



## Elektrokoagülasyon reaktöründe bulanık kontrol metodu ile pH, iletkenlik ve sıcaklığın eş zamanlı kontrolü

Yavuz Demirci<sup>1</sup>, Lütfiye Canan Pekel<sup>2</sup>, Ayla Altıntın<sup>3\*</sup>, Mustafa Alpbaz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Adıyaman Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Adıyaman, 02040, Türkiye

<sup>2</sup>Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Tandoğan, Ankara, 06100, Türkiye

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Maltepe, Ankara, 06570, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Elektrokoagülasyon yöntemiyle tekstil atıksuyunun arıtımı
- Arıtım verimini artırmak için sıcaklık, iletkenlik ve pH'ın eş zamanlı kontrolü
- Bulanık kontrol yönteminin arıtım verimine etkisi

#### Makale Bilgileri

Geliş: 30.09.2015

Kabul: 09.08.2016

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.278454

#### Anahtar Kelimeler:

Elektrokoagülasyon,  
tekstil atıksuyunun arıtımı,  
bulanık kontrol,  
MATLAB/Simulink

#### ÖZET

Yapılan çalışmada, pamuklu tekstil endüstrisinden elde edilen atık suların elektrokoagülasyon (EC) yöntemiyle arıtımı gerçekleştirilmiştir. Arıtımın verimini artırmak için sıcaklık, iletkenlik ve pH'ın eş zamanlı kontrolü bulanık kontrol yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Kontrol çalışmalarına geçilmeden önce Design Expert programı ile optimizasyon deneyleri yapılarak EC'nun tekstil endüstrisi atık suyu üzerindeki etkileri araştırılmış ve kontrol deneylerinin gerekli olup olmadığı tartışılmıştır. Bu çalışmaların ardından kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kontrol deneylerinde MATLAB/Simulink programı kullanılmıştır. Bu sonuçlar neticesinde kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), renk, bulanıklık ve yağ ve gres (O&G) giderme verimleri sırasıyla, %76,2, %88,9, %91,6 ve %74,2 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak tekstil sanayi atık suyunun arıtımında EC prosesinin etkili bir yöntem olduğu ve bulanık kontrol yöntemi ile sıcaklık-iletkenlik-pH eş zamanlı kontrolünün de kullanılmasıyla yöntemin etkinliğinin arttığı ortaya konulmuştur.

## Simultaneous control of ph, conductivity and temperature with fuzzy control method in the electrocoagulation reactors

### H I G H L I G H T S

- Treatment of textile wastewater by electrocoagulation method
- To increase the efficiency of the treatment, the simultaneous control of temperature, conductivity and pH
- Effect of fuzzy control methods on treatment efficiency

#### Article Info

Received: 30.09.2015

Accepted: 09.08.2016

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.278454

#### Keywords:

Electrocoagulation,  
textile wastewater treatment,  
fuzzy control,  
MATLAB/Simulink

#### ABSTRACT

In this study, the purification of the waste water obtained from the cotton textile industry was performed by the electrocoagulation (EC) method. To increase the efficiency of the treatment, the simultaneous control of temperature, conductivity and pH is performed using fuzzy control method. Before being passed to the control operation, Design Expert program with the effects on the textile industry waste water electrocoagulation performing optimization experiments were investigated and discussed whether it is necessary to control experiments. Following these studies have been conducted control experiments. In control experiments, MATLAB/Simulink has been used. The removal efficiencies of chemical oxygen demand (COD), color, turbidity and oil and grease (O&G) were found as 76.2%, 88.9%, 91.6% and 74.2%, respectively. Consequently, the EC is in the process of waste water treatment in the textile industry is an effective method and fuzzy control method with simultaneous control of temperature-conductivity-pH has been shown to increase the effectiveness of the method also being used.

\* Sorumlu Yazar/Corresponding author: altintin@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 582 3508

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

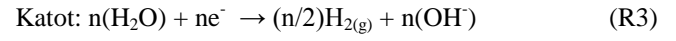
Sanayi devrinin başlangıcından günümüze kadar geçen süre içinde bir ülkedeki endüstriyel çabalar ve bu yolla elde edilen teknolojik ilerlemeler o ülkenin gelişmişliğinin bir göstergesi sayılmaktaydı. Fakat günümüzde gelişmişlik ve buna paralel olarak toplum refahına, fabrikaların artan kapasite ve sayılarının olumlu etkilerinin yanı sıra neden olduğu çevre kirliliği gerek Dünya'da gerekse ülkemizde önemli boyutlara ulaşmıştır. Özellikle tekstil endüstrisinde yüksek su tüketimi nedeniyle atıksu oluşumu oldukça fazladır. Bu nedenle tekstil endüstrisi atıksuları özellikle boyama prosesinde fazla miktarda kullanılan azoboyalar suda aromatik aminlerin oluşumunu sağlar bu da suda kanserojenik ürünlerin oluşumuna neden olur. Atıksuların karakteristiği elyaf cinsi, uygulanan işlemler ve kullanılan kimyasal maddelere bağlı olarak değişiklik gösterir. Ayrıca proses sonucu oluşan atıksular; yüksek renk ve pH değerlerine sahip (pH: 2-12), yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) konsantrasyonu ve süspansiyon katı madde içeren, düşük biyolojik parçalanmaya sahiptir [1, 2]. Tekstil endüstrisi atık sularında KOİ/BOİ<sub>5</sub> (biyokimyasal oksijen ihtiyacı) oranı 3-4 arasında değişmekte olup, bunun anlamı biyolojik olarak zor ayrışabilirliktir [3]. Rengi meydana getiren boyalar, biyolojik olarak parçalanmamaları ve canlılar üzerinde potansiyel toksidite oluşturmaları nedeni ile atıksu arıtımında problem yaratmaktadır. Boyama sırasında kullanılan kimyasal maddeler, kalıcı ve biyolojik olarak ayrışmasının zor olması nedeniyle biyolojik ve fizikokimyasal arıtma proseslerine karşı dirençli olup bu tip arıtma yöntemleri ile giderilememektedir [4, 5]. Özellikle azo, antrakinin ve indigo içeren sentetik boyalar biyolojik parçalanmaya dirençli olduklarından geleneksel aerobik yöntemlerle yeterince arıtılamamaktadır [6]. Tekstil endüstrisi atıksularının arıtılabilirliği ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Literatürde kimyasal koagülasyon, kimyasal çöktürme, kimyasal oksidasyon, biyolojik oksidasyon, klorlama, adsorpsiyon, elektrokoagülasyon ve membran prosesler kullanılarak yapılan çalışmalar mevcuttur [7-11]. Elektrokoagülasyon yönteminde elektrot hidroliz reaksiyonları sonucu oluşan metal hidroksit flokları sayesinde kısmi oksidasyon, koagülasyon, adsorpsiyon, çökeltme ve flotasyon işlemleri eşzamanlı olarak gerçekleşerek renk, bulanıklılık ve KOİ giderimi sağlanmaktadır. Ayrıca elektrokoagülasyon (EC); etkin enerji kullanımı, basit ekipman gereksinimi, otomatik kontrole yakınlık, işletim kolaylığı, düşük miktarlarda ve kolay ayrılabilen atık çamur üretimi, ortama minimum miktarda iyon salınımı gibi avantajları nedeniyle atıksu arıtımında son yıllarda önem kazanan bir yöntemdir. EC prosesinde meydana gelen aşamalar: elektrodun (Al, Fe gibi) yükseltgen çözünmesi ile koagülant oluşturmaları, kirlenmelerin kararsızlaşması, partikül süspansiyonu ve emülsiyon kırılması ve son olarak kararsız fazlarda flokların toplanması şeklinde gerçekleşmektedir [12, 13]. EC'da anot olarak çözünen demir veya alüminyum elektrotlar kullanılması halinde bu elektrotlar çözünerek

