

**REACTIVE YELLOW 145 BOYAR MADDESİNİN
ELEKTROKİMYASAL OKSİDASYON YÖNTEMİ İLE
GİDERİM PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

SEDA BALCI



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**REACTIVE YELLOW 145 BOYAR MADDESİNİN ELEKTROKİMYASAL
OKSİDASYON YÖNTEMİ İLE GİDERİM PERFORMANSININ
ARAŞTIRILMASI**

SEDA BALCI
0000-0002-2015-8513

Prof. Dr. Taner YONAR
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Seda BALCI tarafından hazırlanan “REACTIVE YELLOW 145 BOYAR MADDESİNİN ELEKTROKİMYASAL OKSİDASYON YÖNTEMİ İLE GİDERİM PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Taner YONAR

Başkan : Prof. Dr. Taner YONAR
0000-0002-0387-0656
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Melike YALILI KILIÇ
0000-0001-7050-6742
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç. Dr. Baybars Ali FİL
0000-0003-3085-224X
Balıkesir Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

../../....

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

.../.../.....

Seda BALCI

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Taner YONAR
22.04.2022

Seda BALCI
22.04.2022

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

REACTIVE YELLOW 145 BOYAR MADDESİNİN ELEKTROKİMYASAL OKSİDASYON YÖNTEMİ İLE GİDERİM PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI Seda BALCI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Taner YONAR

Yüksek miktarda atıksu üretimi, tekstil üretim sürecinin ana adımlarından boyama prosesleri esnasında oluşmaktadır. Dünya boyar madde pazarının yaklaşık %25'ini oluşturan reaktif boyar maddeler, renk seçeneğindeki çeşitliliği ve proses uygulamasındaki kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedir. Bu çalışmada, kararlı yapıdaki Sn/Sb/Ni-Ti yeni nesil anotlarının elektrokimyasal oksidasyon yöntemi ile boyar madde içeren sentetik atıksulardaki giderim performansının Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) ile optimizasyonu incelenmiştir. Tekstil endüstrisinde yaygın kullanılan Reaktif Yellow 145 (RY145), toksik ve kanserojenik etkiye sahip olduğu bilinen azo kromofor içeren anyonik özellikteki bir boyar maddedir. İleri oksidasyon yöntemleri, geleneksel(fiziksel, kimyasal, biyolojik) arıtma yöntemlerinin yanında toksikolojik ve eko-toksikolojik etkilerin önüne geçmede daha çevreci bir alternatiftir. Elektrokimyasal oksidasyon çalışmalarında kullanılan, 5x5 cm Platinize Titanyum katot ve 2,5x2,5 cm Sn/Sb/Ni-Ti anotlar laboratuvar ortamında üretilmiştir. RY145 içeren sentetik atık su numuneleri 500 mg/L konsantrasyonlarda hazırlanmıştır. KCl tuz konsantrasyonu, akımsal yoğunluk, pH, ve zaman olmak üzere dört parametre ölçülmüştür. Sentetik boyar madde çözeltisinin ölçümleri, boya çözünürlüğünü de doğru belirleme adına UV/VIS spektrofotometre kullanılarak yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre; renk giderimi ve KOİ giderimi için optimum şartlar, 1500 mg/L KCl, 50 mA/cm² akımsal yoğunluk, nötr pH (7,1) ve 45 dakika deney süresinde elde edilmiştir. Model denkleminin güvenilirliğini belirten R² değerleri ise renk giderimi için >%99, KOİ giderimi için ise >%95 olarak belirlenmiştir. Çalışmalar kontrol deneyleri ile tamamlanmış olup, model tarafından verilen giderim verimlerine uygun sonuçlar bulunduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Reactive Yellow 145 (RY145), elektrokimyasal oksidasyon, Sn/Sb/Ni-Ti, Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY), anot, katot

2022, ix + 59 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF REMOVAL PERFORMANCE OF REACTIVE YELLOW 145 DYE BY ELECTROCHEMICAL OXIDATION METHOD

Seda BALCI

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Taner YONAR

A high amount of wastewater is produced during the dyeing processes, which is one of the main steps of the textile production process. Reactive dyestuffs, which make up approximately 25% of the world dyestuff market, are preferred due to their variety in color options and ease of process application. In this study, the optimization of the removal performance of stable Sn/Sb/Ni-Ti new generation anodes in synthetic wastewater containing dyestuffs by electrochemical oxidation method with Response Surface Method (RSM) was investigated. Reactive Yellow 145 (RY145), which is widely used in the textile industry, is an anionic dye containing azo chromophore, which is known to have toxic and carcinogenic effects. Advanced oxidation methods are a more environmentally friendly alternative to traditional (physical, chemical, biological) treatment methods in preventing toxicological and eco-toxicological effects. 5x5 cm Platinized Titanium cathode and 2,5x2,5 cm Sn/Sb/Ni-Ti anodes used in electrochemical oxidation studies were produced in a laboratory environment. Synthetic wastewater samples containing RY145 were prepared at concentrations of 500 mg/L. Four parameters including KCl salt concentration, current density, pH, and time were measured. Measurements of the synthetic dyestuff solution were made using a UV/VIS spectrophotometer to accurately determine the dye solubility. According to the test results; Optimum conditions for color removal and COD removal were obtained at 1500 mg/L KCl, 50 mA/cm² current density, neutral pH (7.1) and 45 minutes experiment time. R² values indicating the reliability of the model equation were determined as >99% for color removal and >95% for COD removal. The studies were completed with control experiments and it was determined that the results were suitable for the removal efficiencies given by the model.

Key words: Reactive Yellow 145(RY145), electrochemical oxidation, Sn/Sb/Ni-Ti, Response Surface Method (RSM), anode, cathode

2022, ix + 59 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışma süresince tüm bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, tüm çalışmalarında yardımını esirgemeyen, yol gösterici olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Taner YONAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında sürekli yardımı olan çalışma arkadaşım Eren ER, desteğini sunan Fanar SHAKIR ve tez yazımında olumlu katkılar sağlayan iş arkadaşım Emrah KIRCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her anında desteğini gördüğüm, fikirlerime kıymet vererek yanımda olan Ahmet TUNALI'ya içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarında her koşulda yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bana güvenen değerli ailem; annem Elif BALCI, babam İbrahim BALCI, kardeşim Sinan BALCI, karındaşım, en yakın arkadaşım Sena BALCI EFE ve eşi Fatih EFE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Hayatımın tüm aşamalarında maddi manevi desteği ile benimle olan ikinci ailem ÇETİNKOL ailesine teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans diplomamı, her daim yanımda olan ikizim Sena BALCI EFE'ye ithaf ediyorum.

Seda BALCI
22/04/2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Boya ve Boyar Madde.....	3
2.1.1. Azo Boyar Maddeleri.....	4
2.1.2. Reaktif Boyar Maddeler	5
2.1.3. RY145 Boyar Maddesi.....	6
2.2. Teksitl Endüstrisi Boyama Atıksularının Özellikleri.....	8
2.3. Tekstil Endüstrisi Atıksularında Boyar Madde Giderimi	9
2.4. Yeni Nesil Sn/Sb/Ni-TiAnotlar Kullanılarak Yapılan Anodik Oksidasyon Çalışmaları	11
2.5. RY145 ve Diğer Reaktif Boyar Maddelerin Arıtılması İle İlgili Yapılan Çalışmalar	13
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	16
3.1. Materyal	16
3.1.1. Boyar Madde.....	16
3.1.2. Anot – Katot Materyali	16
3.1.3. Kullanılan Kimyasallar ve Materyaller	17
3.1.4. Katot Kaplama	19
3.1.5. Sn/Sb/Ni-Ti Anot Kaplama.....	19
3.2. Yöntem.....	21
3.2.1. Yanıt Yüzey Yöntemi Deneysel Tasarımı	21
3.2.2. Teorik Yaklaşım.....	24
3.2.3. Analitik Ölçümler.....	27
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	28
4.1. Deneysel Sonuçlar ve Değerlendirilmesi	28
4.1.1 KOİ Giderim Verimi Üzerine Deneysel Sonuçlar	28
4.1.2 Renk Giderim Verimi Üzerine Deneysel Sonuçlar	35
4.2. KCl Tuzu İlavesinin Elektrokimyasal Arıtıma Etkisi	41
4.3. Renk ve KOİ Giderimde pH ile Yapılan Çalışmalar ve Elektrokimyasal Giderime Etkisi	41
4.4. Renk Ve KOİ Giderimde Akımsal Yoğunluk ile Yapılan Çalışmalar ve Elektrokimyasal Giderime Etkisi	42
4.5. Optimum Şartlar.....	43
4.5.1. Renk giderimde Optimum Değerlerin Belirlenmesi	43
4.5.2. KOİ Giderimde Optimum Değerlerin Belirlenmesi.....	44

4.5.3. Renk Ve KOİ Bileşik Giderimde Optimum Şartların Belirlenmesi.....	44
5. SONUÇ.....	46
KAYNAKLAR	48
EKLER.....	54
EK-1	55
EK-2	57
ÖZGEÇMİŞ	59

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
C ₂ H ₂ O ₄	Oksalik Asit
Cl	Klor
Cl ⁻	Klor İyonu
e ⁻	Elektron
HCl	Hidroklorik Asit
H ₂ O ₂	Hidrojen Peroksit
H ₂ SO ₄	Sülfürik Asi
H ₂ PtCl ₆	Kloroplatinik Asit
KCl	Potasyum Klorür
NaCl	Sodyum Klorür
NaOH	Sodyum Hidroksit
Na ₂ SO ₄	Sodyum Sülfat
Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	Kurşun asetat
NaOH	Sodyum Hidroksit
RuO ₂	Rutenyum (IV) Oksit
SnCl ₄ .5H ₂ O	Kalay (IV) Klorid Pentahidrat
SnO ₂	Kalay Oksit
TiO ₂	Titanyum Diyoksit

Kısaltmalar	Açıklama
AC	Aktif Karbon
AMP	Ampisilin
ADMI	Amerikan Boya İmalatçıları Enstitüsü Renk Birimi
AKM	Askıda Katı Madde
BY28	Bazik Yellow 28
AKM	Askıda Katı Madde
BOİ ₅	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
BDD	Bor Katkılı Elmas
CNT	Karbon Nanotüp
ÇKM	Çözünmüş Katı Madde
DC	Doğru Akım Güç Kaynağı
EOİ	Elektrokimyasal Oksidasyon İşlemi
HPLC	High Performance Liquid Chromatography
İOP	İleri Oksidasyon Prosesi
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
TOK	Toplam Organik Karbon
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Sn/Sb/Ni-Ti	Kalay, Antimon, Nikel Kaplı Titanyum Anotlar
RB5	Reaktif Black 5
RB19	Reaktif Mavi 19
RR195	Reaktif Red 195

RY145	Reactive Yellow 145
XRD	X-Işını Kırınımı
YYY	Yanıt Yüzey Yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. RY145 boyasının yapısal gösterimi	16
Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan pH metre ve hassas terazi.....	17
Şekil 3.3. Doğru akım (DC) güç kaynağı.....	18
Şekil 3.4. Ultrasonik banyo ve punto kaynak cihazı.....	18
Şekil 3.5. Titanyum örgülerin kaplama için temizlenmesinin şematik hali.....	19
Şekil 3.6. Kaplanma işlemi tamamlanan katot ve anot görseli	20
Şekil 3.7. Elektrokimyasal oksidasyon deney düzeneği	26
Şekil 3.8. RY145 sırasıyla 10, 30 ve 50. dakikadaki renk değişimi	27
Şekil 4.1. Renk kalibrasyon eğrisi.....	28
Şekil 4.2. Deneysel ve tahmin edilen KOİ giderim verimleri arasındaki ilişki	30
Şekil 4.3. RY145 KOİ giderim verimi-zaman surface grafiği	32
Şekil 4.4. RY145 KOİ giderim verimi-zaman contour grafiği	32
Şekil 4.5. RY145 KOİ giderim verimi-pH surface grafiği	33
Şekil 4.6. RY145 KOİ giderim verimi-pH contour grafiği.....	33
Şekil 4.7. RY145 KOİ giderim verimi-akım surface grafiği	34
Şekil 4.8. RY145 KOİ giderim verimi-akım contour grafiği.....	34
Şekil 4.9. Deneysel ve tahmin edilen renk giderim verimleri arasındaki ilişki	36
Şekil 4.10. RY145 renk giderim verimi-zaman surface grafiği	38
Şekil 4.11. RY145 renk giderim verimi-zaman contour grafiği	38
Şekil 4.12. RY145 renk giderim verimi-pH surface grafiği.....	39
Şekil 4.13. RY145 renk giderim verimi-pH contour grafiği.....	39
Şekil 4.14. RY145 renk giderim verimi-akım surface grafiği	40
Şekil 4.15. RY145 renk giderim verimi-akım contour grafiği.....	40
Şekil 4.16. YYY optimizasyonu ile optimum renk giderim değerleri	43
Şekil 4.17. YYY optimizasyonu ile optimum KOİ giderim değerleri	44
Şekil 4.18 YYY optimizasyonu ile optimum renk ve KOİ bileşik giderim değerleri.....	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge.2.1. Boyar Maddelerin Sınıflandırılması	4
Çizelge 2.2. Sınıflarına göre boyar maddeler ve uygulama alanları	7
Çizelge 2.3. Boya içeren atıksu karakterizasyonu	8
Çizelge 2.4. Tekstil atıksularından boyar Madde giderilmesinde kullanılan farklı ileri arıtma yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları	10
Çizelge 3.1. RY145 boyar maddesine ait bilgiler	16
Çizelge 3.2. Tasarım faktörleri ve seviyeleri	22
Çizelge 3.3. RY145 için deneysel tasarım matrisi	22
Çizelge 3.4. Elektrokimyasal Oksidasyon İndirgenme ve Yükseltgenme Reaksiyonları	24
Çizelge 4.1. Deneysel ve tahmin edilen KOİ giderim verimleri.....	29
Çizelge 4.2. RY145 KOİ giderim varyans analizi	30
Çizelge 4.3. Deneysel ve tahmin edilen renk giderim verimleri.....	35
Çizelge 4.4. RY145 renk giderim varyans analizi	36
Çizelge 4.5. KOİ ve Renk bileşik giderimi için optimum şartlar.....	45

1. GİRİŞ

Gelişen sanayileşmenin en önemli sektörlerinden biri olan tekstil endüstrisi üretime ve istihdama katkısı ile sosyoekonomik anlamda büyük bir öneme sahiptir. Dünya genelinde su tüketimi de endüstriyellemenin gelişimiyle doğru orantılı olarak artmaktadır. Ayrıca, tekstil endüstrisi su tüketicileri arasında en yüksek sıralarda yer almaktadır (Santos vd., 2020). Çevre kirliliği ve kontrolü birçok kimyasalın kullanıldığı bu gibi endüstrilerin artması nedeniyle çalışılması gereken başlıca konulardan biri olmuştur.

Her bir endüstri tesisi aynı kategorilerde yer alsalar bile hiçbir zaman birbiriyle aynı olmamaktadır. Bu sebeple tek bir standart arıtma sisteminin tanımlanmasının yetersiz olacağı ve her bir endüstri için özel bir arıtma sisteminin olması atıksu arıtımında ana prensiplerdendir. Bunu sağlayabilmek adına her bir endüstri için spesifik çözüm üretmek o endüstriyi detaylı tanımakla mümkün olmaktadır.

Yüksek miktarda atıksu üretimi, tekstil üretim sürecinin ana adımlarından boyama ve terbiye prosesleri esnasında oluşmaktadır. Bu adımlar, doğal ve/veya suni liflerin istenen renkler ile boyanmasını ve son ticari ürünlere dönüştürülmesini sağlar (Lin ve Peng, 1994; Sakalis vd., 2006). Dünya çapında 10.000 adet farklı pigment, boya bulunmakta ve yaklaşık olarak yıllık 2.000.000 ton üretimi yapılmaktadır (Zollinger, 2003). Boyar maddeler tekstil, plastik, kağıt, deri, baskı, maden işleme, gıda teknolojileri ve halı gibi birçok sektörde renklendirme amacıyla kullanılmaktadır (Gupta vd., 2003; Lee, 2006; Wang vd., 2006).

Dünya çapında boyar madde pazarının yaklaşık 175 bin tonunun (%25'i) reaktif yapıdaki boyar maddeler oluşturmaktadır. Renk seçeneğindeki çeşitliliği ve proses uygulamasındaki kolaylığı nedeniyle öncelikli tercih edilmektedir (Khatri vd., 2015). Bu araştırmada tekstil endüstrisinde de yaygın kullanılması nedeniyle reaktif boya bileşimi üzerine çalışılmıştır.

Tekstil endüstrilerindeki boyaların %10'u ila %25'i boyama proseslerinde tüketilir ve %2 ila %20'si ise doğrudan sulu atık olarak farklı ekosistemlere deşarj edilir (Zollinger,

2003). Atıksular gerekli arıtma yöntemleri uygulanmadan doğal kaynaklara(deniz, göl, nehir gibi) veya kanalizasyona deşarj edilirse doğaya zarar vererek su kirliliğine sebep olmaktadır. Boyama endüstrisinden kaynaklanan atıksular boyar madde konsantrasyonu, boyar madde cinsi ve özelliğine bağlı içerik yapısı değışkenlik göstermektedir. Oluşan atıksular güçlü renk konsantrasyonu, sıcaklık, yüksek pH, ve KOİ parametlerine karşın düşük biyolojik parçalanabilirliğe sahip sulardır. Bu durumda standart bir arıtma yöntemiyle diğler endüstrilerden, farklı teknoloji uygulamaları ile oluşan atıksuların giderim verimlerinin yüksek olmasının beklenmesi zordur (Sakalis vd., 2006).

Komplike ve dirençli yapıları nedeniyle tekstil atıklarından boyaların bozunması çok zordur. Kimyasal oksidasyon, koagölasyon, adsorpsiyon prosesi ve biyolojik proses gibi konvansiyonel yöntemlerle boyanın uzaklaştırılması için birçok metot kullanılmaktadır ancak bunlar tek başına atıksudan boyayı uzaklaştırmak için yeterli olamamaktadır. Örneğın, koagölasyon prosesi çözünür boya türleri için uygun değılken aktif karbon(AC) ise yalnızca çözünür türdeki boyalar için etkili yöntemdir (Gosavi ve Sharma, 2013).

İleri oksidasyon prosesleri (İOP'ler), geleneksel yöntemlere göre boyaları parçalama konusunda büyük bir potansiyele sahiptir. İOP'ler boyalı tekstil atıksuların giderilmesinde fiziksel, biyolojik ve kimyasal proseslere göre daha umut verici bir alternatif olarak yer almaktadır. İOP'lerinin tercih edilmesi durumunda temel sorun; kirletici parametrelerin bir ortamda konsantre edilmesiyle daha tehlikeli bir durumda ortama deşarj edilmeleridir. İOP'lerin, kirletici parametreleri son nihai ürünlere çevrilmesinde etkili olduğı bir gerçektir. Ancak yüksek enerji ile çalışmaları bu konuda ciddi bir soruna yol açmaktadır (Kosutic vd., 2007).

