

## Doğrudan Güneş Enerjisi Kullanılarak Tekstil Atıksularının Elektrokoagülasyon ile Arıtımı

Gülizar KURTOĞLU AKKAYA<sup>1\*</sup>, İbrahim ÜÇGÜL<sup>2</sup>

### Öz

Bu çalışmada, yenilenebilir bir enerji kaynağı güneş enerjisi ve atık metaller kullanılarak yeşil ve sürdürülebilir bir elektrokoagülasyon prosesi ile yüksek boya konsantrasyonu içeren tekstil atıksuların arıtımı değerlendirilmiştir. Doğrudan bir fotovoltaik panel (PV) ile desteklenen elektrokoagülasyon sürecinde ilk olarak güneş enerjisinden elde edilen akımın, tekstil atıksuyundaki değişimleri on saat boyunca izlenmiş ve kaydedilmiştir. Elde edilen akım değerleri 0,5A-2A aralığında değişmiş ve bu aralıkta yedi farklı akımda farklı elektroliz sürelerinde (0-60 dakika) hurdaya ayrılmış demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon ile arıtım gerçekleştirilmiştir. Arıtım sonrasında KOİ ve renk giderim verimleri belirlenmiş ve her birim akım değeri için optimum elektroliz süresi elde edilmiştir. Ayrıca, asidik, nötr ve alkali pH koşullarında kirlilik giderimi değerlendirilmiştir. Sonuç olarak pilsiz doğrudan elektrokoagülasyonla tekstil atıksularının arıtımı atıksu pH'sında 1A 15 dk işletme koşulunda en yüksek KOİ (%92) ve renk (%95) giderimi elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrokoagülasyon, fotovoltaik panel, güneş enerjisi, tekstil atıksuyu

## Treatment of Textile Wastewater by Electrocoagulation Using Direct Solar Energy

### Abstract

In this study, the treatment of textile wastewater containing high dye concentration was evaluated by a green and sustainable electrocoagulation process using solar energy which is a renewable energy source and waste metals. In the electrocoagulation process directly supported energy by a photovoltaic panel (PV), the changes in the current obtained from the solar energy in the textile wastewater were monitored and recorded for ten hours. The current values varied in the range of 0.5A-2A, and in this range, the electrocoagulation was carried out using scrap iron electrodes at different electrolysis times (0-60 min) at seven different currents. After the treatment, the COD and color removal efficiencies were determined, and the optimum electrolysis time was obtained for each unit current value. In addition, pollution removal was evaluated at acidic, neutral and alkaline pH conditions. As a result, the highest COD and color removal were achieved in the treatment of textile wastewater with battery-free direct electrocoagulation at 1A 15 min operating condition at wastewater pH and were determined as 92% and 95%, respectively.

**Keywords:** Electrocoagulation, photovoltaic panel, solar energy, textile wastewater.

<sup>1</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, ka.gulizar@gmail.com, gakkaya@erbakan.edu.tr

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Isparta, Türkiye,

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, ibrahimucgul@sdu.edu.tr

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-4779-0428>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-9794-0653>

## 1. Giriş

Tekstil endüstrisi, haşıl sökme, yıkama, ağartma, boyama ve baskı gibi birçok farklı ıslak işleme operasyonları için önemli miktarda su tüketen ve çok çeşitli özelliklere sahip olan bir atıksu üretmektedir. Bu nedenle, gerçek endüstriyel tekstil atıksuları, son derece karmaşık bir matrise sahip yüksek oranda kirlenmiş ve zehirli atıksulardır (Jegatheesan ve ark., 2016). Yüksek oksijen ihtiyacı (özellikle kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), yüksek renk konsantrasyonu ve büyük miktarda toplam askıda ve çözünmüş katı madde tekstil atıksu matrisinin en belirgin özellikleridir (Aouni ve ark., 2009; El-Gohary & Tawfik, 2009). Bu sebeple, uygun bir arıtma yönteminin seçimi kirleticilerin zararlı etkilerini en aza indirmek için önemlidir.

Tekstil atıksularının arıtılması için biyolojik arıtma, adsorpsiyon, iyon değişimi ve membran filtrasyonu, kimyasal pıhtılaşma ve elektrokoagülasyon gibi fiziksel veya elektrokimyasal prosesler uygulanmaktadır (Siddique ve ark., 2017). Elektrokoagülasyon, endüstriyel atıksuların arıtılması için etkili ve öne çıkan proseslerden biridir ve geleneksel pıhtılaşma yöntemlerine göre birçok avantajı bulunmaktadır (De Maman ve ark., 2022; Pacheco ve ark., 2022).

Elektrokoagülasyon, sulu çözelti içerisinde daldırılmış anot ve katottan oluşan metal elektrotlara elektrik akımının uygulanması ile atıksu arıtımını sağlayan bir prosesdir. Uygulanan akım ile elektrotlar çözelti içerisinde çözünür ve çözünen anotta oksidasyon katotta ise indirgeme meydana gelmektedir (Mollah ve ark., 2001). Çözünmüş metalik iyonlar ile suda bulunan kirleticilerin reaksiyona sonucu atıksu arıtımı gerçekleşmektedir. Genellikle proseste demir (Fe) ve alüminyum metalleri kullanılmaktadır. Elektrokoagülasyonda Fe elektrot kullanıldığında sulu çözeltide meydana gelen ana anodik ve katodik reaksiyonlar Denklem (1) ve (2)'de verilmiştir.



