

# Elektrokoagülasyon yöntemiyle atık sularının arıtımı: etkinlik, modelleme ve kontrol yaklaşımları

Dursun Alp KIZILÖZ<sup>1</sup>, Metin DEMİRTAŞ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Bursa/Türkiye

<sup>2</sup>Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Balıkesir/Türkiye

Geliş Tarihi (Received Date): 13.11.2024  
Kabul Tarihi (Accepted Date): 24.02.2025

## Öz

Elektrokoagülasyon, atık suya daldırılmış anot ve katot metallerine elektrik akımı uygulanarak kirleticilerin elektrokimyasal reaksiyonlarla giderilmesini sağlayan bir arıtma yöntemidir. Geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük enerji tüketimi, daha az kimyasal kullanımı ve kısa işlem süresi gibi avantajlarıyla öne çıkar. Ancak, bu prosesin etkinliği; akım yoğunluğu, elektrot tipi, elektrot bağlantı konfigürasyonu, pH ve sıcaklık gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu çalışmada, tekstil ve kağıt endüstrisi başta olmak üzere farklı atık sularda gerçekleştirilen elektrokoagülasyon çalışmaları gözden geçirilmiş, parametrelerin arıtma süreci üzerindeki etkileri ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Araştırmalar hem kağıt hem de tekstil endüstrisinde elektrokoagülasyon prosesi sonucunda %90'ın üzerinde Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) giderim veriminin elde edilebileceğini göstermektedir. Farklı atık sular üzerinde yapılan modelleme ve kontrol çalışmaları sonucunda, optimizasyon ve kontrol uygulamalarıyla, arıtma veriminde artış ve enerji maliyetinde azalma sağlandığı tespit edilmiştir. Bu makalede, elektrokoagülasyon prosesinin temel çalışma prensipleri, proses üzerinde etkili olan faktörler ve süreci iyileştirmeye yönelik modelleme ile kontrol çalışmaları kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Atık su arıtımı, elektrokoagülasyon, kontrol ve modelleme.

Dursun Alp KIZILÖZ, alp.kiziloz@btu.edu.tr, <https://orcid.org/0009-0008-7501-7102>

\*Metin DEMİRTAŞ, mdtas@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-2622-5286>

## Treatment of wastewater by electrocoagulation: efficiency, modeling and control approaches

### Abstract

*Electrocoagulation is a treatment method that removes pollutants by electrochemical reactions by applying electric current to anode and cathode metals immersed in wastewater. It stands out with its advantages such as lower energy consumption, less chemical use and short process time compared to traditional methods. However, the effectiveness of this process depends on many factors such as current density, electrode type, electrode connection configuration, pH and temperature. In this study, electrocoagulation studies carried out in different wastewaters, especially in the textile and paper industry, were reviewed and the effects of the parameters on the treatment process were examined in detail. Studies show that over 90% Chemical Oxygen Demand (COD) removal efficiency can be achieved as a result of the electrocoagulation process in both the paper and textile industries. As a result of modeling and control studies conducted on different wastewaters, with optimization and control applications, it was determined that an increase in treatment efficiency and a decrease in energy costs were achieved. In this article, the basic working principles of the electrocoagulation process, the factors affecting the process and modeling and control studies aimed at improving the process are analyzed comprehensively.*

**Keywords:** Wastewater treatment, electrocoagulation, control and modeling.

### 1. Giriş

Su, yaşamın sürdürülebilmesi için temel bir gerekliliktir ve su kaynaklarının temizliği, günümüzün en kritik çevresel sorunlarından biri haline gelmiştir. Giderek artan nüfus, sanayileşme ve tarımsal faaliyetler, su kaynaklarının kirliliğini büyük ölçüde artırmış ve etkin su arıtma teknolojilerine olan ihtiyacı zorunlu kılmıştır. Su arıtımı, sadece çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda insan sağlığının korunması için de büyük önem taşımaktadır. Geleneksel su arıtma yöntemleri bazı durumlarda etkili olsa da endüstriyel atık suların arıtımı gibi karmaşık sorunların çözümünde yetersiz kalabilmektedir. Bu noktada elektrokoagülasyon prosesi, özellikle ağır metal, boya, organik kirleticiler ve yağ gibi maddelerin uzaklaştırılmasında etkili bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Elektrokoagülasyon, su arıtma teknolojisi olarak ilk kez 1900'li yılların başında kullanılmaya başlanmıştır [1]. Ancak, bu teknolojinin ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılması, daha çok 1970'li yıllardan sonra olmuştur. Zamanla, teknolojideki gelişmelerle birlikte elektrokoagülasyon, geniş bir endüstri yelpazesinde kullanılan ve özellikle ağır metal iyonlarının gideriminde etkili bir çözüm olarak kabul görmüştür [2].

Elektrokoagülasyon prosesi atık su içine daldırılmış anot ve katot metallerine elektrik akımı uygulanarak elektrokimyasal tepkimelerin tetiklenmesi prensibine dayanmaktadır. Elektrokimyasal tepkimeler sonucunda atık su içerisinde metal hidroksit flokları oluşmakta, bu da sudaki Askıda Katı Madde (AKM), KOİ, Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ) ve renk gibi kirlilik parametrelerinin giderilmesini sağlamaktadır. AKM, atık suda çözülmüş ve askıda bulunan mineral ve organik parçacıkların toplamını ifade eder. Bu maddeler, suyun fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde ciddi olumsuz etkiler

yaratabilir. Atık sudaki koloidal elementlerin konsantrasyonunu belirlemek, kirliliğin su ekosistemi üzerindeki etkilerini değerlendirmek açısından önemlidir [3]. KOİ, organik maddelerin kimyasal oksidasyon sürecinde tüketilen oksijen miktarını ölçen bir parametredir. BOİ ise, biyokimyasal süreçler yoluyla parçalanabilen organik maddelerin ayrışması sırasında kullanılan oksijen miktarını ifade eder [4]. Elektrokoagülasyon prosesinin verimliliği uygulanan akım yoğunluğu, pH, sıcaklık, elektrot materyali ve elektrot bağlantı konfigürasyonu, iletkenlik, elektrotlar arası mesafe ve süre gibi birçok parametreye bağlıdır [5-10]. Bu sebeple, prosesin modellenmesi ve kontrol edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Elektrokoagülasyon, düşük enerji maliyeti, çevre dostu olması ve minimum kimyasal gereksinimi ile dikkat çeken bir su arıtma teknolojisidir. Diğer arıtma yöntemleri ile karşılaştırıldığında, daha az çamur üretmesi ve daha kısa işlem süresi gibi avantajları bulunmaktadır [5]. Özellikle endüstriyel atık sularının işlenmesi sırasında hem ekonomik hem de operasyonel avantajlar sunarak, çevresel etkileri minimuma indirmektedir. Bu çalışmada elektrokoagülasyon prosesinin çalışma prensibi ve prosesi etkileyen faktörler literatürde yapılan çalışmalardan derlenerek açıklanmıştır. Birçok farklı parametreye bağlı olan elektrokoagülasyon prosesinin modellenmesi ve kontrolü konusunda literatürde yapılmış çalışmalara değinilmiştir. Prosesin verimini artırmak ve enerji maliyetini azaltmak amacıyla gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutulmuştur.