Bu çalışmanın amacı, RY145 boyar maddesini içeren sentetik atıksularda KOİ ve renk parametreleri için yeni nesil ve kararlı Sn/Sb/Ni-Ti anotları kullanılarak pH, akımsal yoğunluk, zaman ve tuzun farklı konsantrasyonları denenerek Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) ile optimum verimlerin bulunmasıdır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Boya ve Boyar Madde

Tarih boyunca insanlar çevresinden fayda sağlamış ve onu korumayla birlikte güzelleştirmeye çalışmıştır. Boyamak, cisimlerin renklendirilmesi olarak ifade edilebilir. Genel olarak cisimlerin dış yüzeylerinin renklendirilmesi ya da korunması amacı ile kullanılan maddelere ‘boya’ denir. Eş anlamlı gibi kullanılan boya ve boyar madde kelimeleri farklı anlamlar taşımaktadır. Boyar madde elyaf, kumaş gibi malzemelerin renkli hale getirilmesinde uygulanan malzemelere denir. Boyalar genellikle anorganik(organik yapıda olan boyalarda mevcuttur), tüm boyar maddeler ise organik yapıdadır. Boyar madde malzemenin yüzeyine kimyasal ya da fizikokimyasal proseslerle birleşmektedir. Boyanan yüzey silme, yıkama veya kazıma gibi fiziksel yöntemlerle başlangıçtaki renksiz durumunu alamaz (Başer ve İnancı, 1990).

Renkli organik bileşikler, rengi oluşturan doymamış kromofor grubu, kromojen ise bu grubu taşıyan bileşikler içerir. Boyar maddeler Çizelge 2.1.de belirtildiği gibi 3 ana grupta sınıflandırılmaktadır.

Çizelge.2.1. Boyar Maddelerin Sınıflandırılması

BOYAR MADDELERİN SINIFLANDIRILMASI		
1) Boyama Özelliklerine Göre	2) Çözünürlüklerine Göre	3) Kimyasal Yapılarına Göre
•Katyonik (Bazik) Boyar Maddeler •Asit Boyar Maddeleri •Substantif Boyar Maddeler (Direkt Boyar Maddeler) •Mordan Boyar Maddeler •Reaktif Boyar Maddeler •Küpe Boyar Maddeler •İnkişaf Boyar Maddeler •Metal Kompleks Boyar Maddeler •Dispersiyon Boyar Maddeler •Pigment Boyar Maddeler	•Suda Çözünen Boyar Maddeler •Substratta Çözünen •Suda Çözünmeyen Boyar Maddeler	•Azo Boyar Maddeleri •Nitro ve Nitrozo Boyar Maddeleri •Polimetin Boyar Maddeleri •Arilmetin Boyar Maddeleri •Azo Annulen Boyar Maddeleri •Karbonil Boyar Maddeleri •Kükürt Boyar Maddeleri

2.1.1. Azo Boyar Maddeleri

Azo tipi boyalar en büyük boya grubudur ve günümüzde kullanılan tüm boyalar arasında %60-70'i temsil etmektedir (Park ve Choi, 2003). Bu tür bileşiklerin temel özelliği, diğerleri arasında OH ve SO_3H gibi bazı fonksiyonel grupları içeren aromatik yapılarla bağlantılı olarak bir kromofor grubu olarak azo bağı (N_2) içermeleridir. Azo boyalar çevrede çok kararludur ve belediye atık su tesisleri tarafından geleneksel aerobik arıtmalar altında renk giderme ve bozunmalarının zorluğundan dolayı ortam koşullarında kalıcıdır (Cruz-González vd., 2012).

Sentetik olarak elde edilen azo boyar maddeler, doğal boyar maddelerin içerisinde yer almazlar. Sentezlenen sulu çözelti içerisinde başlangıç maddelerinin limitsiz

değiştirilebilmesi ve basitçe hazırlanabilmesi ile azo boyar maddeler çok sayıda elde edilebilmektedir. Özelliklerine ve uygulamada içerdiği etkin gruba göre azo boyar maddeler aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilirler:

- Azoik (inkisaf) boyar maddeleri
- Anyonik azo boyar maddeler
 - a) Reaktif boyar maddeler
 - b) Direkt boyar maddeler
 - c) Asit boyar maddeleri
 - d) Metal-kompleks boyar maddeleri
 - e) Krom boyar maddeleri
- Katyonik azo boyar maddeleri
- Pigment azo boyar maddeleri
- Dispersiyon azo boyar maddeleri
- a) Hidrofob çözücülerde çözünen azo boyar maddeleri
- b) Yağlarda çözünen azo boyar maddeleri

2.1.2. Reaktif Boyar Maddeler

Pamuk, keten gibi selülozik elyafların ve bazı durumlarda ipek, deri, yün, naylon boyamasında tercih edilmektedir. Kovalent bağ ile elyaf üzerine bağlanırlar. Bu boyaların güçlü özelliği renk çeşitliliğinin fazla olması ve parlak bir yapıya sahip olmalarıdır (Gözükızıl, 2013). Reaktif boyama işleminde diğer boyama işlemlerine göre daha çok kimyasal kullanılır. Doğru kimyasalların belirlenmesi boyama kalitesi ve buna bağlı olarak boyahanelerin başarısını büyük ölçüde etkilemektedir.

Ticari olarak önemli bir sınıf olan reaktif boyaların işleme prosesi sonucu oluşan kayıpları oldukça önemli ve artırımı zordur. Bu nedenle, selülozik liflerin bu boyalarla boyanmaları sırasında, yaklaşık %50'si atık suya kaybolabilir. Lif ile reaksiyona girmeyen ve hidrolize durumda olan bu boyalar, ortaya çıkan çıkış suyunda farklı ve geri dönüşü olmayan bir formda karşımıza çıkmaktadır (Morais vd., 1999).

Reaktif boyama sonucu oluşan atıksular:

-Uygulanan reaktif boyaların %20-30'unu temsil eden (ortalama 2g/L) substrat üzerine sabitlenmemiş hidrolize reaktif boyalar oluşur. Bu artık miktar, atıksuların renklenmesinden sorumludur.

-Atıksudaki yüksek seviyelerde BOİ/KOİ'sinden ve organik maddeler veya geri dönüştürülemeyen boya kalıntı maddelerinden sorumludur.

-Tekstil liflerini içermektedir.

-Her Litre başına 60 ila 100 gram aralığında elektrolit oluşmaktadır. Atıksu sodyum karbonat ve sodyum klorür içerdiğinden yüksek oranlarda tuz içermektedir.

Bunlara ek olarak, pH değeri 10-11 ve yüksek oranda sıcaklık (50-70 °C) sergilemektedir (Allègre vd., 2006).

2.1.3. RY145 Boyar Maddesi

RY145, azo kromofor içeren bir anyonik hetero bi-fonksiyonel reaktif boyasıdır. Yaygın olarak, polyester, suni ipek ve pamuk karışımli kumaşların baskı ve boyanmasında kullanılmaktadır. Selülozik hidroksil grubu ile aktifleştirilmiş çift bir bağa nükleofilik ekleme veya reaktif klor atomunun nükleofilik eklemesi ile ikili düzende reaksiyona girmektedir. Işık haslığı, bu iki reaktif türün varlığında artmaktadır. Ancak su ve insanı yaşam üzerindeki kansorejenik ve mutajenik etkiler de yok sayılmamalıdır.

Boyama işlemlerinde yüksek oranda tercih edilen bu boya doğrudan kirletici olarak bu çalışmada seçilmiştir.

Araştırmalarda adsorpsiyon, biyolojik prosesler, ozonlama ve granüler aktif karbon içeren ozonlama, UV-C/H₂O₂ işlemleri gibi İOP'lerin bir çok kombinasyonlarına dayanan RY145 boyar maddesinin renk giderimi hakkında raporlar bulunmaktadır (Brosillon vd., 2008).

Yüksek oranda tercih edilen 8 boyar madde sınıfına ait uygulama alanları ve karakteristik yapıları Çizelge 2.2.de yer almaktadır.

Çizelge 2.2. Sınıflarına göre boyar maddeler ve uygulama alanları

Boya Sınıfı	Asit	Bazik	Vat	Sülfür
Renklendirilecek Madde	Naylon, yün, ipek, kağıt, mürekkep ve deri	Pamuk, yapay ipek, deri ve naylon	Vat Pamuk, yapay ipek ve yün	Pamuk ve yapay ipek
Karakteristik	Suda çözünürlüğü yüksek, anyonik, yaş haslıkları zayıf	Suda çözünürlüğü yüksek, katyonik	Kolloidal, yaş haslıkları iyi, suda çözünmez	Kolloidal, yaş haslıkları iyi, suda çözünmez
Elyafa Tutunma Mekanizması	İyonik Bağ	İyonik Bağ	Boya Banyoda İpliğe Çöktürülür	Boya Banyoda İpliğe Çöktürülür

Boya Sınıfı	Reaktif	Direk	Dispers	Azoik
Renklendirilecek Madde	Pamuk, yün, ipek ve naylon	Pamuk, yapay ipek, deri ve naylon	Polyester, asetat, akrilik ve plastik	Pamuk, yapay ipek ve polyester
Karakteristik	Suda çözünürlüğü yüksek, anyonik, yaş haslıkları zayıf	Suda çözünürlüğü yüksek, anyonik, yaş haslıkları zayıf	Kolloidal dispersiyon, yaş haslıkları iyi, suda çözünürlüğü çok düşük	Kolloidal, yaş haslıkları iyi, suda çözünmez
Elyafa Tutunma Mekanizması	Kovalent Bağ	İyonik Bağ	Kolloidal İmpregnasyon, Adsorpsiyon	Boya Banyoda İpliğe Çöktürülür

Reaktif boyar maddeleri ele aldığımızda, kovalent bağ yapısı ile elyafa tutunduğu ve yüksek suda çözünürlük, anyonik ve zayıf yağ haslıkları bulunduğu bilinmektedir.

2.2. Tekstil Endüstrisi Boyama Atıksularının Özellikleri

Boyar maddenin atıksuda bulunma oranı, elyafa bağlanma oranı ile ilişkilidir. Elyafın sentetik, pamuklu, yünlü türüne ve boyar maddenin tipine göre değişiklik gösterebilir.

Boyaların ekolojik ve toksikolojik özellikleri üzerine Boyar Madde Üretim Endüstrisi tarafından araştırmalar yapılmaktadır. Boyalar toksikolojik çalışmalarda; göz ve deri tahrişi, akut ve kronik zehirlilik, kanserojen özelliği ve mutojen özelliği gibi birçok sınıflandırmada ele alınmaktadır. Reaktif ve dispers yapıdaki boyar maddelerin hassaslaştırma durumunda alerjik etkisi belirlenebilmektedir (Barışık, 2009).

Çizelge 2.3.de farklı boya çeşitlerinin ve farklı elyaf tiplerinin boyandığı boyama atıksuların karakterizasyonu gösterilmiştir (Correia vd., 1994; Kocaer ve Alkan, 2002).

Çizelge 2.3. Boya içeren atıksu karakterizasyonu

Boya Türü	Elyaf çeşidi	Renk ADMI	TOK mg/L	BOİ mg/L	AKM mg/L	ÇKM mg/L
Reaktif, kesikli	Pamuklu	3890	150	0	32	12500
Reaktif, sürekli	Pamuklu	1390	230	102	9	691
Direkt	Viskoz	12500	140	15	26	2669
Asit	Poliamid	4000	315	240	14	2028
Bazik	Akrilik	5600	255	210	13	1469
1:2 Metal kompleks	Poliamid	370	400	570	5	3945
Dispers	Polyester	1245	360	198	76	1700
Vat	Pamuklu	1910	265	294	41	3945

2.3. Tekstil Endüstrisi Atıksularında Boyar Madde Giderimi

Tekstil endüstrisinden kaynaklanan atıksuların kirletici parametreleri geniş bir yelpazede değişiklik göstermektedir. Bu parametrelerin çeşitliliği atıksu giderimi için değişik arıtma yöntemlerinin tercih edilmesini gerektirebilmektedir.

Boyar madde gideriminde yaygın olarak kullanılan yöntemler dört gruba ayrılabilir. Bunlar: (i) adsorpsiyon, kolagülasyon-flokülasyon, membran filtrasyon ve iyon değişimi gibi fiziksel ve fizikokimyasal prosesler, (ii) aerobik-anaerobik parçalanmada biyolojik yöntemler, (iii) kimyasal oksidasyon prosesler, (iv) elektrokimyasal prosesler olarak sıralanabilir (Namal, 2017).

Tekstil endüstrisi atıksuları alıcı ortama verilmeden önce gerekli deşarj limitlerini sağlamalıdır. Sudan ayrılması güç organik kirleticilerin arıtımı ve kompleks kimyasal yapısı nedeniyle arıtım için çoğunlukla birden fazla yöntemin uygulanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Boyar madde giderilmesinde tercih edilen ileri arıtma yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.4.te sunulmuştur.

Çizelge 2.4. Tekstil atıksularından boyar madde giderilmesinde kullanılan farklı ileri arıtma yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları (Kocaer ve Alkan, 2002; Nas, 2006)

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj
Elektrokimyasal yöntem	Atık çamur oluşmaması.	Fazla elektrik enerjisini kullanımı
Ozonlama	Atık çamur oluşmaması ve Arıtılmış atıksuyun tekrar kullanılabilmesi	Ozonun yarılanma süresinin kısa oluşu ve yüksek maliyet
İyon değişimi	Çözünebilir boyar maddelerin iyi şekilde giderilebilmesi, Rejenerasyon ile iyon değiştirici kaybının olmaması	Yüksek maliyet ve olumlu sonuç alınan boyar madde sınıfının az olması
Membranla ayırma	Sistemin beklenmedik bir kimyasala, sıcaklığa ve bakteriyel aktiviteye karşı direnç göstermesi	Membran tıkanma olasılığı, rejenerasyonunun gerekliliği ve yüksek maliyet
Fotokimyasal yöntem	Atık çamur oluşmaması	Yan ürün oluşumu
Fenton	Basit ve kullanım kolaylığı, KOİ'nin azalması (Reaktif boyar maddeler hariç)	Reaksiyon süresinin uzun oluşu, çamur, tuz ve tehlikeli atık oluşumu
Fenton çamur geri kazanım sistemi (FSR)	Basit kullanım kolaylığı (Reaktif Boyar maddeler hariç)	Gaz ve tuz oluşumu
Sodyum hipoklorit (NaOCl) ile yükseltgenme	Azo bağının kırılması	Klorun çevre üzerindeki olumsuz etkileri.
O ₃ /H ₂ O ₂	Çamur ve tuz oluşmaması. Kısa reaksiyon süresi (Reaktif boyalar için çok kısa reaksiyon süresi)	Tüm boya gruplarına uygulanmaz, Tehlikeli ve toksik, KOİ azaltılmaz
UV/H ₂ O	İşletme kolaylığı, tuz ce çamur oluşmaması	Askıda kalan partiküllerinin ayrılması ve tüm boya gruplarına uygulanmaz

2.4. Yeni Nesil Sn/Sb/Ni-TiAnotlar Kullanılarak Yapılan Anodik Oksidasyon Çalışmaları

Abbasi ve diğerleri (2018), Ti/TiHx/Ni-Sb-SnO₂ (Ti/TiHx/NATO) bileşimine sahip, üç katmanlı, uzun çalışma ömrüne sahip ve ozon oluşumu için iyi elektrokatalitik özellikleri hedefleyen yeni bir anot hazırlamışlardır. TiHx bir ara katman olarak hazırlanmıştır. Ti/TiHx elektrotunun yüzeyinde Sn-Sb-Ni öncülünü kaplamak için döndürmeli kaplama ve termal ayrıştırma yöntemleri tercih edilmiştir. Ti/TiHx/ Ni-Sb-SnO₂'nin oksijen evrim reaksiyonu için başlangıç potansiyeli Ti/ Ni-Sb-SnO₂'dan daha yüksek olduğunu belirlenmiştir. Ayrıca, Ti/TiHx/Ni-Sb-SnO₂'nin çalışma ömrünün, oda sıcaklığında 50 mA.cm⁻²'lik bir akım yoğunluğunda Ti/Ni-Sb-SnO₂'nin iki katı olduğunu sonucuna varılmıştır. Metilen mavisinin bozunması ve elektrokimyasal ozon üretimi üzerinde yeni hazırlanan elektrotların seçiciliği ve aktivitesini doğrulamak için araştırmalar yapılmıştır. 5 dakikalık elektrolizden sonra, aynı koşullar altında TiHx'li elektrotta %56, Ti/ Ni-Sb-SnO₂'da ise %38'lik ozon üretimi için bir akım verimi elde edilmiştir. Ayrıca sonuçlar Ti/TiHx/Ni-Sb-SnO₂'nin metilen mavisini gideriminde daha yüksek bir kinetik hız sabitine ve renk giderme verimliliğine sahip olduğunu göstermiştir.

Yapılan bir çalışmada kararlı ve yeni nesil Sn/Sb/Ni-Ti anotların Ampisilin (AMP) antibiyotiği içeren atık sulardan elektrokimyasal oksidasyon prosesi kullanılarak giderilmesini incelemişlerdir. Araştırmanın sulu çözeltisinde AMP konsantrasyonu 0.05 g/L olarak belirlenmiştir. Çalışmada akım yoğunluğu, pH katot-anot uzaklığı ve tuz tipi ve konsantrasyonu değerlendirilmiş ve tuz tipi ve konsantrasyonunun en önemli parametrelerden biri olduğu belirtilmiştir. Tercih edilen tuz tipleri için, potasyum klorür(KCl) varlığında yapılan deneylerde, sodyum klorür(NaCl) ile karşılaştırıldığında daha yüksek verimler bulunduğu sonucuna varılmıştır. KCl varlığındaki deneylerde 60 dakika, pH=8, 50 mA/cm², 750 mg/L ve anotlar arası 1cm mesafeden sonra KOİ ve AMP'nin $\geq$ %99 uzaklaştırıldığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, NaCl varlığındaki deneylerde ise, 90 dakika, pH 8, 50 mA/cm², 2500 mg/L ve anotlar arası 1 cm mesafeden sonra KOİ ve AMP'nin tamamen uzaklaştırıldığı belirlenmiştir (Kurt vd., 2019).

Abbasi ve diğerkleri (2015), ozonlama prosesinde geri dönüştürülmüş olan ozon jeneratörü sistemi ile çalışmışlardır. Anot olarak laboratuvar ortamında oluşturdıkları titanyum bazlı Sn-Sb-Ni nanokompoziti ile kaplanmış elektrotlar ile elektrokimyasal reaktör hazırlamışlardır. Rodamin B molekülü içeren sulu çözeltiye 192 mg/saat sabit akış hızı ile ozonlama işlemi yapılmıştır. Ozonlama prosesi için sıcaklık, pH, temas süresi ve ilk boya konsantrasyonu gibi 4 önemli parametrenin değerlendirilmesi planlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu 8mg/L boya çözeltisi için 45°C sıcaklıkta, pH 3.7 ve 30 dakika temas süresi sonrasında bozunma veriminin %99.5'e ulaştığı ortaya koymuştur.

Parsa ve diğerkleri (2012), Karbon Nanotüplerle(CNT) Ti/Sn-Sb-NiO₂ Elektrotunun Ozon üretimindeki mevcut verimliliğinin iyileştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Kompozit Sn-Sb-Ni-CNT kaplamaları, perklorik asit içeren bir ortamda daldırma prosedürünü takip eden bir tavlama prosedürü kullanılarak titanyum ağ üzerine uygulanmıştır. Elektrot bileşimini ve yapısını detaylı olarak gözlemleyebilmek adına taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) ve elektrokimyasal karakterizasyon için akım verimliliği ve voltametri ölçümleri değerlendirilmiştir. 17 saat boyunca yapılan testler sonucunda CNT içeren anotların sabit 53,5 mA/cm² akım yoğunluğunda daha kararlı bir elektrot potansiyeli olduğunu sonucuna varılmıştır.