Elektrokoagülasyon ile atıksu arıtımında elektrot maliyeti ve enerji tüketim maliyetleri, arıtma prosesinin kullanılabilirliğini sınırlayan faktörlerdir. Bu sebeple birçok araştırmacı bu konu üzerinde araştırmalar yapmaktadır. Birçok çalışmada atık hurda metallerin elektrokoagülasyonda kullanılarak elektrot maliyetinin ortadan kaldırılabilceği belirtilmiştir (Akkaya, 2022; Bani-Melhem ve ark., 2023; Nippatla & Philip, 2020). Saf metaller kadar verimli bir arıtma sağlayan hurda metaller, son yıllarda elektrokoagülasyon çalışmalarında tercih edilmeye başlanmıştır.

Bununla birlikte, enerji maliyetini en aza indirmek için elektrokimyasal arıtma teknikleri ile yenilenebilir bir enerji kaynağı kombine edilerek yeşil teknolojiler geliştirilmiştir. En yaygın ve incelenenlerden biri fotovoltaiik güçtür (Valero ve ark., 2008). Fotovoltaiik hücreler (PV) sayesinde

güneş enerjisinden arıtma için gerekli olan elektrik akımı sağlanarak etkili ve ucuz arıtma yapılabilir. Bu nedenle, birçok araştırmacı çalışmalarını elektrokimyasal süreçlere güç sağlamak için yeşil enerjilerin kullanımına odaklanmıştır (Pandey ve ark., 2021; Park ve ark., 2008; Valero ve ark., 2014). Çalışmalarda, PV modülü doğrudan reaktöre bağlanarak, güneş enerjisinin daha kolay bir şekilde daha yüksek verimlilikle çalıştırılması, ekipman ve bakım maliyetlerinde azalma sağlanması ve enerji depolama için gerekli pilin kullanılmaması ile sonrasında meydana gelecek pil atığının olmaması düşünülmüştür (Thomson & Infield, 2003; 2005). Buna ilaveten, güneşten elde edilen enerjinin gece ve sıfır üretim saatlerinde kullanılabilmesi için enerji depolama ekipmanına ihtiyaç olduğu da belirtilmektedir. Ancak, enerjinin depolamasında kimyasal ve elektrik enerjileri arasındaki dönüşüm enerji kayıplarına yol açabilmektedir.

Yapılan çalışmada, yüksek boya konsantrasyonu içeren bir tekstil atıksuyunun etkili ve düşük maliyetli arıtımı için pilsiz, doğrudan güneş enerjisi kullanılarak elektrokoagülasyon ile arıtımı amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk adımında PV modülden sağlanan enerjinin tekstil atıksuyu üzerindeki akım değişimleri kaydedilmiştir. Elde edilen en düşük ve en yüksek akım değerleri arasında belirlenen farklı akım koşullarında hurda metaller kullanılarak renk ve kirletici giderimi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, hem PV hem de hurda metaller kullanılan elektrokoagülasyon ile etkili ve sıfır arıtma maliyetli atıksu arıtımı sağlanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Atıksu Temini ve Karakterizasyonu

Tekstil atıksuyu, reaktif boyar maddelerin kullanıldığı bir iplik fabrikasının atıksu arıtma tesisinden alınmıştır. Fabrikada, iplik boyama için çektirme (exhaust), terbiye için ise emdirme (pad batch) yöntemleri kullanılmaktadır. Reaktif boyar madde türü fabrikadan talep edilen ipliğin rengine göre çeşitlilik göstermektedir. Terbiye tesisinde boyanan iplikteki boya fazlalığını gidermek için zaman zaman yıkama yapılmaktadır. Fabrika atıksu arıtma tesisine, fabrikanın iplik boyama, evsel atıksu ve terbiye tesisi birimlerinden atıksular gelmektedir. Bu atıksular sülfirik asit veya hidroklorik asit (HCl) ile nötralize edilerek biyolojik arıtma yapılmaktadır. Arıtılan su çöktürme işlemlerinden sonra şehir kanalizasyon hattına deşarj edilmektedir.

Bu çalışmada arıtma tesisi girişinden ayın farklı iki gününde atıksu numuneleri alınmıştır. Kompozit tekstil atıksuyunun karakterizasyonu Tablo1'de verilmiştir. Arıtma tesisine terbiye tesisinden gelen yıkama suları sebebiyle bu çalışmada kullanılan KOİ konsantrasyonu 479 mg/L olmuştur. Atıksu deneysel çalışmalar gerçekleşene kadar +4 °C'de bekletilmiştir.

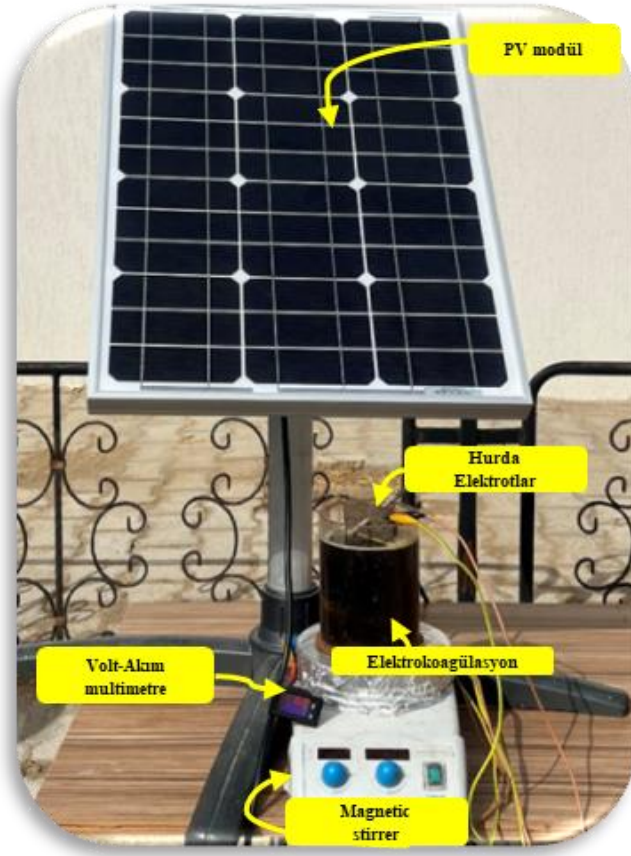
**Tablo 1.** Deneysel çalışmada kullanılan atıksu bileşimi