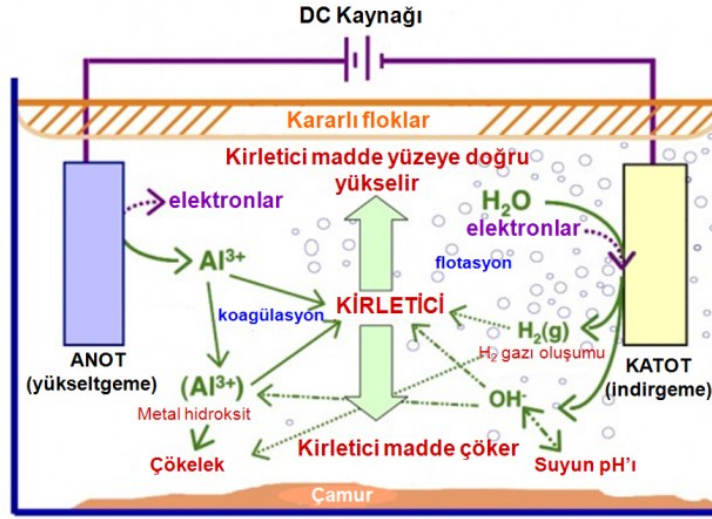
## 2. Elektrokoagülasyon prosesi

Elektroliz, bir sıvı içerisine daldırılmış iki iletken çubuğa (anot ve katot) elektrik akımı uygulanması sonucunda, anottan çözünen elektronların elektrokimyasal tepkimeleri tetiklemesidir. Elektrokoagülasyon ise atık suda elektroliz uygulanmasıdır. Elektrokoagülasyon süreci, elektroliz sonucunda anot metalinin çözünmesi ve katot metalinde hidroksil iyonları oluşması ile artırılması istenen atık suyun içerisinde metal hidroksit floklarının meydana gelmesi prensibine dayanır [11]. Anot metalinin çözünmesi ve katot metalinde oluşan hidroksil iyonları ( $OH^-$ ) ile birleşmesi sonucunda atık su içerisinde metal hidroksit flokları meydana gelir. Oluşan bu metal hidroksit flokları sudaki kirlilikleri tutarak suyun temizlenmesini sağlamaktadırlar.

Elektrokoagülasyon prosesinde verimi ve ekonomik uygunluğu sebebiyle sıklıkla demir ( $Fe$ ) ve alüminyum ( $Al$ ) elektrotlar kullanılmaktadır. Bu elektrotlar atık suyun iletkenlik, pH gibi parametrelerine de bağlı olarak çözünerek, sıvı içerisine  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$  ve  $Fe^{3+}$  iyonları vermekte olup, bu iyonlar sudaki hidroksil iyonları ( $OH^-$ ) ile birleşerek sıvı içinde çok az çözünen  $Al(OH)_3$ ,  $Fe(OH)_2$  ve  $Fe(OH)_3$  gibi metal hidroksitler oluşturmaktadır [6].

Şekil 1'de elektrokoagülasyon prosesinin oluşum mekanizması alüminyum anot için verilmiştir. Katot metali ise herhangi bir metal olabilmektedir (alüminyum, demir, paslanmaz çelik vb.). Anot ve katoda doğru akım uygulanmakta, elektron akışı sayesinde anottan  $Al^{3+}$  iyonları koparılmaktadır. Benzer şekilde elektron transferi sonucunda su ( $H_2O$ ) molekülleri parçalanarak hidrojen gazı ( $H_2$ ) ve hidroksil iyonları ( $OH^-$ ) oluşmaktadır.  $Al^{3+}$  katyonlarının sudaki kirleticiler ile tepkimesi sonucu çözelti dibinde çöken bir çamur oluşmakta ve sudaki kirlilik giderilmektedir. Ayrıca  $Al(OH)_3$  metal hidroksitlerinin absorbe ettiği kirleticiler suyun yüzeyinde kararlı floklar şeklinde biriktiği gibi, yoğunluğu fazla olan kirleticiler de çökerek çamur oluşturur [7].

Elektrokoagülasyon prosesinde meydana bu iki tepkime sonucunda başta kirli olarak bulunan su, alt kısımda çökmüş kirliliklerin oluşturduğu çamur, orta kısımda arıtılmış su ve üst kısımdaki kararlı flokların oluşturduğu yüzen kirlilikler olmak üzere 3 faza ayrılır.



Şekil 1. Elektrokoagülasyon prosesi oluşum mekanizması [8]

### 3. Elektrokoagülasyon prosesini etkileyen faktörler

Elektrokoagülasyon prosesi kirliticileri sudan uzaklaştırmak için sinerjik olarak çalışan çok sayıda mekanizmaya sahip karmaşık bir süreçtir [9]. Elektrokoagülasyon prosesi kullanılan elektrotların cinsi, elektrotların bağlantı şekli, elektrotların yerleşiminin yanı sıra elektrotlar arası mesafe, elektrotlara uygulanan akım, elektrot yüzeyindeki akım yoğunluğu, çözeltiliye eklenen destek elektrolit derişimi, çözeltilinin iletkenliği, çözeltilinin pH değeri, çözeltili sıcaklığı ve prosesin süresi gibi pek çok faktörden etkilenmektedir [5-10]. Literatür incelendiğinde elektrokoagülasyon prosesinin tekstil endüstrisi atık suları, kâğıt endüstrisi atık suları, hastane atık suları, içme suları, mezbaha atık suları, süt endüstrisi atık suları, sızıntı suları, zeytinyağı sanayi atık suları ve gıda sanayi atık suları gibi birçok farklı atık suya uygulandığı görülmektedir [12-20]. Bu derleme makalesinde sırasıyla elektrokoagülasyon prosesini etkileyen faktörlerden pH, iletkenlik, sıcaklık, elektrot bağlantı şekilleri ve akım yoğunluğu parametreleri ele alınmıştır.

#### 3.1 pH

Elektrokoagülasyon prosesinde kimyasal tepkimeler ortamın pH değerine göre değişmektedir. Ortamın pH değeri processte ortaya çıkan ara ürünleri ve tepkimeleri belirlemektedir [21]. Çözeltilinin pH değeri çözeltilinin iletkenliği, elektrotların çözünmesi, metal hidroksitlerin oluşması ve koloidal parçacıkların zeta potansiyeli üzerinde etkisi vardır. Öte yandan elektrokoagülasyon prosesi sırasında pH artar, bu da onu sürekli değişen bir parametre haline getirir [9]. Tekstil atık sularında yapılan bir çalışmada asidik koşullar altında  $OH^-$  konsantrasyonunun metal hidroksit türlerinin oluşumu için yeterli olmadığı görülmüştür. Buna karşılık, alkali koşullar altında, metal hidroksit oluşumunun kolaylıkla gerçekleştiği gözlemlenmiştir [22].

#### 3.2 İletkenlik

Atık suyun iletkenlik değeri elektrik sarfiyatı ile doğrudan ilişkilidir. Sabit akım ve değişken gerilim uygulanarak yapılan bir elektrokoagülasyon prosesinde, atık suyun iletkenlik değeri arttığında, direnç azalacağı için Ohm yasasına (1) göre uygulanan gerilim değeri de azalacaktır. Aynı akım değerinde daha düşük gerilim uygulanacağı için enerji maliyeti azalacaktır (2).

$$V = I \times R \quad (1)$$

$$P = V \times I \quad (2)$$

Denklemlerde  $V$  gerilimi (Volt),  $I$  akımı (Amper),  $R$  direnci (Ohm) ve  $P$  gücü (Watt) göstermektedir. Atık suya çözeltilerin iletkenliğini artırmak ve elektrik tüketimini azaltmak için destek elektrolitik eklenmektedir [6, 10, 21]. Çözeltinin iletkenliği elektrolitin türüne ve konsantrasyonuna bağlıdır.  $NaCl$ ,  $Na_2SO_4$  ve  $KCl$  gibi farklı elektrolit türleri mevcuttur. Elektrolitik iletkenliği artırmak için çözeltilere genellikle  $NaCl$  eklenir [9].