çözeltiyeye Al<sup>3+</sup> ve Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> iyonları vermekte olup, bu iyonlar sudaki hidroksil iyonları ile reaksiyona girerek çok az çözünen Al(OH)<sub>3</sub>, Fe(OH)<sub>2</sub> ve Fe(OH)<sub>3</sub> gibi metal hidroksitleri oluşturur. EC sırasında oluşan metal hidroksit partiküllerinin adsorpsiyon özellikleri çok fazladır. Çözelti sistemlerinin elektrokimyasal proses mekanizması oldukça karmaşıktır. Proseste genellikle EC, elektroflotasyon (EF) ve elektrooksidasyon (EOx) olmak üzere üç önemli mekanizma birlikte meydana gelmektedir [14-18]. Elektrokimyasal proseste anotta yükseltgenme, kattotta ise indirgenme olur (R1-R6). EC'nın mekanizması, ortamın kimyasal özelliğine ve iletkenliğine bağlıdır. Ayrıca pH, ortamdaki koloidal partiküllerin boyutu ve kimyasal türlerin derişimi gibi özellikler de EC prosesi üzerine etki etmektedir. EC'de Al ve Fe en çok tercih edilen ve kullanılan elektrot malzemeleridir [19, 20].

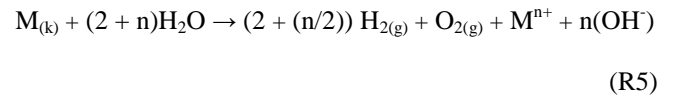
Anodik reaksiyon: Metal çözünmesi:



Katodik reaksiyon: Hidrojen gazı ve hidroksit iyonunun oluşması:



Toplam reaksiyon:



Çözeltide koagülant oluşması:



Sıcaklık, iletkenlik ve pH, arıtma kalitesini ve maliyetini etkileyen, EC prosesi için önemli anahtar parametrelerdir. Bundan dolayı EC prosesinde optimum bir akım yükünün belirlenmesi ve sıcaklık, iletkenlik ve pH parametrelerinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Kimyasal prosesler çoğunlukla çok değişkenli (çok girdili ve çok çıktılı), kompleks ve doğrusal olmayan özelliğe sahip sistemlerdir. Klasik kontrol ediciler, tek değişkenli bir sistemde başarıyla kullanılmasına rağmen, çok değişkenli kontrol sistemlerinin tasarımında tamamıyla tatmin edici bir metot olmamakta ve sistemin bu çok değişkenli özelliği, kontrol probleminde en temel zorluklardan birisini meydana getirmektedir [21]. Çok değişkenli sistemlerin karakteristik özelliği proses etkileşimlerinin varlığıdır. Yani her bir ayarlanabilen değişken tüm kontrol edilen değişkenleri etkileyebilir. Eğer proses etkileşimleri belirgin ise, en iyi çok devreli kontrol sistemi bile yeterli kontrol sağlayamayabilir [22]. Sistemde

belirsizlikler ve/veya bilinmeyen doğrusal olmayan fonksiyonlar var ise durum daha da zorlaşabilir [23]. Bu durumlarda, model öngörülmesi kontrol ve bulanık kontrol gibi çok değişkenli kontrol stratejileri kullanılabilir. Çok değişkenli sistemler için bulanık kontrol pek çok durumda tercih edilmektedir. Ancak çok değişkenli bulanık kontrol uygulamalarının sayısı çok fazla değildir [24]. Tekstil boyama işlemlerinde ortaya çıkan atıksular hacim ve kimyasal bileşim bakımından oldukça fazla kirlilik yüküne sahip olup, deşarj edilmeden önce arıtılması gerekir. Yüksek KOİ, çözünmüş katı madde ve oldukça değişken pH'a bağlı olarak alıcı ortam deşarjlarından önce arıtılmaları gerekli ve zorunludur. Belirli set noktalarında atıksuların tutularak hem deşarj standartlarının sağlanması ve arıtma verimlerinin Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) değerlerinde tutulması kazanç sağlayacaktır. Bu çalışmada, tekstil atıksularının arıtımı için EC prosesine bulanık kontrolün uygulanması ile sistemde etken parametreler olan sıcaklık, iletkenlik ve pH eş zamanlı olarak kontrol edilmiş ve böylece hem arıtma verimi hem de optimum maliyet azaltılmasına olanak sağlanmıştır.

## 2. DENEYSSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

### 2.1. Malzemeler (Materials)

Çalışmada kullanılan tekstil sanayi atıksuyu Malatya'da bulunan bir pamuklu tekstil fabrikasının arıtma ünitesi girişinden temin edilmiştir. Atıksu, fabrikanın deşarj hattından alınmıştır. Atıksuyun genel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Kullanılan tekstil atık suyunun özellikleri  
(Properties of used the textile wastewater)

Parametre	Birim	Değer
pH	-	7,8
KOİ	mg/L	5720
Yağ-gres (O&G)	mg/L	46,32
Toplam Azot	mg/L	0,352
AKM	mg/L	14
Toplam Sülfat	mg/L	97
Toplam Sülfid	mg/L	0,411
İletkenlik	mS/cm	2,10
Bulanıklık	FTU	178
Renk	CU	468

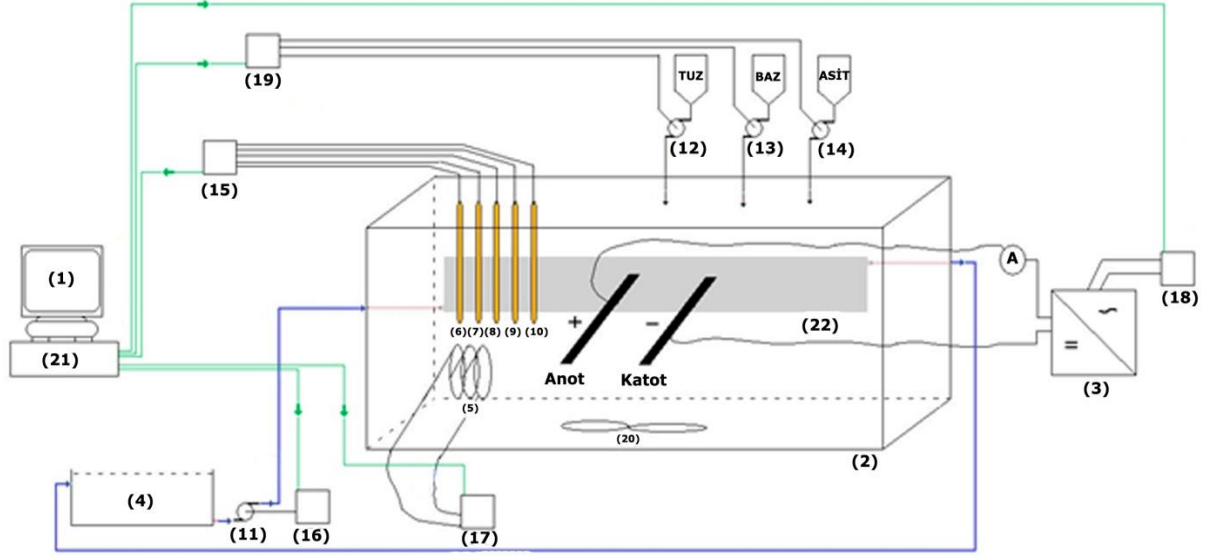
### 2.2. Deneysel Sistem (Experimental System)