<b>Parametre</b>	<b>Değer (mg/L)</b>
KOİ	479
pH	10,1
Klorür	9,99
Renk	1049 Pt-Co
NH <sub>3</sub> -N	19,2
Bulanıklık	22,8 NTU
İletkenlik	4,30 mS/cm
<b>Metaller</b>	<b>Değer (mg/L)</b>
K	17,36
Cr	0,01
Mn	0,04
Fe	0,68
Co	<0,00
Ni	<0,00
Cu	0,24
Zn	0,43
As	0,01
Se	<0,00
Cd	<0,00
Pb	0,04

Atıksuyun iletkenlik ve pH ölçümleri, Hach Multi-HQ40d Cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. KOİ, potasyum dikromat yöntemi (Standart Methods 5220-D) ile birlikte kapalı reflux yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir (APHA, 1981). Numunenin renk değerleri, bir DR 6000 HACH spektrofotometresinde 455 nm'de Pt-Co olarak ölçülmüştür. Bulanıklık, bir bulanıklık ölçer (Hach 2100 Series) kullanılarak belirlenmiştir. Atıksuyun metal tayini için öncelikle mikrodalga parçalama (MARS 6 Microwave Acid Digestion) yapılmıştır. Sonrasında elde edilen örnekler, endüktif olarak eşleştirilmiş bir plazma kütle spektrometresi (ICP-MS) (Agilent Technologies-7900 ICP-MS/ASX 500) kullanılarak metal konsantrasyonları tayin edilmiştir (APHA, 1981). Atıksuyun pH'sını değiştirmek için HCl (6M, 0.01 M) ve sodyum hidroksit (NaOH, 6M, 0.01 M) kullanılmıştır. Ayrıca atıksuyun iyonik gücünü arttırmak için atıksuya 0,5 g/L NaCl eklenmiştir.

## 2.2. PV Modül-Elektrokoagülasyon Prosesi

Çalışmada kullanılan PV modül modül tipi 40w-mONO'dır. Maksimum güç akımı 2,273 amper (A) ve maksimum güç voltajı 17,60 voltur (V). Ağırlığı 3 kg ve boyutları 565\*420\*28 mm şeklindedir. Akım ve voltaj değerlerini gösteren bir multimetre PV modüle bağlanmıştır. Elektrokoagülasyon reaktörü pleksiglas malzemeden yapılmış, çapı 9 cm, yüksekliği 15 cm'dir. Elektrokoagülasyonda 2\*70\*110 mm boyutlarda iki çift Fe plaka elektrotlar kullanılmış ve elektrotlar, hurdaya ayrılmış malzemelerden şekillendirilmiştir. Deneysel çalışmanın görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir.



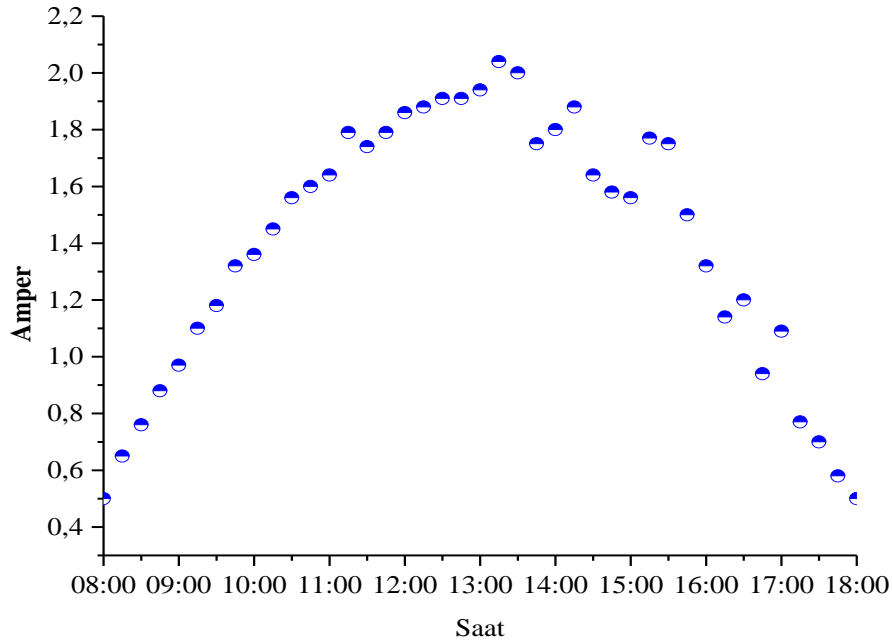
Şekil 1. Pilsiz PV modüle bağlanmış elektrokoagülasyon prosesi

