

## Yağlı Atıksuların Elektrokoagülasyon ile Arıtımında Yatay ve Dikey Elektrot Yerleşiminin Karşılaştırılması

Candan Eryılmaz<sup>1</sup>, Ayten Genç<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Zonguldak.

e-posta:candankose@beun.edu.tr

Geliş Tarihi : 02.06.2017 ; Kabul Tarihi : 17.08.2018

### Özet

#### Anahtar kelimeler

Atıksu arıtımı;  
Elektrokoagülasyon;  
Elektrot yerleşimi; Yağ  
giderim verimi.

Bu çalışmada yağlı atıksuların elektrokoagülasyon ile arıtımında elektrot yerleşim düzeninin giderim verimine etkisi incelenmiştir. Kesikli akışlı elektrokoagülasyon deneyleri bor yağı ile hazırlanan sentetik atıksu numuneleri ile gerçekleştirilmiştir. Sentetik atıksuların karakterizasyonu renk, yoğunluk, bulanıklık, iletkenlik, pH, KOI ve zeta potansiyel ölçümleri ile belirlenmiştir. Deneyler alüminyum levha elektrotların yatay (EHY) ve dikey (EHD) olarak yerleştirildiği aynı hacme sahip iki farklı elektrokimyasal hücrede, aynı çalışma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Elektrotlara uygulanan potansiyel fark ve elektrot alanı artırılması ile her iki elektrot yerleşim düzeninde de giderim verimlerinde artış sağlanmıştır. Ancak elektrotların elektrokimyasal hücredeki konumlarının giderim verimini etkilemediği gözlenmiştir. EHY ve EHD'de elde edilen en yüksek KOI giderim verimleri %97 ve %88'dir. Enerji tüketimleri ise 0.22 ve 0.15 kWh/kgKOI'dir. Deney sonuçlarına göre EHY'de giderim verimleri daha yüksek olmakla birlikte enerji tüketimi de artış göstermektedir.

## The Comparison of Horizontal and Vertical Electrode Layouts in the Treatment of Oily Wastewaters by Electrocoagulation

### Abstract

#### Keywords

Wastewater treatment;  
Electrocoagulation;  
Electrode layout;  
Oil removal efficiency.

In this study, the effect of electrode layouts on removal efficiency was investigated in the treatment of oily wastewater by electrocoagulation. Batch electrocoagulation experiments were performed with synthetic wastewater samples prepared with boron oil. The characterization of synthetic wastewaters was determined by color, density, turbidity, conductivity, pH, COD and zeta potential measurements. The experiments were performed under the same operating conditions in two different electrochemical cells with the same volume in which the aluminum sheet electrodes were placed horizontally (EHY) and vertically (EHD). By increasing the potential difference applied to the electrodes and the electrode area, the removal efficiencies have been increased in both electrode layouts. However, it has been observed that the positions of the electrodes in the electrochemical cell do not affect the removal efficiency. The highest COD removal efficiencies obtained in the EHY and EHD were 97% and 88%, respectively. The corresponding energy consumptions were 0.22 and 0.15 kWh/kg<sub>KOI</sub>. According to the experimental results, in EHY, energy consumption increases as well as efficiency is higher.

## 1. Giriş

Yağ bazlı sıvılar endüstrilerde çeşitli amaçlar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Petrokimya tesislerinde, otomobil endüstrilerinde, metal kesme, tekstil ve kağıt fabrikalarında, maden ve metalürji işletmeleri ve gıda endüstrilerinde oluşan atıksularda büyük oranda yağlara rastlanır (Fadali et al.2016). Metal endüstrilerinde metal kesme sıvıları, soğutma ve yağlama gibi olumlu özelliklerinden dolayı kesme, delme, haddeleme vb. işlemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Cambiella et al.2007). Ayrıca bu sıvıların kullanımı, kullanılan aletlerin ömrünü, işletim verimini ve kalitesini arttırdığı için işletmelerin üretim maliyetlerini düşürmektedir. Ancak, metal kesme sıvıları kimyasal yapılarında hidrokarbonların yanında yüzey aktif maddeler, korozyona ve bakteriyel büyümeye karşı farklı kimyasallar içermektedir. Bu nedenle, metal kesme sıvısı içeren yağlı atıksuların, yüksek KOİ değerlerinin yanı sıra çevre ve insan sağlığına olan olumsuz etkilerinden dolayı arıtılarak uzaklaştırılması gerekmektedir (Zimmerman et al.2004).

Metal kesme sıvısı içeren yağlı atıksular tehlikeli kimyasallar grubuna girdiği için, bu atıksuların arıtımı önemli bir problemdir (Greeley and Rajagopalan2004). Yağlar atıksularda serbest, emülsiyeye ve dispers olmak üzere farklı formlarda bulduklarından, bu atıksuların arıtımında fiziksel, kimyasal, biyolojik ve elektrokimyasal arıtım prosesleri uygulanabilmektedir (Cheng et al.2005). Elektrokoagülasyon diğer arıtım yöntemlerine göre birçok avantaj sağlamaktadır. Birçok kirleticinin bir arada giderilebilmesi, düşük enerji ihtiyacı ve bakım maliyeti gerektirmesi, basit ekipman ve işletme parametreleri ile arıtımın gerçekleştirilebilmesi elektrokoagülasyon prosesinin başlıca avantajları olarak sayılabilir (Holt et al.2005).