Tekstil atık suyunun arıtımı için; elde edilen deney verilerini bilgisayara aktarabilen ve sistemde etken olan sıcaklık, iletkenlik ve pH parametrelerini eş zamanlı kontrol eden bir elektrokoagülasyon kontrol sistemidir. EC deneyleri için paslanmaya dayanıklı plexiglass malzemeden yapılmış dikdörtgen kesitli EC reaktörü, elektrot sayısı, elektrotlar arası mesafenin ayarlanmasına olanak sağlayacak ve otomasyon sistemini de kapsayacak şekilde tasarlanarak imal ettirilmiştir. EC deneylerinde her biri 60 mm x 60 mm x 3 mm boyutlarında alüminyum elektrotlar kullanılmıştır. Demirci vd. [25] tarafından daha önce yapılan bir

çalışmada, demir ve alüminyum elektrotlar için toplam maliyet ayrı ayrı hesaplanmış, demirin alüminyuma göre elektrot tüketimi ve elektrik tüketimi açısından üstün olduğu ancak alüminyumun elektrot ile yüksek bulanıklık, renk ve KOİ verimleri elde edildiği belirtilmiştir. EC reaktöründe akım ve voltaj doğru akım güç kaynağı (MAY11-PS Constant Current Power Supply) ile sağlanmıştır ve bir kontrol elemanı (MAY11-ESA Electrophoresis Control Unit) vasıtasıyla kontrol edilmiştir. Gerektiği takdirde bilgisayardan gönderilen sinyallerle elektrotlara giden akım istenen değere ayarlanabilmektedir. EC reaktörü içinden tepkime boyunca sıcaklık artışı olmaktadır. Tepkimenin istenen şartlarda gerçekleşmesi için ilgili sıcaklığın istenen değerlerde sabit tutulması gerekmektedir. Bu amaçla kimyasal endüstrilerde çok kullanılan bir ısıtma ve soğutma sistemi (Hofer RCB20-PLUS) monte edilmiştir. Sistemi istenilen sıcaklıkta tutabilmek için reaktörün dış çeperine soğutma ceketleri yapılmıştır. EC reaktörünün sıcaklık, iletkenlik ve pH parametrelerini eş zamanlı olarak kontrol etmek için MATLAB-Simulink programı ile bilgisayar kontrol sistemi kullanılmıştır. Sıcaklık kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla soğutma ceketinin içinden geçen soğutma suyunun akış hızını ayarlamak için bilgisayar kontrollü bir açma kapama vanası (T-GP 101,5; 1/4) kullanılmıştır. Reaktör içerisine pH, iletkenlik ve sıcaklık ölçüm cihazlarının (Mettler-Toledo) akımdan etkilenmemeleri için ayrı bir hazne yapılmıştır. Reaktör içerisinden bu hazneye pompa (Aspen Standard Pump) yardımıyla sürekli olarak sabit bir hızda atık su akışı sağlanmaktadır. Örneğin ortam pH'ı kontrol etmek amacıyla reaktör içi pH değerinin ölçüldüğü bir ölçüm elemanı sistemin içerisindeki hazneye daldırılmış ve ölçülen değerler bilgisayara kablo aracılığıyla iletilmiştir. Kontrolüne yönelik bilgisayar tarafından yapılan hesaplamalar sonunda elde edilen veriler sinyaller halinde peristaltik pompaya (Longerpump LEAD-2) gönderilmiş ve gerekli asit çözeltisi akış hızı ayarlanmıştır. Buna benzer şekilde iletkenlik ölçümleri de aynı şekilde hazneye daldırılan iletkenlik ölçer yardımıyla yapılmış, bilgisayara nakledilmiş, yapılan hesaplamalardan sonra yine gerekli sinyaller tuz çözeltisinin akış hızını ayarlayan peristaltik pompaya gönderilerek akış hızı ayarlanmıştır. Reaktör içerisinde homojen bir karışım elde edebilmek için bir karıştırıcı (MS-3020 Lab. Stirrer) kullanılmıştır. Kullanılan deneysel sistem Şekil 1'de gösterilmiştir.

### 2.3. Analiz Yöntemleri (Analytical Procedures)

Deneysel çalışmaların sonunda, renk, bulanıklık ve KOİ analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizleri yapmadan önce numuneler bir gün çökelmeye bırakılmıştır ve analizler ikişer kez tekerrürlü yapılarak ortalama değerler bulunmuştur. Renk ve bulanıklık deneyleri için, Orbeco-Hellige Model 975-MP su analiz sistemi kullanılmıştır. KOİ (mg/L) ölçümleri Standart Metotlarda verilen prosedüre göre yapılmıştır [26]. pH ve iletkenlik ölçümleri için Mettler-Toledo model pH metre ve iletkenlik ölçer kullanılmıştır. Atıksuyun pH'ını istenilen pH değerine



- |                      |                      |                        |                          |                    |
|----------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|
| (1) Bilgisayar       | (6) İletkenlik Probu | (11) Peristaltik Pompa | (16) Pompa Sürücü Bir.   | (21) Kontrol Sist. |
| (2) EC Reaktörü      | (7) Bulanıklık Probu | (12) Peristaltik Pompa | (17) Triak Modülü        | (22) Soğutma Levh. |
| (3) Potansiyostat    | (8) pH Probu         | (13) Peristaltik Pompa | (18) Akım İletim Birimi  |                    |
| (4) Soğutma suyu kaz | (9) DO Ölçüm Probu   | (14) Peristaltik Pompa | (19) Pompa Sürücü Birimi |                    |
| (5) Dalgıç Isıtıcı   | (10) Sıcaklık Probu  | (15) Ölçüm İletim Bir. | (20) Karıştırıcı         |                    |

Şekil 1. Elektrokogülasyon deney sistemi (Electrocoagulation Experimental system)

ayarlamada NaOH ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Merck) kullanılmıştır. Kullanılan tuz (NaCl) ve asit çözeltisinin (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) derişimi sırasıyla 6x10<sup>-2</sup>M ve 4x10<sup>-3</sup>M' dır. NaCl ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> için kullanılan pompaların akış hızları sırasıyla 0-2,5 mL/dk ve 0-4 mL/dk arasında ayarlanabilmektedir. Optimum koşulların bulunmasında kesikli tepkimelerin yürütüldüğü deneylerin planlaması D-optimal esaslı Cevap Yüzey Yönteminin (RSM) kullanıldığı Design-Expert 7.0.0 istatistiksel programı yardımıyla yapılmıştır. RMS kullanılarak, akım yoğunluğu ve elektroliz süresi bağımsız değişkenleri ile bulanıklık giderim verimini tahmin etmek için model oluşturulmuştur. Önerilen model için ANOVA tablosu oluşturulmuş, model üzerine etki eden model terimlerinin önem dereceleri belirlenmiştir. Optimum elektroliz süresi 60 dakika ve akım yoğunluğu 10,4 mA/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur.