Yapılan bir diğerk çalışmada 0.5 Molar H₂SO₄ çözeltisine daldırılarak hazırlanan Ni/Sb-SnO₂ anotları kullanılarak elektrokimyasal ozon üretimi üzerine çalışmışlardır. Deneysel çalışmalarda aynı elektrokimyasal hücre ile hem geri dönüştürülmüş hem de akış sistemleri incelenmiştir. Anotların (mol oranları Sn:Sb:Ni - 500:8:3), <3V'luk hücre voltajı ile oda sıcaklığı ve akış koşullarında %50'ye varan akım verimliliği ile ozon üretimi gerçekleştirdiği belirlenmiştir. Elde edilen minumum 18 kWh/kg'lik enerji maliyetinin çalışmalarda önemli bir yere sahip olduğu belirtilmiştir (Christensen vd., 2009)

Zakaria ve Christensen (2014), platinize titanyum katotlara karşılık Ni/Sb-SnO₂ anotları kullanılan Membran Elektrokimyasal Elektrot reaktörü üzerine çalışmalar yapmıştır. Reaktif Blue 50 boyar maddesinin (1000 mg/L konsantrasyondaki) 5 dakikalık deney süresinde tamamen giderildiği ve çalışma sonucunda güç sarfiyatının 8 kWh/kg.KOI

olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca boya oksidasyonu sonucu oluşan yan ürünler araştırılmış ve çeşitli organik yapıdaki asitlerin oluştuğu belirlenmiştir.

2.5. RY145 ve Diğer Reaktif Boyar Maddelerin Arıtılması İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Santos ve diğerleri (2020) yaptığı çalışmada tekstil atıksularının karışımı olan mavi 19 (RB19), kırmızı 195 (RR195) ve sarı 145 (RY145) olmak üzere üç reaktif boya karışımını ve sentetik boya karışımı için elektrokimyasal oksidasyon yöntemi ile araştırmıştır. YYY ile 23 tam faktöriyel tasarım çalışması gerçekleştirilmiştir. YYY sonuçlarına göre optimum şartlar 30 mA/cm²; 75 ppm ve NaCl %100 giderim sonucunu elde etmiştir. Birinci dereceden kinetik model ile hesaplamalar yapılmıştır. Gerçek tekstil atıksuyunun boya giderim verimi %48, karışımın %59 olarak gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar neticesinde elektrokimyasal yöntemlerle arıtımının karışımın renk gideriminde etkili olduğu ve gerçek tekstil atıksuyunun arıtılmasında da optimize edilebileceğini göstererek arıtılmış suların tarımsal alanlarda tekrar kullanılabileceğini belirtmiştir.

Vlyssides ve diğerleri (1999), reaktif azo boya işleminden kaynaklanan tekstil boya atıksularını , elektrokimyasal oksidasyon yöntemiyle arıtılmasını araştırmıştır. Çalışmada anot olarak Ti/Pt ve katot olarak paslanmaz çelik 304 kullanılmıştır. Atıksuyun elektrolitik hücreden geçmesi sırasında üretilen kimyasalların (oksijen, klor, hidroksil radikalleri ve diğer oksidanlar) güçlü oksitleme potansiyeli nedeniyle, organik kirleticiler su ve karbondioksit oksitlendiği belirtilmiştir. Laboratuvar ölçekli pilot tesiste 2 ml HCl (%36) eklendiğinde ve 0.89 A/cm²'de 18 dakika iki elektrolizden sonra KOİ %86, BOİ %71, ADMI renk birimleri %100 ve TKN %35 oranında azaldığı belirtilmiştir. KOİ/BOİ oranının 2,16'dan 1,52'ye indirilmesi ile atık suyun biyolojik olarak parçalanabilirliği iyileştirilmiş ve ortalama enerji tüketimi 21 kWh/kg KOİ olarak gözlemlenmiştir.

Yapılan araştırmada tekstil atık suyunda bulunan organik kirleticinin arıtılması ve arıtılmış atık suyun boyama amacıyla yeniden kullanılmasını geniş bir aralığı kapsayan kesikli bir elektrokimyasal hücrede çalışılmıştır. Tekstil atıksuyunun arıtılması deneyleri sonucunda KOİ parametresi önemli bir ölçüde giderilmiştir. Arıtılan tekstil atıksuyu ile

birkaç boyama denemesi gerçekleştirilmiş ve boya tutumu ile suyun kalitesi, boyama işleminin her döngüsünde incelenmiştir. Sonuçlar, kullanın elektrokimyasal yöntemin tekstil atıksularının arıtılması ve boyama amacı ile yeniden kullanabileceğini göstermiştir (Mohan vd., 2007).

Yüksek konsantrasyonda CI iyonu içeren tekstil atık sularının Ti/RuO₂, Ti/Pt ve Ti/IPt/Ir elektrotları kullanılarak elektrokimyasal bir yöntemle arıtılması incelenmiştir. Her üç anotun da atık suda bulunan organiklerin doğrudan veya dolaylı oksidasyonunda çok etkili olduğu belirlenmiştir. Çalışmada 6 A/dm²'de 60 dakikalık elektrolizde optimum sonuçlar elde edilmiş ve Çözünmüş Organik Karbon yaklaşık %85, KOİ ise %85-92 oranında verimlilik sağlamıştır. Organiklerin uzaklaştırılmasında test edilen üç elektrottan sırasıyla verim elde edilmiştir: Ti/RuO₂ > Ti/Pt > Ti/Pt/Ir (Naumczyk vd., 1996).

Yapılan bir diğer çalışmada gerçek tekstil atıksuyunda RuO₂ kaplı Ti elektrot (Ti/RuO₂) kullanılarak elektro-oksidadyon arıtma verimi çalışılmıştır. Deney tasarımı ve için Box Behnken Tasarımı kullanılmıştır. Optimum durumlarda KOİ giderimi %80, renk giderimi %97,25 ve enerji tüketimi 0,679 Wh olarak belirlenmiştir. Kinetik çalışma KOİ gideriminin renk gideriminden daha hızlı olduğunu göstermiştir (Kaur vd., 2017).

Abdelhay ve diğerleri (2020), boyalı bir atıksuyun BDD anot üzerinde elektrokimyasal oksidasyon yöntemi kullanılarak arıtılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmada 2,8 mA/cm² sabit akım yoğunluğunda, farklı destekleyici elektrolitler (Na₂SO₄ ve NaCl) kullanılmıştır. Deneyler sırasında renk giderme, bulanıklık, iletkenlik ve KOİ gibi parametrelere önem verilmiştir. Farklı destekleyici elektrolitlerin eklenmesi, hem boya hem de tekstil endüstrisi atık suları için renk giderme, bulanıklık ve KOİ verimlilikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Bokharı ve diğerleri (2013), C.I reaktif sarı 145 boyasının birleşik UV/H₂O₂ sistemini ile farklı koşullar altında bozunma ve suyun saflaştırılmasındaki etkinliğini ve uygulanabilirliğini araştırmıştır. Boya konsantrasyonu, hidrojen peroksit dozu, UV maruz kalma süresi, pH gibi parametreler değerlendirilmiştir. Bozunma verimliliği, Hidrojen

peroksit dozu ve UV ışığının artması ile doğrudan olmayan bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Reaktif Yellow 145 boyasının bozunması %98'e kadar çıktığı belirlenmiştir. Bulunan sonuçlar doğrultusunda tekstil endüstrisinden kaynaklanan boya içeren atıksuların arıtılmasında çevre dostu bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Mevcut teknolojilerin boya içeren atıksuların arıtılmasında verimli olmaması nedeniyle ileri arıtım yöntemlerinin geliştirilmesinin sağlık ve çevre açısından önem taşıdığı belirtilmiştir.

Reaktif boyalar içeren tekstil boya atıksuyunun demir elektrotlar kullanarak NaCl elektroliti varlığında kesikli bir elektrokimyasal reaktörde giderimini incelemişlerdir. Çalışmada Levafix Blue CA, Levafix Red CA ve Levafix Yellow CA reaktif boyaları kullanılmıştır. Sentetik atıksu yüksek sayılabilecek 400 mg/L ile 2000 mg/L boya konsantrasyon aralığında hazırlanarak yanıt yüzey metodolojisi (RSM) ile optimize edilmiştir. Optimizasyonda NaCl konsantrasyonunun ve akımsal yoğunluğun en az, bulanıklık ve boya gideriminin en iyi olduğu sıcaklık 28 °C olarak belirlenmiştir. Kısıtlı maliyette sırasıyla Levafix Yellow CA, Levafix Blue CA ve Levafix Red CA için akımsal yoğunluklar 5.4 mA/cm², 6.7 mA/cm² ve 5.9 mA/cm², NaCl konsantrasyonu 2.8 g/L, 3.1 g/L ve 2.5 g/L optimize koşullar olduğu gözlemlenmiştir (Körbahti, 2007).

Ceron-Rivera ve diğerleri (2004), yılında Bazik Yellow 28 (BY28) ve Reaktif Black (RB5) boyar maddelerinin demir-çelik, aliminyum ve bakır alaşımlı elektrotlar kullanarak renk ve KOİ parametrelerinin giderimesini incelemişlerdir. Parçalanma ürünleri ve renk değişimleri HPLC de (diod array dedektörlü) takip edilmiştir. Demir ve bakır elektrotları yardımıyla KOİ ve renk giderim verimleri sırasıyla %65-67 ve %95 olarak tespit edilmiştir.

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

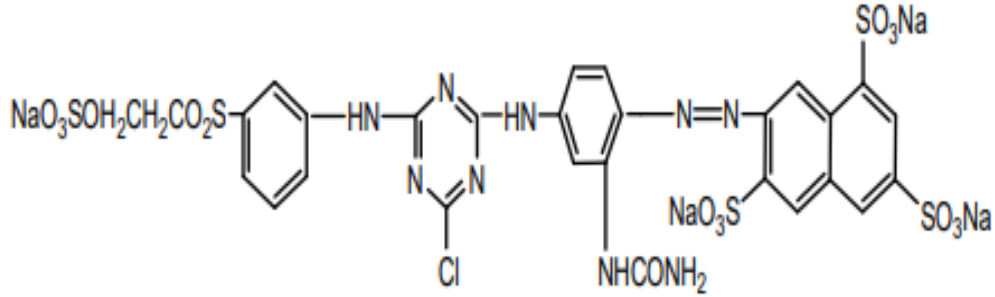
3.1. Materyal

3.1.1. Boyar Madde

Tekstil boyamada kullanılan RY145 boyar maddesi yerel bir tekstil boyahanesinden temin edilmiştir. Boyar maddeye ait bilgiler Çizelge 3.1.de ve yapısal gösterimi Şekil 3.1.de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. RY145 boyar maddesine ait bilgiler

Boyar Madde	Kimyasal Formülü	Molekül Ağırlığı (g/mol)
Reaktif Sarı 145 (RY145)	$C_{28}H_{20}ClN_9Na_4O_{16}S_5$	1026.26



Şekil 3.1. RY145 boyasının yapısal gösterimi (Bokhari ve diğerleri (2013))

3.1.2. Anot – Katot Materyeli

Bu çalışmada anot ve katot ana malzemesi olarak tittanyum(Ti) örgü (3Ti7-077FA mesh, Dexmet, USA) kullanılmıştır. Kullanılan ana malzeme 2,5 cm x 2,5 cm boyutlarında kesilerek anot, 5 cm x 5 cm boyutlarında kesilerek katot olarak kullanılmıştır.

3.1.3. Kullanılan Kimyasallar ve Materyaller

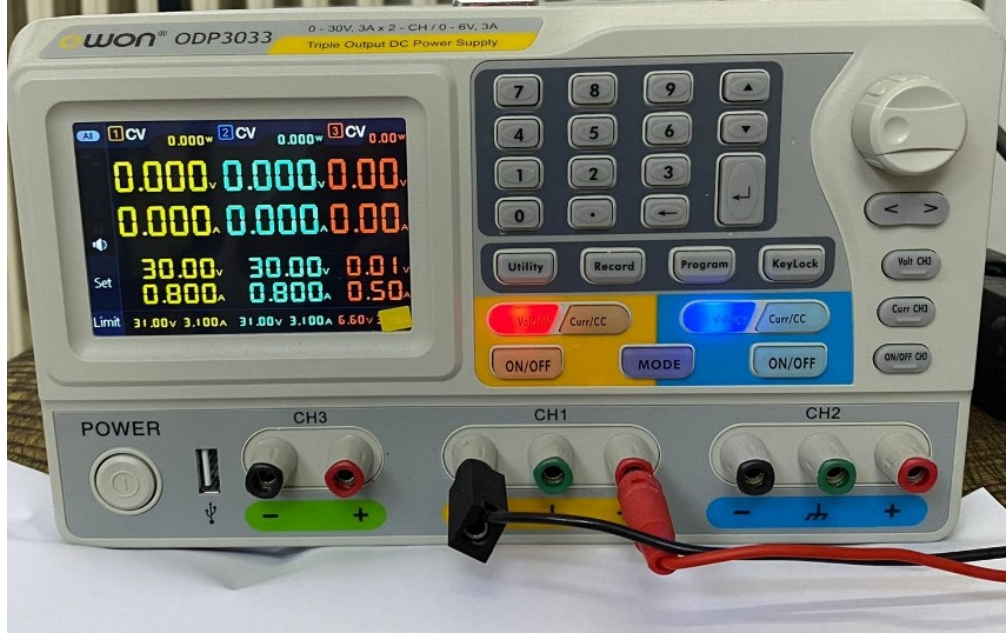
Antimon trioksit (Sb_2O_3) ve Nikel (II) oksit (NiO) Alfa Aesar Company'den sağlanmıştır. Kurşun asetat ($\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$), Kloroplatinik asit (H_2PtCl_6), sodyum hidroksit (NaOH), sülfürik asit (H_2SO_4) ve kalay (IV) klorid pentahidrat ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) Merck tarafından sağlanmıştır. Çözeltilerin hazırlanılmasında kullanılmak üzere Millipore Milli-Q ($18\text{M}\Omega\text{ cm}$) ultra saf su kullanılmıştır.

Kullanılan Cihazlar

- UV/VIS Spektrofotometre
- Doğru Akım (DC) güç kaynağı
- Ultrasonik Banyo
- Hasas Terazî
- pH Metre
- Punto Kaynak Makinesi



Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan pH metre ve hassas terazi



Şekil 3.3. Doğru akım (DC) güç kaynağı



Şekil 3.4. Ultrasonik banyo ve punto kaynak cihazı

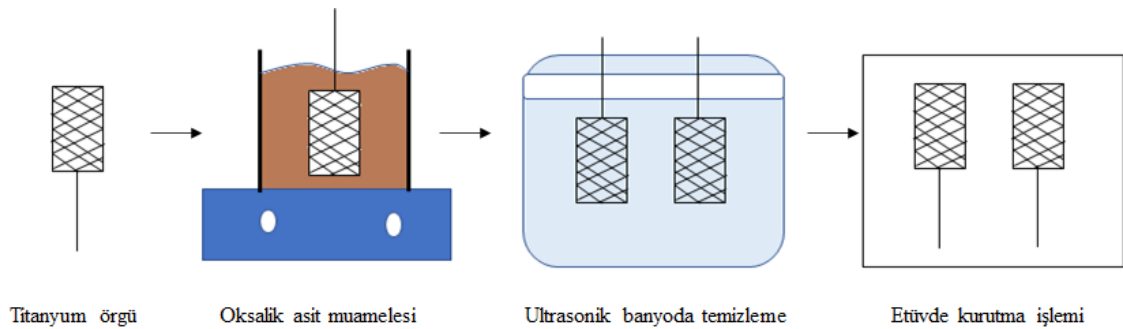
3.1.4. Katot Kaplama

Titanyum örgünün katot olarak kaplanması için öncelikle Cradle (Beşik) hazırlanmıştır. Cradle'ın boyutları katotu içerisine alacak büyüklükte iki plaka olarak oluşturulmuştur. İki plaka birbirine dört ucundan tel punto kaynak ile birleştirilmiştir.

Katot kaplama çözeltisi 0,0617 gr kurşun asetat ve 5 gr Kloroplatinik asit HCl (5M) ile 250 ml'ye tamamlanarak hazırlanmıştır. Temizlenen 5 cm x 5 cm ölçülerinde kesilen Ti örgü Cradle'ın içerisine yerleştirilerek kaplama çözeltisi eklenmiştir. Düşük akımda (0,68A) 3 dk, akım artırılarak (1,36A) 2 dk işlem görmüştür. Daha sonra etüvde 2 dk inkübe edilmiştir. Kaplama çözeltisi ile kaplanan Ti örgü fırında sırasıyla 450 °C, 550 °C, 700 °C, 800 °C ve 1000 °C sıcaklık denenerek 75 dk bekletilmiştir.

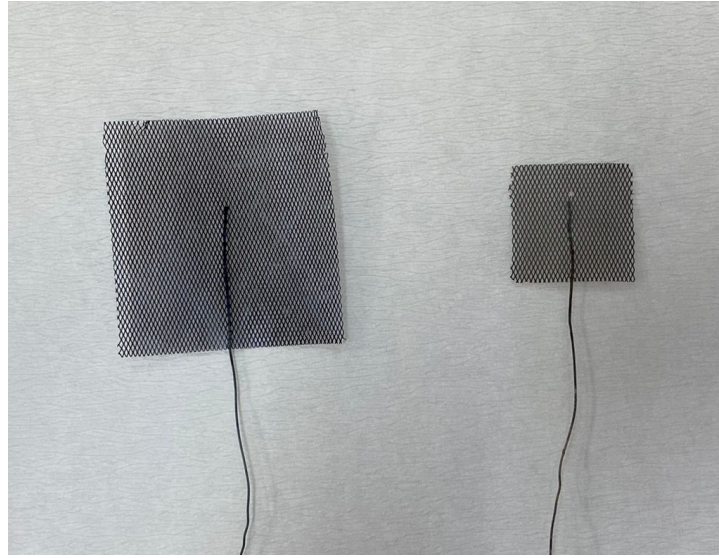
3.1.5. Sn/Sb/Ni-Ti Anot Kaplama

2,5 cm x 2,5 cm kesilen Ti örgüler ve teller birbirlerine punto kaynak makinesi ile puntolanmıştır. Puntolama esnasında Ti teller örgünün tam ortasına hizalanmıştır. Ti örgü ve telin üzerindeki kirliliklerin (yağ vb.) safsızlaştırılması için Şekil 3.5.te görüldüğü gibi %10'luk oksalik asit ($C_2H_2O_4$) çözeltisi ile en az 30 dk (çözelti kahverengi renk alana kadar) muamele görmüştür. Oda sıcaklığına gelen Ti örgüler 3 defa 15'er dk ultrasonik banyoda tutulmuştur. Daha sonra etüvde (103 °C sıcaklıkta) kurutularak temizleme işlemi tamamlanmıştır. Ti örgüler Sn/Sb/Ni ile kaplamaya hazır hale gelmiştir.