Elektrokoagülasyon ile arıtım en basit tanımıyla bir anot ve bir katottan oluşan elektrokimyasal bir hücredir (Fouad2013). Elektrot malzemeleri olarak uygulamalarda çoğunlukla alüminyum ve

demir kullanılır. Elektrotlara uygulanan potansiyel farkı sabit olabileceği gibi hücreden geçen akım da sabit tutulabilir. Elektrotlara sabit bir potansiyel fark uygulandığında, anottan oksidasyon reaksiyonuna bağlı olarak çözünen metal iyonları, hidroksit iyonları ile reaksiyona girerek metal hidroksitleri oluştururlar. Metal hidroksitler atıksudakoagülant ya da adsorbant olarak arıtımın gerçekleşmesini sağlarlar. Katot tarafında ise indirgenme reaksiyonu gerçekleşir ve buna bağlı olarak suyun elektrolizi sonucu gaz kabarcıkları oluşur. Bu gaz oluşumları kirleticilerin, özellikle yağların atıksuyun yüzeyine taşınmasını sağlar (Chen2004).

Elektrokoagülasyon ile arıtımda birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, özellikle elektrokimyasal hücre tasarımıyla ilgili eksikler, bu konuda daha fazla araştırma yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır (Hassan et al.2015). Çünkü elektrokimyasal hücre tasarımı akış rejimi, flokların oluşma mekanizması ve kabarcıkların yüzeğe taşınımı gibi birçok parametreyi doğrudan etkilemektedir (Hansen et al.2007). Elektrokoagülasyon çalışmalarının çoğunluğunda, paralel metal levha elektrotlar hücrede dikey olarak yerleştirilmiştir (Adhoum and Monser2004; Dubrawski et al.2014; Fouad et al.2009). Bu çalışmada, yağlı atıksuların giderim verimi, metal elektrotlar iki farklı elektrokimyasal hücreye yatay (EHY) ve dikey (EHD) olarak yerleştirilerek kesikli akışlı çalışma modunda elektrokoagülasyon deneyleri yapılarak incelenmiştir. Bu amaçla, Petrol Ofisi bor yağı kullanılarak hazırlanan atıksuların karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Elektrokoagülasyon deneylerinde voltaj farkının, elektrot alanının ve elektrotların elektrokimyasal hücrelerdeki konumunun giderim verimine olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca, deneylerden elde edilen sonuçlara göre elektrokimyasal hücrelerin enerji tüketimleri hesaplanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Atıksu Numunelerinin Hazırlanması

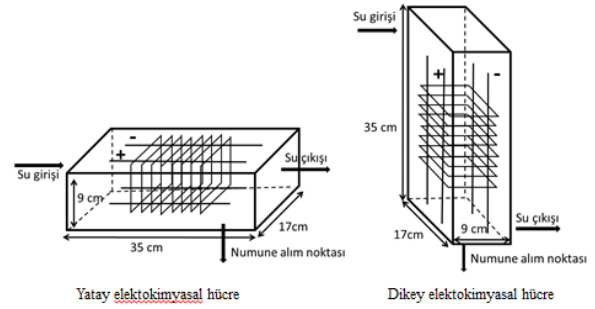
Çeşme suyuna %2 oranında Petrol Ofisi Bor Yağı eklenerek hazırlanan sentetik atıksular, mekanik karıştırıcıda 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen atıksu süt beyazı görünümünde ve homojen bir yapıdadır. Deneylerden önce atıksuyunpH, iletkenlik, bulanıklık ve KOİ ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Sentetik atıksu numunelerinin özellikleri

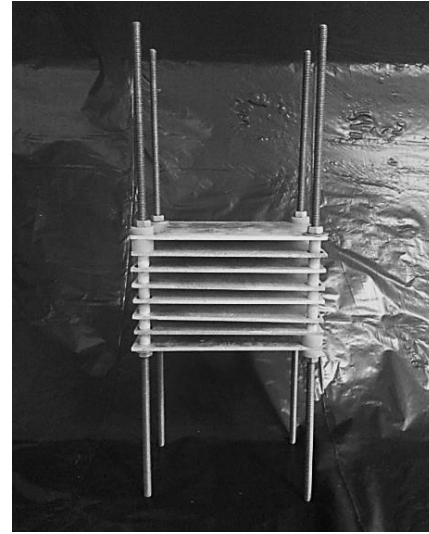
Parametre	Değer
pH	7-8,5
İletkenlik ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	350-500
Renk	Beyaz
Bulanıklık (NTU)	10500-13500
KOİ (mg/L)	50000-60000
Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0,983

## 2.2 Elektrokoagülasyon Deneyleri

Yağlı atıksuların elektrokoagülasyon ile arıtımı yatay ve dikey elektrokimyasal hücrelerde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Yatay elektrokimyasal hücrede (EHY) elektrotlar zemine dik, dikey elektrokimyasal hücrede (EHD) ise elektrotlar zemine paralel şekilde yerleştirilmiştir. Bu nedenle iki elektrokimyasal hücrede de su akışı elektrotlara diktir. Pleksiglas malzemeden yapılmış olanEHY ve EHD aynı hacme sahiptir (5,7 L) ve boyutları 35\*17\*9 cm olarak tasarlanmıştır. Deneylerde kullanılan alüminyum levha elektrotların uzunluğu 13,5 cm, genişliği 8,5 cm ve kalınlığı ise 0,3 cm’dir. Elektrotlar arası mesafe 1 cm olarak ayarlanmıştır. EHY ve EHD’de kullanılan, 4 anot ve 4 katottan oluşan ve toplam aktif yüzey alanı 459 cm<sup>2</sup> olan alüminyum elektrotlar Şekil 2’de gösterilmektedir. Alüminyum levha elektrotların yüzey pasifasyonlarını önlemek amacıyla deney sonunda, kullanılan elektrotların yüzeyleri zımpara makinesi ile 5 sn süreyle zımparalanmış ve elektrotlar bir gün seyreltik asetik asit içerisinde bekletilmiştir.