Çalışmalar, Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Uygulama Merkezi bahçesinde gerçekleştirilmiştir. PV modül, güneş ışınlarının en verimli sağlandığı noktaya yerleştirilmiştir. PV modülden Fe-Fe elektrotlar vasıtasıyla aktarılan enerji, atıksu iletkenliğine ve elektrot cinsine göre farklılık gösterebilmektedir. Dolayısıyla, arıtım çalışmaları öncesinde atıksuya PV modül vasıtasıyla geçen akım tayin edilmiştir. Bunun için, 23 Haziran 2022’de sabah 08.00-18.00 arası her 15 dk’da bir multimetre aracılığı ile atıksuya geçen akım değerleri not edilmiştir. Eş zamanlı olarak aynı işlem doğru akım güç kaynağına bağlı elektrotlarla yapılarak elde edilen akım ve voltaj değerleri kontrolü yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında, atıksuyun kendi pH değerinde ve farklı elektroliz sürelerinde (0, 5, 10, 15, 20, 25, 35, 45 ve 60 dk) 250 mL tekstil atıksu numunesinde elektrokoagülasyon deneyleri yapılmıştır. Reaktörde atıksuyun homojen bir karışımı, bir manyetik karıştırıcı vasıtasıyla 200 rpm hız ile sağlanmıştır. Elektrotlar, her elektrokoagülasyon çalışmasından önce aseton ve ardından damıtılmış su ile yıkanmıştır. Çalışmalar tamamlandıktan sonra numuneler laboratuvar koşullarında 1 saat bekletilmiştir. Elde edilen duru fazların, KOİ analizi ve renk tayinleri yapılmış ve giderim verimleri hesaplanmıştır. Analizler iki tekrarlı yapılmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Tekstil atıksuyunun üzerinde PV modülün performansı

Tekstil atıksuyunun elektrokoagülasyon prosesi ile arıtılması için gerekli olan akım, PV modül aracılığıyla güneşten sağlanmıştır. PV modüle bağlı multimetre ile 8.00-18.00 arası atıksuya verilen akım izlenmiş ve 15 dk arayla not edilmiştir. Şekil 2’de elde edilmiş akım değerleri gösterilmiştir. Sonuçlara göre güneşin dik açı ile geldiği saatlerde daha fazla akım elde edilmiştir. Gün içerisinde, güneşe bağlı olarak akım değerleri öğle saatlerine kadar artma ve öğle sonrasında azalma göstermiştir. Çalışma esnasında, bazı saatlerde bulutlar güneş ışınlarının etkili bir şekilde gelmesine engel olmuştur. Bu durum, akım değerlerinde dalgalanmalar meydana getirmiştir. Sonuç olarak, en düşük 0,5A, en yüksek 2A’lik akım elde edilmiştir.



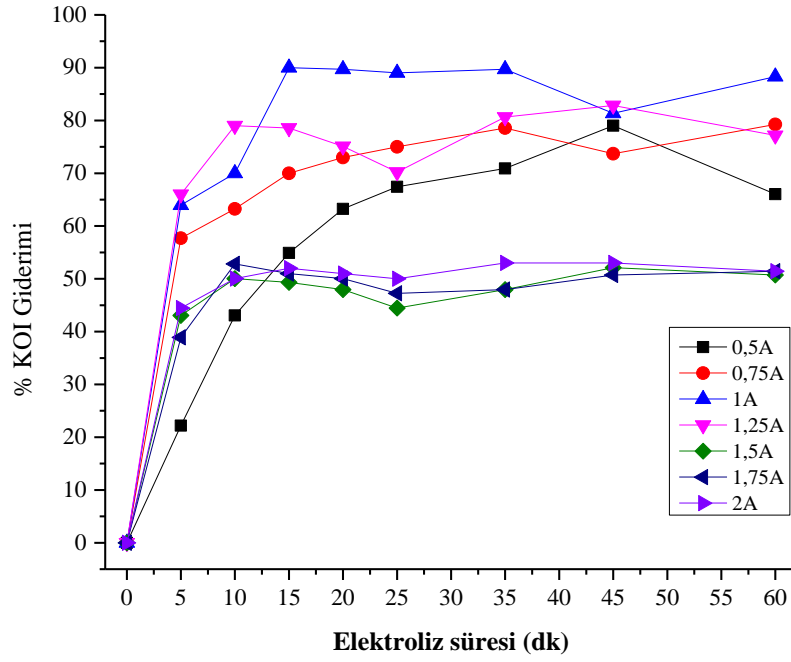
Şekil 2. PV modül aracılığıyla elektrokoagülasyon prosesine sağlanan akım değerleri

#### 3.2. Uygulanan akım etkisi

PV modülünden 10 saatlik süre içerisinde 0,5-2A aralığıyla akım elde edilmiştir. Pilsiz çalıştırılan bir PV-Elektrokoagülasyonda atıksuyun arıtma performansını değerlendirmek için yedi farklı akım değerinde (0,5A, 0,75A, 1A, 1,25A, 1,5A, 1,75A, 2A) sekiz farklı arıtma süresinde (0, 5, 10, 15, 20, 25, 35, 45, 60 dk) deneysel çalışma yapılmıştır. Akım süreleri maksimum 1 saatlik arıtma

süresi dikkate alınarak belirlenmiştir. Uzun arıtma sürelerinin fazla enerji gereksinimi olması sebebiyle 1 saatle sınırlı tutulmuştur.