Şekil 3.5. Titanyum örgülerin kaplama için temizlenmesinin şematik hali

500:8:1 oranında kaplama işlemi için hazırlanacak Sn/Sb/Ni piroliz solüsyonu reçetesi Hong Kong Üniversitesi çalışmalarından alınmıştır. Solüsyon için 0,02 gr NiO, 0,585 gr Sb₂O₃ ve 28,2 gr SnCl₂.2H₂O hassas terazide tartılmıştır. Tartılan kimyasallar ultrasonik banyo muamelesi ile 100 ml etanol içerisinde çözülmüştür. Temizlenerek kaplama işlemine hazır hale getirilen Ti örgüler üzeri kapatılacak şekilde 500:8:1 oranında hazırlanmış Sn/Sb/Ni piroliz solüsyonunda 2 dakika süresince bekletilmiştir. Elektrot kaplamada sıcaklık önemli parametrelerden biridir. Piroliz solüsyonundan çıkarılan Ti örgüler 103 °C önceden ısıtılmış etüvde 15 dakika boyunca kurutulmuştur. Daha sonra Ti örgüler 520 °C'deki fırında muamele görmüştür. 20 kez tekrarlanan kaplama döngüsünde sadece ilk kaplama 20 dk ve son kaplama 75 dk olacak şekilde fırın içerisinde tutulmuştur. Tamamlanan döngüler sonucunda Ti örgüler anot olarak çalışılmaya hazır hale gelmiştir. Şekil 3.6.da kaplanmış anot ve katot görseli yer almaktadır.



Şekil 3.6. Kaplama işlemi tamamlanan katot ve anot görseli

Yapılan araştırmalar sonucu literatürde RY145 boyası içeren sentetik atıksuyun yeni nesil Sn/Sb/Ni-Ti kullanarak elektrokimyasal oksidasyon yöntemi ile arıtılması çalışmasına ulaşamamıştır.

3.2. Yöntem

3.2.1. Yanıt Yüzey Yöntemi Deneysel Tasarımı

Yanıt Yüzey Yöntemi, 1951 yılında ilk olarak Wilson ve Box tarafından (“Denemelerin Optimum Koşullara Ulaşması”) deneylerde optimum koşulları belirlemek amacıyla çalışılmıştır. Yöntem, model oluşturma, çeşitli faktörlerin (basınç, sıcaklık, zaman, reaktan oranları vb.) etkilerini değerlendirme, deney tasarlama ve çalışmaların en az deney maliyeti ile planlı ve sınırlı sayıda istenen yanıtları tasarlama yöntemidir (Roche, 2015). YYY, belirlenmiş alan üzerinde belirli girdi değişkenleri arasından belirlenen yanıtın etkilenen faktörlerini ve hangi girdi değerleri arasından min. veya max. sonucu vereceğini göstermektedir (Trinh ve Kang, 2010).

Yöntem, eleme denemeleri, bölge araştırması ve ürün veya işlemin optimizasyonu olmak üzere 3 aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama olan eleme denemelerinde daha verimli ve daha az sayıda esas denemelerin yapılması sağlanmaktadır. Bölge araştırmasında ise birinci aşamada belirlenen bağımsız değişkenlerin, sistemin yanıtında oluşturdukları sonuçların, ne kadar optimum değerlere yaklaşp yaklaşmadığını belirlenmektedir. Son olarak sistem optimum değerlere yaklaştığında üçüncü aşama başlar. Gerçek yanıt ile optimum değer etrafında oluşan eğrilik çoğunlukla ikinci dereceden polinomiyal model ile tahmin edilmektedir. Varyans analizi ile deneysel tasarımın geçerliliği kontrol edilmektedir (Thompson, 1982).

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \varepsilon \quad (3.1)$$

Y= Girdiler sonucu elde edilen çıktılar(cevaplar)

X_i ve X_j = Sisteme etkisi olan bağımsız faktörleri

b_0 = sabit katsayı

b_i ve b_{ii} = 1. derece lineer katsayı

b_{ij} ikinci dereceden lineer katsayı

Literatür taraması ve ön deneylerin çalışılmış olması araştırmadaki bağımsız faktörleri belirlemede önemli bir etkiye sahiptir. Yapılan ön çalışmalar ile seçilen ana faktörlerin

aralıkları makul seviyelerde belirlenmelidir. YYY çalışmalarında bağımsız faktörler ve aralık değerleri doğru bir şekilde belirlenmezse araştırmanın nihai sonuçları güvenilir ve yetersiz olacaktır.

YYY deney tasarımında Minitab programı ile en yaygın kullanılan Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) metodu kullanılmıştır. MKT stratejisinde -1 ve +1 şeklinde kodlanmış 2^k faktöriyel bölüm, n_c sayıda ve düzey=0 olarak merkez noktasından ve merkez noktasından α kadar uzaklıkta 2^k sayıda eksen noktasından oluşur. Modelin eğriselliği merkez noktalar yardımı ile test edilebilmektedir (Süzen, 2015).

Tasarımda, 4 faktör bulunmaktadır. Proses parametreleri ve bunların seviyeleri (düşük, orta, yüksek) Çizelge 3.2. de verilmektedir. Bu parametreler;

- Zaman (t) (X_1)
- pH (X_2)
- Tuz Konsantrasyonu (mg/L) (X_3)
- Akımsal Yoğunluk (X_4)

Çizelge 3.2. Tasarım faktörleri ve seviyeleri

Bağımsız Değişkenler	Yanıt Yüzeyleri ve Seviyeleri		
	-1	0	+1
Zaman (X_1)	10	30	50
pH (X_2)	5	7	9
Tuz Konsantrasyonu (mg/L) (X_3)	500	1000	1500
Akımsal Yoğunluk (X_4)	10	30	50

RY145 giderim verimi optimizasyonu için deneysel tasarım matrisi Çizelge 3.3.de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. RY145 için deneysel tasarım matrisi

	t (X ₁)	pH (X ₂)	Tuz (X ₃)	Akım (X ₄)
1	10	5	500	10
2	50	5	500	10
3	10	9	500	10
4	50	9	500	10
5	10	5	1500	10
6	50	5	1500	10
7	10	9	1500	10
8	50	9	1500	10
9	10	5	500	50
10	50	5	500	50
11	10	9	500	50
12	50	9	500	50
13	10	5	1500	50
14	50	5	1500	50
15	10	9	1500	50
16	50	9	1500	50
17	10	7	1000	30
18	50	7	1000	30
19	30	5	1000	30
20	30	9	1000	30
21	30	7	500	30
22	30	7	1500	30
23	30	7	1000	10
24	30	7	1000	50
25	30	7	1000	30
26	30	7	1000	30
27	30	7	1000	30
28	30	7	1000	30
29	30	7	1000	30
30	30	7	1000	30
31	30	7	1000	30

RY145 giderim verimlerini belirlemek için 31 deneyden oluşan deney matrisi oluşturulmuştur. Tasarımın merkez noktasının belirlenmesi adına tekrar deneyleri (7 adet) seçilmiştir. Deneysel çalışmalar Çizelge 3.3.te verildiği sıralamada yapılmayarak çevresel faktörlerin etkisini minimum seviyeye indirmek hedeflenmiştir.

3.2.2. Teorik Yaklaşım

Elektrokimyasal oksidasyon işlemi (EOİ) geleneksel arıtma metodları ile karşılaştırıldığında, düşük hacimli uygulanması, güçlü oksidasyon performansı ve çevresel uyumluluğu nedeniyle umut verici arıtma yöntemi haline gelmiştir. EOİ ekonomik ve yüksek performans gösterebilmesinin, elektrot malzemesi seçimine bağlı olduğu güçlü bir şekilde kanıtlanmıştır.

Elektrolitten çıkan iyonik bileşiklerin katot veya anotta indirgendiği ya da yükseltgendiği heterojen iyon transferi tepkimelerine elektrokimyasal tepkimeler denir (Pletcher ve Walsh, 1990). Proses sürecinde oluşan indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları Çizelge 3.4.de belirtilmiştir.

Çizelge 3.4. Elektrokimyasal Oksidasyon İndirgenme ve Yükseltgenme Reaksiyonları (Kırlaroğlu, 2008)

ANOT REAKSİYONLARI	KATOT REAKSİYONLARI
Elektron verir.	Elektron alır.
Yükseltgenme olur.	İndirgenme olur.
Anyonlar anotta toplanır.	Katyonlar katotta toplanır.
Anolit bölge oluşur.	Katolit bölge oluşur.
Anotta oksijen: $2H_2O - 4e^- \rightarrow O_2 \uparrow + 4H^+$	Katotta hidrojen: $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 \uparrow + 2OH^-$
Klor var ise: $2Cl^- - 2e^- \rightarrow Cl_2 \uparrow$	Gazın indirgenmesi : $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Elektrokimyasal oksidasyon proseslerinde ortama karşı dayanıklı, çözünmeyen metal alaşım elektrotlar (Ti/Sn, Ti/Ru, Pt/Ti/Ir, çelik gibi) kullanılmaktadır. Birçok araştırmacı, tipik anotlar platin, grafit, aktif karbon fiber, boyutsal olarak kararlı anotlar (örneğin Ti/IrO₂, Ti/RuO₂, Ti/PbO₂ ve Ti/SnO₂) ve BDD dahil olmak üzere çeşitli anotları kullanarak çalışmalar yapmıştır (Zhou ve He, 2007; Zhuo vd., 2011).

Doğrudan EO prosesinde ilk olarak kirleticiler anot yüzeyine adsorbe olurlar ve anodun yüzeyinde elektron transferi işlemi gerçekleşir (Chiang vd., 1995). Doğrudan EO hızı,

organik bileşiklerin difüzyon hızına, anodun aktif noktalarına ve akım şiddetinin etkisiyle anodun katalitik aktivitesine bağlıdır.

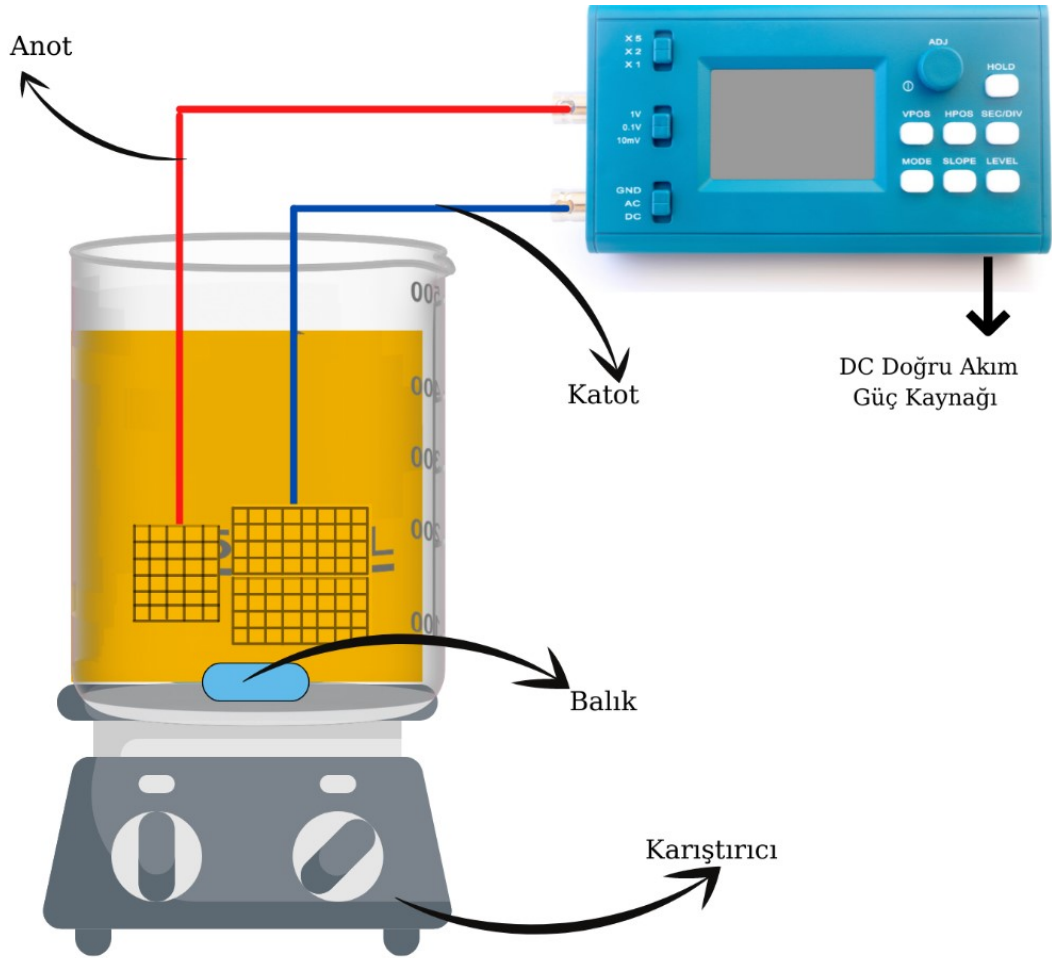
Dolaylı EO prosesinde ise ozon, hidrojen peroksit, klor ve hipoklorit, gibi kimyasal ajanlar yardımı ile anodik oksidasyon olarak gerçekleşmektedir (Vlyssides vd., 2001).

Elektrot materyalinin yüksek derecede kararlı ve etkin olması istenir (Özcan vd., 2008). Ti-bazlı metal oksit elektrotlar özellikle kalıcı kirleticilerin arıtımında etkili elektrot materyali olarak kanıtlanmıştır (Wang vd., 2016).

Asidik çözeltilerde; bir miktar O_3 , serbest klor, O_2 , ve ikincil oksitleyici olarak doğrudan oksidasyon prosesindeki klor oksitler ortaya çıkmaktadır (Vlyssides vd., 2000; Vlyssides vd., 2001). Orta alkali çözeltilerde ise klorür, klor gazına ve hipoklorit, klorür iyonuna dönüşmektedir. Bununla beraber O_2 , bir miktar H_2O_2 ve bazı durumlarda O_3 oluşabilir. Bu reaksiyonlar aşağıda belirtilmiştir:



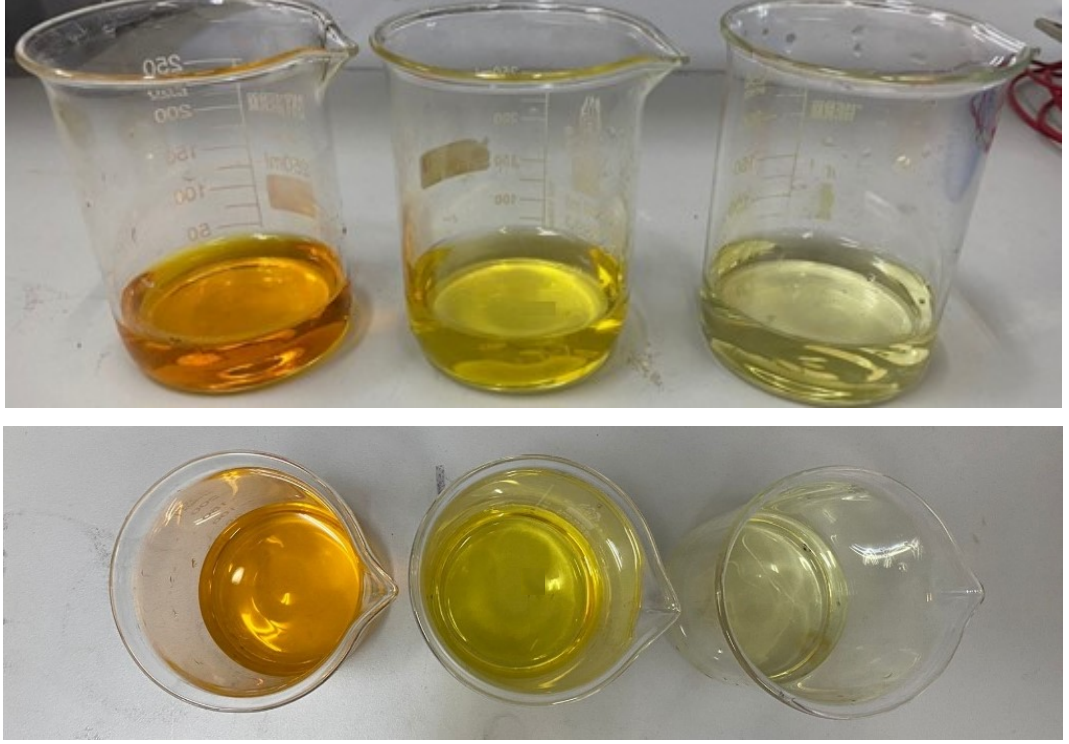
Deney düzeneği Şekil 3.7.de görüldüğü üzere doğru akım (DC) güç kaynağı, Sn/Sb/Ni-Ti Anot, Pilatinize edilmiş katot ve mıknatıslı karıştırıcıdan oluşmaktadır.



Şekil 3.7. Elektrokimyasal oksidasyon deney düzeneği

500 mg/L RY145 çözeltisi 250 mililitrelik beher içerisine alınarak EO işlemine tabi tutulmuştur. Beher içerisine katot ve anot elektrotları, elektrotların çözeltinin içerisinde kalmasına dikkat edilerek yerleştirilmiştir. pH, Farklı tuz konsantrasyonları ve akımsal yoğunluk parametreleri renk ve KOİ giderim performansının 10, 30 ve 50 dakikalık periyotlardaki optimum değeri numune alınarak ölçülmüştür.

RY145'in 10, 30 ve 50. Dakikadaki renk değişimi Şekil 3.8.de yer almaktadır.



Şekil 3.8. RY145 sırasıyla 10, 30 ve 50. dakikadaki renk değişimi

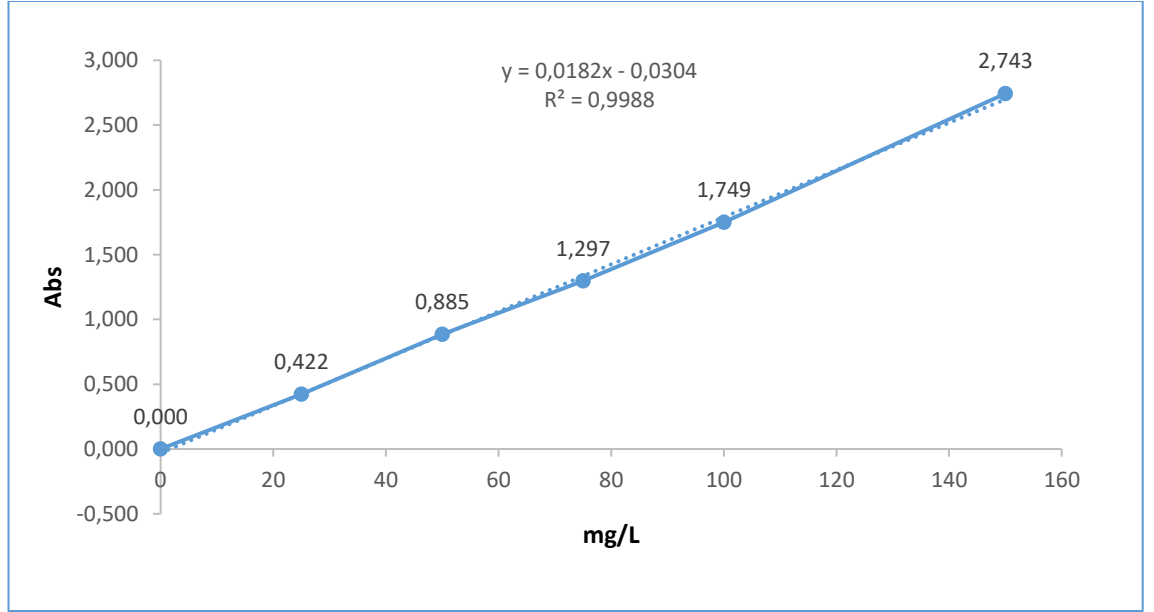
3.2.3. Analitik Ölçümler

Çalışmalar sonucunda örneklerin renk ve KOİ giderim verileri UV/VIS spektrofometre ile ölçülmüştür. KOİ ölçümleri hazır kitler (HACH LCK serisi) yardımı ile yapılmıştır. Numune pH'ları Cyberscan(İngiltere) marka pH metre ile analiz edilmiştir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Boya çözünürlüğünü doğru belirleme adına hazırlanan sentetik boyar madde çözeltisinin ölçümleri yapılmıştır. UV/VIS spektrofotometre kullanılarak yapılan absorbanstaramasında max. dalga boyu 421 nm olarak tespit edilmiştir.

