüzey alanına sahip demir, alüminyum, grafit ve paslanmaz çelik plakalar kullanılmıştır.

**Şekil 1.** Elektrokimyasal deney düzeneği

Elektrotlar, elektrokimyasal reaktör içerisine yerleştirildikten sonra 500 mL kot kumaşı üretim tesisi atıksuyu ile doldurulmuştur. İstenilen voltaj ve akım güç kaynağı ile sağlanarak belirlenen süreler sonunda alınan numunelerde gerekli analizler yapılmıştır. Her çalışma öncesinde elektrotlar üzerinde biriken kir ve pas kalıntılarını gidermek amacıyla önceden hazırlanan temizleme çözeltisi içerisinde (0,25 M H₂SO₄) 5 dakika bekletilmiştir [12]. Temizleme sonrası elektrotlar 100°C

Ö. Kahraman, İ. Şimşek

ettüvede kurutulmuş, desikatörde sabit tartıma hazır hale getirilerek bir sonraki deney düzeneği için hazırlanmıştır. Deneylerin yapıışında WTW CR 4200 marka termoreaktör, pH ile iletkenlik ölçümlerinde HACH HQ440D marka multimetre, elektrotların tartımında AND Gf-600 marka hassas terazi, renk ölçümünde spektrofotometre (TETRA T80+ UV/VIS) kullanılmıştır. pH ayarlaması için 0,1 N NaOH ve 0,1 N HCl çözeltileri kullanılmıştır. İletkenlik ayarlaması NaCl ile yapılmıştır.

Arıtma verimi hesaplamasında;

$$C_{KOI}(\%) = ((C_0 - C_e)/C_0) \times 100 \quad (1)$$

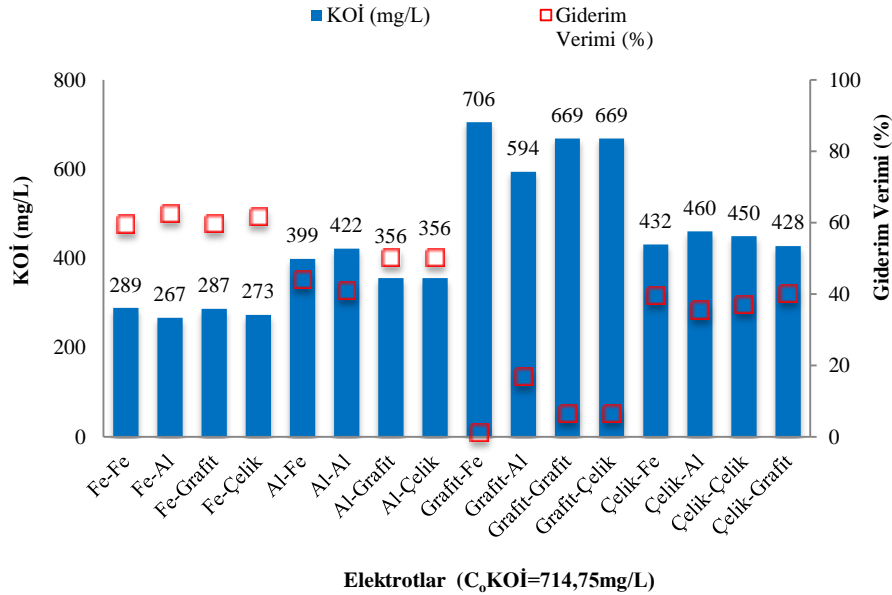
Eşitliği kullanılmıştır. Burada CKOI (%): Yüzde olarak KOİ giderim verimini, C₀: Başlangıç KOİ konsantrasyonunu (mg/L), C_e: Arıtım sonrası KOİ konsantrasyonunu (mg/L) ifade etmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Elektrot Materyallerinin Giderim Verimine Etkisi

Elektrokimyasal arıtım verimini etkileyen en önemli parametrelerin başında elektrot tipi gelmektedir. Elektrot seçimi hem elektrokimyasal arıtım türünü belirlemede hem de kirletici giderim verimini de doğrudan etkilemektedir. Elektrokoagülasyon arıtım prosesinde seçilen elektrot türleri akım ile birlikte ortamda çözünürken, elektrooksidasyon arıtım prosesinde OH⁻ radikalleri oluşturmakta ve herhangi bir çözünme söz konusu olmamaktadır. Elektrokoagülasyon yöntemi için demir ve alüminyum elektrotlar yaygın şekilde kullanılırken elektrooksidasyonda bu elektrotların yerini, tıtan, platin, rutenyum, paslanmaz çelik vb. elektrotlar kullanılmaktadır [13].

DeneySEL çalışmalarda kot kumaşı üretim tesisi atıksuyunun elektrokimyasal arıtımına elektrot materyal türünün etkisini belirlemek amacıyla atıksuyun ham pH değerinde (8,27), 1 amper akımda, 25,97 mA/cm² akım yoğunluğunda ve 15 dakika arıtım süresinde demir, alüminyum, paslanmaz çelik ve grafit elektrotlar hem anot hem de katotta 16 farklı kombinasyonda kullanılmıştır. Elektrot türünün elektrokimyasal arıtım sürecine etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar sonucu Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Elektrot materyallerinin KOİ giderim verimine etkisi

Şekil 2'de görüldüğü üzere Demir-Demir, Demir-Alüminyum, Demir-Grafit, Demir-Çelik materyallerinin anot ve katotta kullanılarak yapılan çalışmalarda atıksuyun giriş KOİ değeri olan 714,75 mg/L değerinin sırasıyla 289, 267, 287 ve 273 mg/L değerlerine düştüğü ve giderim verimlerinin sırasıyla %59,58, %62,69, %59,89 ve %61,76 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Alüminyum-Demir, Alüminyum-Alüminyum, Alüminyum-Çelik, Alüminyum-Grafit materyallerinin anot ve katotta

ELEKTROKİMYASAL ARITIM PROSESİ İLE KOT KUMAŞI ÜRETİM TESİSİ ATIKSUYUNDAN KOİ GİDERİMİ VE REGRESYON YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

kullanılarak yapılan çalışmalarda atıksuyun giriş KOİ değeri olan 714,75 mg/L değerinin sırasıyla 399, 422, 356 ve 356 mg/L değerlerine düşmüş ve giderim verimleri %44,19, %40,93, %50,18 ve %50,18 olarak gerçekleşmiştir.