#### 2.4. Kontrol Stratejisi (Control Strategy)

Çalışmada bulanık kontrol yöntemi kullanılmıştır. Bir bulanık kontrol edicinin temelini kural çözümleyici, veri tabanı ve kural tabanından oluşan kural tabanlı sistem oluşturur. Otomatik kontrollü sistemin blok diyagramı üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar: çıkış (output) bölümü, ayar bölümü ve kontrol bölümü. Çıkış bölümü, sistemde ölçülen değişkenleri göstermektedir. Bu bölümde değişkenleri ölçmek için sayaçlar bulunmaktadır. Ayar bölümü ise çıkış bölümündeki bulunan değişkenleri ayarlamak için kullanılmaktadır. Burada bulunan cihazlar pompalardır. Akış hızları ile ayarlar yapılmaktadır. Kontrol

bölümü ise ayar bölümündeki değişkenleri kullanarak çıkış değişkenleri istenilen değerlere getirmektedir. Yapılan çalışmada kontrol edilen değişkenler; sıcaklık, iletkenlik ve pH' dır. Ayarlanabilen değişkenler ise sırasıyla; soğutma suyu akış hızı, NaCl akış hızı ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> akış hızıdır.

Bulanık kontrol için yapılan yaklaşımlar;

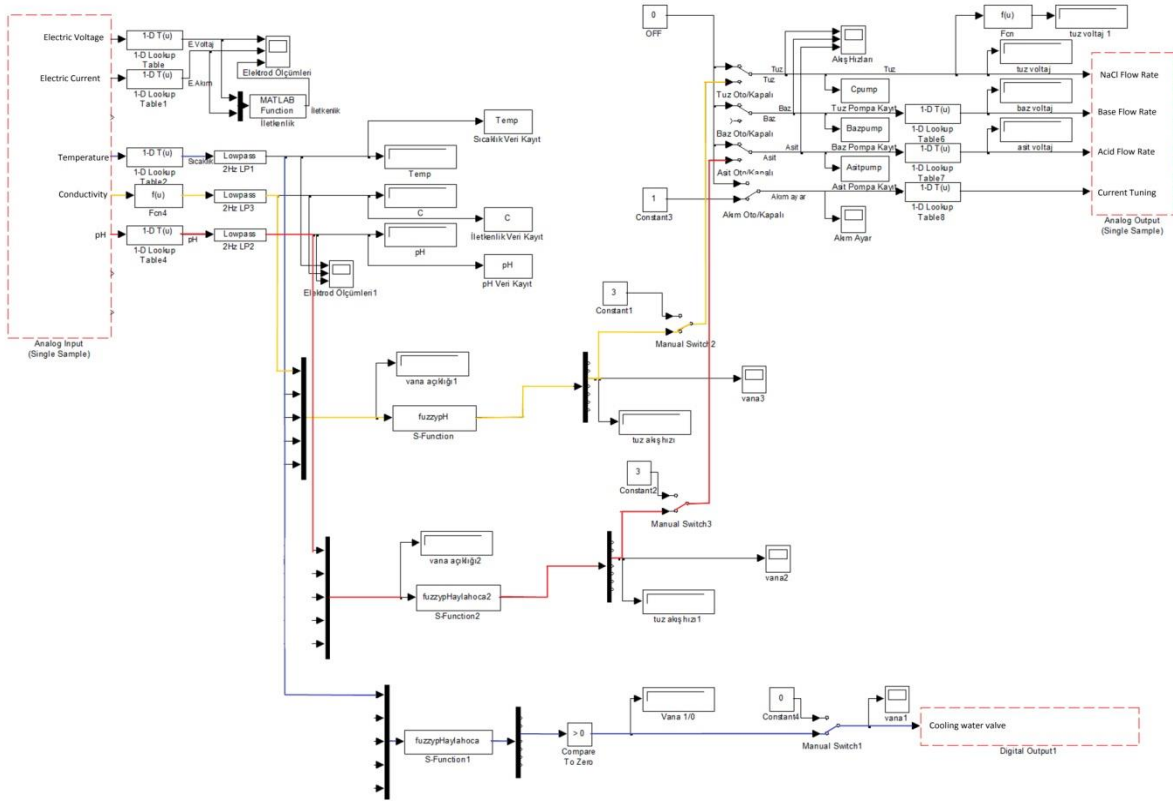
- Bulanık model 1. mertebeden kabul edilmiştir.
- Üçgen-tip bulanık üyelik fonksiyonları kullanılmıştır.
- Üyelik fonksiyonlarının sayısı 5 seçilmiştir.
- Üçgen üyelik fonksiyonlarının simetrik olduğu kabul edilmiştir.
- Girdi ve çıktı için aynı üyelik fonksiyonu kümesi kullanılmış, ancak bu değerler daha sonra bilgisayar programı içerisinde farklı çarpanlar kullanılarak skala ayarlaması yapılmıştır.

Bulanık kontrol ile sıcaklık, iletkenlik ve pH kontrolü için Şekil 2'de gösterilen MATLAB-Simulink programı kullanılmıştır. S-function içerisinde bulanık kontrol algoritmaları yerleştirilerek iletkenlik, pH ve sıcaklık eş zamanlı kontrol edilmiştir. Bu program üzerinde istenilen parametrenin ayarlanabilen değişkeni el anahtarı (manual switch) yardımıyla açılabilir ya da kapatılabilir ve böylece kontrol sistemi ayarlanmak istenen parametre için devreye girmektedir.

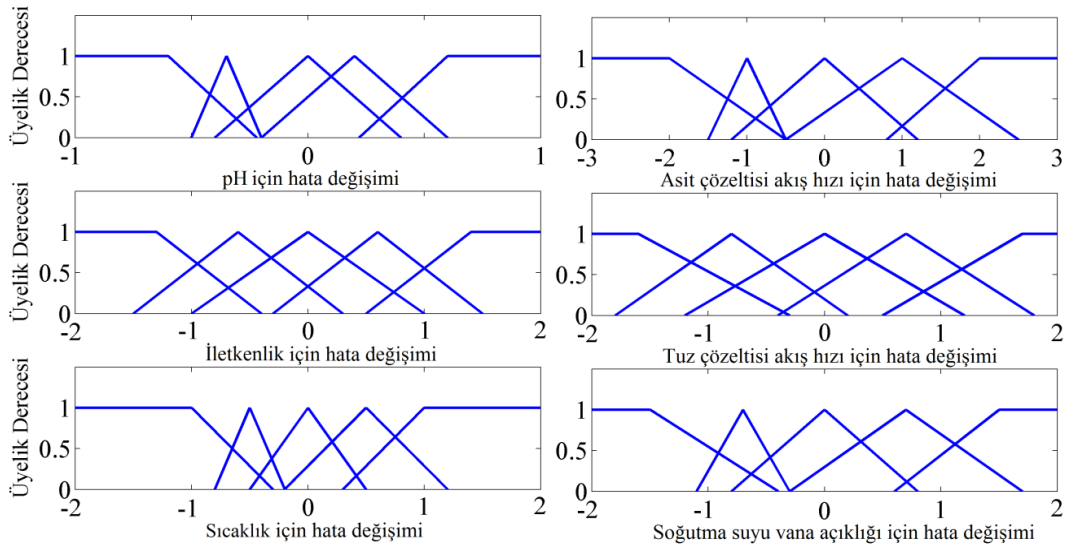
Ayarlanabilen değişkenler iletkenlik (sarı hat), pH (kırmızı hat) ve sıcaklık kontrolü (mavi hat) için sırasıyla NaCl akış