Renk giderim sonuçları için oluşturulan kalibrasyon eğrisi Şekil 4.1.de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Renk kalibrasyon eğrisi

4.1. Deneysel Sonuçlar ve Değerlendirilmesi

4.1.1 KOİ Giderim Verimi Üzerine Deneysel Sonuçlar

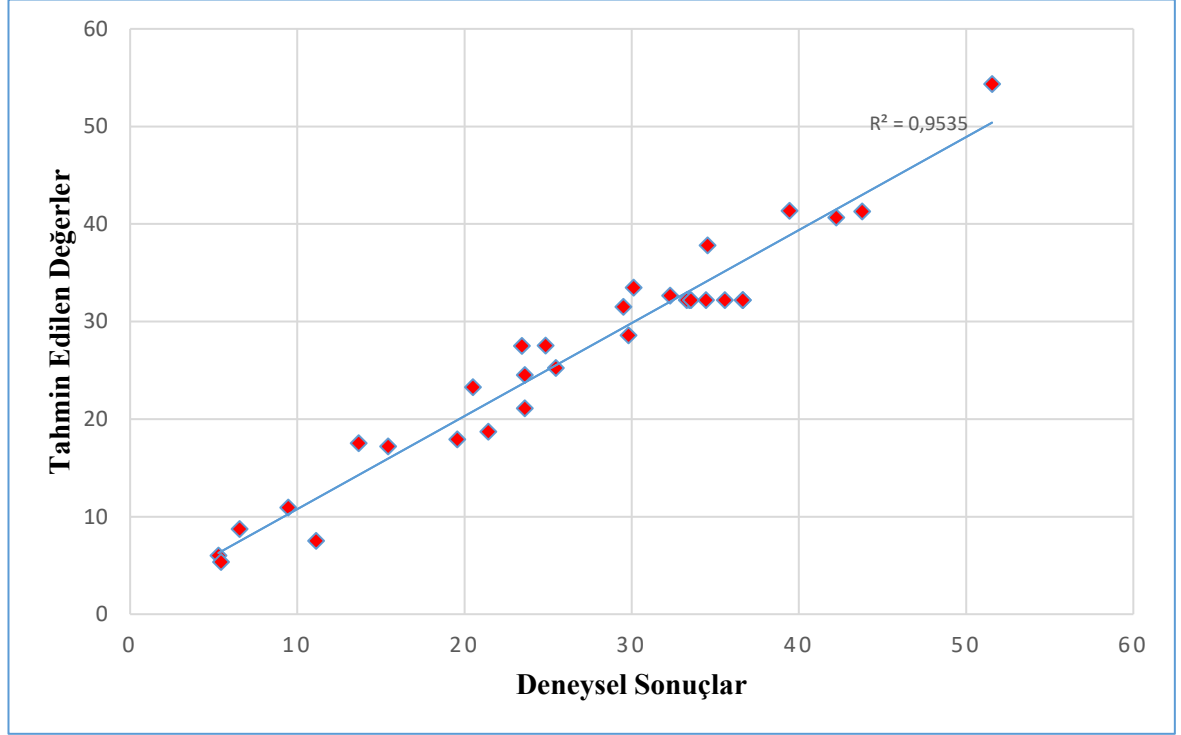
RY145 boyar madde içeren sentetik atıksudaki YYY analize göre sunulan tahmini KOİ giderim verimleri ve çalışmalar sonucu ulaşılan deneysel KOİ giderim verimleri Çizelge 4.1.de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Deneysel ve tahmin edilen KOİ giderim verimleri

Deney No	DeneySEL Giderim(%)	Tahmin Giderim(%)	Deney No	DeneySEL Giderim(%)	Tahmin Giderim(%)	Deney No	DeneySEL Giderim(%)	Tahmin Giderim(%)
1	19,56	17,9273	12	43,79	41,2810	23	34,54	37,8040
2	21,43	18,7144	13	23,60	21,0984	24	51,55	54,3574
3	25,46	25,2394	14	42,24	40,6705	25	33,44	32,1951
4	20,50	23,2739	15	23,60	24,5255	26	33,30	32,1951
5	5,28	5,9988	16	39,44	41,3451	27	36,65	32,1951
6	9,45	10,9284	17	6,54	8,7340	28	33,54	32,1951
7	5,43	5,3534	18	13,66	17,5374	29	36,65	32,1951
8	11,12	7,5305	19	23,43	27,5040	30	34,44	32,1951
9	15,42	17,2194	20	29,50	31,4974	31	35,56	32,1951
10	32,30	32,6489	21	30,12	33,4818			
11	29,81	28,6039	22	24,84	27,5496			

KOİ Giderim Model Denklemi = $-28,2 + 2,821 t + 12,17 \text{ pH} + 0,0065 \text{ Tuz} - 2,517 \text{ Akım} - 0,04765 t*t - 0,674 \text{ pH}*\text{pH} - 0,000007 \text{ Tuz}*\text{Tuz} + 0,03471 \text{ Akım}*\text{Akım} - 0,0172 t*\text{pH} + 0,000104 t*\text{Tuz} + 0,00915 t*\text{Akım} - 0,00915 t*\text{Akım} - 0,001989 \text{ pH}*\text{Tuz} + 0,0255 \text{ pH}*\text{Akım} + 0,000395 \text{ Tuz}*\text{Akım}$

Şekil 4.2.de KOİ giderimi için deneysel sonuçlar ile tahmin edilen sonuçlar arasındaki ilişki grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Deneysel ve tahmin edilen KOİ giderim verimleri arasındaki ilişki

KOİ giderim varyans analizi Çizelge 4.2.de belirtilmiştir.

Çizelge 4.2. RY145 KOİ giderim varyans analizi

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	4018,93	287,07	23,44	0,000
Residual Error	10	182,70	18,27	8,28	0,009

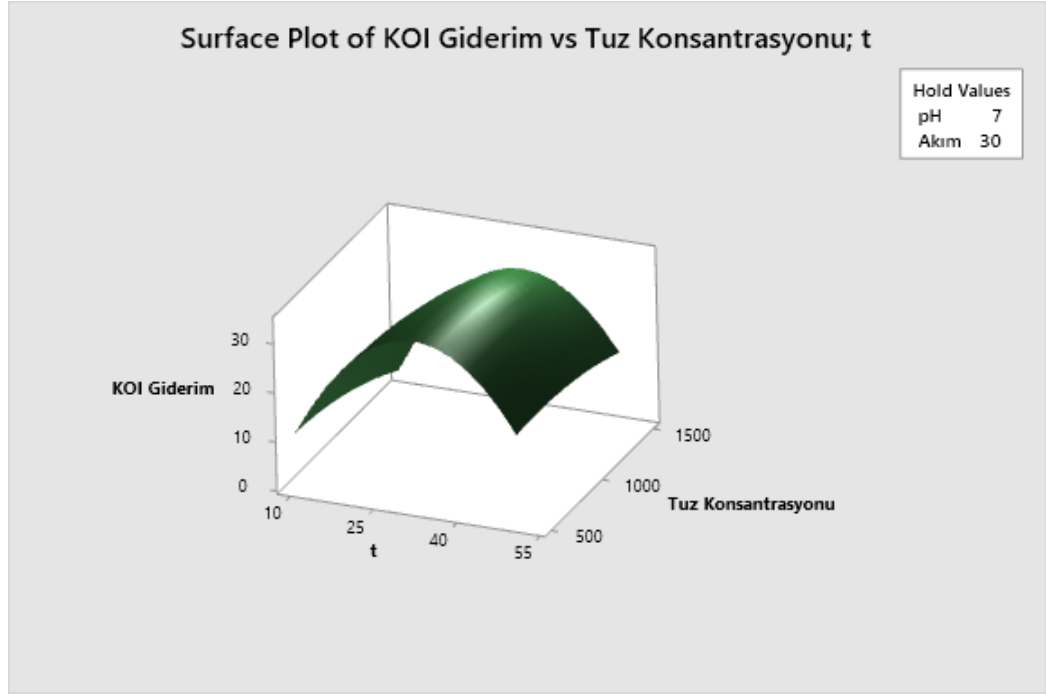
Tabloda da belirtilen ANOVA sonuçlarından parametrelerin P değerine bakılarak anlamlılık değeri belirlenmektedir. H_0 hipotezi için $\alpha=0,01$ ve $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyinde $P < \alpha$ olduğundan reddedilir. Buna istinaden faktörlerin KOİ giderim üzerinde etkili olduğu kabul edilmiştir.

Sabit kirletici konsantrasyonunda, KOİ gideriminde zaman parametresi incelendiğinde en iyi verimin ($\text{pH}=7$ ve $\text{Akım}=30 \text{ mA/cm}^2$) çalışılan zaman aralığının optimum seviyesinde olduğu gözlemlenmiştir. Zaman parametresi işletme maliyetine doğrudan etki eden faktörlerden olduğundan önem arz etmektedir. Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.de tuz konsantrasyonuna - zaman etkisi görülmektedir.

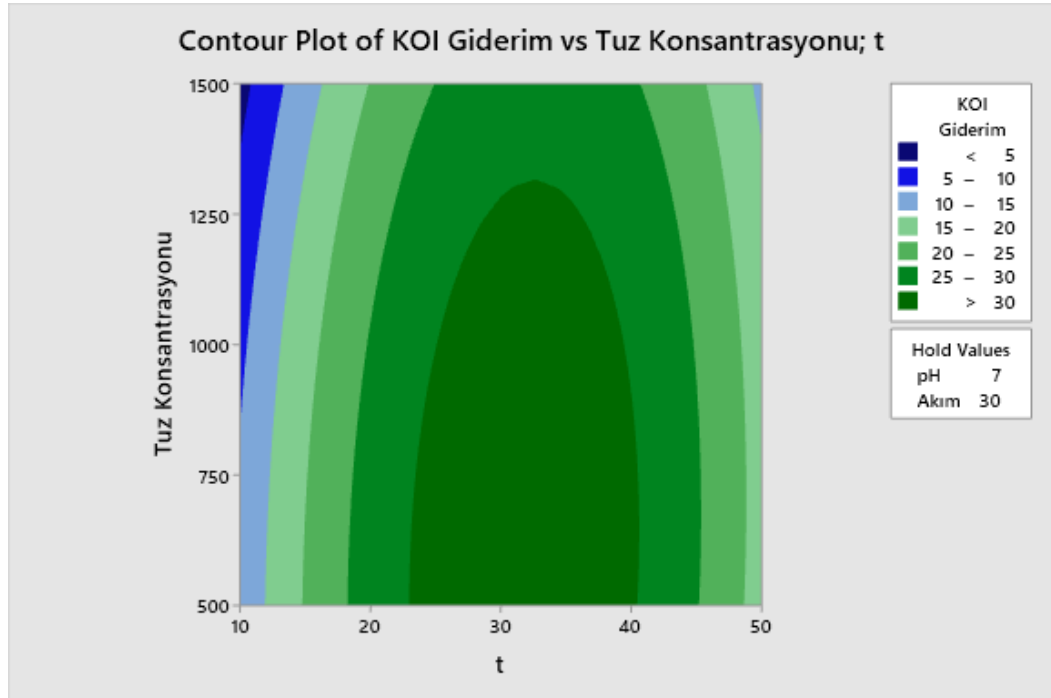
Hazırlanan boyar madde numunesinin doğal pH değeri yaklaşık 5 olarak ölçülmüştür. KOİ gideriminin ($t=30$ ve $\text{Akım}=30 \text{ mA/cm}^2$) düşük tuz konsantrasyonuna rağmen pH değerinin artmasıyla yükseldiği görülmektedir. Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.da tuz konsantrasyonuna - pH etkisi görülmektedir.

Veriminin belirlenmesinde ($\text{pH}=7$ ve $\text{Akım}=30 \text{ mA/cm}^2$) akımsal yoğunluğun etkisi oldukça önemlidir. Yüksek akım değerleri zaman parametresinde olduğu gibi enerji maliyet açısından işletmeye dezavantaj olarak yansıyabilir. Akımsal yoğunluğun artması ile verim doğru orantılı olarak artmaktadır. Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.de tuz konsantrasyonuna – akımsal yoğunluğun etkisi görülmektedir.