Grafit-Demir, Grafit -Alüminyum, Grafit -Çelik, Grafit -Grafit materyallerinin anot ve katotta kullanılarak yapılan çalışmalarda atıksuyun giriş KOİ değeri olan 714,75 mg/L değerinin sırasıyla 706, 594, 669 ve 669 mg/L değerlerine düştüğü ve giderim verimlerinin sırasıyla %1,36, %16,83, %6,43 ve %6,43 olarak ölçülmüştür. Çelik-demir, çelik-alüminyum, çelik-grafit, çelik-çelik materyallerinin anot ve katotta kullanılarak yapılan çalışmalarda atıksuyun KOİ değeri sırasıyla 432, 460, 450 ve 428 mg/L değerlerine düşmüş ve KOİ giderim verimleri %39,63, %35,57, %37,05 ve %40,13 olarak gerçekleşmiştir.

Elektrot materyallerinin KOİ giderim verimine etkisinin belirlendiği çalışmanın bu kısmında anotta demirin kullanıldığı serilerde yüksek KOİ giderim verimleri elde edilmiştir. Katotta ise en alüminyumun kullanıldığı Demir-Alüminyum elektrot çiftinde en yüksek KOİ giderim verimi elde edilmesine rağmen Demir-Çelik elektrot çiftiyle arasında çok fazla verim farkı olmaması ve paslanmaz çeliğin alüminyuma göre korozyona daha dayanıklı olması [14] nedeniyle kot kumaşı üretim tesisi atıksuyunun elektrokimyasal yöntemlerle arıtımında Demir- Çelik en uygun anot ve katot elektrotu olarak belirlenmiş ve deneylere bu elektrot çifti ile devam edilmiştir. Ayrıca Tablo 2' de görüldüğü gibi yapılan çalışmalarda genellikle demir ve alüminyum elektrotlar kullanılmasına rağmen demir ve çeliğin birlikte kullanılmaması bu çalışmanın özgünlüğünü artırmaktadır.

Anotta demir elektrotun kullanılmasıyla birlikte Fe^{+2} iyonları serbest kalırken katotta da hidrojen üretimi meydana gelir.

Anotta:



Katotta:



Suda serbest kalan demir iyonları $Fe(OH)_2^+$, $Fe(OH)_4^-$, $Fe(OH)_6^-$, $Fe(OH)_2^+$, $FeOH^{2+}$, $Fe_2(OH)_2^{4+}$, $Fe(H_2O)_2^+$, $Fe(H_2O)_5OH^{2+}$ ve $Fe(H_2O)_4(OH)_2^+$ gibi monomerik ve polimerik demir bileşikler oluştururlar. Atıksuda bulunan kolloidal partiküller hidroksit iyonlarının içerisinde tutularak nötrale olurlar ve ağırlıkları nedeniyle çöklerler. Sularda yüksek KOİ'ye sebep olan organik kirleticilerde aynı prensiple giderilirler [15].

Tablo 2. Bu çalışmanın önceki çalışmalarla karşılaştırılması

Atıksu	Kirletici	Elektrot Çifti	pH	Akım	Süre (dk.)	Mesafe (mm)	İletkenlik (μ s/cm)	Verim (%)	Referans
Tekstil	Renk	Fe-Al	8,00	20 A/m ²	80	30	28000	>99	[16]
Tekstil	KOİ	Al-Al	7,80	10,4 mA/cm ²	60	15	2100	79	[17]
Tekstil	Bulanıklık	Al-Al	4,57	4 mA/cm ²	10	10	1455	96	[18]
Gıda	KOİ	Al-Fe	5,50	0,8A	10	20	2000	66	[19]
Gıda	Toplam Fenol	Al-Fe	4,84	100 A/m ²	293	60	4400	56,4	[20]
Hastane	TOK	Ss-Ss	7,80	2,68 mA/cm ²	20	-	1085	99,89	[21]
Hastane	Siprofloksasin	Al-Al	7,78	12,5 mA/cm ²	20	10	-	88,57	[22]
Metal	KOİ	Fe-Fe	5,00	30 mA/cm ²	30	30	17140	76,2	[23]
Gıda	KOİ	Al-Al	7,00	1,83 mA/cm ²	30	-	3500	95	[24]
Tekstil	Renk KOİ	Fe-Fe	3,00	0,88 mA/cm ²	180	20	4150	93 89	[25]
Mezbaha	Bulanıklık	Fe-Fe	2,00	2,5 A	30	10	522	93,69	[26]
Sızıntı Suyu	Renk KOİ	Fe-Fe	7,73	-	-	11,6	-	82,7 45,1	[27]
Deri	KOİ AKM	Fe-Fe	3,31	53,72 mA/cm ²	5	-	-	54,8 86	[28]
Bu Çalışma (Tekstil)	KOİ	Fe-Ss	8,27	0,8 A (20,78 mA/cm ²)	15	10	4000	91,25	-

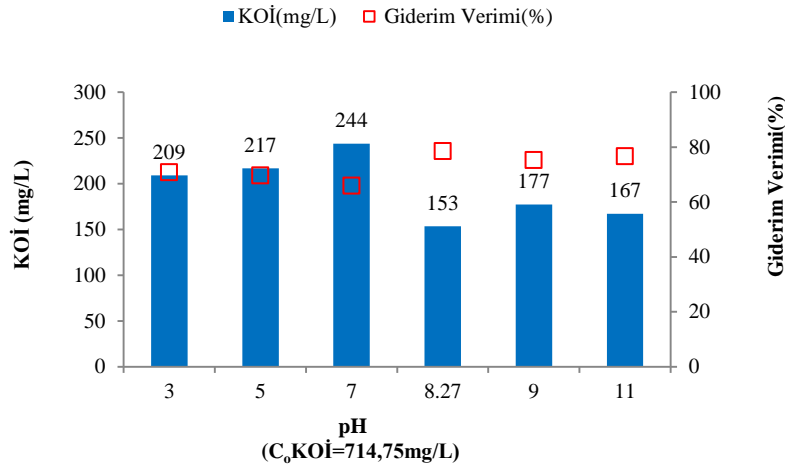
3.2. pH'in Giderim Verimine Etkisi

pH, elektrooksidasyon arıtımda hidroksil radikallerinin oluşumunda ve elektrokoagülasyon arıtım prosesinde metal hidroksitlerin oluşumunda direkt etki etmektedir. Koagülantlar belli pH değerleri dışında oluşmaz ve hidroksil radikallerinin oluşum yüzdesi de büyük oranda azalır. Proseslerin sonucunda pH'nin değişimi söz konusu olmaktadır. Elektrooksidasyonun baskın olduğu durumlarda pH giderek düşer, fakat elektrokoagülasyon uygulamalarında pH'nin giderek arttığı gözlenmektedir [29].

Katotta oluşan OH⁻ iyonları anotta çözünen Fe iyonları ile tepkimeye girerek uygun elektrotun belirlenmesi kısmında söz edilen demir-hidroksit bileşiklerini oluşturmaktadır [15].