Şekil 1. Elektrokimyasal hücreler



Şekil 2. Alüminyum elektrotlar

Elektrokoagülasyon deneylerinde elektrotlara uygulanan voltaj farkı DC güç kaynağı (18 V, 10 A) ile sağlanmıştır. Deneyin başlangıcında elektrokimyasal hücreler atıksu numunesi ile doldurulmuştur. Deneylerde, elektrotların tamamı suyun içinde kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Uygulamalarda su akışı peristaltik pompa ile sağlanmıştır ve atıksu debisi 90 mL/dak olarak ayarlanmıştır. Deneyler kesikli akışlı çalışma modunda, çıkış suyu hücrelerin girişine beslenerek gerçekleştirilmiştir. Her bir deneyde 6 L atıksu kullanılmıştır. Deney süresi 90 dakikadır ve yağ giderim verimleri bulanıklık ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ölçümlerinden hesaplanmıştır. Bulanıklık ölçümleri, deney başlangıcından itibaren her 5 dakikada bir Şekil 1’de gösterilen numune alım noktalarından alınmıştır. 10 mL’lik atıksu numuneleri, musluk suyu ile 20 kat seyreltilerek Aqualytic AL450T-IR cihazı ile ölçülmüştür. Her numunenin bulanıklığı üç kere ölçülerek, ölçümlerin aritmetik ortalaması

hesaplanmıştır. KOİ analizleri ise ASTM standartlarında belirtilen (AWWA 1998) 5220-C kapalı sistem, titrimetrik metot yöntemine göre yapılmıştır.

### 2.3 Enerji Tüketimi

Elektrokoagülasyonda tüketilen elektrik enerjisi miktarı artırılan toplam su hacmine göre hesaplanabilmektedir. Spesifik enerji ( $E_s$ ) olarak ifade edilen bu değer:

$$E_s = \frac{\int_0^t U I dt}{v} \quad (1)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada,  $U$ ,  $I$ ,  $t$  ve  $v$  sırasıyla elektrotlara uygulanan voltaj farkı (Volt), elektrotlardan geçen akım değeri (Amper), elektrokoagülasyon deney süresi (saniye) ve arıtılan atıksuyun hacmini ( $m^3$ ) ifade etmektedir. Spesifik enerji değeri aynı zamanda atıksudan giderilen 1 kg KOİ değerine göre de hesaplanabilmektedir ( $E_{s,KOI}$ ):

$$E_{s,KOI} = \frac{\int_0^t U I dt}{(KOI_0 - KOI_t)v} \quad (2)$$

Burada,  $KOI_0$  ve  $KOI_t$ , atıksuyun başlangıçta ve "t" anındaki KOİ değerini ifade etmektedir. Elektrokoagülasyon deneylerinde tüketilen enerji miktarının hesaplanmasında, deneyler esnasında her 10 saniyede bir kaydedilen akım değerleri kullanılmış ve integral hesaplamalarında ise sayısal yöntemlerden trapez kuralı uygulanmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

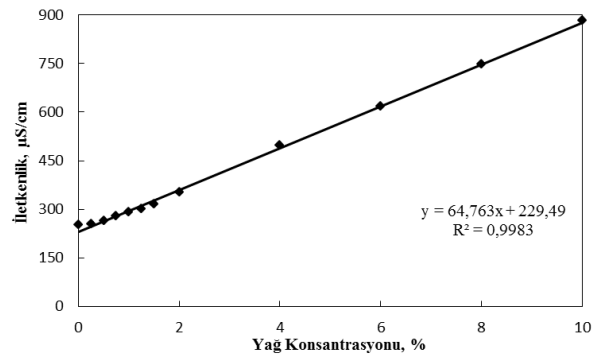
Yağlı atıksuların karakterizasyonunda Tablo 1'de sunulan ölçümlerin dışında, yağ konsantrasyonuna bağlı olarak atıksuyun iletkenlik ve bulanıklık değişimleri ölçülmüştür. Elektrokoagülasyon ile arıtmada suyun iletkenliği enerji tüketimini belirleyen en önemli parametredir. Ayrıca, farklı pH değerlerinde atıksuların zeta potansiyel ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon deneylerinde, EHY ve EHD'de, elektrotlara uygulanan voltaj farkı, elektrot alanı ve elektrotların elektrokimyasal

hücrelerdeki konumlarının bulanıklık giderimine olan etkileri araştırılmıştır. Bulanıklık gideriminin incelendiği deneylerde, en iyi verimi sağlayan parametrelerle deneyler tekrar edilerek atıksuyun KOİ giderim verimi incelenmiştir. Son olarak, elektrokoagülasyon deneylerinde tüketilen enerji miktarı EHY ve EHD için hesaplanarak, spesifik enerji tüketimleri karşılaştırılmıştır.