hızı (switch: NaCl on/off),  $H_2SO_4$  akış hızı (switch: Acid on/off) ve soğutma suyu vanasıdır (switch: valve on/off). Bulanık kontrol ile sıcaklık kontrolü deneylerinde ayarlanabilen değişken (soğutma suyu vana açıklığı için hata değişimi) ve ölçülen değişken (sıcaklık için hata değişimi), iletkenlik kontrolü deneylerinde ayarlanabilen değişken (tuz çözeltisi akış hızı için hata değişimi) ve

ölçülen değişken (iletkenlik için hata değişimi), pH kontrolü deneylerinde ayarlanabilen değişken (asit çözeltisi akış hızı için hata değişimi) ve ölçülen değişken (pH için hata değişimi) için bulanık üyelik fonksiyon kümeleri ve bunlara bağlı olarak ilişki matrisi belirlenmiştir. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları Şekil 3'de gösterilmiştir. Belirlenen bu parametreler ve ilişki matrisi kullanılarak



Şekil 2. MATLAB/Simulink programı (MATLAB/Simulink program)



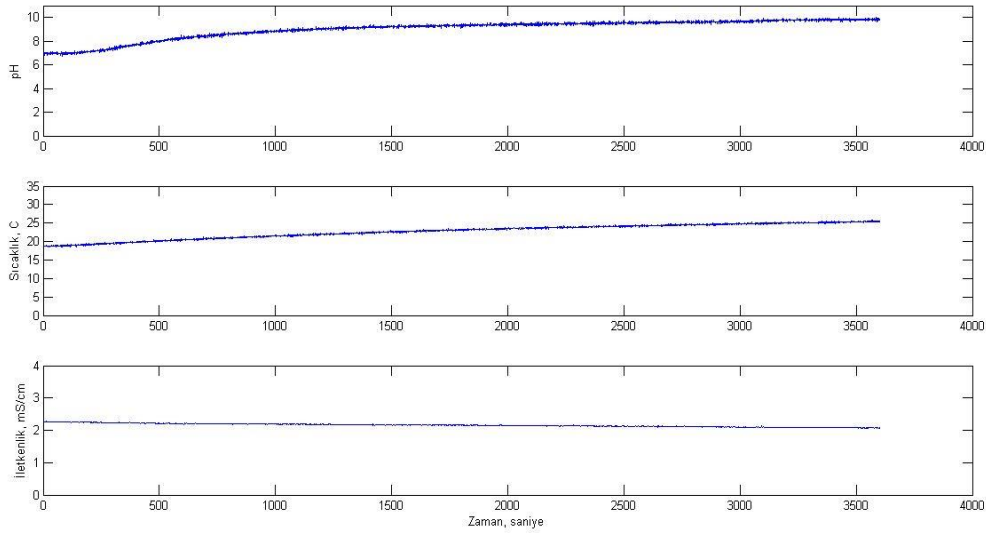
Şekil 3. Bulanık kontrol için giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları (Input and output membership functions for fuzzy control)

sistemin deneysel olarak bulanık kontrolü gerçekleştirilmiştir.

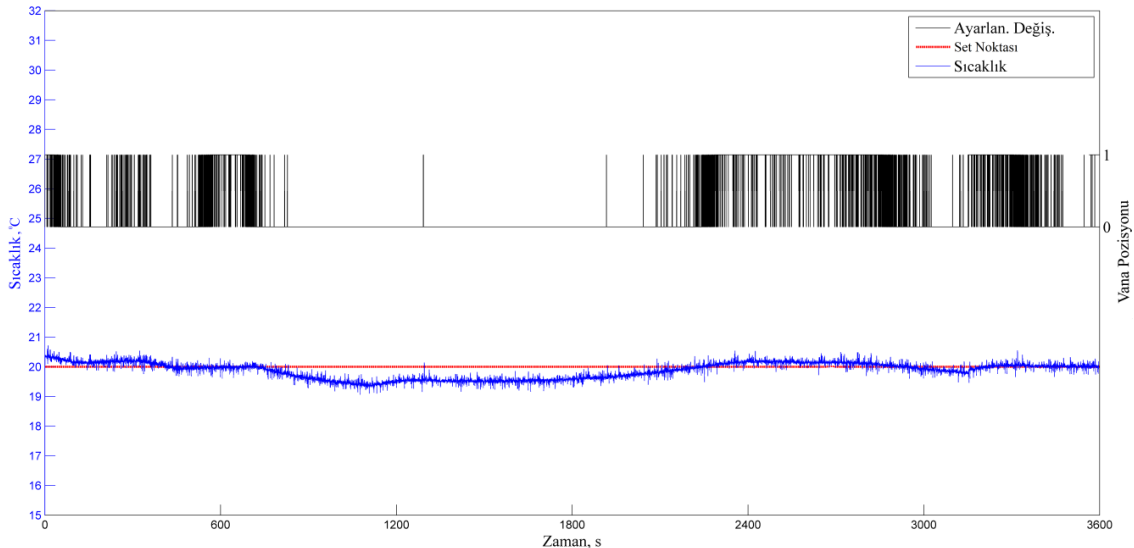
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

EC reaktöründe, akım yoğunluğu, atık su iletkenliği ve elektroliz süresi gibi değişkenlerin arıtma verimine etkisi araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar kullanılarak bir matematiksel model oluşturmak ve seçilen kriterlere göre optimum üretim koşullarını belirlemek amacıyla değerlendirilmiştir. Optimizasyon deneyleri sonucunda bu parametrelerin optimum değerleri bulunarak giderim veriminin maksimum olması sağlanmıştır. Uygun parametre değerleri bulunmuş ve kullanılacak elektrolit maddesine karar verildikten sonra bu teknoloji proses kontrol ile birleştirilerek daha iyi arıtım sağlanmıştır. Al

elektrotların kullanıldığı monopolar paralel (MP-P) bağlı EC reaktöründe optimizasyon çalışmaları sonucu elde edilen modele göre maksimum bulanıklık giderimi için akım yoğunluğu  $10,4 \text{ mA/cm}^2$ , süre 60 dk olarak belirlenmiş ve bu optimum şartlar altında kontrol çalışmaları yürütülmüştür. Kullanılan elektrot sayısı 4, aktif elektrot yüzey alanı  $96 \text{ cm}^2$  ve elektrotlar arası mesafe  $0,8 \text{ cm}$ 'dir. Kullanılan soğutma suyu sıcaklığı  $8^\circ\text{C}$ 'dir. Çalışmanın ilk aşamasında dinamik analizler yapılmış, pH ve iletkenlik değiştirilmeden 60 dakikalık sıcaklık, iletkenlik ve pH'ın zamana karşı nasıl davranış gösterdiği incelenmiştir. Deney esnasında suyun sıcaklığı, pH ve iletkenliği elektroliz süresiyle değiştiği gözlenmiştir: zaman ilerledikçe pH'ın nötr değerden bazik değere değiştiği, iletkenliğin azaldığı ve sıcaklığın arttığı görülmüştür (Şekil 4). Bir saatlik deney sonucunda arıtılan tekstil atık suyunun