Çalışmanın bu aşamasında başlangıç pH'nin etkisini belirlemek için pH aralığı 3-11 olarak seçilmiştir. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda da optimum pH değerleri oldukça geniş bir aralıkta değişmektedir (Tablo 2). Demir-paslanmaz çelik elektrotları monopolar-seri olarak 1 Amper akım değerinde 25,97 mA/cm² akım yoğunluğunda ve 15 dakika arıtım süresince pH değişikliklerine bağlı olarak kesikli olarak elektrokimyasal deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda pH'ı ayarlamak için 0,1 N HCl ve 0,1 N NaOH çözeltileri kullanılmıştır. Elektrokimyasal arıtım üzerine pH'nin etkisinin incelendiği deneysel çalışmaların sonucu Şekil 3'te verilmiştir.

Şekil 3 incelendiğinde ise KOİ giderimlerinin tüm pH'larda %60 üzerinde gerçekleştiği görülmektedir. pH çalışmaları 3, 5, 7, 8,27(hamsu), 9 ve 11 pH değerlerinde sırasıyla 209, 217, 244, 153, 177 ve 167 mg/L çıkış KOİ değerleriyle birlikte %70,76, %69,67, %65,88, %78,54, %75,21 ve %76,64 giderim gerçekleşmiştir.



Şekil 3. pH'in KOİ giderim verimine etkisi

Elde edilen sonuçlara göre anotta kütle kayıplarının düşük pH değerlerinde daha fazla olduğu bunun elektrot kullanım süresini kısalttığı ve elektrot maliyetinde dolayısıyla işletme maliyetlerinde artışa neden olduğu görülmüştür. Ayrıca 3- 11 arasında değişen başlangıç pH'larının, oluşan hidroksitlerin etkisiyle arıtım sonrasında sırasıyla 7,10, 7,54, 8,22, 10,19, 10,47 ve 11,28 a kadar yükseldiği gözlenmiştir. KOİ giderim verimleri değerlendirildiğinde %78,54 KOİ giderimi ile başlangıçta herhangi bir kimyasal ilavesi söz konusu olmayan atıksuyun ham pH değeri 8,27 optimum pH olarak belirlenmiştir. Su kirliliği kontrol yönetmeliği'nin tekstil sanayii ile ilgili Tablo 10.1 de belirtilen pH sınır değerinin 6- 9 aralığında olması istenmiştir. Prosesle etki eden diğer koşullarla pH'ta yaşanacak değişimin sınır değerlerin dışında kalması durumunda gerekli pH ayarlaması yapılmalıdır.

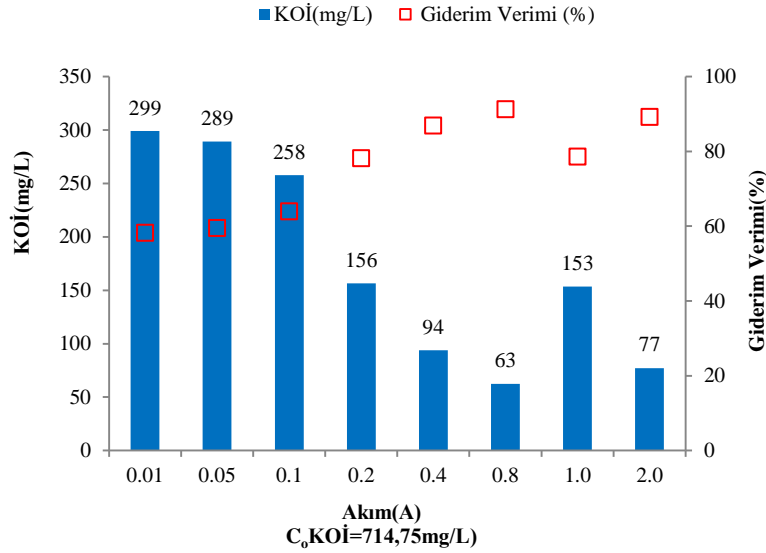
3.3. Akımın Giderim Verimine Etkisi

Elektrokimyasal proseslerde gerekenden fazla akım yoğunluğu uygulandığında maliyet artmaktadır. Elektrokoagülasyon yöntemi uygulanıyor ise akım yoğunluğuna bağlı olarak çamur oluşumunda da artış gözlenmektedir. Bunların yanı sıra arıtmada yüksek akım yoğunluğu uygulanırsa daha kısa süreli bir arıtım gerçekleşmektedir [30].

ELEKTROKİMYASAL ARITIM PROSESİ İLE KOT KUMAŞI ÜRETİM TESİSİ ATIKSUYUNDAN KOİ GİDERİMİ VE REGRESYON YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

Ayrıca elektrokimyasal arıtım prosesinde oluşan iyonların hareketleri, koagülant üretim hızı, üretilen gaz kabarcıklarının hız ve büyüklüğü ile buna bağlı flokların oluşumu gibi etkilerinin yanında doğrudan işletme maliyetine etkisi nedeniyle akım ve akım yoğunluğu dikkate alınması gereken önemli parametrelerden bir tanesidir [31, 32, 33].

Akım yoğunluğunun giderim verimine etkisini belirlemek amacıyla pH 8,27' de 15 dakika boyunca 0,01-2 Amper ve 0,26 - 51,95 mA/cm² aralığında akım yoğunluğu uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4'te verilmiştir. Buna göre sırasıyla %58,17, %59,52, %63,93, %78,13, %86,88, %91,25, %78,54 ve %89,20 arıtım verimleri hesaplanmıştır.



Şekil 4. Akımın KOİ giderim verimine etkisi

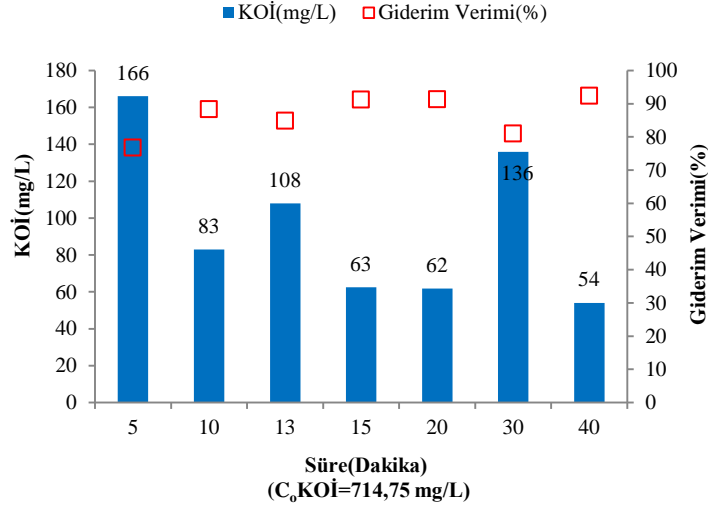
Akım ve akım yoğunluğundaki artış reaktöre uygulanan potansiyel farkta artışa sebep olmaktadır. Potansiyel farktaki bu artış da enerji tüketiminde artışa neden olmaktadır. Bununla birlikte Faraday Yasası'na göre akımın dolayısıyla akım yoğunluğunun artması elektrot tüketimini de arttırmaktadır [34, 35].