### 3.1 Yağlı Atıksuların Karakterizasyonu

#### a) İletkenlik Ölçümleri

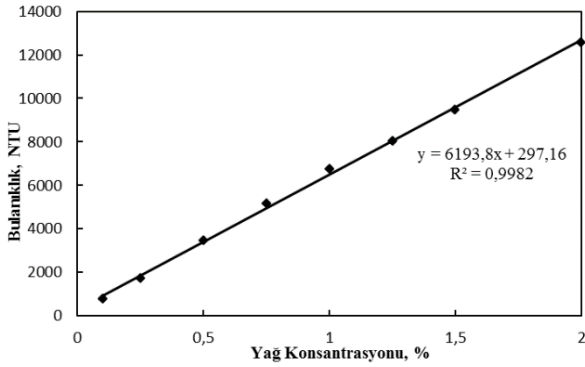
Farklı konsantrasyonlarda bor yağı içeren atıksu numuneleri hazırlanarak iletkenlik değerleri ölçülmüştür (Şekil 3). Yağ konsantrasyonu arttıkça iletkenliğin doğrusal olarak artış gösterdiği görülmektedir ( $R^2=0,9983$ ). İletkenlikteki bu artış, bor yağının içerisinde bulunan farklı katkı maddelerinden (yüzey katkı maddeleri, sülfürlü, klorlu ve fosforlu bileşikler, hayvansal ve bitkisel kaynaklı yağlar, pas ve korozyon önleyici katkılar, vb.) kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. Atıksudaki yağ konsantrasyonunun iletkenlik değişimine etkisi

#### b) Bulanıklık Ölçümleri

Atıksuların içerdiği yağ yüzdelere bağlı olarak bulanıklık değerlerindeki değişimler Şekil 4'de görülmektedir. Elde edilen sonuçlar yağ yüzdesi ile bulanıklık değerleri arasındaki korelasyon katsayısının 1'e çok yakın olduğunu (0,99) göstermektedir. Yağ yüzdesi ile bulanıklık arasında bulunan bu doğru orantı nedeniyle, elektrokoagülasyon deneylerinde arıtma verimi bulanıklık giderimine göre hesaplanmıştır.

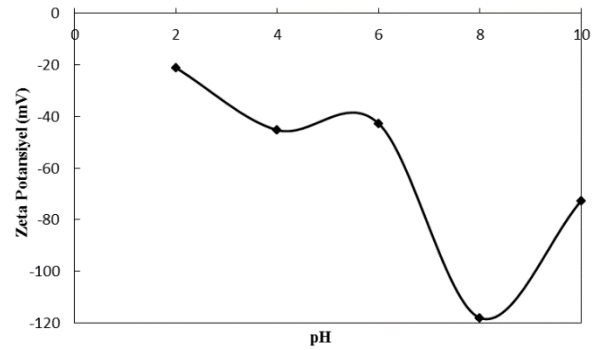


Şekil 4. Atıksudaki yağ konsantrasyonunun bulanıklık değerine etkisi

### c) Zeta Potansiyel Ölçümleri

Zeta potansiyel, atıksuyun kararlılığının belirlenmesinde önemli bir parametredir (McClements2007). Atıksudaki yağ damlalarının yüzey yüklerinin artması ile damlaların birbirini itme kuvveti artacağından atıksuyun kararlılığı artmaktadır. Yüzey yüklerinin azalması ise atıksuyun kararlılığını azaltarak faz ayrımlarının oluşmasına neden olmaktadır. Atıksu numunelerinde bulunan yağ damlalarının zeta potansiyellerinin ölçümü için % 0,25 oranında bor yağı içeren atıksu numuneleri hazırlanmış ve farklı pH değerlerine ayarlanarak zeta potansiyel ölçümleri "Malvern Zeta-Meter System 4.0" cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5'de sunulmaktadır. % 0,25 oranında bor yağı içeren atıksuyun pH değeri 8'dir. Atıksuyun pH değerleri sodyum hidroksit ve hidroklorik asit kullanılarak 2-10 aralığına ayarlanmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre, yağ damlalarının bu pH değerlerinde negatif olduğu belirlenmiştir. Yağ damlalarının hidroksilleri adsorplayarak çok geniş bir pH aralığında negatif yüzey yüküne sahip olduğu düşünülmektedir (Rios et al. 1998). Metal kesme sıvıları suyla karıştırılarak kullanıldığından genellikle pH 7-9 aralığında kararlı bir dispersiyon oluşturulacak şekilde tasarlanır. Bor yağı damlalarının yüzey yüklerinin pH 6-8 aralığında oldukça negatif yüklendiği görülmektedir (Şekil 5). Ancak pH 8'den 10'a yükseldiğinde damlaların yüzeyindeki negatif yükün azaldığı görülmektedir. Damlaların yüzey yüklerindeki bu değişim, yağ damlalarının pH'a bağlı protonasyona uğrayabilen

ve iyonize edilebilir fonksiyonel gruplar içerdiği kabulü ile açıklanmaktadır (Knecht et al. 2010). Yüzey yükünün en fazla olduğu zeta potansiyel değeri, pH 8'de elde edilmiştir.

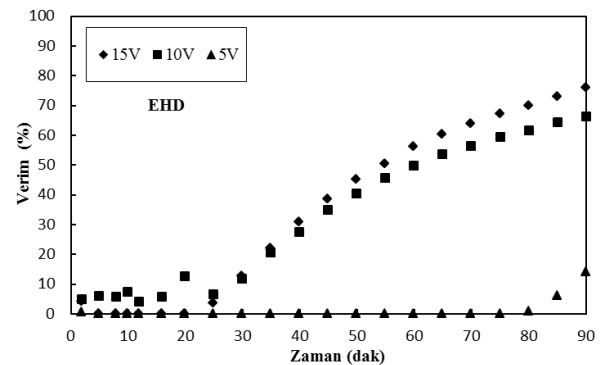
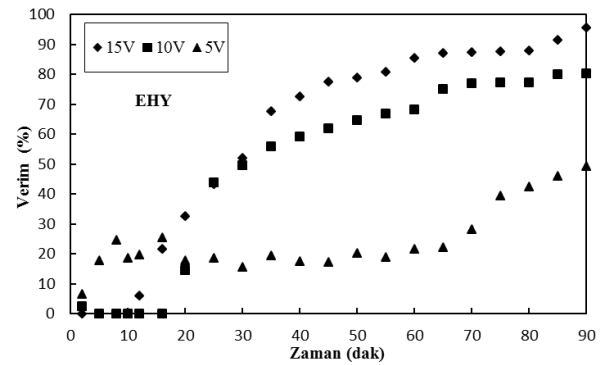