a. KOİ Giderim Verimi Üzerine Zaman Etkisi

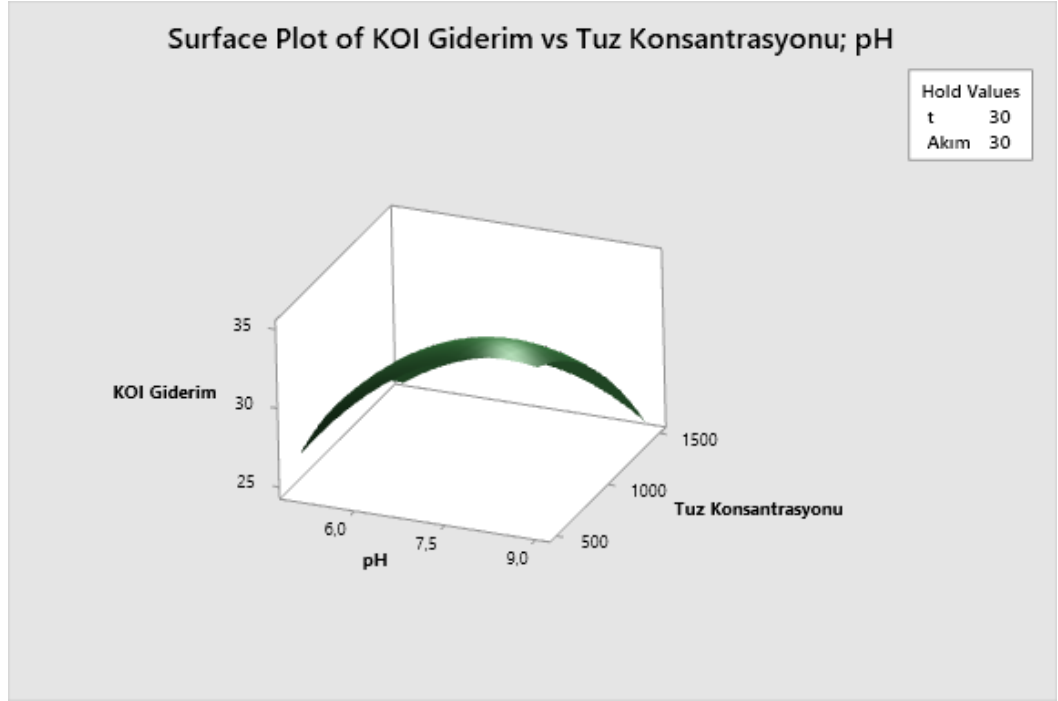


Şekil 4.3. RY145 KOİ giderim verimi-zaman surface grafiği

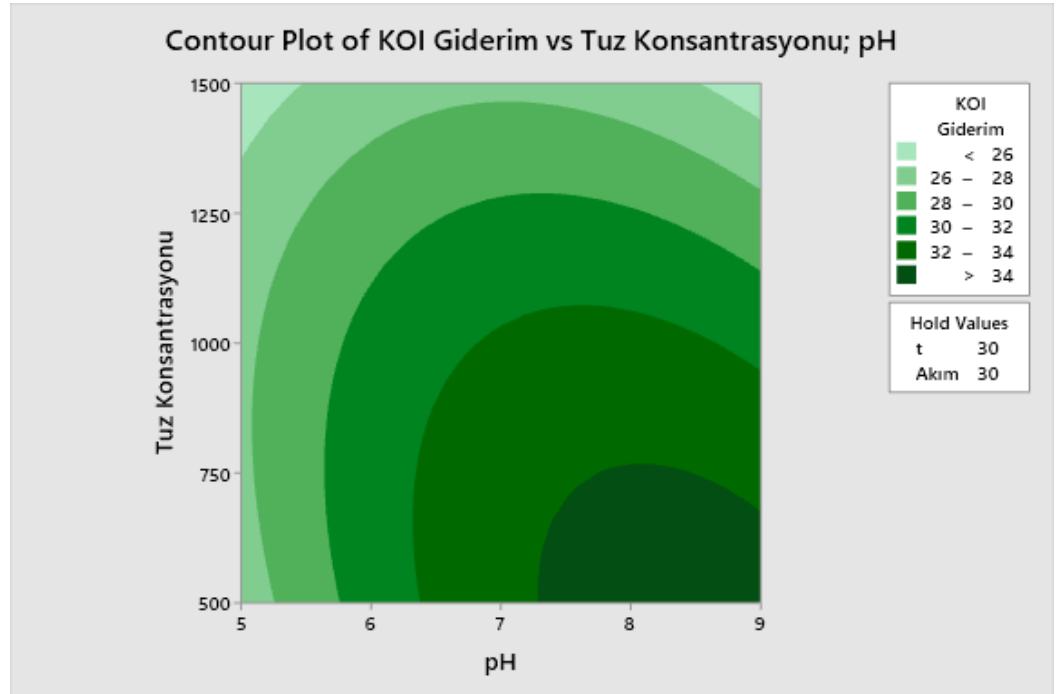


Şekil 4.4. RY145 KOİ giderim verimi-zaman contour grafiği

b. KOİ Giderim Verimi Üzerine pH Etkisi

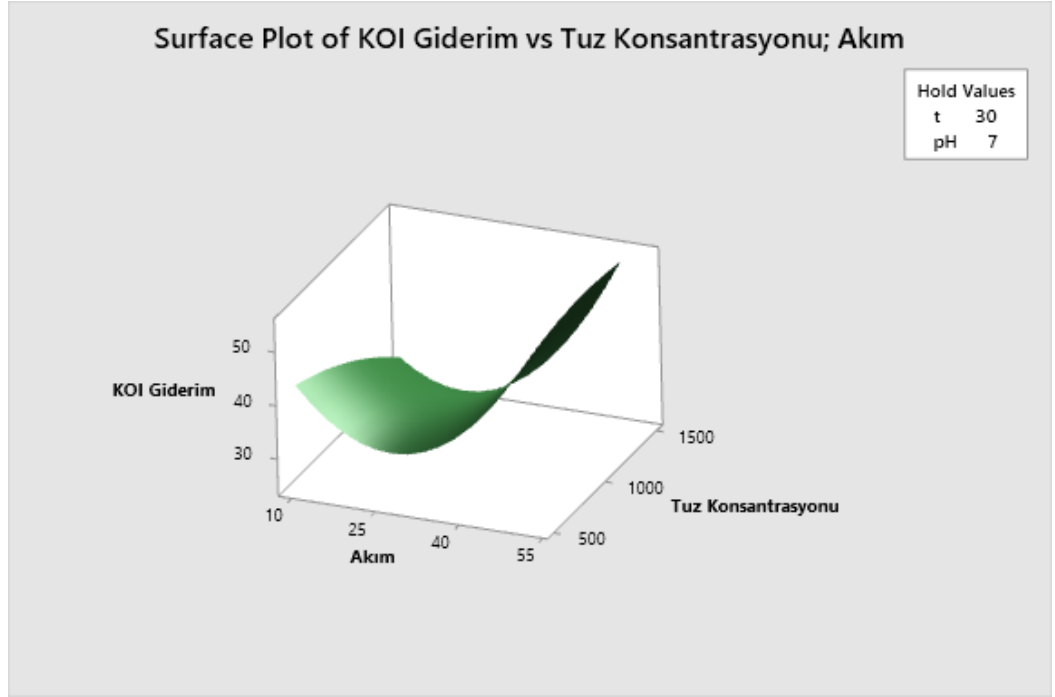


Şekil 4.5. RY145 KOİ giderim verimi-pH surface grafiği

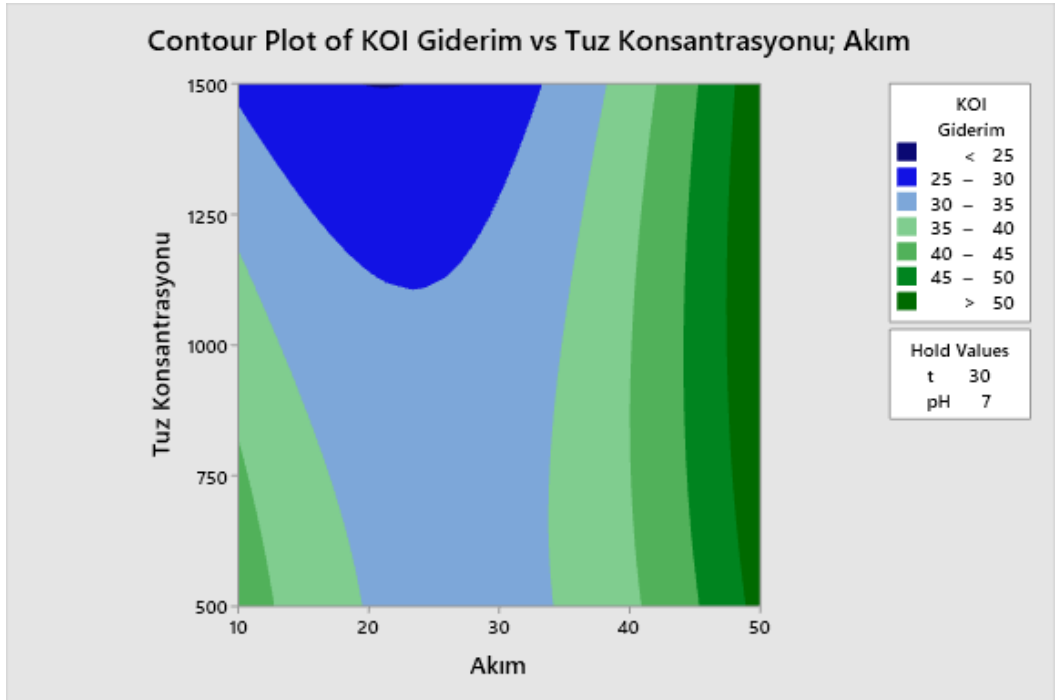


Şekil 4.6. RY145 KOİ giderim verimi-pH contour grafiği

c. KOİ Giderim Verimi Üzerine Akımın Etkisi



Şekil 4.7. RY145 KOİ giderim verimi-akım surface grafiği



Şekil 4.8. RY145 KOİ giderim verimi-akım contour grafiği

4.1.2 Renk Giderim Verimi Üzerine Deneysel Sonuçlar

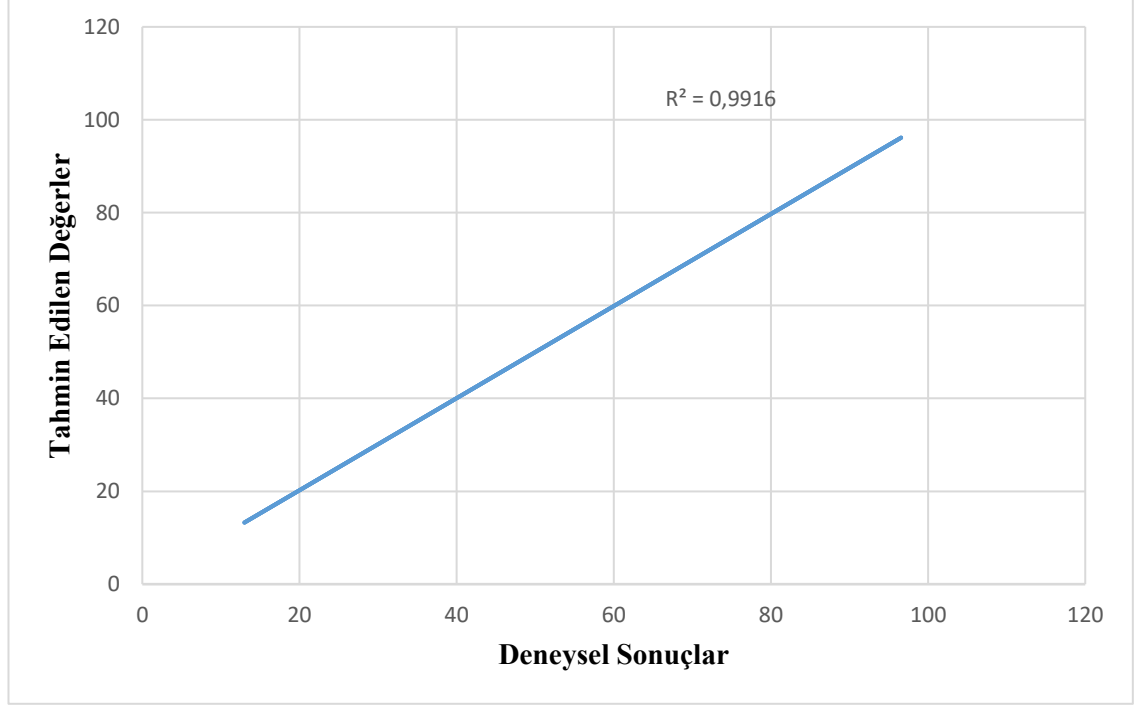
RY145 boyar madde içeren sentetik atıksudaki YYY analize göre sunulan tahmini KOİ giderim verimleri ve çalışmalar sonucu ulaşılan deneysel renk giderim verimleri Çizelge 4.3. de gösterilmektedir.

Çizelge 4.3. Deneysel ve tahmin edilen renk giderim verimleri

Deney No	Deneysel Giderim(%)	Tahmin Giderim(%)	Deney No	Deneysel Giderim(%)	Tahmin Giderim(%)	Deney No	Deneysel Giderim(%)	Tahmin Giderim(%)
1	17,46	15,8086	12	91,67	88,4080	23	24,92	24,7437
2	36,09	34,3775	13	47,21	43,5586	24	58,62	60,5837
3	18,28	17,2191	14	96,57	96,6924	25	49,74	46,6368
4	36,24	40,3830	15	37,77	38,5441	26	45,84	46,6368
5	17,58	19,9036	16	94,13	96,2730	27	45,01	46,6368
6	40,41	40,9824	17	25,17	28,8493	28	46,68	46,6368
7	13,00	12,0841	18	68,89	66,9982	29	49,89	46,6368
8	39,28	37,7580	19	45,19	47,1960	30	47,81	46,6368
9	28,39	28,9736	20	47,91	47,6915	31	46,85	46,6368
10	78,19	79,5974	21	42,49	44,1237			
11	33,27	33,1891	22	49,95	50,1037			

Renk Giderim Model Denklemleri = $11,4 - 0,104 t + 1,78 \text{ pH} + 0,0086 \text{ Tuz} + 0,506 \text{ Akım} + 0,00322 t*t + 0,202 \text{ pH}*\text{pH} + 0,000002 \text{ Tuz}*\text{Tuz} - 0,00993 \text{ Akım}*\text{Akım} + 0,0287 t*\text{pH} + 0,000063 t*\text{Tuz} + 0,02003 t*\text{Akım} - 0,002307 \text{ pH}*\text{Tuz} + 0,0175 \text{ pH}*\text{Akım} + 0,000262 \text{ Tuz}*\text{Akım}$

Şekil 4.9.'da renk giderimi için deneysel sonuçlar ile tahmin edilen sonuçlar arasındaki ilişki grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Deneysel ve tahmin edilen renk giderim verimleri arasındaki ilişki

Renk giderim varyans analizi Çizelge 4.4.de belirtilmiştir.

Çizelge 4.4. RY145 renk giderim varyans analizi

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	13796,9	985,49	134,74	0,000
Residual Error	10	96,2	9,62	2,77	0,112

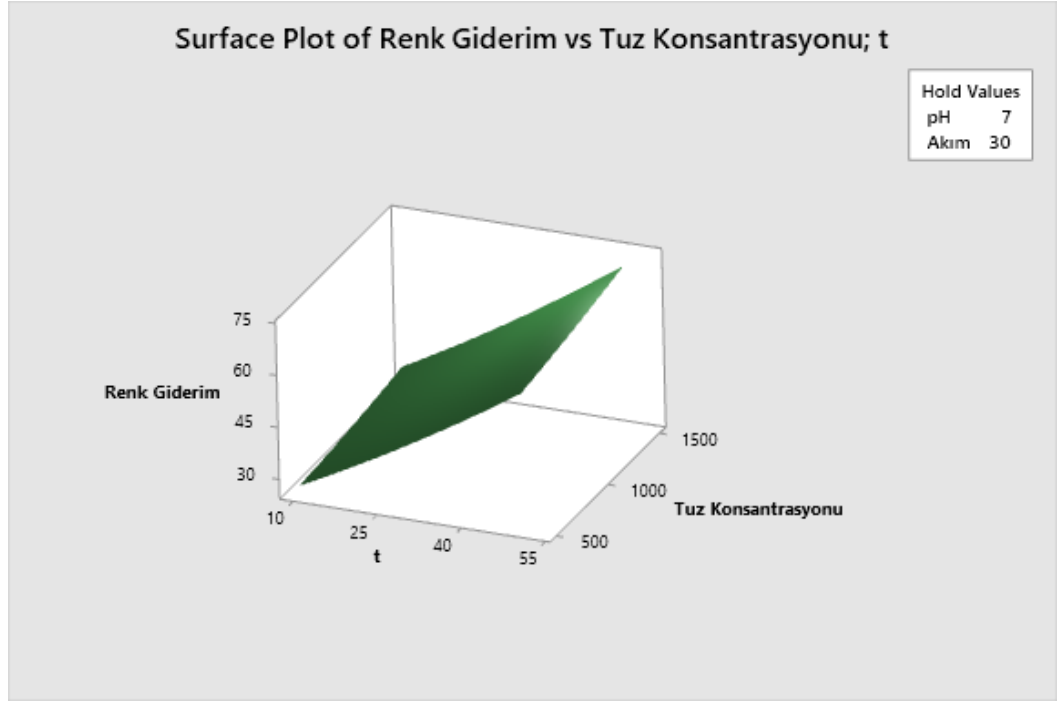
Tabloda da belirtilen ANOVA sonuçlarından parametrelerin P değerine bakılarak anlamlılık değeri belirlenmektedir. H_0 hipotezi için $\alpha=0,01$ ve $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyinde $P < \alpha$ değerini sağlamamaktadır. Fakat hata payı %10'dan düşük bulunduğundan kabul edilebilir seviyededir.

Renk giderimi ele alındığında ($\text{pH}=7$, Akım= 30 mA/cm^2) deney sürelerinin artışı verimi olumlu bir şekilde etkilemiştir. Yükselen tuz konsantrasyon değerleri de zamanla aynı oranda etki sağlamaktadır. Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.de tuz konsantrasyonuna - zaman etkisi görülmektedir.

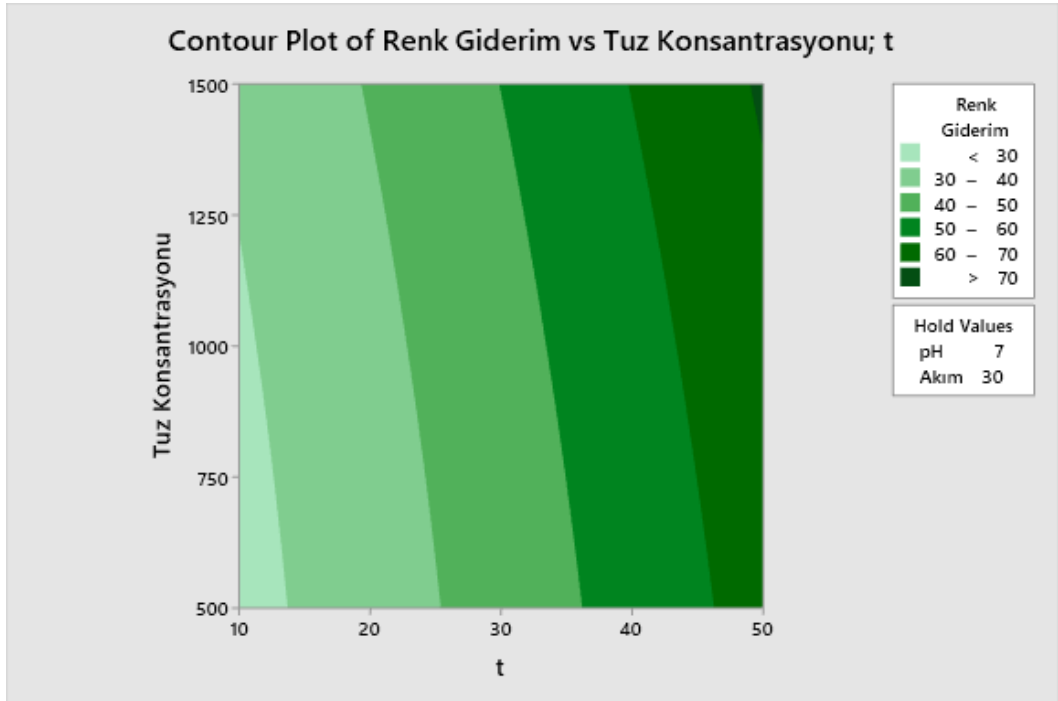
pH optimizasyonu incelendiğinde ($t=30$, Akım= 30 mA/cm^2) doğal pH değerlerinde etkili olduğu gözlemlenmektedir. Renk giderim veriminin asidik şartlarda yüksek olduğu bilinmektedir. Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.te tuz konsantrasyonuna - pH etkisi görülmektedir.

Renk giderim verimi ($\text{pH}=7$, Akım= 30 mA/cm^2) incelendiğinde de KOİ giderim veriminde olduğu gibi yüksek akım değerleri belirlenmiştir. Artan tuz konsantrasyonu ve artan akım değerlerini etkili bir sonuç göstermektedir. Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.de tuz konsantrasyonuna - akım etkisi görülmektedir.