### 3.3 Sıcaklık

Atık su sıcaklığındaki artışın elektrokoagülasyon prosesinde kirliliklerin giderilmesiyle ters bir ilişkisi mevcuttur. Elektrokoagülasyon prosesi esnasında meydana gelen kirlilik giderici metal hidroksitler düşük sıcaklıklarda suda çözünmeyerek yüzeyde floklar halinde ve çözelti dibinde çamur halinde birikerek suyun arıtılmasını sağlarken, atık su sıcaklığı arttıkça metal hidroksitlerin de çözünürlüğü artmaktadır. Dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda kirlilik giderici metal hidroksitler çözünerek suya karışır ve suyu tekrar kirletir [7]. Atık su sıcaklığındaki artış iletkenliği de etkilemektedir. Sıcaklık arttıkça çözeltinin akışkanlığı artmakta, iyonlar çözelti içinde daha kolay hareket edebilir hale gelmektedir. Sonuç olarak su sıcaklığının artmasıyla iletkenlik de artmaktadır. Öte yandan sıcaklığın artışı devam ettiğinde iyonlar birbirleri ile çarpışmakta ve çözelti içinde daha zor hareket etmeye başlamaktadırlar. Bu durumda da iletkenlik azalmaktadır [23]. Yapılan çalışmalarda iletkenliğin 60 °C'ye kadar arttığı ancak daha yüksek sıcaklıklarda azaldığı gözlemlenmiştir. Sıcaklıkla birlikte iletkenliğin artmasının bir nedeni de katot yüzeyinde oluşan metal oksit film tabakasının sıcaklık arttıkça elektrot yüzeyinden sökülmesidir [24, 25].

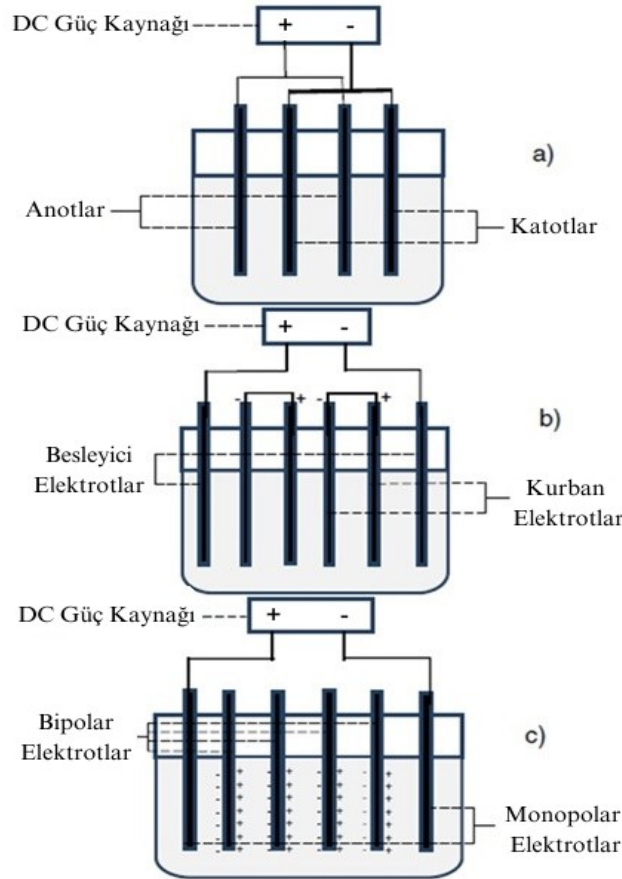
### 3.4 Elektrot bağlantı şekilleri

Literatür incelendiğinde çalışmaların çoğunlukla durgun atık suda gerçekleştirildiği ve elektrokoagülasyon prosesi deneylerinin plaka şeklinde anot ve katot metalleri kullanmak suretiyle yapıldığı görülmektedir. Plaka şeklindeki anot ve katotların bağlantı şekilleri incelendiğinde monopolar paralel (MP-P), bipolar paralel (BP-P) ve monopolar seri (MP-S) gibi farklı bağlantı şekilleri kullanılarak reaktörler tasarlanmıştır. Öte yandan döner anot-sabit katot veya akışkan suda uygulanan silindirik anot-katot gibi farklı elektrokoagülasyon reaktörü tasarımları da mevcuttur.

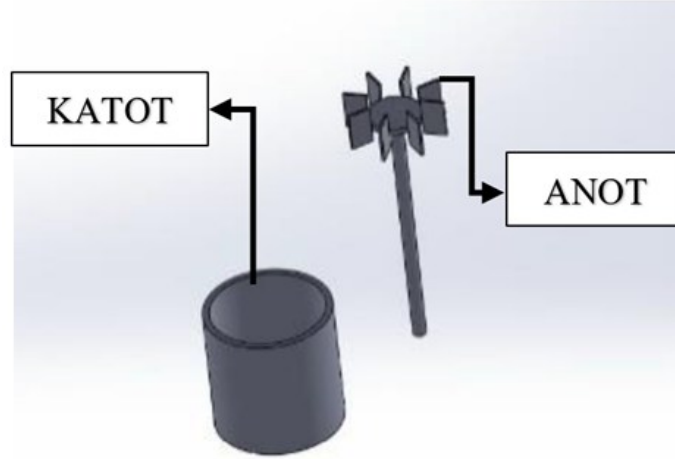
Şekil 2(a)'da verilen monopolar paralel plaka bağlantısı en sık kullanılan bağlantı türüdür. DC güç kaynağından sağlanan doğru akım vasıtasıyla anottan katoda elektron akışı sağlanmaktadır. 4 plaka kullanıldığı için 2 ayrı anot-katot plaka arasındaki alanda elektrokoagülasyon prosesi gerçekleşmektedir. Şekil 2(b)'de verilen monopolar seri reaktör tasarımında elektrik akımı uygulanan monopolar anot ve katodun arasına yerleştirilen, birbirine dahili olarak bağlı olan elektrot çiftine kurban elektrot adı verilmektedir [10]. Merkezde bulunan her bir kurban elektrot çifti birbirine dahili olarak bağlıdır ve iki dış elektrotla hiçbir ara bağlantısı yoktur. Bu durumda, tüm elektrotlardan geçen elektrik akımı aynıdır, oysa genel voltaj, her bir elektrolitik hücredeki voltajın toplamıdır. Bu tasarımda, akım uygulanan anot ve katot arasındaki mesafe artmakta ve

reaktör ortasına eklenen çözünen anotlar elektronları tutmaktadır. Dolayısıyla monopolar anottan katoda elektron transferini sağlamak amacıyla diğer tasarımlara kıyasla daha fazla gerilim uygulamak gerekmektedir. Bu da aynı verimi elde etmek için daha fazla enerji uygulanması ve maliyetin artması anlamına gelmektedir. Güç kaynağına bağlı monopolar anot ve katot elektrot arasına yerleştirilmiş, elektrik akımı uygulanmayan çözünen anotlardan oluşan bipolar paralel elektrokoagülasyon reaktörü tasarımı Şekil 2(c)'de verilmiştir. Elektrotlara akım uygulandığında oluşan manyetik alan sayesinde, reaktörün ortasında bulunan tükenen anotların bir yüzü anot bir yüzü katot gibi davranmaktadır.

Topal çalışmasında daha önce literatürde bulunmayan bir elektrokoagülasyon reaktör tasarımı kullanmıştır. Şekil 3'de gösterilen tasarımda kullanılan silindirik katodun boyu 10 cm, çapı ise 8.2 cm'dir. Anot ise her bir bıçağı 1.8 cm x 3 cm boyutlarında olan 8 bıçaklı disk türbin tipi bir karıştırıcıdır. Anot ve katot materyali olarak demir ve alüminyum kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Deneyler durgun suda, karıştırıcı anodun silindirik katot içerisine eş merkezli olarak yerleştirilip doğru akım uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Diğer tasarımlardan farklı olarak anot elektrot, kimyasal tepkimelerin gerçekleşmesi için gereken elektron akışını sağlamanın yanında atık suyun karışması ve çözünen iyonların atık su içerisinde dağılması görevini de üstlenmektedir. Böylelikle atık su içerisinde flok oluşumu da desteklenmektedir [21].