Şekil 5. Bor yağı içeren atıksuyun farklı pH değerlerinde zeta potansiyel ölçümleri

## 3.2 Yağlı Atıksuların Elektrokoagülasyon ile Arıtımı

### a) Elektrotlara Uygulanan Voltaj Farkının Giderim Verimine Etkisi

Deneylerde 8 adet elektrot kullanılmıştır ve elektrotlar elektrokimyasal hücrelerin orta bölümüne yerleştirilmiştir. Elektrotlara 5, 10 ve 15 V uygulamalarında EHY ve EHD'de gerçekleştirilen deney sonuçları Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Elektrotlara uygulanan voltaj farkının bulanıklık giderim verimine etkisi

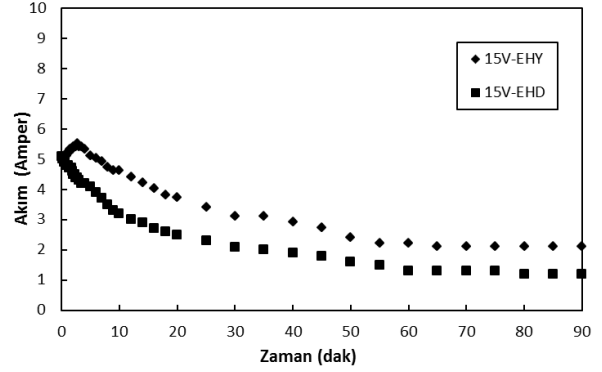
5, 10 ve 15 V'luk voltaj farkları elektrotlara uygulandığında, 90 dakikada EHY'de elde edilen bulanıklık giderim verimleri sırasıyla %49, %80 ve %95 iken, EHD'de elde edilen verimler %14, %66 ve %76'dır. EHY ve EHD'nin voltaj artışına gösterdiği tepki benzerlik göstermektedir. Sonuçlara göre, her iki elektrokimyasal hücrede de 5 V voltaj farkı uygulaması, bor yağı içeren atıksuyun arıtımında yetersiz kalmaktadır.

Şekil 6 incelendiğinde EHY ve EHD'de arıtımın ilk 20 dakikasında bulanıklığın arttığı, yani giderimin olmadığı görülmektedir. Bulanıklıktaki bu artışa elektrotlara uygulanan voltaj farkı nedeniyle ortama verilen  $Al^{+3}$  iyon konsantrasyonundaki artışın neden olduğu düşünülmektedir. Her iki elektrokimyasal hücreden elde edilen sonuçlar, elektrotlara uygulanan voltaj farkının artmasının bulanıklık giderim verimini arttırdığını ancak bu artışın doğrusal olmadığını göstermektedir. Faraday yasasına göre elektrotlara uygulanan voltaj farkı arttığında elektrotlardan ortama verilen alüminyum iyonları artacağından ortamdaki alüminyum hidroksit floklarının miktarı artacaktır. Yağ damlaları oluşan floklara adsorplanarak sudan ayrıldığından giderim veriminde artış gözlenecektir. Ancak voltajın artırılması elektrotlarda reaksiyon hızlarını artırabilse de akım veriminde önemli bir azalmaya neden olmaktadır. Bu nedenle belirli bir voltaj değerinden sonra potansiyel farkındaki artış giderim veriminde artış sağlayamamaktadır

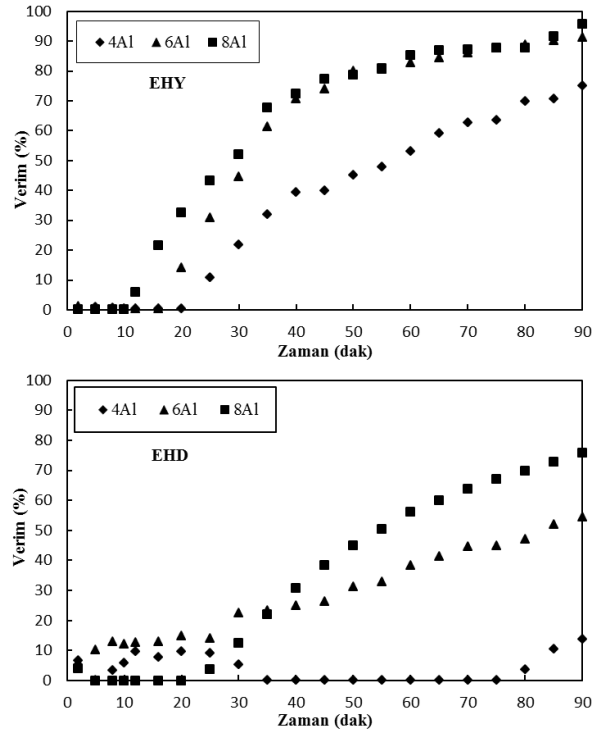
15 V voltaj farkı uygulamasında EHY'de bulanıklık giderim verimi EHD'ye göre %25 daha fazladır. Uygulamalar esnasında, EHD'de oluşan floklar ünitenin üst kısmına doğru yol alırken, elektrotlar arasına sıkışarak ortam direncini yükselttiği gözlenmiştir. Direncin artışına bağlı olarak, akım değerlerindeki düşüş giderim veriminin azalmasına neden olmuştur (Şekil 7).