a. Renk Giderim Verimi Üzerine Zaman Etkisi

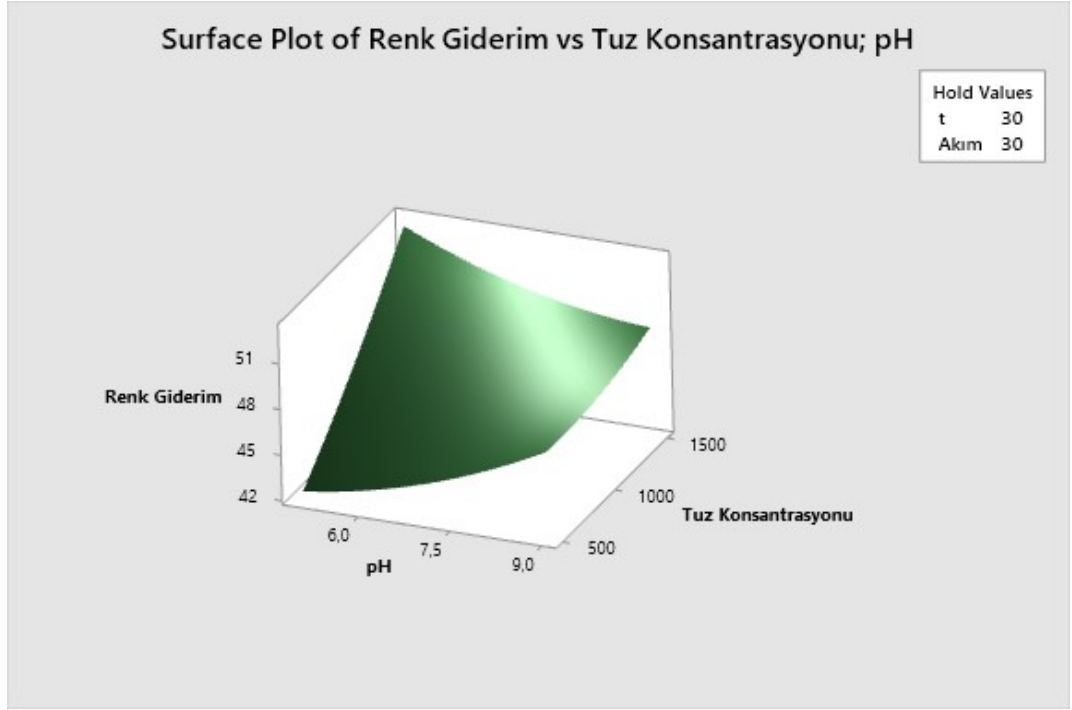


Şekil 4.10. RY145 renk giderim verimi-zaman surface grafiği

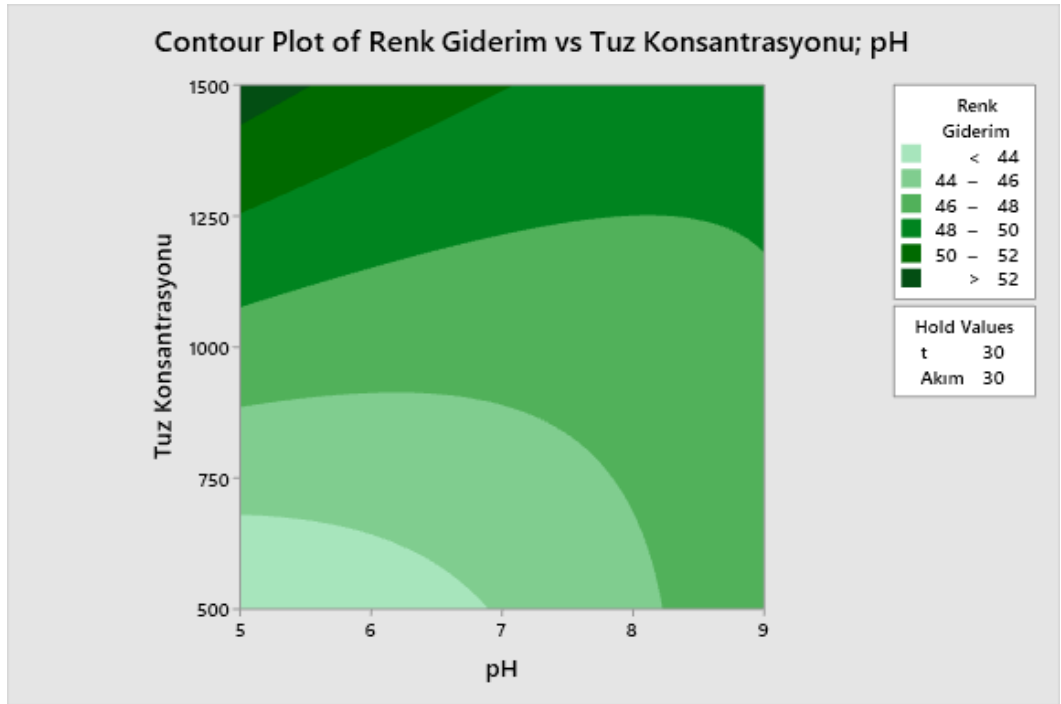


Şekil 4.11. RY145 renk giderim verimi-zaman contour grafiği

b. Renk Giderim Verimi Üzerine pH Etkisi

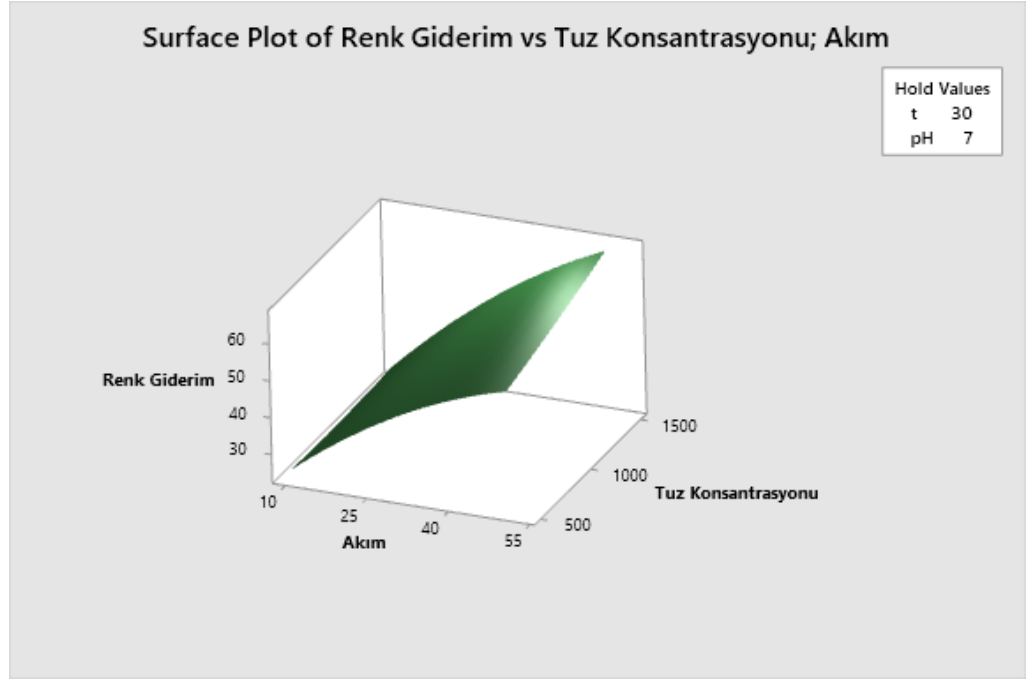


Şekil 4.12. RY145 renk giderim verimi-pH surface grafiği

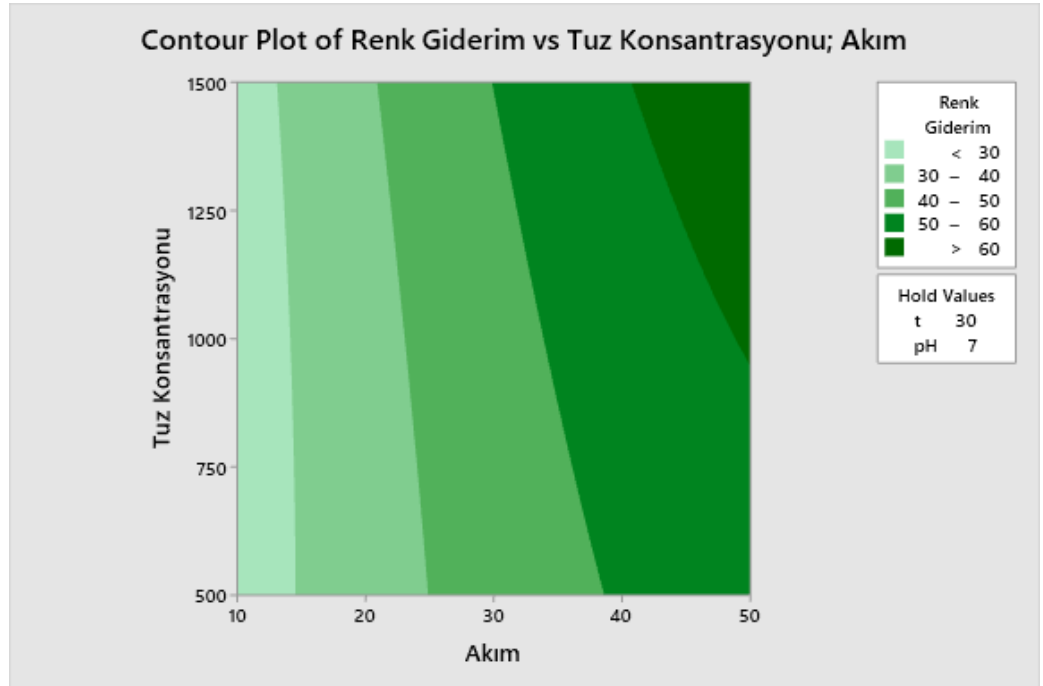


Şekil 4.13. RY145 renk giderim verimi-pH contour grafiği

c. Renk Giderim Verimi Üzerine Akım Etkisi



Şekil 4.14. RY145 renk giderim verimi-akım surface grafiği



Şekil 4.15. RY145 renk giderim verimi-akım contour grafiği

4.2. KCl Tuzu İlavesinin Elektrokimyasal Arıtıma Etkisi

KCl tuz konsantrasyonunun artışı ile birlikte KOİ parametresinin giderim veriminin de yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu durum tuz seviyesinin elektrokimyasal oksidasyon çalışmalarında iletkenliğe etkisiyle açıklanabilir.

Erkmen ve Adıgüzel (2022), boyar madde içeren atıksuyun arıtılması çalışmalarında KCl, NaCO₃, NaCl ve NaNO₃ tuz türlerinin etkilerini incelemiştir. Çalışmada titanyum anot kullanılmıştır. Sonuçlara göre, proses üzerinde renk ve KOİ gideriminin en yüksek verimi KCl tuzu eklentisiyle olmuştur. İleri arıtım yöntemlerinde en önemli maliyet getirisinin enerji tüketimi olduğu göz önünde bulundurularak KCl tuzunun 35.4 kWh /L ile en düşük enerji değerine sahip olduğuna ulaşılmıştır.

Elektrolit ilavesiyle atıksuyun iletkenliği artmakta bununla birlikte hücre potansiyeli azalmaktadır. Bu durum oksidasyon prosesindeki enerji tüketimini azaltmaktadır (Candia-Onfray vd., 2018). Ancak tuz konsantrasyonunun artışı çevre sorunlarına yol açabilmektedir (Basiriparsa vd., 2014; Pillai ve Gupta, 2016).

4.3. Renk ve KOİ Giderimde pH ile Yapılan Çalışmalar ve Elektrokimyasal Giderime Etkisi

Atıksuların arıtılmasında önemli bir rol oynayan parametrelerden bir diğeri de çözelti pH değeridir. Çözelti pH'ının geniş değer aralığı sebebiyle boyalı atıksuların elektrokimyasal oksidasyonu hakkında birçok rapor bulunmaktadır. Elektrot malzeme seçiminin ve kirleticilerin farklı doğası nedeniyle sonuçlar çeşitlilik ve çelişki göstermektedir (Xia vd., 2020). Bu nedenle, pH parametresinin RY145'in giderim verimliliği üzerindeki etkisi asidik, nötr ve alkali bir pH aralığında incelenmiştir.

Yonar ve Sivrioğlu (2016) yılında Sn/Sb/Ni-Ti anotları kullanılarak yaptıkları elektrokimyasal oksidasyon çalışmasında pH şartlarının nötr ve asidik ortamlarda çok daha iyi sonuçlar gösterdiği belirtilmiştir. Buna rağmen ilave kimyasal kullanımının maliyeti nedeniyle çalışmalarda nötre yakın doğal pH değeri (7,2) tercih edilmiştir.

İndigo boya içeren atıksuyun elektrokimyasal oksidasyon yöntemiyle gideriminin yapıldığı çalışmada demir elektrotlar kullanılmıştır. Çalışma sonucunda sırasında renk giderim verimi (%93,77) ve KOİ giderim veriminin (%92,07) sağladığında optimum şartlarda pH 7,58 olarak tespit edilmiştir (Solak ve Öztürk, 2018).

Öztürk ve Yılmaz (2019), Ti/Pt anotları kullanılarak mezbahane atıksuları üzerinde yaptıkları çalışmada pH parametresinin etkisini de araştırmışlardır. Çalışmada 3, 5, doğal pH (7,03), 8 ve 9 değerlerine ayarlanan pH ile TN, TSS, KOİ ve TOK ve renk giderimi üzerindeki etkisinde pH=7,03'te tüm kirleticiler için giderim verimliliği arttığı gözlemlenmiştir. Öte yandan anot yüzeyinde, asidik ortamda oluşan CO_3 ve CO_3^{-2} gibi hidroksil radikalleri ile organik kirleticilerin giderimi sağlanırken alkali ortamda klor gazı ve hipoklorit iyonu ile organik kirleticilerin giderimi sağlanmaktadır. Parametrenin en düşük (3) ve en yüksek (9) değerlerinde giderim veriminin aniden düştüğü belirtilmiştir.

4.4. Renk ve KOİ Giderimde Akımsal Yoğunluk ile Yapılan Çalışmalar ve Elektrokimyasal Giderime Etkisi

Bir diğer önemli parametreler arasında da akımsal yoğunluk yer almaktadır. Parametre, maliyet analizinde işletmenin güçlü bir alanını kaplamasının yanında ayrışma hızına da etki etmektedir. Yüksek akımlarda anotların akım yoğunluğuna dayanamayıp punto alanlarından koptukları tespit edilmiştir. Bu sebeple 10 – 50 mA/cm² aralığında deneysel çalışmalar tamamlanmıştır. Yüksek giderim veriminin akımsal yoğunluğun artması ile oluşması beklenirken, anotların dayanıklılıklarına ters etki sağlamıştır (Yonar ve Sivrioğlu, 2016). Enerji kullanımının artması ile işletme maliyetlerinin de artması olumsuz yönde etkilemektedir.

Boyar madde (reaktif azo) karışımını içeren numunede elektrokimyasal arıtma yöntemi organik madde ve renk giderimi çalışılmıştır. Maksimum KOİ ve renk giderimi 39,9 mA/cm² akım yoğunluğunda kaydedilmiştir (Vaghela vd., 2005).

Daneshvar ve diğerleri (2004), yaptığı çalışmada elektrokoagülasyon yöntemiyle Acid Red 14 azo boyası içeren atıksuyun renk giderim verimini araştırmıştır. Akım yoğunluğu

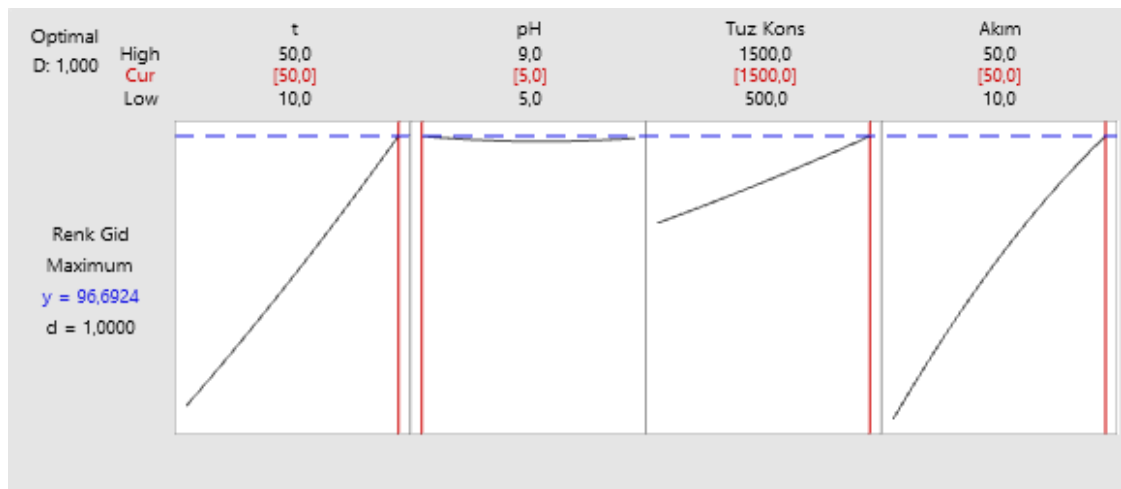
40 A/m²'de giderim verimi %52,10 iken akım yoğunluğunun 60 A/m²'ye artırılması sonucu verimin %91,2'ye yükseldiği elde edilmiştir.

4.5. Optimum Şartlar

KOİ ve renk giderim verimliliğine bakılmak üzere örneklere (Sabit boyar madde başlangıç derişimi=500 mg/L) 500, 100, 1500 mg/L KCI tuzu eklenerek elektrokimyasal oksidasyon uygulanmıştır. Çalışmalarda; tuz konsantrasyonu - zaman, tuz konsantrasyonu - pH ve tuz konsantrasyonu - akım parametrelerinin değişkenleri her 10, 30 ve 60. dakikada analiz edilmiştir.

4.5.1. Renk Giderimde Optimum Değerlerin Belirlenmesi

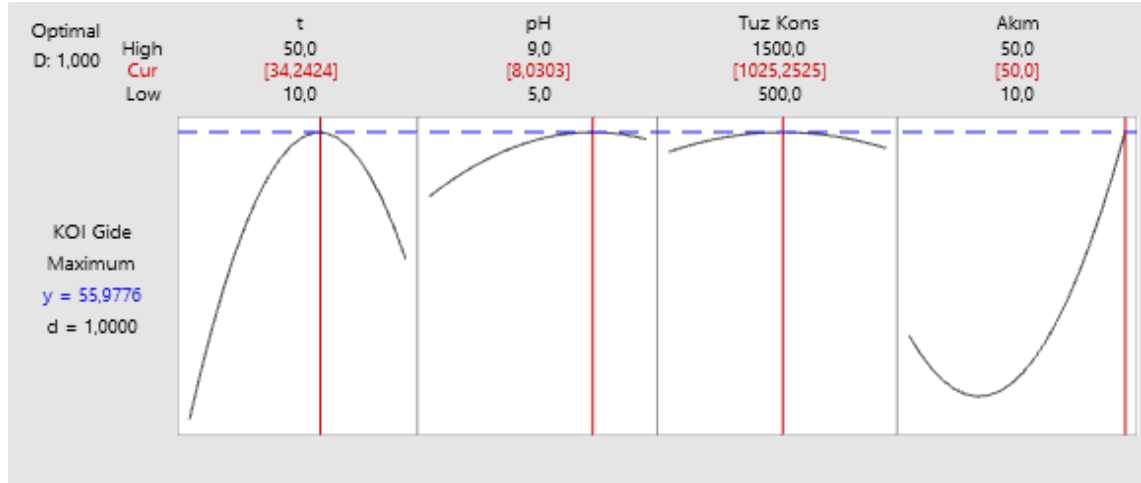
Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, renk parametresinin giderim verimi incelendiğinde maksimum değerlerin asidik pH değerinde (pH=5), 1500 mg/L tuz konsantrasyonunda ve 50 mA/cm² akımsal yoğunlukta 50 dakikalık bir deney süresinde olduğu gözlemlenmiştir. Asidik pH seviyelerinde anotta oluşan ozon, elektrolite bağlı klor gazı ile hidroksil radikalleri ve oksidanlar oluşmaktadır. Çalışmada asidik şartların daha etkin olduğu pH optimizasyonu ile gözlemlenmiştir. Şekil 4.16.da renk giderim optimum değerleri yer almaktadır.



Şekil 4.16. YYY optimizasyonu ile optimum renk giderim değerleri

4.5.2. KOİ Giderimde Optimum Değerlerin Belirlenmesi

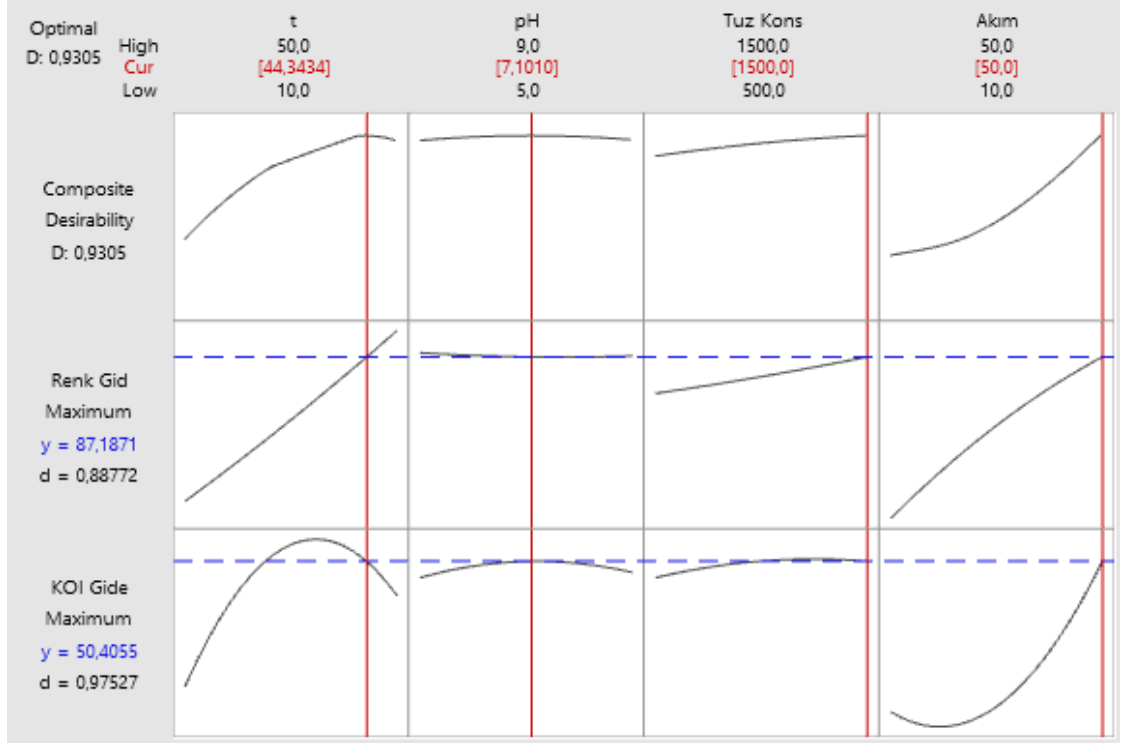
RY145 boyar maddesi için yapılan optimizasyon sonucunda, bir diğer parametre olan renk giderim verimi incelendiğinde maksimum değerlerin bazik pH değerinde (pH=8), yaklaşık 1000 mg/L tuz konsantrasyonunda ve 50 mA/cm² akımsal yoğunlukta 35 dakikalık bir deney süresinde olduğu gözlemlenmiştir. Bazik pH değerlerinde katotta hidrojen peroksit ve oksidasyon reaksiyonları oluşmaktadır. KOİ gideriminde ise bazik şartların daha etkin olduğu pH optimizasyonu ile gözlemlenmiştir. Şekil 4.17.de renk giderim optimum değerleri yer almaktadır.