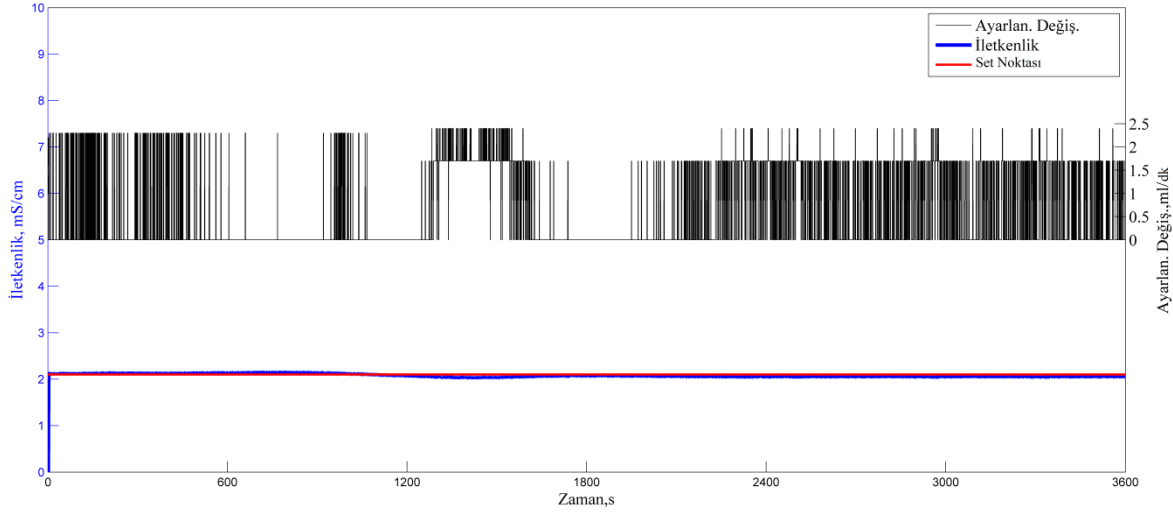
Şekil 4. EC prosesinin dinamik davranışı (The dynamic behavior of the EC process)



Şekil 5. Bulanık kontrol ile sıcaklık-iletkenlik-pH kontrolünde, sıcaklığın ve soğutma suyu vana pozisyonunun zamana karşı değişimi (Temperature and cooling water valve position changing with time in temperature-conductivity-pH control using the fuzzy control)

**Tablo 2.** MP-P EC reaktörü ile elde edilen giderim verimleri (The removal efficiencies obtained by the MPI-P EC reactor)

Zaman (dk)	Bulanıklık giderim verimi (%)	Renk giderim verimi (%)	KOİ giderim verimi (%)	Toplam harcanan elektrot miktarı (g)
60	75,7	72,8	66,2	0,5509

**Şekil 6.** Bulanık kontrol ile sıcaklık-iletkenlik-pH kontrolünde, iletkenliğin ve tuz çözeltisi akış hızının zamana karşı değişimi (Conductivity and saline flow rates changing with time in temperature-conductivity-pH control using the fuzzy control)

bulanıklık, renk ve KOİ giderim verimlerine bakılmıştır ve sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde bulanık kontrol yöntemi kullanılarak sıcaklık-iletkenlik-pH kontrolü eş zamanlı olarak yapılmıştır. Sıcaklık için set noktası 20°C, iletkenlik için set noktası 2,1 mS/cm ve pH için set noktası 7,8 olarak belirlenmiştir. Şekil 5’de bulanık kontrol ile sıcaklık-iletkenlik-pH kontrolünde, kontrol boyunca sıcaklığın zamana karşı değişimi ve ayarlanabilen değişken olan soğutma suyu vana pozisyonunun zamana karşı değişimi gösterilmiştir. Bulanık kontrol ile sıcaklık-iletkenlik-pH kontrolünde, Şekil 6’da kontrol boyunca iletkenliğin ve ayarlanabilen değişken olan tuz çözeltisi akış hızının zamana karşı değişimi gösterilmiştir. Şekil 7’de bulanık kontrol ile sıcaklık-iletkenlik-pH kontrolünde, kontrol boyunca sırasıyla pH’nın zamana karşı değişimi ve ayarlanabilen değişken olan asit çözeltisi akış hızının zamana karşı değişimi gösterilmiştir. Literatürde süt endüstrisi atıksuyu ile yapılan çalışmada pH’nın etkisi; bir pH kontrol ünitesi vasıtasıyla elektrokimyasal reaktöre sürekli olarak H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve NaOH ilavesi ile pH istenilen değerde sabit tutularak incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, pH’nın arıtma verimi üzerine kayda değer bir etkisinin olduğu görülmüştür [27]. Kontrol çalışmalarının sonuçları Tablo 3’de gösterilmiştir. Bu sonuçlar neticesinde KOİ, renk, bulanıklık ve O&G giderme verimleri sırasıyla, %76,2, %88,9, %91,6 ve %74,2 olarak elde edilmiştir. Dinamik davranış giderme verimi ile karşılaştırıldığında kontrol çalışmalarının sonuçlarının yüksek olduğu görülmüştür. Sisteminin uygulanabilirliğinin ortaya konması amacıyla işletme maliyeti (İM, €/m<sup>3</sup>) analizleri yapılmıştır. Yapılan elektrokoagülasyon çalışmalarında elektrik enerjisi kullanıldığından dolayı elde edilen sonuçlar verim açısından kıyaslamaların yanında

işletme maliyetlerini de ortaya koyma kaygılarıyla hareket edilmiştir. Elektrot tüketimi ve elektrik enerjisi sarfiyatı işletme maliyetlerini belirleyen en önemli faktörlerdir. Al elektrotların kullanıldığı ve sıcaklık, iletkenlik ve pH kontrolünün yapıldığı arıtım deneyi sonucu enerji tüketimi, elektrot tüketimi ve kimyasal madde tüketimini kapsayan toplam birim arıtma maliyetinin hesaplamaları Eş. 1 kullanılarak yapılmıştır [28, 29].