Sonuçta akım ve akım yoğunluğunda meydana gelen artış hem elektrot hem de enerji maliyetini arttırmaya devam ederken KOİ giderim veriminde 0,8 A den sonra azalmaya neden olmuştur. Optimum giderim verimi %91,25 ile 0,8A (Akım yoğunluğu 20,78 mA/cm²) olarak belirlenmiştir. Tablo 2'de de görüldüğü gibi belirlenen optimum akım yoğunluğu, daha önce yapılmış benzer çalışmalardaki akım yoğunluğu aralığındadır.

3.4. Sürenin Giderim Verimine Etkisi

Elektrokimyasal arıtım prosesinde yeterli miktarda ve uygun flokların oluşması arıtım süresine bağlı olarak gerçekleşmektedir [36]. Arıtım süresinin optimum süreden uzun olması işletme maliyetinde artış, çamur ve köpük oluşumu gibi işletme problemleri meydana gelmektedir [37].

Elektrokimyasal arıtım prosesleri üzerine işletme süresinin etkisinin belirlenmesi için kot kumaşı üretim tesisi atıksuyu 8,27 pH değerinde ve 0,8 Amper akım şiddetinde kesikli olarak 5, 10, 13, 15, 20, 30, 40'nci dakikalarda numuneler alınarak KOİ giderim verimleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen KOİ giderim verimleri Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Sürenin KOİ giderim verimine etkisi

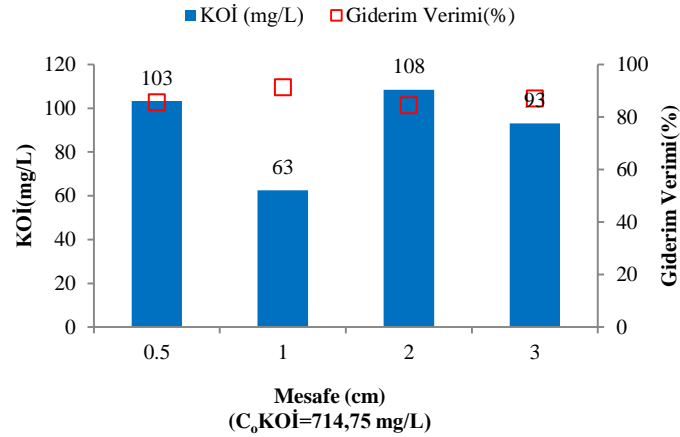
Buna göre 714,75 mg/L başlangıç KOİ değeri, 5.dakika sonunda 166 mg/L'ye düşmüş ve %76 civarında KOİ giderim verimi elde edilmiştir. KOİ giderimi zamanla artış göstermiştir. 10.dakika ve sonrasında %85'in üzerinde KOİ giderim verimi elde edildiği, 15.dakikada ise KOİ giderim veriminin %91,25 olduğu görülmektedir.

İşletme süresinin enerji maliyetine, artım sonrasında meydana gelen çamur ve köpük oluşumuna doğrudan etkisi göz önüne alındığında optimum süre olarak KOİ giderim veriminin %91,25 olduğu 15. dakika seçilmiştir. Delil vd. (2019) ve Varank vd. (2016)'nin yaptığı çalışmalar incelendiğinde de uygulanan akım yoğunluğu yüksek ise reaksiyon süresi kısa, akım yoğunluğu düşük ise reaksiyon süresinin uzun olduğu görülmektedir [25, 28].

3.5. Elektrotlar Arası Mesafenin Giderim Verimine Etkisi

Elektrotlar arası mesafenin ne çok az, ne de çok fazla olması istenmektedir. Elektrotlar arası mesafe artırıldığında potansiyel fark, buna bağlı olarak elektrik tüketimi artmakta bu da enerji maliyetlerinin artışına sebep olmaktadır. Elektrotlar arası mesafenin çok yakın olması durumunda flok oluşumu ve oluşan flokların adsorplama yetenekleri azalmaktadır. Elektrotlar arası mesafenin çok uzak olması durumunda ise potansiyel farktaki artışa bağlı olarak elektrokimyasal prosesi ekonomik bir çözüm olmaktan çıkarmaktadır [38].

Elektrotlar arası mesafenin belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmalarda 8,27 pH'da, 0,8 A akım şiddetinde ve 15 dakika arıtım süresinde elektrotlar arası mesafe 0,5 cm, 1 cm, 2 cm ve 3 cm ayarlanarak KOİ giderim verimleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen KOİ giderim verimleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Elektrotlar arası mesafenin KOİ giderim verimine etkisi

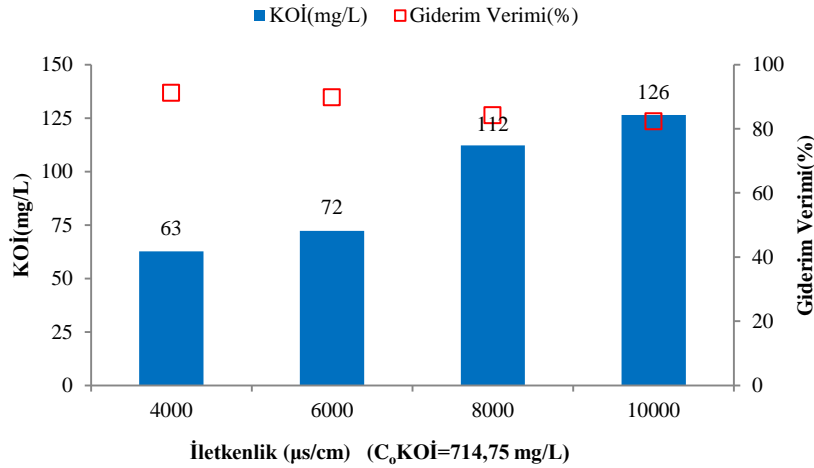
ELEKTROKİMYASAL ARITIM PROSESİ İLE KOT KUMAŞI ÜRETİM TESİSİ ATIKSUYUNDAN KOİ GİDERİMİ VE REGRESYON YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

Şekil 6 incelendiğinde bütün elektrotlar arası mesafe çalışmalarında verim %85'in üzerinde gerçekleştirmiştir. Elektrotlar arası mesafe 1 cm olarak belirlendiğinde başlangıç KOİ değeri 714,75 mg/L'nin 63 mg/L düştüğü ve giderim veriminin %91,25 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Elektrotlar arası mesafe arttıkça potansiyel farkın arttığı bunun da maliyeti artırmasından dolayı 8,27 pH'da, 0,8 Amper akım şiddetinde ve 15 dakika arıtım sürecinde optimum elektrotlar arası mesafe 1 cm olarak belirlenmiştir. Naje vd. (2016), Ahmadzadeh vd. (2017), Nwabanne ve Obi (2017) yaptıkları çalışmalarda elektrotlar arası mesafeyi 10 mm olarak kullanmışlardır [18, 22, 26].