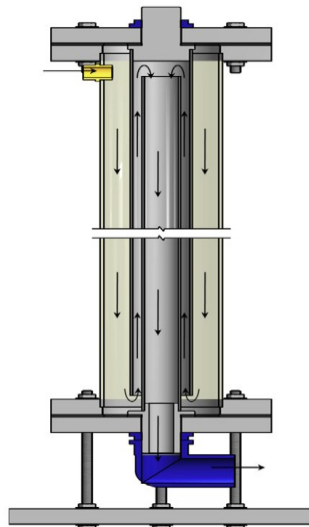


Şekil 2. Elektrotların bağlantı şekilleri [10]  
(a) Monopolar paralel (b) Monopolar seri (c) Bipolar paralel



Şekil 3. Elektrokoagülasyon reaktörü tasarımı [21]

Ardhan vd. yaptıkları çalışmada sürekli akışlı ve kesikli tip elektrokoagülasyon reaktörlerinin performansını kıyaslamışlardır. Deneylerinde kullandıkları sürekli akışlı elektrokoagülasyon reaktörü Şekil 4’de verilmiştir. Sürekli akış sistemi, etkin hacmi 1.5 L olan silindirik bir tüp, bir elektrot düzeneği, bir besleme pompası ve bir DC güç kaynağı ünitesinden oluşmaktadır. Katot olarak 3.2 cm çapında ve 100 cm uzunluğunda içi boş silindir şeklinde demir tüp, anot olarak ise 5.1 cm çapında ve 100 cm uzunluğunda içi boş silindir şeklinde demir tüp kullanılmıştır. Elektrotlar, anodun iç yüzeyi ile katodun dış yüzeyi arasında 7.5 mm boşluk olacak şekilde eş merkezli bir konfigürasyonda monte edilmiştir [26]. Elektrotların yerleşimi dolayısıyla tasarım, tüp içinde tüp elektrokoagülasyon olarak da adlandırılır. Anot ve katodun dışında yalıtkan silindir şeklinde bir tüp bulunmaktadır. Atık su Şekil 4’de sol üst tarafta gösterilen girişten sisteme dahil olmakta ve ok yönlerini takip ederek ilerlemektedir. Su anot ve katot arasından yukarıya doğru çıkarken gerçekleşen elektrokoagülasyon prosesi sonucunda arıtma gerçekleşmektedir. Sonrasında katodun içinden akan su çökeltme tankına iletilmekte ve burada fazlara ayrılmaktadır [26].



Şekil 4. Sürekli akışlı tip elektrokoagülasyon reaktörü tasarımı [26]

### 3.5 Akım yoğunluğu

Elektrokoagülasyon prosesinde akım yoğunluğu, anottan çözünen metal miktarını, koagülant dozajını, çözeltide oluşan hidrojen gazı miktarını, katotta biriken metal miktarını, çözeltilinin karışmasını, sıcaklığını ve kirlilik giderim verimini etkilediği için çok önemli bir parametredir [6-8]. Bu faktörlere ek olarak akım yoğunluğunun elektrokoagülasyon prosesinde doğrudan kontrol edilebilir tek operasyonel parametre olması oldukça kritiktir [9].

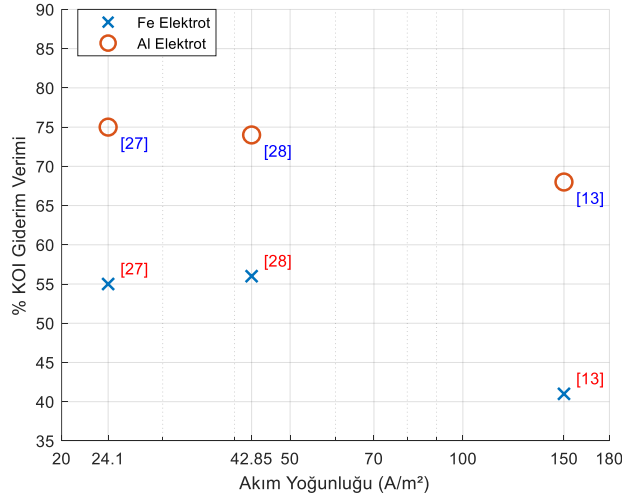
Akım yoğunluğu arttıkça anottan çözünen metal miktarı, oluşan hidrojen gazı miktarı ve çözeltideki metal hidroksit miktarı artar, bu da sıvıdaki AKM, KOİ, BOİ ve renk gibi kirlilik parametrelerinin giderilmesini sağlamaktadır. Akım yoğunluğunun artışı bir doyum noktasına kadar suyun arıtılma süresini kısaltıp, arıtma verimini artırır da belirli bir değerden sonra kirlilik giderim verimi çok fazla değişmeyecektir. Öyle ki akım yoğunluğu arttıkça elektrotlar ısınacağı için atık suyun sıcaklığı da artacak bu da arıtım verimini olumsuz yönde etkileyecektir. Akım yoğunluğunun gereğinden fazla olması anot metalini daha fazla çözeceği için anot metalinin değişim periyodu kısalacak ve anot değişim maliyeti artacaktır. Suyun arıtılabileceği optimum akım değerinden fazla akım uygulamak elektrik maliyetlerini de artıracaktır. Dolayısıyla en kısa sürede, en az maliyetle ve en verimli arıtım için optimum akım yoğunluğu belirlenmelidir [1,9].

Şekil 5’de farklı kağıt endüstrisi atık sularında MP-P bağlantı konfigürasyonunda Fe ve Al elektrotlar kullanarak ve farklı akım yoğunluklarında yapılmış elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen %KOİ giderim sonuçları verilmiştir. Uğurlu vd. KOİ değeri 426.03 mg/L olan atık suyu 0.25 L hacimli kaptta, 24.1 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda Fe elektrot kullanarak yaptığı çalışmada %55 KOİ giderim verimi ile artırırken; aynı şartlar altında Al elektrot kullanarak %75 KOİ giderim verimi elde etmiştir [27]. Yine Uğurlu KOİ değeri 426 mg/L olan atık suyu 0.25 L hacimli kaptta, 42.85 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda Fe elektrot kullanarak yaptığı çalışmada %56 KOİ giderim verimi ile artırırken; aynı şartlar altında Al elektrot kullanarak %74 KOİ giderim verimi elde etmiştir [28]. Zodi vd. KOİ değeri 285 mg/L olan atık suyu 2.5 L hacimli kaptta, 150 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda Fe elektrot kullanarak yaptığı çalışmada %41 KOİ giderim verimi ile artırırken; aynı şartlar altında Al elektrot kullanarak %68 KOİ giderim verimi elde etmiştir [13]. Çalışmalar incelendiğinde kağıt endüstrisi atık sularında, MP-P bağlantı konfigürasyonunda Al elektrot kullanılarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi sonucunda, Fe elektrot kullanılarak yapılan çalışmalara kıyasla, daha yüksek %KOİ giderim verimi elde edildiği görülmüştür. Genel itibarıyla akım yoğunluğu arttıkça %KOİ giderim veriminin de arttığı görülmektedir.

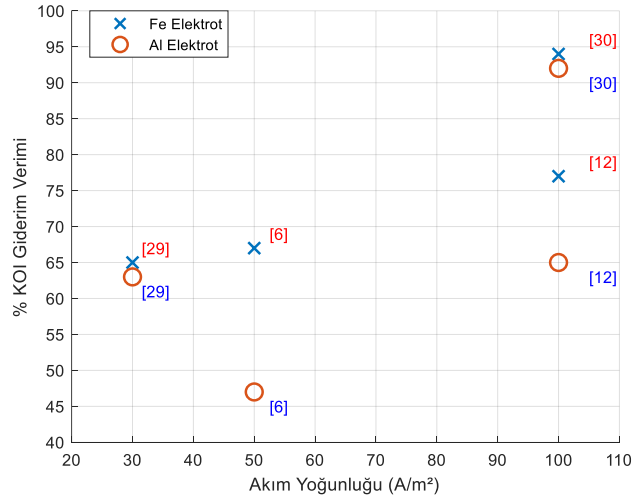
Şekil 6’da farklı tekstil endüstrisi atık sularında MP-P bağlantı konfigürasyonunda Fe ve Al elektrotlar kullanarak ve farklı akım yoğunluklarında yapılmış elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen %KOİ giderim sonuçları verilmiştir. Bayramoğlu vd. KOİ değeri 2031 mg/L olan atık suyu 1.32 L hacimli kaptta, 30 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda Fe elektrot kullanarak yaptığı çalışmada %65 KOİ giderim verimi ile artırırken; aynı şartlar altında Al elektrot kullanarak %63 KOİ giderim verimi elde etmiştir [29]. Kobyay vd. KOİ değeri 1513 mg/L olan 3.5 L atık suyu, 50 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda Fe elektrot kullanarak yaptığı çalışmada %67 KOİ giderim verimi ile artırırken; KOİ değeri 1341 mg/L olan 3.5 L atık suyu, 50 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu uygulayarak ve Al elektrot kullanarak %47 KOİ giderim verimi ile artırmıştır [6]. Bayramoğlu vd. KOİ değeri 3422 mg/L olan 0.25 L atık suyu, 100 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda Fe elektrot kullanarak %77 KOİ giderim verimi ile artırırken; aynı şartlar altında Al elektrot kullanarak %65 KOİ