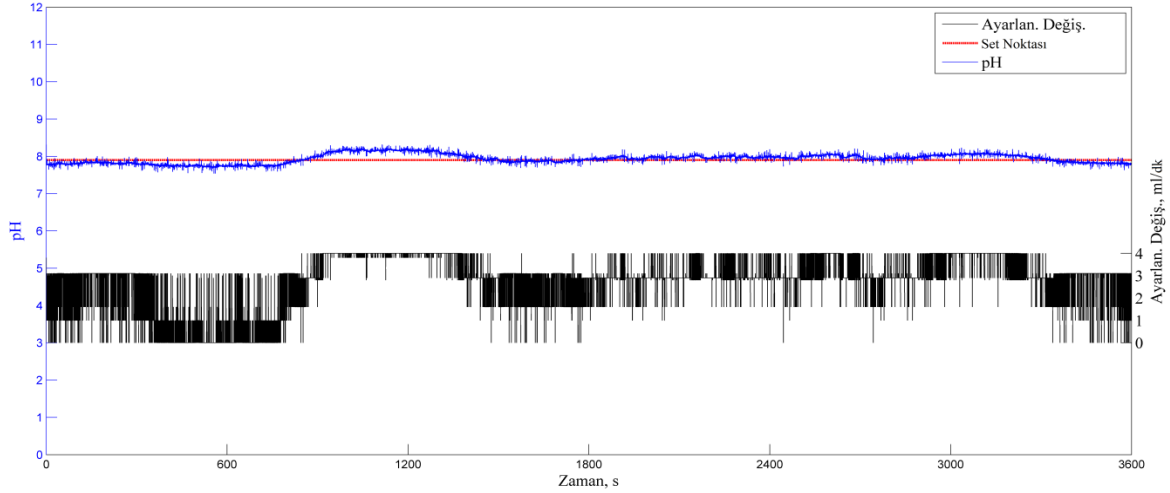
$$\text{İM} = 0,073 \times C_{\text{enerji}} + 3,06 \times C_{\text{elektrot}} + 1,45 \times C_{\text{asit}} + 0,997 \times$$

$$C_{\text{NaCl}} \quad (1)$$

$C_{\text{enerji}}$  (kWh/m<sup>3</sup>),  $C_{\text{elektrot}}$  (kg Al elektrot/m<sup>3</sup>) ve  $C_{\text{asit}}$  (kg/m<sup>3</sup>) deneysel verilerden elde edilen harcanan değerlerdir. Elektrik, elektrot, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve NaCl için Haziran 2015 birim fiyatları sırasıyla 0,26 TL/kWh, 10,90 TL/kg Al, 5,16 TL/L ve 3,55 TL/kg olarak alınmıştır.  $C_{\text{enerji}}$  ve  $C_{\text{elektrot}}$  değerleri Eş. 2’ye (Faraday Kanunu) göre hesaplanmıştır.

$$C_{\text{enerji}} = \frac{U \times i \times t}{v} \quad (2)$$

Dinamik davranış ve kontrol çalışmalarının ortalama voltaj değerleri 19,1 V ve 12,6 V’dur. Kontrol çalışmaları ve dinamik davranış altında elektrokoagülasyon prosesinin işletme maliyeti sonuçları Tablo 4’de verilmiştir. Literatürde tekstil atıksuyunun EC yöntemi ile arıtımı prosesinin işletme maliyeti üzerine bazı çalışmalar mevcuttur. Özyonar ve Karagözoğlu [30] demir ve alüminyum elektrotların kullanıldığı EC prosesinde elektrotlar monopolar paralel bağlanarak, bulanıklık giderimi üzerine; elektrot türü, başlangıç pH’ı, akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin etkisini araştırmışlardır.



**Şekil 7.** Bulanık kontrol ile sıcaklık-iletkenlik-pH kontrolünde, pH ve asit çözeltisi akış hızının zamana karşı değişimi (pH and acid solution flow rates changing with time in temperature-conductivity-pH control using the fuzzy control)

**Tablo 3.** Kontrol çalışmalarının sonuçları (Results of the control studies)

Parametre	Birim	Başlangıç Değeri	Dinamik Davranış	Bulanık kontrol	Dinamik Davranış giderim verimi	Bulanık kontrol giderim verimi
İletkenlik	mS/cm	2,1	1,87	2,1	-	-
pH	-	7,8	10,24	7,8	-	-
Sıcaklık	°C	21,19	27,89	20,0	-	-
O&G	mg/L	46,32	13,11	11,95	%71,7	%74,2
Bulanıklık	FTU	594	144	50	%75,7	%91,6
Renk	CU	1732	471	192	%72,8	%88,9
KOİ	mg/L	5720	1930	1360	%66,2	%76,2

**Tablo 4.** Kontrol çalışmaları ve dinamik davranış altında elektrokoagülasyon prosesinin işletme maliyeti (Operating costs of the electrocoagulation process under control and dynamic behavior studies)

	Akım yoğunluğu (A/m <sup>2</sup> )	U (V)	C <sub>elektrot</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>enerji</sub> (kWh/m <sup>3</sup> )	C <sub>asit</sub> (L/m <sup>3</sup> )	C <sub>NaCl</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Toplam Maliyet (TL/m <sup>3</sup> )
Dinamik davranış	100	19,1	0,5509	0,01779	-	-	6,004
pH, iletkenlik ve sıcaklık kontrolü	100	12,6	0,599	0,01480	0,04880	0,19150	7,443

Her iki elektrot materyali için optimum işletme koşulları başlangıç pH'ı 7,9 ve akım yoğunluğu 10 A/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Bulanıklık giderme verimleri ile işletme maliyetleri alüminyum ve demir elektrotları için sırasıyla %99, %96, 0,0234 \$/m<sup>3</sup> ve 0,0247 \$/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir [30]. Yine benzer şekilde Kobya vd. [28], pH'ın 6-12 arasında değiştiği, voltajın 2,59-3,89 V olarak artırıldığı atıksuda, arıtma verimi incelenmiş ve akım yoğunluğunun 50 A/m<sup>2</sup> olduğu EC prosesi için toplam enerji maliyetini 20,26 euro/m<sup>3</sup> olarak bulmuşlardır.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışmada bir pamuklu tekstil fabrikası atıksuyunun arıtımı EC yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. EC reaktöründe bulanık kontrol yöntemi ile çok değişkenli

kontrol yapılmıştır. Yani sıcaklık-iletkenlik-pH eş zamanlı olarak kontrol edilmiştir. Yapılan bu çalışmada elde edilen bulgulardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Bulanık kontrol yöntemi ile sıcaklık-iletkenlik-pH kontrolü eş zamanlı olarak başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar dinamik deneylerle karşılaştırıldığında, kontrol deneylerinin giderim verimleri üzerindeki üstünlüğü çok net ortaya çıkmıştır. Yapılan çalışmada kontrol giderim verimleri, endüstriyel atıksuların arıtımını başarıyla gerçekleştirdiğini ve kirletici miktarlarını Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'nde belirtilen deşarj kriterlerine indirdiğini göstermiştir [31]. Kontrol deneyleri ile harcanan elektrot miktarlarında düşüş olduğu, buna bağlı olarak da elektrot tüketim maliyetlerinde düşüş olduğu görülmüştür. Buna ek olarak kontrol deneylerinin yapılmasıyla elektrik sarfiyatlarında da önemli bir düşüş olmuştur. Akım



yoğunluğu arttıkça sisteme uygulanan potansiyel fark artmakta, potansiyel farkın artması da enerji tüketimini artırmaktadır. Ayrıca iletkenlik kontrolü için kullanılan NaCl miktarı ve pH kontrolü için istenen set noktasına getirmek için sistemde kullanılan asit miktarı tüketim maliyetine yansıtıldığında toplamda çıkan birim arıtma maliyetinde bir miktar artış olmaktadır. Ancak elektrot ve enerji sarfiyatı düşünüldüğünde kontrol deneyleri her yönüyle dinamik deneylerden daha avantajlı olduğu görülmüştür. Kontrol çalışmaları ile işletme maliyeti artmasına karşın arıtma verimlerinde önemli iyileşmeler tespit edilmiştir.