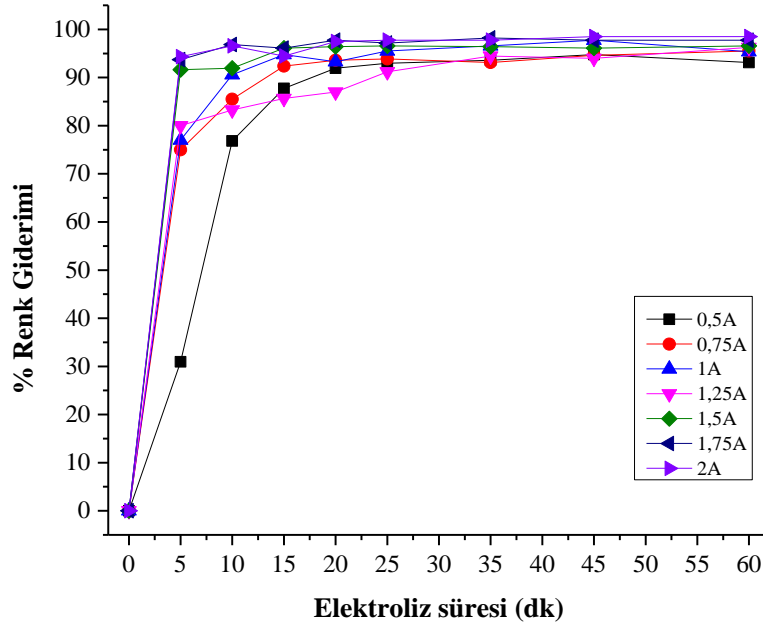
Şekil 3'te, tekstil atıksuyunun PV-Elektrokoagülasyon ile KOİ giderimi gösterilmiştir. En düşük giderim verimi 0,5A 5 dk'da (%22) elde edilmiştir. Ancak elektroliz süresinin artması ile giderim verimi artmış 0,5A için en optimum reaksiyon süresinin 45 dk (%79) olduğu görülmüştür. Ancak, 0,5A 60 dk gerçekleşen elektrokoagülasyonda KOİ giderim verimi düşüş göstermiştir. 0,75A ve 1A'da 5 dk'lık elektroliz süresinde yapılan elektrokoagülasyonda ise 0,5A'dan daha etkili bir arıtım meydana gelmiştir. 0,75A ve farklı elektroliz sürelerinde yapılan çalışmalarda en yüksek giderim verimi 35 dk'da %79 olarak elde edilmiştir. 1A için ise optimum süre 15 dk (%92) ve 1,25A için 10 dk (%79) olmuştur. Buna göre, yüksek KOİ giderimi için ortama verilen akım arttıkça elektroliz süresinin azaldığı görülmüştür. Ortama verilen akım yükseldikçe atıksu arıtımı daha kısa sürede gerçekleşmektedir. Faraday yasasına göre elektrokoagülasyonda metal elektrotların çözünmesiyle teorik üretilen iyon miktarı ortama verilen akım ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla, daha yüksek akımda, elektrot malzemesinin daha yüksek çözünmesi (Faraday yasası), daha yüksek demir hidroksit oluşum hızıyla birlikte çökeltme ve koagülasyon yoluyla daha yüksek KOİ giderim verimliliği sağlandığı belirtilmektedir (Golder ve ark., 2007; Guo ve ark., 2006). Ancak, 1,5A, 1,75A ve 2A akım değerlerinde yapılan elektrokoagülasyon çalışmalarında tekstil atıksuyunun arıtımı, aynı elektroliz sürelerinde elde edilen KOİ giderim verimlerine bakıldığında daha düşük giderim verimliliği elde edilmiştir. Atıksuya gerekenden fazla verilen akım, anotun daha fazla çözünmesine sebep olmaktadır. Sulu çözeltilerde, kirleticinin çökeltmesi için yeterli sayıda metal hidroksit yumakları mevcut olduğunda, kirletici giderme verimliliğinde bir artış gözlenmemektedir (Bharath ve ark., 2020). Çok yüksek metal iyon konsantrasyonları kolloidlerin kararsız hale gelmesine sebep olur ve kirletici gideriminde düşüşe neden olabilir (Sahu ve Chaudhari 2015). Bunun dışında, elektrokoagülasyon işleminden sonra katodik elektrodun yüzeyinde biriken ince kahverengimsi bir tabaka sebebiyle KOİ düşüşlerinin gözlemlendiği de bildirilmiştir (Asselin ve ark., 2008). Benzer durumlar, farklı çalışmalarda da ortaya konmuştur ( Sahu ve Chaudhari 2015; Singh ve ark., 2019; Sanei ve ark., 2022).



Şekil 3. Farklı akımlarda PV-Elektrokoagülasyon ile KOİ giderimi

Şekil 4, hurda elektrotlar kullanılarak yapılan PV-Elektrokoagülasyon ile tekstil atıksuyunun arıtımında renk giderim verimini göstermektedir. Farklı akım değerlerinde, 15 dk elektroliz süresinden sonra renk giderim verimi %85 üzeri elde edilmiştir. Sonuçlara göre akımın artması renk gideriminde oldukça etkilidir. En düşük renk giderimi en düşük akım ve elektroliz süresinde (0,5A 5dk) %31 olarak kaydedilmiştir. Ancak, 0,75A ve üzeri değerlerde 5 dk'lık elektroliz süresinde % 80 üzeri giderim verimi elde edilmiştir. Elektroliz süresinin artması renk giderimine katkı sağlamasına rağmen uygulanan elektrik akımının artması kadar hızlı bir katkı değildir. Bu sebeple renk gideriminde akımın artması daha etkili elektrokoagülasyon sağlamaktadır. Her ne kadar yüksek akım değerleri KOİ gideriminde etkili olmasa da renk gideriminde bu durum söz konusu değildir. Akım ve elektroliz süresi artışı neredeyse % 100 renk giderimi sağlamıştır.