giderim verimi elde etmiştir [12]. Zodi vd. KOİ değeri 3260 mg/L olan 2 L atık suyu,  $100 \text{ A/m}^2$  akım yoğunluğunda Fe elektrot kullanarak %94 KOİ giderim verimi ile artırırken; aynı şartlarda Al elektrot kullanarak %92 KOİ giderim verimi elde etmiştir [30]. Çalışmalar incelendiğinde tekstil atık sularında, MP-P bağlantı konfigürasyonunda Fe elektrot kullanılarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi sonucunda, Al elektrot kullanılarak yapılan çalışmalara kıyasla, daha yüksek %KOİ giderim verimi elde edildiği görülmüştür. Genel itibarıyla akım yoğunluğu arttıkça %KOİ giderim veriminin de arttığı görülmektedir. Şekil 5 ve 6'da grafikleri verilen çalışmalar Tablo 1'de görülmektedir. Tablo 2'de ise literatürde kağıt ve tekstil endüstrisi atık sularında yapılmış diğer çalışmaların detayları verilmiştir.



Şekil 5. Kağıt endüstrisi atık sularında MP-P bağlantı konfigürasyonunda Fe ve Al elektrot kullanarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesinden elde edilen akım yoğunluğu ( $\text{A/m}^2$ ) - %KOİ giderim verimleri



Şekil 6. Tekstil endüstrisi atık sularında MP-P bağlantı konfigürasyonunda Fe ve Al elektrot kullanarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesinden elde edilen akım yoğunluğu ( $\text{A/m}^2$ ) - %KOİ giderim verimleri

Tablo 1. Şekil 5 ve 6’da verilen elektrokoagülasyon çalışmaları

Endüstri	Elektrot Cinsi	Başlangıç KOİ (mg/L)	Atık Su Hacmi (L)	Akım Yoğunluğu (A/m <sup>2</sup> )	% KOİ Giderim Verimi	Referans
Kağıt	Al	426.03	0.25	24.1	%75	[27]
Kağıt	Fe	426.03	0.25	24.1	%55	[27]
Kağıt	Al	426	0.25	42.85	%74	[28]
Kağıt	Fe	426	0.25	42.85	%56	[28]
Kağıt	Al	285	2.5	150	%68	[13]
Kağıt	Fe	285	2.5	150	%41	[13]
Tekstil	Fe	2031	1.32	30	%65	[29]
Tekstil	Al	2031	1.32	30	%63	[29]
Tekstil	Fe	1513	3.5	50	%67	[6]
Tekstil	Al	1341	3.5	50	%47	[6]
Tekstil	Fe	3260	2	100	%94	[12]
Tekstil	Al	3260	2	100	%92	[12]
Tekstil	Fe	3422	0.25	100	%77	[30]
Tekstil	Al	3422	0.25	100	%65	[30]

Tablo 2. Literatürde kağıt ve tekstil atık sularında yapılan elektrokoagülasyon çalışmaları

Endüstri	Elektrot Cinsi	Bağlantı Şekli	Başlangıç KOİ (mg/L)	Atık Su Hacmi (L)	Akım Yoğunluğu (A/m <sup>2</sup> )	% KOİ Giderim Verimi	Referans
Tekstil	Al	MP-S	1364	3.5	30	%63	[6]
Tekstil	Fe	MP-S	1398	3.5	30	%54	[6]
Tekstil	Al	BP-S	1513	3.5	40	%56	[6]
Tekstil	Fe	BP-S	1410	3.5	40	%62	[6]
Tekstil	Fe	MP-P	1500	1	92.5	%61	[31]
Tekstil	Al	MP-P	3422	0.25	100	%50	[32]
Kağıt	Fe	MP-P	623	3	20.7	%87.8	[33]
Kağıt	Fe	MP-P	2950	6	60	%82	[34]
Kağıt	Fe	MP-P	1700	1.5	700	%88.4	[7]
Kağıt	Al	MP-P	1700	1.5	700	%80	[7]
Kağıt	Al	MP-P	7960	0.3	140	%98	[35]
Kağıt	Al	MP-P	620	0.3	150	%90	[36]
Kağıt	Fe	Döner Anot	1220	0.5	30	%84	[21]
Kağıt	Al	Döner Anot	1220	0.5	30	%82	[21]

#### 4. Modelleme ve kontrol yöntemleri

Elektrokoagülasyon prosesi çok farklı parametrelerden etkilenen karmaşık bir sistem olması sebebiyle matematiksel olarak modellenirken basit lineer denklemlerle aşılabilen birçok problem bulunmaktadır [37]. Bu sebeple doğrusal olmayan ve karmaşık girdi-çıkı verileri içeren sistemleri öğrenip modelleyebilen Yapay Sinir Ağları (YSA), elektrokoagülasyon sistemlerinin modellenmesi, çıkış verilerinin tahmin edilmesi ve prosesin kontrolünde kullanılabilir. Çalışmanın bu bölümünde, elektrokoagülasyon prosesinin modellenmesi ve prosesi etkileyen faktörlerin kontrol yöntemleri hakkında literatürde yapılan çalışmalar derlenmiştir.

Camcıoğlu, yaptığı çalışmada, yıllık 80000 ton üretim kapasitesine sahip kâğıt fabrikasından alınan atık su numunelerinin elektrokoagülasyon yöntemiyle kesikli sistemde arıtımını analiz etmiştir. Sistemde, iletkenlik, pH ve sıcaklık kontrol edilen ana değişkenler olarak tanımlanırken; destek elektrolit, asit-baz akış hızı ve soğutma suyu akış hızı ayarlanabilir değişkenler olarak seçilmiştir. Bu değişkenlerin yönetimi, MATLAB/Simulink platformu kullanılarak PID kontrol mekanizması, Genelleştirilmiş Öngörmeli Kontrol (GÖK) ve Genelleştirilmiş Minimum Varyans (GMV) kontrol stratejileriyle sağlanmıştır. Süreç, sabit akım koşullarında tek girdili-tek çıktılı ve çok girdili-çok çıktılı olmak üzere iki farklı yapılandırmada test edilmiştir. GMV kontrolüyle yürütülen çok girdili-çok çıktılı arıtma sürecinin sonuçları, kontrolsüz arıtma süreciyle kıyaslandığında, KOİ gideriminde %9.96 oranında artış, enerji tüketiminde ise %37.49 oranında azalma sağlamıştır. Camcıoğlu yaptığı bu çalışmada, literatürde ilk kez Cevap Yüzey Yöntemi (CYY) kullanarak elektrokoagülasyon süreci için optimal işletme parametrelerini belirlemiş ve geleneksel ile ileri kontrol yöntemlerinin atık su arıtımında nasıl kullanılabileceğini göstermiştir. Sonuç olarak, elde edilen veriler, arıtma performansının artması ve maliyetlerin düşmesi sayesinde bu yöntemin endüstriyel uygulamalar için cazip bir seçenek haline geldiğini ortaya koymuştur [8].