3.6. İletkenliğin Giderim Verimine Etkisi

Elektrokimyasal prosesler için klorür reaktantının bir kaynağı olarak yüksek iletkenlik ve çözünürlük, düşük klorür maliyeti ve aktif klorun güçlü oksitleme özellikleri nedeniyle destekleyici elektrolit olarak genellikle sodyum klorür kullanılmaktadır [39]. Bu elektrolit tekstil endüstrisi boyama prosesinde yaygın olarak kullanıldığından atıksularında doğal olarak bulunmaktadır [40]. Klorür iyonları ortamda bulunan HCO_3^- , SO_4^{2-} gibi anyonların olumsuz etkilerini azaltmaktadır. Karbonat ve sülfat iyonları elektrot yüzeyinde izole bir tabaka oluşturacak şekilde Ca^{2+} veya Mg^{2+} iyonlarının çökmesine neden olmaktadır. Oluşan bu tabaka elektrotlar arası potansiyeli arttırmakta ve akım verimini azaltmaktadır. Su ve atıksu arıtımında elektrokimyasal proseslerin verimli bir şekilde yürütülebilmesi için ortamda bulunan anyonların %20'sinin klorür iyonu olması önerilmektedir. Ayrıca sodyum klorür ilavesi iletkenliği artırdığı için güç tüketimini azaltmaktadır [31].

İletkenliğin etkisinin belirlenmesi amacıyla deneylerde anodu demir elektrot, katodu paslanmaz çelik elektrot olarak, pH 8,27'de, 0,8 Amper akım şiddetinde, 15 dakika ve elektrotlara arası mesafe 1 cm olacak şekilde NaCl ilave edilerek kesikli olarak atıksuyun iletkenlik değerleri 4080 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (≈ 4000 ; ham atıksu), 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 8000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve 10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ' ye ayarlanarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen KOİ giderim verimleri Şekil 7'de verilmiştir.

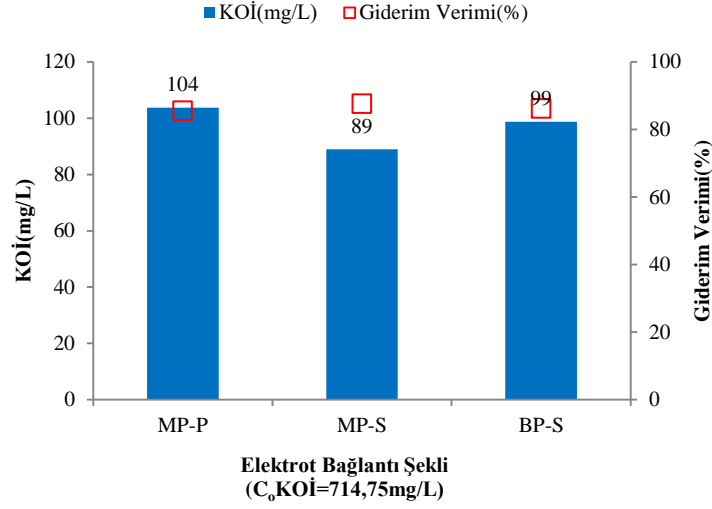


Şekil 7. İletkenliğin KOİ giderim verimine etkisi

Şekil 7 incelendiğinde ise demir ve çelik elektrotlarda, pH 8,27'de 0,8 Amper akım şiddetinde, 15 dakika boyunca ve elektrotlar arası 1 cm olarak ayarlandığında KOİ giderim veriminin %91,25 ile 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'de en yüksek değerine ulaştığı ve bu iletkenlik değerinden sonra verimin kısmi bir düşüş gösterdiği görülmektedir. Yapılan iletkenlik çalışması sonucunda ham atıksuyun kendi iletkenlik değeri olan 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'de en yüksek KOİ giderim verimlerinin elde edildiği görülmektedir. Delil vd. (2019)'de tekstil atıksuyunda yaptıkları elektrokimyasal arıtımda % 89'luk KOİ giderim verimine 4150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik değerinde ulaşımlardır [25].

3.7. Elektrot Bağlantı Şeklinin Giderim Verimine Etkisi

Elektrot bağlantı şeklinin elektrokimyasal arıtım prosesleri üzerine etkisini incelemek amacıyla elektrotlar ilk önce Paralel Bağlı Monopolar (MP-P) elektrotlar şeklinde daha sonra Seri Bağlı Monopolar (MP-S) elektrotlar şeklinde son olarak da Seri Bağlı Bipolar (BP-S) elektrotlar şeklinde bağlanmıştır. KOİ giderim verimleri üzerine incelemeler optimum şartlar olan pH 8,27, 0,8 A Akım şiddetinde, 15 dakika reaksiyon süresi boyunca, elektrotlar arası mesafe 1 cm değerlerinde ve 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik değerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen KOİ giderim verimleri Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Elektrot bağlantı şeklinin KOİ giderim verimine etkisi

Şekil 8 incelendiğinde ise KOİ giderim verimleri tüm elektrot bağlantı şekillerinde %85 ile %87 arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir. Bu da elektrot bağlantı şeklinin KOİ giderim veriminde diğer işletme parametrelerine kıyasla daha az etkili olduğunu göstermektedir.

3.8. Maliyet Analizi

Elektrokimyasal arıtım proseslerinde enerji ve elektrot tüketimi sistemin ekonomik fizibilitesini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Enerji ve elektrot tüketiminin Faraday yasasına bağlı olarak hesaplandığı formüller aşağıda verilmiştir [25].

$$T_{enerji}(kWh/kgKOİ) = \frac{U \cdot i \cdot t \cdot 1000}{60(Co - Ct)v} \quad (4)$$

$$T_{elektrot}(kg \text{ elektrot}/kgKOİ) = \frac{M_w \cdot i \cdot t}{n \cdot F \cdot v \cdot (Co - Ct)} \quad (5)$$

Burada T: Enerji ve elektrot tüketimi, U: Voltaj (V), i: Uygulanan akım (A), t: Elektroliz süresi (sn), v: Atıksu hacmi (L), Co: Giriş KOİ konsantrasyonu, Ct: t süre sonundaki KOİ konsantrasyonu, Mw: metalin molekül ağırlığı (g/mol), n: Reaksiyona giren elektronların mol sayısı (Fe=2), F: Faraday sabiti (F= 96,487 C/Mol) dir.