#### b) Elektrot Alanının Giderim Verimine Etkisi

Bu çalışmada, elektrot alanının giderim verimine etkisini incelemek amacı ile 4, 6 ve 8 alüminyum levha elektrot ile kesikli akışlı çalışma modunda gerçekleştirilen deneylerde elektrotlara uygulanan voltaj farkı 15 V, debi ise 90 mL/dak'dır. EHY ve EHD'de gerçekleştirilen deney sonuçları Şekil 8'de sunulmuştur.



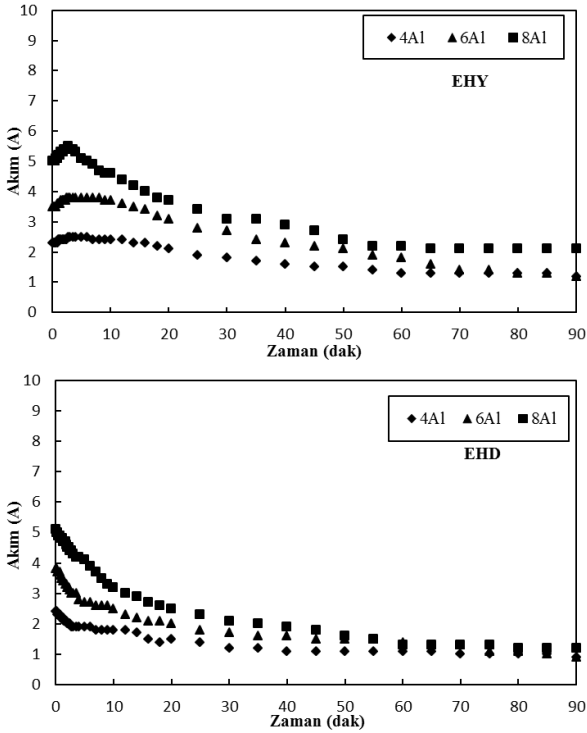
Şekil 7. Elektrotlara uygulanan voltaj farkının akım değişimine etkisi



Şekil 8. Elektrot alanının bulanıklık giderim verimine etkisi

Şekil 8 incelendiğinde EHY için her üç elektrot sayısında da 20. dakikadan itibaren bulanıklık giderim veriminin artmaya başladığı görülmektedir. EHD'de ise 4 adet alüminyum elektrot kullanılması, bor yağı içeren atıksuyun arıtımı için yeterli olmamıştır. 90 dakikalık deney

sonucunda EHY’de 4, 6 ve 8 adet alüminyum elektrot kullanılarak yapılan deney sonucunda elde edilen bulanıklık giderim verimleri sırasıyla %70, %90 ve %95’dir. Şekil 9’da görüldüğü üzere elektrot alanının artması ile her iki elektrokimyasal hücrede ortamdan geçen akım artmaktadır. EHD’de yapılan 90 dakikalık deneylerde, 8 adet elektrot kullanılarak elde edilen maksimum giderim verimi %75’tir.

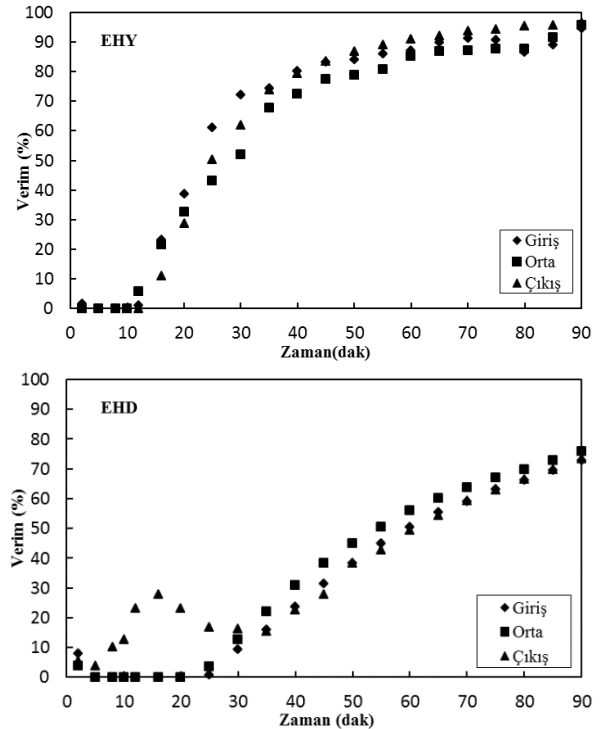


Şekil 9. Elektrot alanının akım değişimine etkisi

EHY ve EHD’de, elektrot alanının artması ile ortama verilen alüminyum iyonlarında Faraday Kanunu’na göre artış gerçekleştiği için, bulanıklık giderim verimleri de artış göstermiştir. Deneylerde kullanılan her bir elektrotun toplam yüzey alanı  $229,5 \text{ cm}^2$ ’dir ve 4, 6 ve 8 adet alüminyum elektrotun yüzey alanları sırasıyla 918, 1377 ve  $1836 \text{ cm}^2$  olarak hesaplanmıştır. Elektrot alanının değişimi ile EHY’de elde edilen bulanıklık giderim verimi, EHD’de elde edilen verimden %27 daha fazladır. Bulanıklık giderim verimindeki bu farklılık, EHD’de yüzeye doğru gitmekte olan flokların bir kısmının elektrotlar arasından geçemeyerek bulanıklığı arttırmamasından kaynaklanmaktadır.