Demirci vd. pamuklu tekstil endüstrisinden elde edilen atık suların elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtımını gerçekleştirmiştir. MATLAB/Simulink programını kullanılarak pH, iletkenlik ve sıcaklık parametrelerini bulanık kontrol yöntemi ile eş zamanlı olarak kontrol edilmiştir. Kontrolsüz yapılan deneylerde bulanıklık, renk ve KOİ giderim verimleri sırasıyla %75.7, %72.8 ve %66.2 iken; bulanık kontrol yönteminin kullanıldığı çalışmalarda bulanıklık, renk ve KOİ giderim verimleri sırasıyla %91.6, %88.9 ve %76.2 elde edilmiştir. Ayrıca, bulanık kontrol ile enerji tüketimi optimize edilmiştir. Dinamik davranışta 19.1 V olan voltaj değeri, bulanık kontrol ile 12.6 V değerine düşürülmüş, bu da enerji tüketiminde düşüş sağlamıştır. Sonuçlara göre, bulanık kontrol ile yapılan deneylerde tüm parametrelerde belirgin bir verimlilik artışı görülmüştür [38].

Safonyk vd. galvanik kaplama tesisi atık sularında nikel iyonlarının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtımını gerçekleştirmiştir. MATLAB/Simulink programı aracılığıyla oransal kontrol yöntemi kullanılarak akım yoğunluğu kontrol edilmiştir. Siemens S7-300 PLC kullanılarak prosesin tam otomatik kontrolü sağlanmıştır. Enerji tüketimi açısından bakıldığında, sistemin kontrolsüz çalışması durumunda harcanan enerji miktarı günlük 44.9 kWh iken, kontrol sistemi uygulandığında bu tüketim 35.3 kWh'e düşmüştür. Bu da sistemin enerji tüketiminde yaklaşık %21.4 oranında bir tasarruf sağladığını göstermektedir [39].

Camcıoğlu vd. kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon ile arıtıldığı bir proseste MATLAB/Simulink ortamında tasarlanan PID kontrol ediciyi kullanarak pH kontrolünü gerçekleştirmiştir. Başlangıç pH değeri 5 olan kağıt endüstri atık suyunun elektrokoagülasyon yöntemiyle kontrolsüz olarak arıtılması sonucunda %10.07 ile %57.96 aralığında değişen bulanıklık giderim verimi elde ederken, pH değeri süreç boyunca 5'e sabitletiğinde ise %98.6 verim elde etmiştir [40].

Elektrokoagülasyon prosesini modellemek amacıyla farklı yöntemler kullanılarak yapılan çalışmalar Tablo 3'de verilmiştir. Kothari vd. kesikli sistemde Brilliant Green boyasının elektrokoagülasyon prosesi ile giderim sürecini modellemek ve optimize etmek için YSA ve CYY kombinasyonunu kullanmıştır. Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) olarak adlandırılan YSA modelinin girdileri zaman, akım yoğunluğu, pH ve NaCl konsantrasyonu iken; çıktıları ise boya giderme verimliliği ve elektriksel enerji tüketimidir. YSA modelinden elde edilen veriler, CYY ile optimize edilmiştir. Oluşturulan modelin boya giderim verimliliği için determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0.99 iken, elektrik enerjisi tüketimi için determinasyon katsayısı ise 0.97'dir. Her iki model için de  $R^2$  değerlerinin yüksek olması, YSA-CYY modelinin güvenilir olduğunu ve kullanılan girdilerin hem boya giderim verimliliği hem de enerji tüketimi üzerindeki etkilerini oldukça iyi açıkladığını göstermektedir. Modelleme ve optimizasyon çalışmaları sonucunda optimum koşullar 10 dakikalık elektroliz süresi, 80 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu ve 0.5 g/L NaCl konsantrasyonu ile maksimum boya giderim verimliliği %98.77 ve enerji tüketimi 14.88 kWh/kg olarak elde edilmiştir [41].

Shirkoohi vd. yaptığı çalışmada sentetik atık sulardan elektrokoagülasyon yöntemiyle fosfat giderim verimini tahmin etmek amacıyla YSA, Adaptif Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi (ANBÇS) ve Destek Vektör Regresyonu (DVR) yapay zeka modellerini kullanmıştır. Modelin giriş parametreleri akım yoğunluğu, başlangıç fosfat konsantrasyonu, başlangıç pH değeri, proses süresi ve elektrot tipi olarak belirlenirken; çıkış parametresi ise fosfat giderim verimliliğidir. YSA ve DVR modellerinin hiperparametreleri Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) gibi meta-sezgisel algoritmalar kullanılarak optimize edilmiştir. Bu sayede, modellerin performansı artırılmıştır. En başarılı sonuçlar hibrit PSO-YSA modelinde elde edilmiştir. Test setlerinde ortalama  $R^2$  değeri 0.981 olarak hesaplanmıştır, bu da modelin fosfat giderimi için yüksek doğrulukla tahmin yaptığını göstermektedir. Çalışma sonucunda fosfat giderimi üzerinde en etkili iki faktör elektrot tipi ve başlangıç fosfat konsantrasyonu olarak belirlenmiştir. Düşük pH ve başlangıç fosfat konsantrasyonu ile daha yüksek akım yoğunluğu ve işlem süresi fosfat giderim verimliliğini artırdığı gözlemlenmiştir [42].

Graça vd. içme suyundan sürekli akışlı elektrokoagülasyon yöntemiyle florür giderim prosesini modellemek için çok katmanlı ileri beslemeli bir YSA modeli kullanmıştır. Modelin giriş parametreleri akım yoğunluğu, debi, girişteki florür konsantrasyonu, işlem süresi ve elektrot konfigürasyonu iken; çıkış parametreleri ise proses çıkışındaki suda bulunan florür konsantrasyonu ve uygulanan voltajdır. Modelin determinasyon katsayısı 0.999 olarak elde edilmiştir. Model parametrelerinin optimizasyonu GA kullanılarak yapılmıştır. Optimum şartlarda giriş florür konsantrasyonu 10 mg/L olan 5 litre içme suyunun florür konsantrasyonunu 1.5 mg/L'nin altına düşürmek için akım 88.3 mA, debi 73.6 mL/dakika ve elektrot konfigürasyonu olarak MP-S yapı seçilmiş, bu koşullarda %85 florür giderimi sağlanmış ve işletme maliyeti 0.05 €/L olarak hesaplanmıştır [43].

Obi vd. mezbaha atık suyunun elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtımını modellemek için YSA ve ANBÇS modellerini, optimizasyon için ise GA ve PSO algoritmalarını kullanmıştır. ANBÇS modeli, YSA modeline kıyasla daha iyi bir performans göstermiştir. ANBÇS için ortalama kare hata  $8 \times 10^{-10}$ ,  $R^2$  değeri ise 0.9993 olarak hesaplanmıştır. ANBÇS modeli, daha düşük hata oranı ile daha yüksek bir doğruluk sağlamış ve YSA modeline kıyasla sistemin girdiler ile çıktılar arasındaki ilişkileri daha iyi öğrenmiştir. Modelleme sonuçlarına dayanarak, elektrokoagülasyon sürecinin optimize edilmesi, sürecin en uygun şartlarda çalıştırılarak maksimum verim alınması ve minimum enerji tüketimi sağlanması hedeflenmiştir. Optimum şartlarda en yüksek bulanıklık giderimi %99.39 olarak belirlenmiştir. Enerji tüketimi  $293.33 \text{ kWh/m}^3$  ve elektrot çözünme miktarı  $0.2237 \text{ g}$  olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, ekonomik olarak en uygun koşulları sağlamış ve minimum enerji ve malzeme kaybı ile maksimum verim elde edilmiştir [44].