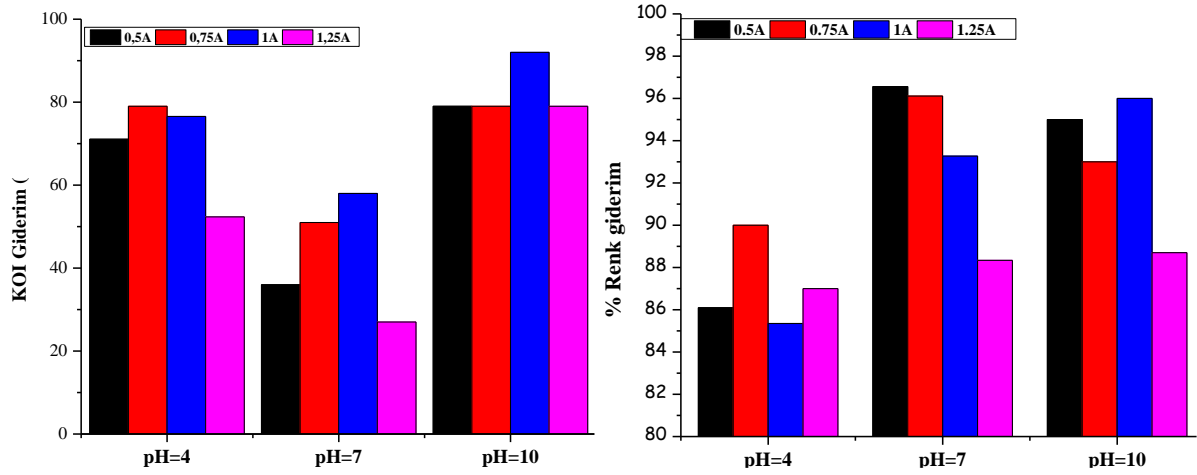


Şekil 4. Farklı akımlarda PV-Elektrokoagülasyon ile renk giderimi

KOİ ve rengin uzaklaştırma verimliliği, zamana ve potansiyel elektrolize bağlı üretilen  $Fe^+$  miktarına bağlıdır. Bu iki parametreden biri arttığında, koagülant metalik iyonların yoğunluğunun dağılımı daha etkilidir. Bu durum, ilgili koagülasyonu artırır ve kirleticilerin uzaklaştırılmasını tamamlar. Çalışmada PV'den elde edilen akımlar hava şartlarına göre değişiklik göstermektedir. Buna bağlı olarak atıksuya verilen akım değerleri değişiklik gösterebilmektedir. Bu yüzden her bir akım değeri için optimum elektrokoagülasyon şartları belirlenmiştir. En iyi KOİ ve renk gideriminin sağlandığı 0,5A, 0,75A, 1A ve 1,25A için elektroliz süresi sırasıyla 45dk, 35dk, 15dk ve 10dk'dır.

### 3.3. pH etkisi

Elektrokoagülasyon çalışmalarında pH etkili bir parametredir. Proseste,  $Fe^{+2}$  ve  $Fe^{+3}$  hidroksitlerin oluşumunda pH önemli bir rol oynamaktadır (Ghanbari & Moradi, 2015). Tekstil atıksuyunun pH değeri 10,1'dir. PV-Elektrokoagülasyon çalışmasında, optimum akım ve elektroliz sürelerinde asidik, nötr ve alkali atıksu koşullarında atıksu arıtımının etkinliği belirlenmiştir. Şekil 5'te pH'ya bağlı KOİ ve renk giderim verimleri verilmiştir.



Şekil 5. Asidik, nötr ve alkali şartlarda KOİ ve renk giderim verimlerinin karşılaştırılması

Tüm akım değerlerinde atıksuyun kendi pH'sında en etkili arıtım sağlandığı görülmektedir. KOİ giderimi nötr pH'da, pH=4 ve pH=10'a göre düşüş göstermiştir. Düşük pH (<4) değerlerinde, elektrokoagülasyonda anotta oluşan  $Fe^{+2}$  gibi metal türleri, tekstil atıksuyunda bulunan anyonik kolloidal partiküllere bağlanarak yüklerini nötralize eder ve çözünürlüklerini azaltarak çökelmelerini sağlamaktadır. Bu sebeple KOİ giderimi nötr pH'ya göre daha yüksek elde edilmiştir. Ancak, tam oksidasyon için pH>7 civarında bir pH değeri gereklidir. Ayrıca, pH 9'dan daha yüksek bir değerde  $Fe(OH)_3$  üretimi artmaktadır. Atıksuda oluşan  $Fe(OH)_3$  çökeltileri,  $Fe(OH)_2$ 'den daha iyi pıhtılaşma özelliğine sahip ve daha kararlıdır. Bu sebeple giderim verimliliği alkali pH'da daha yüksek olduğu belirtilmektedir (Zaroual ve ark., 2006; Mollah ve ark., 2001; Vepsäläinen ve ark., 2012). Dolayısıyla KOİ giderimi için en etkili pH, atıksu pH'sı olmuştur.

Asidik koşullar altında  $OH^-$  konsantrasyonları metal hidroksit türlerinin oluşumu için yeterli değildir. Bu nedenle, asidik pH'da metal hidroksitleri oluşturmak için yeterli  $OH^-$  üretmek zordur. Buna karşılık, alkali koşullar altında, metal hidroksitler kolaylıkla oluşturulabilir. Bu durum renk gideriminde ortaya çıkmıştır. Çalışmada, renk giderim verimi tüm koşullarda %86 üzeri elde edilmiştir. Çıkış suyunun renksizleşmesi ortamın asidik pH'ında çok düşükken, nötr veya alkali koşullarda çok yüksektir. Benzer durum Huda ve ark. çalışmasında da rastlanmıştır (Huda ve ark., 2017). Oluşan demir hidroksitler, alkali koşullar altında adsorpsiyon, pıhtılaşma ve birlikte çökelme yoluyla kirleticilerin uzaklaştırılmasını indükleyen bir süspansiyon olarak kalır (Gengec ve ark., 2012). Bu, nötr ve alkali pH altında renk gideriminde artışa yol açar. Daha önceki çalışmalarda, elektrokoagülasyon prosesinde pH'nın önemli bir faktör olduğu ve bu prosesin çözeltinin pH'ına oldukça bağımlı olduğu ve metal hidroksit türlerinin oluşumu ile iyonların ve kirleticilerin uzaklaştırma mekanizması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu kanıtlanmıştır (Bayramoğlu ve ark., 2007; Emamjomeh & Sivakumar, 2009). Sonuç olarak, KOİ ve renk giderim verimleri birlikte

değerlendirildiğinde tüm optimum değerlerde, tekstil atıksuyunun kendi pH'sında elektrokoagülasyon ile arıtımı su kalitesi açısından daha etkili olduğu bulunmuştur.