### c) Elektrotların Elektrokimyasal Hücrelerdeki Konumunun Giderim Verimine Etkisi

Elektrotların EHY ve EHD’de farklı konumlarda bulunmasının giderim verimine etkisini belirleyebilmek amacıyla elektrotlar elektrokimyasal hücrelerin giriş, orta ve çıkış kısımlarına yerleştirilmiştir. “Giriş”, “Orta” ve “Çıkış” olarak isimlendirilen elektrot konumlarında ilk elektrotun elektrokimyasal hücrelerin giriş kısmına olan mesafesi sırası ile 4 cm, 12 cm ve 21 cm olarak ayarlanmıştır. Uygulamalarda 8 adet elektrot kullanılmış ve elektrotlara uygulanan voltaj farkı 15 V’da sabit tutulmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 10’da sunulmaktadır.



Şekil 10. Elektrotların elektrokimyasal hücrelerdeki konumlarının bulanıklık giderim verimine etkisi

Şekil 10 incelendiğinde, EHY ve EHD’de gerçekleştirilen kesikli akışlı deneylerde, elektrotların elektrokimyasal hücrelerin farklı konumlarına yerleştirildiğinde 90 dakika deney süresi sonunda, bulanıklık giderim veriminin her üç konum için de aynı olduğu görülmektedir. EHY’de deneyin başlangıcından itibaren ilk 15 dakika, her üç elektrot konumunda da bulanıklık değerlerinde artış gözlenirken, EHD’de bu artış

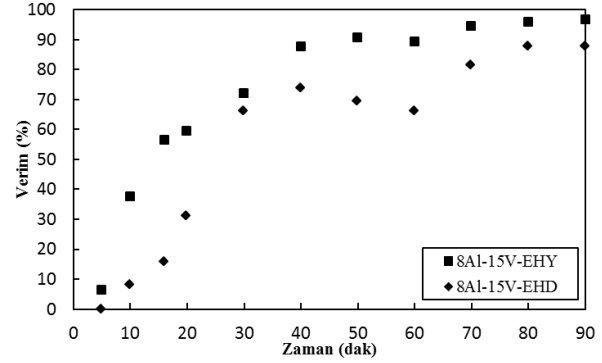
elektrotların “Giriş” ve “Orta” konumlarında gözlenmektedir. EHD’de elektrotlar “Çıkış” konumunda olduğunda ise bulanıklık değerlerinde ilk 30 dakika boyunca dalgalanmalar görülmüştür. Bunun sebebi elektrotların “Çıkış” konumunda, numune alım noktasına en yakın mesafede bulunmasıdır. Bulanıklık giderim verimindeki artış ve azalışlara elektrotlardan ortama verilen alüminyum iyonlarının konsantrasyonu ve oluşan gaz kabarcıkları neden olmaktadır. EHD’de elektrotlar “Çıkış” konumunda bulunduğu, oluşan floklar gaz kabarcıkları ile yüzeye taşınmış ve dolayısıyla alınan numunelerin bulanıklık değerlerinde diğer konumlarda olduğu gibi alüminyum iyonlarına bağlı bir artış gözlenmemiştir. Elektrotların her üç konumunda da, 90 dakika sonunda, EHY ve EHD’de elde edilen bulanıklık giderim verimleri ortalama olarak sırasıyla %95 ve %75’tir.

### 3.3 Kimyasal Oksijen İhtiyacı Giderimi (KOİ)

Bulanıklık giderim veriminin belirlendiği deneylerden elde edilen optimum şartlar kullanılarak EHY ve EHD’de, kesikli akışlı çalışma modunda elektrokoagülasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. En iyi giderim verimi 15 V ve 8 elektrot kullanılarak elde edildiği için deneylerde bu değerler kullanılmıştır. Uygulamalarda elektrotlar, elektrokimyasal hücrelerin “Orta” bölümüne yerleştirilmiştir ve sonuçlar Şekil 11’de sunulmuştur. Her iki elektrokimyasal hücrede de oldukça yüksek KOİ giderim verimi elde edilmiştir. EHY ve EHD’de, elektrokoagülasyon deneyleri sonucunda elde edilen KOİ giderim verimleri sırasıyla %97 ve %88’dir. EHY’de oluşan flokların elektrotların arasından kolayca yukarı çıkabilmesine bağlı olarak ortam direncinde çok büyük artışlar meydana gelmemektedir. Bu nedenle EHY’de EHD’ye göre daha yüksek akım değerlerinde çalışılabilmekte ve böylelikle daha yüksek KOİ giderim verimi elde edilmektedir.

### 3.4 Elektrokimyasal Hücrelerin Enerji Tüketimlerinin Karşılaştırılması

Elektrokoagülasyon deneylerinde tüketilen spesifik enerji miktarları bulanıklık ve KOİ giderimine bağlı olarak hesaplanmıştır. 90 dakika deney süresi için yapılan hesaplamalarda Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 kullanılmıştır ve enerji tüketim değerleri Tablo 2’de sunulmuştur



Şekil 11. Elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen KOİ giderim verimleri

EHY’de elde edilen bulanıklık ve KOİ giderim verimleri EHD’de elde edilen değerlerden daha yüksektir. Ancak, EHD yerine EHY kullanarak bulanıklık giderimini %76’dan %95’e yükseltmek için, %18 oranında daha fazla enerji tüketimi gerekmektedir. Ayrıca, KOİ gideriminde EHD kullanıldığında %88, EHY kullanıldığında ise %97 oranında verim sağlanmıştır. Ancak, %97 giderim verimi sağlandığında spesifik enerji tüketiminde %47 artış elde edilmiştir.