Tablo 3. Elektrokoagülasyon prosesini modelleme çalışmaları

Modelleme Yöntemi	$R^2$ Uyumu	Referans
CYY-YSA	0.99	[41]
PSO-YSA	0.981	[42]
YSA	0.999	[43]
ANBÇS	0.9993	[44]
ANBÇS -PSO	0.9968	[45]
VOK-Freundlich	0.9226	[46]
PSO	0.90	[47]
YSA	0.995	[48]
YSA	0.973	[49]

## 5. Sonuç ve öneriler

Elektrokoagülasyon, ağır metaller, organik kirleticiler ve renk gibi su kirliliğine yol açan maddelerin gideriminde etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel arıtma yöntemlerine göre daha düşük enerji tüketimi, daha az kimyasal ihtiyacı ve kısa işlem süresi gibi avantajlara sahiptir. Ancak, prosesin verimliliği; akım yoğunluğu, elektrot tipi, iletkenlik, pH ve sıcaklık gibi birçok değişkene bağlıdır. Bu parametrelerin optimize edilmesi, prosesin maliyet etkinliğini ve verimini artırmak açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, elektrokoagülasyon prosesinin temel çalışma prensibi, prosesi etkileyen faktörler, prosesin verimini artırmak ve enerji maliyetlerini düşürmek amacıyla geliştirilen modelleme ve kontrol yöntemleri ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Tekstil ve kağıt endüstrisi atık suları üzerinde literatürde yapılan çalışmalar incelenerek, parametrelerin proses üzerindeki etkileri incelenmiştir. Akım yoğunluğunun %KOİ giderimi arasında doğrusal bir bağlantı olduğu görülmüştür. Tekstil endüstrisi atık sularında Fe elektrotun, kağıt endüstrisi atık sularında Al elektrotun %KOİ gideriminde daha verimli olduğu gözlenmiştir. PID ve bulanık kontrol gibi kontrol mekanizmaları ile proses parametrelerinin kontrol edilmesi sonucunda %KOİ giderim veriminin arttığı ve enerji maliyetlerinin azaldığı görülmüştür. YSA ve ANBÇS gibi yapay zeka tabanlı modeller, elektrokoagülasyon prosesinde pH, akım yoğunluğu, sıcaklık gibi çok sayıda

değişkenin etkilerini modelleyerek optimum koşulları belirlemektedir. Yapay zeka tabanlı yapılan modelleme çalışmalarında, yüksek determinasyon katsayıları elde edilerek, modelin proses çıktıları üzerindeki tahmin gücü kanıtlanmıştır. Yapay zeka tabanlı modellerin belirsizliklerin ve değişken koşulların hakim olduğu sistemlerde hassas bir kontrol sağlayarak enerji tüketimi ve elektrot çözünmesi gibi maliyet artırıcı unsurları minimize ettiği görülmüştür.

Sonuç olarak, YSA, ANBÇS ve PID gibi modelleme ve kontrol yöntemlerinin entegrasyonu, elektrokoagülasyon prosesinin endüstriyel uygulamalarda daha sürdürülebilir ve enerji verimli bir su arıtma çözümü olarak kullanımını desteklemektedir. Bu yöntemlerin sağladığı optimizasyon ile proses koşullarına adaptasyon sağlanarak, elektrokoagülasyon prosesinin çevre dostu bir su arıtma teknolojisi olarak daha yaygın bir uygulama alanına sahip olması mümkün hale gelmektedir. Gelecekte, bu modelleme ve kontrol tekniklerinin gelişimi, elektrokoagülasyon prosesinin geniş bir endüstri yelpazesinde daha yüksek verimle kullanılabilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

### Teşekkür

Bu çalışmada sağladıkları değerli destek ve katkılarından dolayı VARAKA Kağıt A.Ş.'ye ve VARAKA AR-GE ekibine teşekkür ederiz.

### Kaynaklar

- [1] Chen, G., Electrochemical technologies in wastewater treatment, **Separation and Purification Technology**, 38, 11-41, doi:10.1016/j.seppur.2003.10.006, (2004).
- [2] Matteson, M. J., Dobson, R. L., Glenn, R. W., Kukunoor, N. S., Waits, W. H. ve Clayfield, E. R., Electrocoagulation and separation of aqueous suspensions of ultrafine particles, **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 104, 101-109, (1995).
- [3] Karef, S., Kettab, A., Loudyil, D., Bruzzoniti, M. C., Bubba, M., D., Nouh, F., A., Boujelben, N., ve Mandi, L., Pollution parameters and identification of performance indicators for wastewater treatment plant of Medea (Algeria), **Desalination and Water Treatment**, 65, 192–198, doi:10.5004/dwt.2017.20290, (2017).
- [4] Chung, M., C., Hong, W., S., Cho, K. ve Hoffmann, M.R., Degradation of organic compounds in wastewater matrix by electrochemically generated reactive chlorine species: kinetics and selectivity, **Catalysis Today**, 313, 189–195, doi:10.1016/j.cattod.2017.10.027, (2018).
- [5] Mao, Y., Zhao, Y. ve Cotterill, S., Examining current and future applications of electrocoagulation in wastewater treatment, **Water**, 15, 8, 1455, doi:10.3390/w15081455, (2023).
- [6] Kobya, M., Bayramoğlu, M., Can, O. T. ve Sözbir, M., Endüstriyel atıksuların arıtılması için elektrokimyasal reaktör geliştirilmesi, TÜBİTAK Proje No:104Y267, Kocaeli, (2008).
- [7] Katal, R. ve Pahlavanzadeh, H., Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the treatment

- of paper mill wastewater, **Desalination**, 265, 199-205, doi:10.1016/j.desal.2010.07.052, (2011).
- [8] Camcıoğlu, Ş., Kâğıt endüstrisi atık sularının elektrokimyasal yöntemle arıtılması, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2016).
- [9] Sahu, O., Mazumdar, B. ve Chaudhari, P. K., Treatment of wastewater by electrocoagulation: a review, **Springer Environmental Science and Pollution Research**, 21, 2397–2413, doi:10.1007/s11356-013-2208-6, (2014).
- [10] Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P. ve Naja, J., Electrocoagulation process in water treatment: a review of electrocoagulation modeling approaches, **Desalination**, 404, 1-21, doi:10.1016/j.desal.2016.10.011, (2017).
- [11] Süzen, Y., Yonga levha endüstrisi atık sularının kimyasal ve elektrooksidasyon yöntemleriyle arıtımı ve optimizasyonu, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2023).
- [12] Bayramoglu, M., Kobya, M., Can, O. T. ve Sozbir, M., Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater, **Separation and Purification Technology**, 37, 117–125, doi:10.1016/j.seppur.2003.09.002, (2004).
- [13] Zodi, S., Louvet, J. N., Michon, C., Potier, O., Pons, M. N., Lapique, F. ve Leclerc, J. P., Electrocoagulation as a tertiary treatment for paper mill wastewater: removal of non-biodegradable organic pollution and arsenic, **Separation and Purification Technology**, 81, 62–68, doi:10.1016/.seppur.2011.07.002, (2011).
- [14] Veli, S., Arslan, A. ve Yılmaz, E., Elektrokoagülasyon prosesi ile hastane atıksuyunda toplam organik karbon giderimi, **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 35, 65-78, (2015).
- [15] Özyonar, F. ve Karagözoğlu, B., İçme sularından elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon ile bulanıklığın giderimi, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 27, 1, 81-89, (2012).
- [16] Bayar, S., Yıldız, Y. Ş., Yılmaz, A. E. ve İrdemez, Ş., The effect of stirring speed and current density on removal efficiency of poultry slaughterhouse wastewater by electrocoagulation method, **Desalination**, 280, 103-107, doi:10.1016/j.desal.2011.06.061, (2011).
- [17] Şengil, İ. A. ve Özacar, M., Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes, **Journal of Hazardous Materials**, 137, 2, 1197-1205, doi:10.1016/j.hazmat.2006.04.009, (2006).
- [18] Ricordel, C. ve Djelal, H., Treatment of landfill leachate with high proportion of refractory materials by electrocoagulation: System performances and sludge settling characteristics, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2, 1551-1557, doi:10.1016/j.ece.2014.06.014, (2014).
- [19] İnan, H., Dimoglo, A., Şimşek, H. ve Karpuzcu, M., Olive oil mill wastewater treatment by means of electro-coagulation, **Separation and Purification Technology**, 36, 23-31, doi:10.1016/S1383-5866(03)00148-5, (2004).
- [20] Solak, M., Pakdil, N. B., Kılıç, M. ve Kobya, M., Elektrokoagülasyon prosesi ile patates cipsi üretim atıksularından fosfor giderimi: Elektrot materyali karşılaştırması, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 22, 2, 302-313, doi:10.16984/saufenbilder.340123, (2018).