4 ve 5 numaralı formüllerden de anlaşılacağı üzere akım, voltaj, elektrot türü, atıksu hacmi, giderilen kirletici konsantrasyonu ve süre maliyeti doğrudan etkileyen parametreler arasında yer almaktadır.

Buna göre optimum koşullarda (demir anot, çelik katot, pH 8.27, 0.8 A akım şiddeti, 15 dk. Arıtım süresi, 4000 µS/cm iletkenlik, 1cm elektrotlar arası mesafe, Monopolar seri bağlı elektrotlar ve 500 mL atıksu hacminde) enerji tüketimi: 2,942 kWh/kgKOİ ve elektrot tüketimi:0,433 kg elektrot/kg KOİ olarak belirlenmiştir.

3.9. Regresyon Yöntemi ile Optimizasyon

Doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak yapılan modelleme ile kot kumaşı üretim tesisi atıksularının elektrokimyasal yöntemler ile KOİ gideriminde, elektrot tipi, pH, akım yoğunluğu, elektrotlar arası mesafe, zaman ve iletkenlik gibi işletme parametrelerinin bireysel ve sinerjik olarak etkilerinin incelenmesi ve en yüksek verimi elde etmek için uygun işletme şartları belirlenmektedir. Bu amaçla laboratuvar ölçeğinde kurulan bir sistem ile kot kumaşı üretim tesisi atıksularının elektrokimyasal arıtım prosesi ile arıtımının optimizasyonunun yapılması gerektiği, elde edilecek sonuçların sistemin uygulamasına yardımcı olacağı düşünülmüştür.

Proses parametrelerinin çalışma aralıkları; akım için 0,01-2 A, pH için 3-11 ve zaman için ise 5- 40 dakika, elektrotlar arası mesafe 0,5-3 cm ve iletkenlik için ise 4000 µs/cm-10000 µs/cm olarak belirlenmiştir. IBM SSPS Statistic Version 24, deneysel verilerin dizaynı ve elde edilen verilerin modellenmesi için kullanılmıştır. Korelasyon yüzdesi belirlenmiş ve bağımsız değişkenlerin kendi aralarında nasıl bir sinerji oluşturdukları ve bu sinerjinin bağımlı değişkenlerdeki etkilerini görmek için ANOVA analizi yapılmıştır.

Giderim verimleri Eşitlik 6'da belirtilen ikinci derece polinom eşitliğine uyarlanmıştır [41];

ELEKTROKİMYASAL ARITIM PROSESİ İLE KOT KUMAŞI ÜRETİM TESİSİ ATIKSUYUNDAN KOİ GİDERİMİ VE REGRESYON YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

$$R = x + \sum \beta_i \cdot X_i + \sum \beta_{ij} \cdot X_i X_j + \sum \beta_{ij} \cdot X_i^2 \quad (6)$$

Burada R Tahmin edilen cevap, x: dizayn merkez noktasında sabit cevap değeri, β_i Lineer katsayı, β_{ij} etkileşimli katsayı ve β_{ij} Kuadratik katsayıyı belirtmektedir.

Katsayı ve değişkenler yerlerine yazıldıktan sonra elde edilen formül şu şekilde oluşmuştur;

$$R = x + (a \cdot X_1) + (b \cdot X_2) + (c \cdot X_3) + (d \cdot X_4) + (e \cdot X_5) + (f \cdot X_6) + (aa \cdot X_1 \cdot X_2) + (ab \cdot X_1 \cdot X_3) + (ac \cdot X_1 \cdot X_4) + (ad \cdot X_1 \cdot X_5) + (ae \cdot X_1 \cdot X_6) + (ba \cdot X_2 \cdot X_3) + (bb \cdot X_2 \cdot X_4) + (bc \cdot X_2 \cdot X_5) + bd \cdot (X_2 \cdot X_6) + (ca \cdot X_3 \cdot X_4) + (cb \cdot X_3 \cdot X_5) + (cc \cdot X_3 \cdot X_6) + (da \cdot X_4 \cdot X_5) + (db \cdot X_4 \cdot X_6) + (ea \cdot X_5 \cdot X_6) + (g \cdot X_1^2) + (h \cdot X_2^2) + (j \cdot X_3^2) + (k \cdot X_4^2) + (l \cdot X_5^2) + (m \cdot X_6^2)$$

(X_1 : Mesafe (cm), X_2 : Süre (Dk), X_3 : pH, X_4 : İletkenlik ($\mu\text{s/cm}$), X_5 : Akım (Amper), X_6 : Voltaj (Volt), a: Mesafe Kat sayısı, b: Süre Kat sayısı, c: pH Kat sayısı, d: İletkenlik Kat sayısı, e: Akım Kat sayısı, f: Voltaj Kat sayısı, g, h, j, k, l, m katsayıları: kuadratik denklem katsayıları).

Doğrusal olmayan regresyon ile modelleme sonucu KOİ için elde edilen formül katsayıları şu şekilde oluşmuştur.

$$\text{KOİ} : -3,269 + (-0,521 \cdot X_1) + (-50,687 \cdot X_2) + (9,490 \cdot X_3) + (0,240 \cdot X_4) + (-11,526 \cdot X_5) + (-54,023 \cdot X_6) + (-21,411 \cdot X_1 \cdot X_2) + (29,563 \cdot X_1 \cdot X_3) + (0,237 \cdot X_1 \cdot X_4) + (-9,495 \cdot X_1 \cdot X_5) + (-35,247 \cdot X_1 \cdot X_6) + (30,828 \cdot X_2 \cdot X_3) + (-0,032 \cdot X_2 \cdot X_4) + (-75,429 \cdot X_2 \cdot X_5) + (-0,320 \cdot X_2 \cdot X_6) + (-0,057 \cdot X_3 \cdot X_4) + (-40,371 \cdot X_3 \cdot X_5) + (1,25E + 01 \cdot X_3 \cdot X_6) + (0,550 \cdot X_4 \cdot X_5) + (-0,028 \cdot X_4 \cdot X_6) + (0,015 \cdot X_5 \cdot X_6) + (-42,734 \cdot X_1^2) + (0,229 \cdot X_2^2) + (-14,483 \cdot X_3^2) + ((0,000) \cdot X_4^2) + (12,053 \cdot X_5^2) + (3,696 \cdot X_6^2)$$

Kot Kumaşı üretim tesisi atıksuyunun elektrokimyasal prosesler ile arıtımı için ikinci dereceden polinom modelinin ANOVA analizi ve korelasyon oranı sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Kot Kumaşı üretim tesisi atıksuyunun elektrokimyasal prosesler ile arıtımı için ikinci dereceden polinom modelinin ANOVA analizi ve korelasyon oranı sonuçları

Parametre	Kaynak	Regresyon	Kalan	Düzeltilmemiş Toplam	Düzeltilmiş Toplam	Korelasyon Oranı
	Kareler Toplamı	661912,98		683372,997	138181,844	
KOİ	df	29	-1	28	27	92%
	Kareler Ortalaması	22824,586				

Tablo 3'te görüldüğü gibi deneysel sonuçların doğrusal olmayan regresyon modeli ile optimizasyonu sonucu KOİ korelasyon oranları %92 olarak gerçekleşmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu kısımda çalışmanın temel sonuçlarının önemi ve etkisi açık bir şekilde belirtilmelidir. Çalışmanın sağlayacağı faydalar ve literatüre katkıları tartışılmalıdır.