Tablo 2. Elektrokimyasal hücrelerde elde edilen giderim verimleri ve enerji tüketimleri

	Birimler	Elde Edilen
EHY	Bulanıklık Giderimi	% 95
	KOİ Giderimi	% 97
	$E_s$	$\text{kWsa/m}^3$ 11,77
	$E_{s, \text{KOI}}$	$\text{kWsa/kg}_{\text{KOI}}$ 0,22
EHD	Bulanıklık Giderimi	% 76
	KOİ Giderimi	% 88
	$E_s$	$\text{kWsa/m}^3$ 9,97
	$E_{s, \text{KOI}}$	$\text{kWsa/kg}_{\text{KOI}}$ 0,15



#### 4. Sonuç

Bor yağı kullanılarak hazırlanan sentetik atıksunumuneleri ile yapılan elektrokoagülasyon deney sonuçlarına göre elektrotlara uygulanan potansiyel fark, elektrot alanı ve elektrot yerleşim düzeni giderim verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Elektrotlara uygulanan potansiyel fark arttıkça giderim verimi artmaktadır, ancak bu artış doğrusal değildir. Elektrotlarda 5, 10 ve 15 V potansiyel farkı uygulandığında EHY’de elde edilen bulanıklık giderim verimleri sırasıyla %49, %80 ve %95’tir. EHD’de aynı voltaj farklarında ulaşılan verim değerleri ise %13, %66 ve %76 olarak belirlenmiştir. Elektrot alanının 2 kat artırılması ile EHY’de bulanıklık giderim verimi %70’den %95’e ve EHD’de %13’den %76’ya yükselmiştir.

EHY’de elde edilen bulanıklık ve KOİ giderim verimleri EHD’de elde edilen değerlerden daha yüksektir. Ancak, EHD yerine EHY kullanarak bulanıklık giderimini %76’dan %95’e yükseltmek için, %18 oranında daha fazla enerji tüketimi gerekmektedir. Benzer şekilde, KOİ gideriminde de EHY kullanılması, %47 oranında daha fazla enerji tüketimine neden olmaktadır. Bu nedenle EHD elektrot yerleşim düzeninde enerji tüketiminin azaltılması için farklı çözümlerin araştırılması gerekmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma Bülent Ecevit Üniversitesi 2014-77047330-06 nolu Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklenmiştir.

#### Kaynaklar

- Adhoum, N., and Monser, L., 2004. Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. *Chemical Engineering and Processing*, **43**, 1281-1287.
- Cambiella, A., Benito, J. A., Pazos, C., and Coca, J., 2007. Interfacial properties of oil-in-water emulsions designed to be used as metalworking fluids. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, **305**, 112-119.
- Chen, G. H., 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, **38**, 11-41.

- Cheng, C., Phipps, D., and Alkhaddar, R. M., 2005. Treatment of spent metalworking fluids. *Water Research*, **39**, 4051-4063.
- Dubrawski, K. L., Du, C., and Mohseni, M., 2014. General Potential-Current Model and Validation for Electrocoagulation. *Electrochimica Acta*, **129**, 187-195.
- Fadali, O. A., Ebrahiem, E. E., El-Gamil, A., and Altaher, H., 2016. Investigation of the Electrocoagulation Treatment Technique for the Separation of Oil from Wastewater. *Journal of Environmental Science and Technology*, **9**, 62-74.
- Fouad, Y. O., 2013. Electrocoagulation of Crude Oil From Oil-In-Water Emulsions Using a Rectangular Cell with a Horizontal Aluminium Wire Gauze Anode. *Journal of Dispersion Science and Technology*, **34**, 214-221.
- Fouad, Y. O. A., Konsowa, A. H., Farag, H. A., and Sedahmed, G. H., 2009. Performance of an electrocoagulation cell with horizontally oriented electrodes in oil separation compared to a cell with vertical electrodes. *Chemical Engineering Journal*, **145**, 436-440.
- Greeley, M., and Rajagopalan, N., 2004. Impact of environmental contaminants on machining properties of metalworking fluids. *Tribology International*, **37**, 327-332.
- Hansen, H. K., Nunez, P., Raboy, D., Schippacasse, I., and Grandon, R., 2007. Electrocoagulation in wastewater containing arsenic: Comparing different process designs. *Electrochimica Acta*, **52**, 3464-3470.
- Hassan, I., Nirdosh, I., and Sedahmed, G. H., 2015. Separation of Oil from Oil-Water Emulsions by Electrocoagulation in an Electrochemical Reactor with a Fixed-Bed Anode. *Water Air and Soil Pollution*, **226**.
- Holt, P. K., Barton, G. W., and Mitchell, C. A., 2005. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, **59**, 355-367.
- Knecht, V., Levine, Z. A., Vernier, T. 2010. Electrophoresis of neutral oil in water. *Journal of Colloid and Interface Science*, **352**, 223-231
- McClements, D. J., 2007. Critical review of techniques and methodologies for characterization of emulsion stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **47**, 611-649.

Rios, G., Pazos, C., and Rios, J. C., 1998. Destabilization of cutting oil emulsions using inorganic salts as coagulants. *Colloid Surface A*, **138**, 383-389.

Zimmerman, J. B., Hayes, K. F., and Skerlos, S. J., 2004. Influence of ion accumulation on the emulsion stability and performance of semi-synthetic metalworking fluids. *Environmental Science & Technology*, **38**, 2482-2490.