- [21] Topal, S., Kâğıt endüstrisi atık sularının elektrokimyasal yöntemi ile arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2015).
- [22] Kurtoğlu Akkaya, G. ve Üçgül İ., Doğrudan güneş enerjisi kullanılarak tekstil atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtımı, **Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi**, 13, 2, 504-516, doi:10.31466/kfbd.1227078, (2023).
- [23] Yalçın, H. ve Gürü, M., **Su teknolojisi**, Palme Yayıncılık, Ankara, (2010).
- [24] Restrepo, A., Arango, A. ve Garc'es, L., La electrocoagulaci'on: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas, **Produccion+ Limpia** 1, 2, 58-77, (2006).
- [25] Ruiz, A. A., La electrocoagulaci'on: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, **Revista Lasallista de Investigación**, 2, 1, 49-56, (2005).
- [26] Ardhan, N., Ruttithiwapanich, T., Songkasiri, W. ve Phalakornkule, C., Comparison of performance of continuous-flow and batch electrocoagulators: a case study for eliminating reactive blue 21 using iron electrodes, **Separation and Purification Technology**, 146, 75-84, doi:10.1016/j.seppur.2015.03.028, (2015).
- [27] Uğurlu, M., Gürses, A., Doğar, Ç. ve Yalçın, M., The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation, **Journal of Environmental Management**, 87, 420-428, doi:10.1016/j.jenvman.2007.01.007, (2008).
- [28] Uğurlu, M., Elektrokoagülasyon yöntemiyle kağıt atık sularında bazı inorganik bileşenlerin giderilmesi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 17, 3, 85-99, (2004).
- [29] Bayramoglu, M., Eyvaz, M., ve Kobya, M., Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation: economical evaluation, **Chemical Engineering Journal**, 128, 155-161, doi:10.1016/j.cej.2006.10.008, (2007).
- [30] Zodi, S., Potier, O., Lopicque, F. ve Leclerc, J. P., Treatment of the textile wastewaters by electrocoagulation: effect of operating parameters on the sludge settling characteristics, **Separation and Purification Technology**, 69, 29-36, doi:10.1016/j.seppur.2009.06.028, (2009).
- [31] Lin, S.H. ve Peng, C.F., Treatment of textile wastewater by electrochemical method, **Water Research**, 28, 2, 277-282, doi:10.1016/0043-1354(94)90264-X, (1994).
- [32] Can, O. T., Kobya, M., Demirbaş, E. ve Bayramoğlu, M., Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation, **Chemosphere**, 62, 181-187, doi:10.1016/j.chemosphere.2005.05.022, (2006).
- [33] Khansorthong, S. ve Hunsom, M., Remediation of wastewater from pulp and paper mill industry by the electrochemical technique, **Chemical Engineering Journal**, 151, 228-234, doi:10.1016/j.cej.2009.02.038, (2009).
- [34] Al-Shannag, M., Lafi, W., Bani-Melhem, K., Gharagheer, F. ve Dhaimat, O., Reduction of COD and TSS from paper industries wastewater using electrocoagulation and chemical coagulation, **Separation Science and Technology**, 47, 5, 700-708, doi:10.1080/01496395.2011.634474, (2012).
- [35] Zaied, M. ve Bellakhal, N., Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry, **Journal of Hazardous Materials**, 163, 995-1000, doi:10.1016/j.hazmat.2008.07.115, (2009).
- [36] Sridhar, R., Sivakumar, V., Immanuel, V. P. ve Prakash, M. J., Treatment of pulp and paper industry bleaching effluent by electrocoagulant process, **Journal of**



- Hazardous Materials**, 186, 1495-1502, doi:10.1016/j.hazmat.2010.12.028, (2011).
- [37] Mirsoleimani-azizi, S. M., Salkhordeh-panbechouleh, S. ve Amooey, A. A., Modeling and optimization of current density for electrocoagulation removal of endosulfan by artificial neural network (ANN), **The 9th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (ICHEC 2015)**, Shiraz, İran, (2015).
- [38] Demirci, Y., Pekel, L. C., Altınten, A. ve Alpbaz, M., Elektrokoagülasyon reaktöründe bulanık kontrol metodu ile pH, iletkenlik ve sıcaklığın eş zamanlı kontrolü, Gazi Üniversitesi, **Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 31, 4, 987-996, doi:10.17341/gazimmfd.278454, (2016).
- [39] Safonyk, A., Targoniy, I., Yuriy, M. ve Bomba, A., Research and automation of the process of wastewater treatment electrocoagulation, **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)**, Lviv, Ukrayna, (2018).
- [40] Camcıoğlu Ş., Özyurt, B. ve Hapoğlu H., Elektrokoagülasyon yöntemiyle kâğıt atık suyu arıtımında pH kontrolü, Anadolu Üniversitesi, **Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 16, 2, 107-115, doi:10.18038/btd-a.95571, (2015).
- [41] Kothari, M. S., Vegad, K. G., Shah, K. A. ve Hassan, A. A., An artificial neural network combined with response surface methodology approach for modelling and optimization of the electro-coagulation for cationic dye, **Heliyon**, 8, 1, e08749, doi:10.1016/j.heliyon.2022.e08749, (2022).
- [42] Shirkoohi, M. G., Tyagi, R. D., Vanrolleghem, P. A. ve Drogui, P., A comparison of artificial intelligence models for predicting phosphate removal efficiency from wastewater using the electrocoagulation process, **Digital Chemical Engineering**, 4, 100043, doi:10.1016/j.dche.2022.100043, (2022).
- [43] Graça, N. S., Ribeiro, A. M. ve Rodrigues, A. E., Modeling and optimization of a continuous electrocoagulation process using an artificial intelligence approach, **Water Supply**, 22, 1, 643-658, doi:10.2166/ws.2021.249, (2022).
- [44] Obi, C. C., Nwabanne, J. T., Igwegbe, C. A., Abonyi, M. N., Umembamalu, C. J. ve Kamuche, T. T., Intelligent algorithms-aided modeling and optimization of the deturbidization of abattoir wastewater by electrocoagulation using aluminium electrodes, **Journal of Environmental Management**, 353, 120161, doi:10.1016/j.envman.2024.120161, (2024).
- [45] Igwegbe, C. A., Obi, C. C., Onyechi, C. C., Davoud, B., Białowiec, A. ve Onukwuli, O. D., Integration of experimental and intelligent modeling for optimizing iron electrocoagulation-flocculation recovery of aquafarm effluent, **Desalination and Water Treatment**, 320, 100832, doi:10.1016/j.dwt.2024.100832, (2024).
- [46] Rahman, N. A., Linus, A. A., Jol, A. A., Jalal, N. S. A., Ming, C. K., Borhan, W. W. S. W., Baharuddin, N., Samsul, S. N. A. ve Mutalip, N. A., Kinetic modelling of peat water treatment with continuous electrocoagulation using aluminium electrodes, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 11, 109559, doi:10.10106/j.jece.2023.109559, (2023).
- [47] Taşkın, A., Evsel atık suların kimyasal çöktürme ve elektrokoagülasyon arıtımında parçacık sürüsü temelli modelleme ve kontrol yaklaşımı, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2016).

- [48] Bhagawatia, P. B., Kumar, K., Lokeshappa, B., Malekdar, F., Sapate, S., Adeogun, A. I., Chapi, S., Goswami, L., Mirkhalafi, S. ve Sillanpää, M., Prediction of electrocoagulation treatment of tannery wastewater using multiple linear regression based ANN: comparative study on plane and punched electrodes, **Desalination and Water Treatment**, 319, 100530, doi:10.1016/j.dwt.2024.100530, (2024).
- [49] Ribeiro, T. S., Grossi, C. D., Merma, A. G., Santos, B. F. ve Torem, M. L., Removal of boron from mining wastewaters by electrocoagulation method: modelling experimental data using artificial neural networks, **Minerals Engineering**, 131, 8-13, doi:10.1016/j.mineng.2018.10.016, (2019).