## 5. SİMGELER (SYMBOLS)

$C_{\text{asit}}$	Harcanan asit miktarı ( $\text{kg/m}^3$ )
$C_{\text{elektrot}}$	Harcanan elektrot miktarı ( $\text{kg/m}^3$ )
$C_{\text{enerji}}$	Enerji tüketimi ( $\text{kWh/m}^3$ )
$C_{\text{NaCl}}$	Harcanan tuz miktarı ( $\text{kg/m}^3$ )
$U$	Elektrotlar arası voltaj değişimi
$i$	Akım (A)
$t$	İşletme süresi (dk)
$v$	Arıtılmış su numunesinin hacmi ( $\text{m}^3$ )

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Koby M., Can O.T., Bayramoglu M., Treatment of Textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes, *Journal of Hazardous Materials*, 100 (1-3), 163-178, 2003.
- Can O.T., Koby M., Demirbas E., Bayramoglu M., Teratment of the textile wastewater by combined electrocoagulation, *Chemosphere*, 62, 181-187, 2006.
- Charmagne O., Caste C., Color removal from textile plant effluents, *American Dyestuff Reporter*, Degremont S.A., Cedex, France, 1996.
- Pagga U., Brown D., The degradation of dyestuffs. part II. behaviours of dyestuffs in aerobic biodegradation tests, *Chemosphere*, 15, 479-491, 1986.
- Ince N.H., Gonenc D.T., Treatability of textile azo dye by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, *Environmental Technology*, 18, 179-185, 1997.
- Kulla H.G., Aerobic bacterial degradation of azo dyes, *FEMS Symposium*, 12, 387-399, 1981.
- Slokar Y.M., Marechal A.M.L., Methods of decoloration of textile wastewaters, *Dye Pigment*, 37, 335-356, 1998.
- Tabrizi M.T.F., Glasser D., Hildebrandt D., Wastewater treatment of reactive dyestuffs by ozonation in a semi-batch reactor, *Chemical Engineering Journal*, 166 (2), 2662-668, 2011.
- Zodi S., Merzouk B., Potier O., Lopicque F., Leclerc J.P., Direct red 81 dye removal by a continous flow electrocoagulation/flotation reactor, *Separation and Purification Technology*, 108, 215-222, 2013.
- Khandegar V., Saroha A.K., Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent—a review, *Journal of Environmental Management*, 128, 949-963, 2013.
- Yurtsever A., Cinar O., Sahinkaya E., Treatment of textile wastewater using sequential sulfate-reducing anaerobic membrane bioreactors, *Journal of Membrane Science*, 511, 228-237, 2016.
- Gomes J.A.G., Daida P., Kesmez M., Weir M., Moreno H., Parga J.R., Irwin G., McWhinney H., Grady T., Peterson E., Arsenic removal by electrocoagulation using combined al-fe electrode system and characterization of products, *Journal of Hazardous Materials*, 139 (2), 220-231, 2007.
- Koby M., Bayramoğlu M., Can O.T., Sözbir M., Akyol A., Endüstriyel Atık Suların Arıtılması için Elektrokimyasal Reaktör Geliştirilmesi, Tübitak Proje No:104Y267, Kocaeli, 2008.
- Gürses A., Yalcin M., Dogar C., Electrocoagulation of some reactive dyes: a statistical investigation of some electrochemical variables, *Waste Management*, 22, 491-499, 2002.
- Canizares P., Carmona M., Lobato J., Martinez F., Rodrigo M.A., Electrodeposition of aluminum electrodes in electrocoagulation processes, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44, 4178-4185, 2005.
- Canizares P., Martinez F., Jimenez C., Lobato J., Rodrigo M.A., Comparison of the alluminium speciation in chemical and electrochemical dosing processes, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45, 8749-8756, 2006.
- Moreno-Casillas H.A., Cocke D.L., Gomes J.A.G., Morkovsky P., Parga J.R., Peterson E., Electrocoagulation mechanism for COD removal, *Separation and Purification Technology*, 56, 204-211, 2007.
- Camcıoğlu Ş., Özyurt B., Zeybek Z., Hapoğlu H., Experimental application of one step ahead advanced pH control to water-based paint wastewater treatment, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 655-664, 2016.
- Chen G., Electrochemical technologies in wastewater treatment, *Separation and Purification Technology*, 38, 11-41, 2004.
- Mollah M.Y.A., Schennach R., Parga J.R., Electrocoagulation (EC) science and application, *Journal of Hazardous Materials*, B84, 29-41, 2001.
- Zeydan M., Bir petrol rafinerisi (TÜPRAŞ) akışkan yataklı katalitik parçalama ünitesinin (FCCU) bulanık modelleme uygulaması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10 (1), 101-110, 2004.
- Seborg D.E., Mellichamp D.A., Edgar T.F., Doyle III F.J., *Process Dynamic and Control*, 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley & Sons, 2011.
- Li T.S., Tong S.C., Feng G.G., A novel robust adaptive-fuzzy-tracking control for a class of nonlinear multi-input/multi-output systems, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 18 (1), 150-160, 2010.
- Tu K.Y., Lee T.T., Wang W.J., Design of a multi-layer fuzzy logic controller for multi-input multi-output systems, *Fuzzy Sets and Systems*, 111, 199-214, 2000.

25. Demirci Y., Pekel L.C., Albaz M., Investigation of different electrode connections in electrocoagulation of textile wastewater treatment, *International Journal of Electrochemical Science*, 10, 2685-2693, 2015.
26. APHA, Standart Methods for Examination of Water and Wastewater, 17th Ed.; American Public Health Association, American Water Works Associations, Water Environment Federation, Washington DC, U.S.A., 1992.
27. Yavuz Y., Koparal A.S., Öğütveren Ü.B., Öcal E., Gıda endüstrisi atıksuyunun elektrokimyasal arıtımı, 7. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, ÇD47, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 5-8 Eylül 2006.
28. Koby M., Oncel M.S., Demirbaş E., Şık E., Akyol A., Ince M., The application of electrocoagulation process for treatment of the red mud dam wastewater from bayer's process, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 2211-2220, 2014.
29. Demirci Y., Pekel L.C., Altınten A., Albaz M., Application of fuzzy control on the electrocoagulation process to treat textile wastewater, *Environmental Technology*, 36 (24), 3243-3252, 2015.
30. Özyonar F., Karagözoğlu B., Removal of turbidity from drinking water by electrocoagulation and chemical coagulation, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (1), 81-89, 2012.
31. Çevre ve Orman Bakanlığı, Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği, Tablo 10. Tekstil sanayi atık sularının alıcı ortama deşarj standartları, 2004.