Kot kumaşı üretim tesisi atıksularının elektrokimyasal arıtımında %61,76 KOİ giderimi ile etkin elektrot materyallerinin anot demir, katot paslanmaz çelik olduğu belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu %78,54 KOİ giderimi ile herhangi bir kimyasal ilavesi söz konusu olmayan atıksuyun ham pH değeri 8,27 optimum pH olarak, optimum akım şiddeti 0,8 A (Akım yoğunluğu 20,78 mA/cm²) olarak elde edilmiştir.

İşletme süresinin enerji maliyetine, arıtım sonrasında meydana gelen çamur ve köpük oluşumuna doğrudan etkisi göz önüne alındığında optimum süre olarak KOİ giderim veriminin %91,25 olduğu 15. dakika seçilmiştir.

Elektrotlar arası mesafe arttıkça potansiyel farkın arttığı bunun da maliyeti artırmasından dolayı 8,27 pH'da, 0,8 A akım şiddetinde ve 15 dakika arıtım sürecinde optimum elektrotlar arası mesafe 1 cm olarak belirlenmiştir.

Demir ve çelik elektrotlarda, pH 8,27'de 0,8 Amper akım şiddetinde, 15 dakika boyunca ve elektrotlar arası 1 cm olarak ayarlandığında KOİ giderim veriminin %91,25 gerçekleştiği ve herhangi bir kimyasal ilavesi olmayan hamsuyun iletkenlik değeri 4000 $\mu\text{S/cm}$ optimum iletkenlik değeri olarak elde edilmiştir.

MP-P, MP-S ve BP-S bağlantı şekillerinde KOİ giderim verimleri sırasıyla %85,49, %87,56 ve %86,18'dir. Buna göre elektrot bağlantı şeklinin KOİ giderim veriminde diğer işletme parametrelerine kıyasla daha az etkili olduğu ortaya konulmuştur.

Yapılan deneyler sonucunda kot kumaşı üretim tesisi atıksuyunun Demir ve Paslanmaz Çelik elektrotlar ile elektrokimyasal metotlarla arıtılmasında 8,27 pH, 0,8 A akım değeri, 15 dakikalık arıtım süresi, elektrotlar arası mesafenin 1 cm ve iletkenlik 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve Seri Bağlı Monopolar (MP-S) Elektrotlar bağlantı şekli optimum olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak bu çalışma, diğer arıtım yöntemleri ile kıyaslandığında kimyasal koagülant kullanımından kaynaklanan ikincil kirlenmelerin oluşmaması, çamur oluşumunun az olması, biyolojik arıtım yöntemlerine göre çevresel koşullar ve toksisiteye karşı toleranslı olması, 15 dakikalık kısa sürede %90'ın üzerinde giderim verimine sahip olması gibi yönleriyle kot kumaşı üretim tesisi atıksularından KOİ'nin giderilmesinde elektrokimyasal arıtım proseslerinin etkin şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Ayrıca elde edilen deneysel sonuçlar IBM SPSS Version 24 programı kullanılarak doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile modellenmiş ve matematiksel olarak ifade edilmiştir. Böylece deneysel bir çalışma yapılmadan elektrokimyasal metotlar kullanarak benzer özellikteki tekstil atıksularından KOİ'nin hangi oranda giderilebileceği belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Laboratuvar imkanlarından yararlandığımız Aksaray Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'ne ve endüstriyel atıksu teminindeki katkılarından dolayı Şirikçiöğlü Mensucat'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] C. A. Zıba, M. Dolaz, S. Akarsu, M. Arslantaş, "Tekstil atıksularında renk gidermede kullanılan koagulantlar: nişasta ve cmps'nin floklaşmaya etkisi," KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 19, no. 3, Dec., pp.110-114, 2016.
- [2] E. Gürtekin, N. Şekerdağ, "Color removal from textile wastewater with fenton process," Journal of Engineering and Natural Sciences, vol. 26, no.3, 2008.
- [3] I. W. K. Suryawan, Q. Helmy, S. Notodarmojo, "Textile wastewater treatment: colour and cod removal of reactive black-5 by ozonation," The 4th International Seminar on Sustainable Urban Development, vol. 106, 012102, 2018.
- [4] A. Yıldız, "Bir tekstil endüstrisi atıksularının da KOİ bileşenleri-toksosite ilişkisinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
- [5] S. H. Lin, C. F. Peng, "Treatment of textile wastewater by electrochemical method," Water Research, vol. 28, no. 2, Feb., pp. 277-282, 1994.
- [6] M. Bakır, "Kalsiyum alginattan immobilize edilen termofil pharimidium sp. ile boya giderimi," Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 2006.
- [7] Z. Köksal, "Antep fıstığı işleme atıksularının sürekli sistemde elektrokimyasal arıtım yöntemleri ile arıtımının incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2015.
- [8] M. Uysal, "Tekstil atıksuyunda kimyasal renk giderim yöntemleri," Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2017.
- [9] L. C. Pekel, "Tekstil atıksularının elektrokimyasal yöntemle arıtılması," Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 2013.
- [10] F. İlhan, U. Kurt, Ö. Apaydın, E. Arslankaya, M. T. Gönüllü, "Elektrokimyasal arıtım ve uygulamaları: katı atık sızıntı suyu çalışması," TÜRKAY AB Sürecinde Türkiye'de Katı Atık Yönetiminde Çevre Sorunları Sempozyumu, 2007.
- [11] APHA, American Public Health Association, "Standard methods for the examination of water and wastewater," 21st ed., APHA-AWWA-WEF, Washington, DC, USA, 2005.
- [12] D. B. Kayan, D. Koçak, M. İlhan, A. Koca, "Electrocatalytic hydrogen production on a modified pencil graphite electrode," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 42, no.4, Jan., pp. 2457-2463, 2017.
- [13] M. A. Yıldız, "Tekstil endüstrisi atıksuyunun elektrokimyasal yöntemler ile arıtılabilirliğinin incelenmesi," Yüksek lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011.
- [14] B. Ayebah, Y. C. Hung, "Electrolyzed water and its corrosiveness on various surface materials commonly found in food processing facilities," Journal of Food Process Engineering, vol. 28, no. 3, Jun., pp. 247-264, 2005.
- [15] O. P. Sahu, P. K. Chaudhari, "Electrochemical treatment of sugar industry wastewater: COD and color removal," Journal of Electroanalytical Chemistry, vol. 739, Feb., pp. 122-129, 2015.