Pilsiz doğrudan güneş enerjisi kullanılarak elektrokoagülasyonla atıksu arıtımı, güneş ışınlarının meteorolojik koşullar, mevsim, günün saati ve PV dizi yönü gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermesi sebebiyle optimum işletme koşullarında çalışılmasına izin vermemektedir (Cao & Hu, 2016; Rahman & Xu, 2016). Bu sebeple bu çalışmada gün boyu sağlanan en düşük ve en yüksek akım değerlerinde en yüksek kirlilik giderim verimi elde edilen optimum koşullar elde edilmiştir. Bunlar 0,5A 45 dk; 0,75A 30dk; 1A 15dk, ve 1,25A 10 dk ve pH=10 olmuştur. Sırasıyla KOİ ve renk giderim verimleri ise %79, %79, %92 ve %79; %95, %93, %96 ve %87'dir.

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Mevcut çalışmada, yenilenebilir enerji ile geri kazanım prensibine dayalı bir elektrokoagülasyon prosesi ile tekstil atıksularının arıtımı gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon için gereken enerji PV modül sayesinde geneşten sağlanmış ve doğrudan güneş enerjisi arıtma prosesinde kullanılmıştır. Elektrotlar ise hurdaya ayrılmış demir malzemelerden elde edilmiştir. Çalışmada, ilk olarak PV modülden elde edilen enerjinin tekstil atıksuyuna iletilen akım değerleri belirlenmiştir. Burada atıksuya verilen en düşük ve en yüksek akım değerleri 0,5A ve 2A olarak kaydedilmiştir. Sonrasında, 0,5A-2A aralığında belirlenen yedi farklı akım değerlerinde ve sekiz farklı elektroliz süresinde elektrokoagülasyonla arıtım gerçekleştirilmiştir. En iyi arıtım verimleri KOİ ve renk giderim verimi için sırasıyla 0,5A 45 dk için %79 ve %79; 0,75A 30dk için %79 ve %95; 1A 15dk için %92 ve %96; 1,25A 10 dk için ise %79 ve %87 elde edilmiştir. Sonuç olarak, pilsiz doğrudan elektrokoagülasyonla tekstil atıksularının arıtımı en iyi arıtım atıksu pH'sında 1A 15 dk işletme koşulunda elde edilmiştir.

Yüksek kirletici içeren atıksuların arıtılması için güneş enerjisinin kullanılması, atıksu arıtma prosesindeki etkinlikleri nedeniyle gözden geçirilmesi ve dikkate alınması gereken önemli bir konudur. Endüstrilerin atıksularını atıksu deşarj standartlarına uygun arıtım yapabilmeleri için büyük maliyetli atıksu arıtma tesislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca dünyada büyüyen enerji krizi yenilenebilir enerjinin kullanımını zorunlu kılmıştır. Bu sebeple yapılan çalışma, yenilikçi, yeşil, sürdürülebilir ve düşük maliyetli bir prosestir. Elektrokoagülasyon ve PV modüle etki eden parametrelerce, daha kapsamlı çalışmalar yapılarak ve tam maliyet ve giderim verimliliği değerlendirilerek endüstrilerde kullanılması önerilmektedir. Bunun dışında, pil kullanılmaması enerjinin üretilmediği saatlerde arıtmanın olamayacağı anlamına gelse de, düşük kapasiteli atıksu arıtma veya ön arıtmanın kullanıldığı endüstriler için yeterli olacağı ön görülmektedir.