ELEKTROKİMYASAL ARITIM PROSESİ İLE KOT KUMAŞI ÜRETİM TESİSİ ATIKSUYUNDAN KOİ GİDERİMİ VE REGRESYON YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

- [16] A. K. Verma, "Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation employing Fe-Al composite electrode," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 20, Dec., pp.168-172, 2017.
- [17] Y. Demirci, L. Pekel, A. Altınten, M. Alpbaz, "Application of fuzzy control on the electrocoagulation process to treat textile wastewater," *Environmental technology*, vol. 36, no. 24, Jul., pp. 3243-3252, 2015.
- [18] A. S. Naje, S. Chelliapan, Z. Zakaria, S. A. Abbas, "Electrocoagulation using a rotated anode: A novel reactor design for textile wastewater treatment," *Journal of Environmental Management*, vol. 176, Jul., pp. 34-44, 2016.
- [19] H. E. G. Akbay, C. Akarsu, H. Kumbur, "Treatment of fruit juice concentrate wastewater by electrocoagulation: optimization of COD removal," *International Advanced Researches and Engineering Journal*, vol. 2, no. 1, Apr., pp. 53-57, 2018.
- [20] O. Yasin, E. K. Ünşar, Z. Işık, F. Yılmaz, N. Dizge, N. A. Perendeci, M. A. Mazmancı, M. Yalvaç, "Optimization of electrocoagulation process and combination of anaerobic digestion for the treatment of pistachio processing wastewater," *Journal of Cleaner Production*, vol. 196, Sep., pp. 42,50, 2018.
- [21] S. Veli, A. Arslan, D. Bingöl, "Application of response surface methodology to electrocoagulation treatment of hospital wastewater," *Clean Soil Air Water*, vol. 44 no. 11, Nov., pp.1516–1522, 2016.
- [22] S. Ahmadzadeh, A. Asadipour, M. Pournamdari, B. Behnam, H. R. Rahimi, M. Dolatabadi, "Removal of ciprofloxacin from hospital wastewater using electrocoagulation technique by aluminum electrode: Optimization and modelling through response surface methodology," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 109, July, pp., 538-547, 2017.
- [23] M. K. Oden, H. S. Erkan, "Treatment of metal plating wastewater using iron electrode by electrocoagulation process: Optimization and process performance," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 119, Oct., pp. 207-217, 2018.
- [24] S. Veli, B. Özbay, İ. Özbay, A. Arslan, E. Çebi, "Elektrokoagülasyon prosesi ile gıda endüstrisi atıksuyunun arıtımında optimum koşulların belirlenmesi," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 22, no. 2, Mar., pp. 932- 936, 2018.
- [25] A. D. Delil, N. Gören, "Investigation of electrocoagulation and electrooxidation methods of real textile wastewater treatment," *Eskişehir Technical University Journal Of Science And Technology*, vol. 20,1, Jan., pp. 83-95, 2019.
- [26] J. T. Nwabanne, C. C. Obi, "Abattoir wastewater treatment by electrocoagulation using iron electrodes," *Pelagia Research Library, Der Chemica Sinica*, vol. 8,2, pp. 254-260, 2017.
- [27] N. Huda, A. A. A. Raman, M. M. Bello, S. Ramesh, "Electrocoagulation treatment of raw landfill leachate using iron-based electrodes: Effects of process parameters and optimization," *Journal of Environmental Management*, vol. 204, Dec., pp. 75-81, 2017.
- [28] G. Varank, S. Y. Güvenç, G. Gürbüz, G. O. Engin, "Statistical optimization of process parameters for tannery wastewater treatment by electrocoagulation and electrofenton techniques," *Desalination and Water Treatment* vol. 57, no. 53, Mar., pp.25460-25473, 2016.
- [29] M. Özden, "Boyar maddelerin elektrokoagülasyon ile arıtılabilirliğinin incelenmesi," *Yüksek Lisans Tezi, Gebze Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze*, 2016.
- [30] G. Chen, "Electrochemical Technologies in wastewater treatment," *Separation and Purification Technology*, vol. 38, no. 1, July, pp. 11-41, 2004.
- [31] M. Y. A. Mollah, R. Schennach, J. R. Parga, D. L. Cocke, "Electrocoagulation (EC)-science and applications," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 84, no. 1, June, pp. 29-41, 2001.
- [32] D. Öztürk, "Mermer endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması," *Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir*, 2018.
- [33] N. Daneshvar, A. R. Khataee, N. Djafarzadeh, "The use of artificial neural networks (ANN) for modeling of decolorization of textile dye solution containing C. I. Basic Yellow 28 by electrocoagulation process," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 137, no. 3, Oct., pp. 1788-1795, 2006.
- [34] A. E. Yılmaz, R. Boncukcuoğlu, M. M. Kocakerim, E. Kocadağıştan, "An empirical model for kinetics of boron removal from boron containing wastewaters by the electrocoagulation method in a batchreactor," *Desalination*, vol. 230, no. 1-3, Sep., pp. 288-297, 2009.
- [35] P. R. Kumar, S. Chaudhari, K. C. Khilar, S. P. Mahajan, "Removal of arsenic from water by electrocoagulation," *Chemosphere*, vol. 55, no. 9, June, pp. 1245-1252, 2004.
- [36] F. Özyonar, B. Karagözoğlu, "Elektrokoagülasyon prosesi ile tekstil sanayi atıksuyunun arıtımı," *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 28, no., Jan., pp.29-37, 2012.
- [37] Z. Köksal, "Antep fıstığı işleme atıksularının sürekli sistemde elektrokimyasal arıtım yöntemleri ile arıtımının incelenmesi," *Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum*, 2015.
- [38] A. Aygün, "Tekstil endüstrisi reaktif ve dispers boya banyo atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımı: yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyon," *Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*, 2012.

Ö. Kahraman, İ. Şimşek

- [39] B. Vardar, “Tekstil Endüstrisi Reaktif Boya Banyolarının Elektrokimyasal Yöntemler ile Arıtımı,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [40] G. Türkoğlu, “Dispers Boya Banyo Atıksularının Elektrokoagülasyon ile Arıtılabilirliğinin İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2007.
- [41] S. Barışçı, Ö. Türkay, A. Dımoğlu, “Elektro-oksidasyon prosesi ile methotrexate gideriminin yüzey yanıt metodu ile optimizasyonu,” Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, vol. 22, no. 2, Mar., pp.1054-1057, 2018.