## Kaynaklar

- Akkaya, G. K. (2022). Treatment of petroleum wastewater by electrocoagulation using scrap perforated (Fe-anode) and plate (Al and Fe-cathode) metals: Optimization of operating parameters by RSM. *Chemical Engineering Research and Design*, 187, 261–275. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2022.08.048>
- Aouni, A., Fersi, C., Ben Sik Ali, M., & Dhabbi, M. (2009). Treatment of textile wastewater by a hybrid electrocoagulation/nanofiltration process. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2–3), 868–874. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2009.02.112>
- APHA-AWWA-WPCF. 1981. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA American Public Health Association.
- Asselin, M., Drogui, P., Benmoussa, H., & Blais, J. F. (2008). Effectiveness of electrocoagulation process in removing organic compounds from slaughterhouse wastewater using monopolar and bipolar electrolytic cells. *Chemosphere*, 72(11), 1727-1733.
- Bani-Melhem, K., Al-Kilani, M. R., & Tawalbeh, M. (2023). Evaluation of scrap metallic waste electrode materials for the application in electrocoagulation treatment of wastewater. *Chemosphere*, 310, 136668. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.136668>
- Bayramoglu, M., Eyvaz, M., & Kobya, M. (2007). Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation: Economical evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 128(2–3), 155–161. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2006.10.008>
- Bharath, M., Krishna, B. M., & Manoj Kumar, B. (2020). Degradation and biodegradability improvement of the landfill leachate using electrocoagulation with iron and aluminum electrodes: a comparative study. *Water Practice and Technology*, 15(2), 540-549.
- Cao, W., & Hu, Y. (2016). Renewable Energy: Utilisation and System Integration. BoD–Books on Demand.
- De Maman, R., da Luz, V. C., Behling, L., Dervanoski, A., Dalla Rosa, C., & Pasquali, G. D. L. (2022). Electrocoagulation applied for textile wastewater oxidation using iron slag as electrodes. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(21), 31713–31722.
- El-Gohary, F., & Tawfik, A. (2009). Decolorization and COD reduction of disperse and reactive dyes wastewater using chemical-coagulation followed by sequential batch reactor (SBR) process. *Desalination*, 249(3), 1159–1164. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2009.05.010>
- Emamjomeh, M. M., & Sivakumar, M. (2009). Fluoride removal by a continuous flow electrocoagulation reactor. *Journal of Environmental Management*, 90(2), 1204–1212. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2008.06.001>
- Gengec, E., Kobya, M., Demirbas, E., Akyol, A., & Oktor, K. (2012). Optimization of baker's yeast wastewater using response surface methodology by electrocoagulation. *Desalination*, 286, 200–209.
- Ghanbari, F., & Moradi, M. (2015). A comparative study of electrocoagulation, electrochemical Fenton, electro-Fenton and peroxi-coagulation for decolorization of real textile wastewater: Electrical energy consumption and biodegradability improvement. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1), 499–506. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2014.12.018>
- Golder, A. K., Samanta, A. N., & Ray, S. (2007). Removal of trivalent chromium by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 53(1), 33–41. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2006.06.010>
- Guo, Z. R., Zhang, G., Fang, J., & Dou, X. (2006). Enhanced chromium recovery from tanning wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 14(1), 75–79. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2005.01.005>
- Huda, N., Raman, A. A. A., Bello, M. M., & Ramesh, S. (2017). Electrocoagulation treatment of raw landfill leachate using iron-based electrodes: effects of process parameters and optimization. *Journal of Environmental Management*, 204, 75–81.
- Jegatheesan, V., Pramanik, B. K., Chen, J., Navaratna, D., Chang, C. Y., & Shu, L. (2016). Treatment of textile wastewater with membrane bioreactor: A critical review. *Bioresource Technology*, 204, 202–212. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.01.006>
- Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC)—science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29–41.
- Nippatla, N., & Philip, L. (2020). Electrochemical process employing scrap metal waste as electrodes for dye removal. *Journal of Environmental Management*, 273, 111039. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.111039>
- Pacheco, H. G. J., Elguera, N. Y. M., Sarka, H. D. Q., Ancco, M., Eguiluz, K. I. B., & Salazar-Banda, G. R. (2022). Box-Behnken Response Surface Design for Modeling and Optimization of Electrocoagulation for Treating Real Textile wastewater. *International Journal of Environmental Research*, 16(4), 1–12.

- Pandey, A. K., Reji Kumar, R., B. K., Laghari, I. A., Samykano, M., Kothari, R., Abusorrah, A. M., Sharma, K., & Tyagi, V. V. (2021). Utilization of solar energy for wastewater treatment: Challenges and progressive research trends. *Journal of Environmental Management*, 297, 113300. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113300>
- Park, H., Vecitis, C. D., & Hoffmann, M. R. (2008). Solar-powered electrochemical oxidation of organic compounds coupled with the cathodic production of molecular hydrogen. *The Journal of Physical Chemistry A*, 112(33), 7616–7626.
- Rahman, F., & Xu, W. (2016). *Advances in solar photovoltaic power plants*. Springer.
- Sahu, O. P., & Chaudhari, P. K. (2015). Electrochemical treatment of sugar industry wastewater: COD and color removal. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 739, 122-129.
- Siddique, K., Rizwan, M., Shahid, M. J., Ali, S., Ahmad, R., & Rizvi, H. (2017). Textile wastewater treatment options: a critical review. *Enhancing Cleanup of Environmental Pollutants*, 183–207.
- Singh, S., Mahesh, S., & Sahana, M. (2019). Three-dimensional batch electrochemical coagulation (ECC) of health care facility wastewater—clean water reclamation. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 12813-12827.
- Sanei, E., & Mokhtarani, N. (2022). Leachate post-treatment by electrocoagulation process: Effect of polarity switching and anode-to-cathode surface area. *Journal of Environmental Management*, 319, 115733.
- Thomson, M., & Infield, D. (2003). A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries. *Desalination*, 153(1–3), 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)80004-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)80004-8)
- Thomson, M., & Infield, D. (2005). Laboratory demonstration of a photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries. *Desalination*, 183(1–3), 105–111. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2005.03.031>
- Valero, D., García-García, V., Expósito, E., Aldaz, A., & Montiel, V. (2014). Electrochemical treatment of wastewater from almond industry using DSA-type anodes: Direct connection to a PV generator. *Separation and Purification Technology*, 123, 15–22. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2013.12.023>
- Valero, D., Ortiz, J. M., Exposito, E., Montiel, V., & Aldaz, A. (2008). Electrocoagulation of a synthetic textile effluent powered by photovoltaic energy without batteries: Direct connection behaviour. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(3), 291–297.
- Vepsäläinen, M., Pulliainen, M., & Sillanpää, M. (2012). Effect of electrochemical cell structure on natural organic matter (NOM) removal from surface water through electrocoagulation (EC). *Separation and Purification Technology*, 99, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.08.011> (2017).
- Zaroual, Z., Azzi, M., Saib, N., & Chaïnet, E. (2006). Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. *Journal of Hazardous Materials*, 131(1-3), 73-78.