Şekil 4.17. YYY optimizasyonu ile optimum KOİ giderim değerleri

4.5.3. Renk ve KOİ Bileşik Giderimde Optimum Şartların Belirlenmesi

Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda RY145 boyar maddesi için maksimum renk ve KOİ bileşik gideriminin elde edildiği proses şartları Şekil 4.18 ve Çizelge 4.5.te yer almaktadır.



Şekil 4.18. YYY optimizasyonu ile optimum renk ve KOİ bileşik giderim değerleri

Çizelge 4.5. KOİ ve Renk bileşik giderimi için optimum şartlar

Zaman	pH	Tuz Konsantrasyonu (mg/L)	Akım	KOİ Giderimi(%)	Renk Giderimi(%)
44,3434	7,10101	1500	50	50,4055	87,1871

Renk ve KOİ bileşik giderim sonuç parametrelerinin de gösterdiği üzere maksimum KCl tuz konsantrasyonun giderim verimine katkısı yüksektir. Yapılan çalışmalarda bileşik giderim pH $\cong$ 7 (optimum) olarak bulunmuştur. pH değerinin artması ile birlikte renk giderim verimi düşerken KOİ giderim verimi artmaktadır.

5. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada, deneyler Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. RY145 boyar maddesinin renk ve KOİ giderimi verimi üzerine; pH, akım yoğunluğu, tuz konsantrasyonu ve zaman parametrelerinin elektrokimyasal oksidasyon prosesi kullanılarak etkileri araştırılmıştır. Anodik malzeme olarak yeni nesil ve kararlı titanyum bazlı Sn/Sb/Ni laboratuvar ortamında 500-8-1 oranında kaplanarak hazırlanmıştır. Bunun yanı sıra katot malzemesi de laboratuvar ortamında hazırlanmıştır.

Her bir boyar maddenin kendine özgü kimyasal yapısı olması bu boyar maddelerin arıtma işlemi sonunda oluşabilecek yan ürünler ve bunların çevresel etkilerinin olduğu bilinmektedir. Giderim çalışmaları ve sonrasında oluşabilecek yan ürünler için sadece renk parametresi ile çalışılmamış KOİ analizleri de tamamlanmıştır.

Bu çalışmada tekstil atıksularında bulunan RY145 boyar maddesinin elektrokimyasal oksidasyon yöntemi uzaklaştırılması araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Tuz konsantrasyonu, akımsal yoğunluk, pH ve zaman parametreleri değerlendirilmiştir. KCI tuz konsantrasyonunun parametre olarak en etkili seviye olduğu gözlemlenmiştir.
- Akımsal yoğunluk parametresinin artması ile enerji kullanımı da artmaktadır. Bu durum işletme maliyetlerinin artmasına etki ettiğinden olumsuz yönde etkilemektedir.
- Tuz konsantrasyonunun artması elektro-kimya proseslerinde su iletkenliği de arttırmaktadır. Tuz miktarının artması ile KOİ ve renk gideriminin arttığı belirlenmiştir.
- Renk giderimi dikkate alındığında optimum temas süresi 50 dakika, asidik pH değerinde (pH=5), sırasıyla maksimum tuz konsantrasyonu ve akımsal yoğunlukta 1500 mg/L ve 50 mA/cm² olarak belirlenmiştir.
- KOİ giderimi dikkate alındığında ise optimum temas süresinin yaklaşık 35 dakika, bazik pH değerinde (pH=8), yaklaşık 1000 mg/L tuz konsantrasyonu ve 50 mA/cm² akımsal yoğunlukta olatık sulardığı gözlemlenmiştir.

- Renk ve KOİ bileşik giderimde optimum şartlar 1500 mg/L KCl, pH 7,1, 50 mA/cm² olarak seçilmiştir. Bu şartlar altında optimum oksidasyon 45 dakikalık bir sürede gerçekleştirilmiştir.
- Renk ve KOİ bileşik giderimi sonucunda KOİ giderimi verimi %50,4055, renk giderim verimi ise % 87,1871 belirlenmiştir.
- MKT deney stratejisinin RY145 boyar maddesinin elektrokimyasal oksidasyon prosesi ile renk ve KOİ giderim sürecinin tasarımı ve analizi için tercih edilebilir bir metot olduğu kabul edilebilir.
- Model denkleminin güvenilirliğini belirten R² değerleri ise KOİ giderimi için >%95, renk giderimi için ise >%99 olarak tespit edilmiştir.
- RY145 boyar maddesi için elektrokimyasal oksidasyon prosesinin etkili bir renk ve KOİ giderimi sağladığı söylenebilir.
- Çalışmalar kontrol deneyleri ile tamamlanmış olup, model tarafından verilen giderim verimlerine uygun sonuçlar bulunduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, elektrokimyasal oksidasyon prosesinin sentetik atıksulardan RY145 boyar maddesinin uzaklaştırılmasında kullanılabileceği belirlenmiştir. Çalışmanın materyal ve yöntem açısından yurt dışı ve ülkemizde yapılan örnekleri kısıtlı sayıdadır ve laboratuvar ortamında kaplanan anot ve katot materyalleri çalışmayı özgün kılmaktadır. Bu çalışma; tekstil boyahaneleri kaynaklı atıksuların, gerekli deşarj limitlerini sağlayabilmesinin yanında su geri kazanımı uygulamalarında da geleneksel yöntemlere göre daha çevreci bir alternatif olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Abbasi, M., Bäckström, J., & Cornell, A. (2018). Fabrication of Spin-Coated Ti/TiHx/Ni-Sb-SnO₂ Electrode: Stability and Electrocatalytic Activity. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(9), 568–574.
- Abbasi, M., Soleymani, A. R., & Parsa, J. B. (2015). Degradation of Rhodamine B by an Electrochemical Ozone Generating System Consist of a Ti Anode Coated with Nanocomposite of Sn–Sb–Ni Oxide. *Process Safety and Environmental Protection*, 94, 140–148.
- Abdelhay, A., Jum'h, I., Bsoul, A. Al, & Arideh, D. A. (2020). Performance Of Electrochemical Oxidation Over BDD Anode For The Treatment Of Different Industrial Dye-Containing Wastewater Effluents. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 11(1), 110–121.
- Allègre, C., Moulin, P., Maisseu, M., & Charbit, F. (2006). Treatment and reuse of reactive dyeing effluents. *Journal of Membrane Science*, 269(1–2), 15–34.
- Barışık, Ş. (2009). *Bazı Endüstrilerden Çıkan Atık Çamurların Boyar Madde Gideriminde Adsorban Olarak Kullanımının İncelenmesi*. Çukurova Üniversitesi.
- Başer, İ., & İnancı, Y. (1990). *Boyarmadde Kimyası*. Marmara Üni. Teknik Eğitim Fak.
- Basiriparsa, J., Golmirzaei, M., & Abbasi, M. (2014). Degradation of azo dye C.I. Acid Red 18 in aqueous solution by ozone-electrolysis process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20, 689–694.
- Bokhari, T. H., Kashif, M., Bhatti, I. A., Zubair, M., Adeel, S., Yousaf, M., Ahmad, M., Iqbal, M., Usman, M., Zuber, M., & Mansha, A. (2013). Degradation Study of C.I. Reactive Yellow 145 by Advanced Oxidation Process. *Asian Journal of Chemistry*, 25(15), 8668–8672.
- Brosillon, S., Djelal, H., Merienne, N., & Amrane, A. (2008). Innovative integrated process for the treatment of azo dyes: coupling of photocatalysis and biological treatment. *Desalination*, 222(1–3), 331–339.
- Candia-Onfray, C., Espinoza, N., Silva, E. B. S. da, Toledo-Neira, C., Espinoza, L. C., Santander, R., García, V., & Salazar, R. (2018). Treatment of winery wastewater by anodic oxidation using BDD electrode. *Chemosphere*, 206, 709–717.
- Ceron-Rivera, M., Davila-Jimenez, M. M., & Elizalde Gonzalez, M. P. (2004). Degradation Of The Textile Dyes Basic Yellow 28 And Reactive Black 5 Using Diamond And Metal Alloys Electrodes. *Chemosphere*, 55, 1–10.
- Chiang, L. C., Chang, J. E., & T.C., W. (1995). Indirect oxidation effect in electrochemical oxidation treatment of landfill leachate. *Water Research*, 29(2), 671–678.

- Christensen, P. A., Lin, W. F., Christensen, H., Imkum, A., Jin, J. M., Li, G., & Dyson, C. M. (2009). Room Temperature, Electrochemical Generation of Ozone with 50% Current Efficiency in 0.5M Sulfuric Acid at Cell Voltages < 3V. *Ozone: Science & Engineering*, 31(4), 287–293. <https://doi.org/10.1080/01919510903039309>
- Correia, V. M., Stephenson, T., & Judd, S. J. (1994). Characterisation Of Textile Wastewaters - A Review. *Environmental Technology*, 15(10), 917–929.
- Cruz-González, K., Torres-Lopez, O., M.García-León, A., Brillas, E., Hernández-Ramírez, A., & M.Peralta-Hernández, J. (2012). Optimization of electro-Fenton/BDD process for decolorization of a model azo dye wastewater by means of response surface methodology. *Desalination*, 286, 63–68.
- Daneshvar, N., Ashassi Sorkhabi, H., & Kasiri, M. B. (2004). Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections. *Journal of Hazardous Materials*, 122(1–2), 55–62.
- Erkmen, J., & Adıgüzel, M. (2022). Acid red-20 sentetik endüstriyel boyar maddenin elektro-oksidasyon yöntemi ile sulu çözeltiden uzaklaştırılması. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 11(2), 363–371. <https://doi.org/10.28948/ngmuh.854958>.
- Gosavi, V. D., & Sharma, S. (2013). A General Review on Various Treatment Methods for Textile Wastewater. *Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology*, 3(1), 02–039.
- Gözükızıl, M. F. (2013). *Tekstil Endüstrisi Atıksularından Fenton Prosesi ve Biyosorpsiyon Yöntemi ile Renk Giderimi ve Örnek Tesis Modeli*. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gupta, V. ., Ali, I., Suhas, & Mohan, D. (2003). Equilibrium uptake and sorption dynamics for the removal of a basic dye (basic red) using low-cost adsorbents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 265(2), 257–264. [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(03\)00467-3](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00467-3).
- Kaur, P., Kushwaha, J. P., & Sangal, V. K. (2017). Evaluation and disposability study of actual textile wastewater treatment by electro-oxidation method using Ti/RuO2 anode. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.06.004>.
- Khatri, A., Peerzada, M. H., Mohsin, M., & White, M. (2015). A review on developments in dyeing cotton fabrics with reactive dyes for reducing effluent pollution. *Journal of Cleaner Production*, 87(1), 50–57.
- Kırlaroğlu, M. (2008). *Tekstil Atıksularının Farklı Güç Kaynakları Kullanılarak Elektrokimyasal Arıtımında Optimum Şartların Araştırılması*.

- Kocaer, F. O., & Alkan, U. (2002). Boyar Madde İçeren Tekstil Atıksularının Arıtım Alternatifleri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7(1), 47–55.
- Körbahti, B. K. (2007). Response Surface Optimization of Electrochemical Treatment of Textile Dye Wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 145(1–2), 277–286.
- Kosutic, K., Dolar, D., Asperger, D., & Kunst, B. (2007). Removal of Antibiotics from a Model Wastewater by RO/NF Membranes. *Separation and Purification Technology*, 53, 244–249.
- Kurt, A., Taner, Y., Helvacioğlu, H., Shakir Fanar, & Neşelen, E. (2019). The Effect of Different Parameters on Electrochemical Removal of Ampicillin Using New Generation Sn/Sb/Ni-Ti Anodes. *16th International Conference on Environmental Science and Technology*.
- Lee, J.W., Choi, S.P., Thiruvengkatachari, R., Shim, W.G. and Moon, H. (2006). Evaluation of the performance of adsorption and coagulation processes for the maximum removal of reactive dyes. *Dyes and Pigments*, 69, 196–203.
- Lin, S. H., & Peng, C. F. (1994). Treatment of textile wastewater by electrochemical method. *Water Research*, 28(2), 277–282. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90264-X](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90264-X).
- Mohan, N., Balasubramanian, N., & Basha, C. (2007). Electrochemical oxidation of textile wastewater and its reuse. *Journal of Hazardous Materials*, 147(1–2), 644–651. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.063>.
- Morais, L. C., Freitas, O. M., Gonçalves, E. P., Vasconcelos, L. T., & Beça, C. . G. (1999). Reactive dyes removal from wastewaters by adsorption on eucalyptus bark: variables that define the process. *Water Research*, 33(4), 979–988.
- Namal, O. Ö. (2017). Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Proseslerin Araştırılması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 388–396. <https://doi.org/10.17100/nevbiltek.322169>.
- Nas, M. Z. (2006). *Tekstil Boyalarının Sulu Çözeltilerden Adsorpsiyon Yöntemiyle Giderimi*. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü,.
- Naumczyk, J., Szpyrkowicz, L., & Zilio-Grandi, F. (1996). Electrochemical treatment of textile wastewater. *Water Science and Technology*, 34(11). [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(96\)00816-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(96)00816-5).
- Özcan, A., Şahin, Y., Koparal, A. S., & Oturan, M. A. (2008). Prophan mineralization in aqueous medium by anodic oxidation using boron-doped diamond anode: Influence of experimental parameters on degradation kinetics and mineralization efficiency. *Water Research*, 42(12), 2889–2898.

- Öztürk, D., & Yilmaz, A. E. (2019). Treatment of slaughterhouse wastewater with the electrochemical oxidation process: Role of operating parameters on treatment efficiency and energy consumption. *Journal of Water Process Engineering*, 31, 100834.
- Park, H., & Choi, W. (2003). Visible Light and Fe(III)-Mediated Degradation of Acid Orange 7 in the Absence of H₂O₂. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 159(3), 241–247.
- Parsa, J. B., Abbasi, M., & Cornell, A. (2012). Improvement of the Current Efficiency of the Ti/Sn-Sb-Ni Oxide Electrode via Carbon Nanotubes for Ozone Generation. *Journal of The Electrochemical Society*, 159(5), D265–D269. <https://doi.org/10.1149/2.jes112940>.
- Pillai, I. M. S., & Gupta, A. K. (2016). Anodic oxidation of coke oven wastewater: Multiparameter optimization for simultaneous removal of cyanide, COD and phenol. *Journal of Environmental Management*, 176, 45–53.
- Pletcher, D., & Walsh, F. C. (1990). *Industrial Electrochemistry*. The Universty Press.
- Roche, A. (2015). Response Surface Methodology For Functional Data With Application To Nuclear Safety. *Hal Open Science*, hal-01144628v2f.
- Sakalis, A., Fytianos, K., Nickel, U., & Voulgaropoulos, A. (2006). A comparative study of platinised titanium and niobe/synthetic diamond as anodes in the electrochemical treatment of textile wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 119(2–3), 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.02.009>.
- Santos, D. H. S., Duarte, J. L. S., Tavares, M. G. R., Tavares, M. G., Friedrich, L. C., Meili, L., Pimentel, W. R. O., Tonholo, J., & Zanta, C. L. P. S. (2020). Electrochemical degradation and toxicity evaluation of reactive dyes mixture and real textile effluent over DSA® electrodes. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 153, 107940. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107940>.
- Solak, M., & Öztürk, A. (2018). Endüstriyel Atıksu Arıtımında Kimyasal Ve Elektrokimyasal Proseslerin Etkinliğinin Karşılaştırılması: Denim Ürün Üretim Sektörü. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7(2), 20–35.
- Süzen, Y. (2015). *Tekstil Endüstrisi Boyar Maddelerinin Fenton Oksidasyonu Sulu Ortamlardan Giderimi Ve Yanıt Yüzey Yöntemiyle (Yyy) Optimizasyonu*. Balıkesir Üniversitesi.
- Thompson, D. (1982). Response Surface Experimentation. *J Food Process Preservation*, 6(3), 155–188.
- Trinh, T. K., & Kang, L.-S. (2010). Application of Response Surface Method as an Experimental Design to Optimize Coagulation Tests. *Environmental Engineering Research*, 15(2), 63–70. <https://doi.org/10.4491/eer.2010.15.2.063>.

- Vaghela, S. S., Jethva, A. D., Mehta, B. B., Dave, S. P., Adimurthy, S., & Ramachandraiah, G. (2005). Laboratory Studies of Electrochemical Treatment of Industrial Azo Dye Effluent. *Environmental Science & Technology*, 39(8), 2848–2855.
- Vlyssides, A. ., Loizidou, M., Karlis, P. ., Zorpas, A. ., & Papaioannou, D. (1999). Electrochemical oxidation of a textile dye wastewater using a Pt/Ti electrode. *Journal of Hazardous Materials*, 70(1–2), 41–52. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(99\)00130-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(99)00130-2).
- Vlyssides, A., Papaioannou, D., Laizidoy, M., Karlis, P., & Zorpas, A. (2000). Testing an Electrochemical Method for Treatmant of Textile Dye Wastewater. *Waste Management*, 20, 569–574.
- Vlyssides, G. A., Karlis, P., Loizidou, M., Zorpas, A., & Arapoglou, D. (2001). Treatment of Leachate from a Domestic Solid Waste Sanitary Landfill by an Electrolysis System. *Environmental Technology*, 22(12), 1467–1476.
- Wang, C., Yu, Y., Yin, L., Niu, J., & Hou, L.-A. (2016). Insights of ibuprofen electro-oxidation on metal-oxide-coated Ti anodes: Kinetics, energy consumption and reaction mechanisms. *Chemosphere*, 163, 584–591.
- Wang, Y., Mu, Y., Zhao, Q. B., & Yu, H. Q. (2006). Isotherms, kinetics and thermodynamics of dye biosorption by anaerobic sludge. *Separation and Purification Technology*, 50, 1–7.
- Xia, Y., Wang, G., Guo, L., Dai, Q., & Ma, X. (2020). Electrochemical oxidation of Acid Orange 7 azo dye using a PbO₂ electrode: Parameter optimization, reaction mechanism and toxicity evaluation. *Chemosphere*, 241, 125010.
- Yonar, T., & Sivrioğlu, Ö. (2016). Electrochemical Degradation of Textile Effluent Using Novel Ozone Generating Sn-Sb-Ni Anodes. *International Journal of Environmental Engineering*, 3(3), 2374–1724.
- Zakaria, K., & Christensen, P. A. (2014). The Use of Ni/Sb–SnO₂-based Membrane Electrode Assembly for Electrochemical Generation of Ozone and the Decolourisation of Reactive Blue 50 Dye Solutions. *Electrochimica Acta*, 135, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.05.013>.
- Zhou, M., & He, J. (2007). Degradation of azo dye by three clean advanced oxidation processes: Wet oxidation, electrochemical oxidation and wet electrochemical oxidation—A comparative study. *Electrochimica Acta*, 53(4), 1902–1910. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.08.056>.
- Zhuo, Q., Deng, S., Yang, B., Huang, J., & Yu, G. (2011). Efficient Electrochemical Oxidation of Perfluorooctanoate Using a Ti/SnO₂-Sb-Bi Anode. *Environmental Science & Technology*, 45(7), 2973–2979. <https://doi.org/10.1021/es1024542>.

Zollinger, H. (2003). *Color chemistry: syntheses, properties, and applications of organic dyes and pigments*. VHCA, Verlag Helvetica Chimica Acta.

EKLER

EK 1 Renk Giderimi İçin Yazıt Yüzey Regresyon Sonuçları

EK 2 KOİ Giderimi İçin Yazıt Yüzey Regresyon Sonuçları

EK-1

Response Surface Regression: Renk Giderim versus t; pH;Tuz; Akım

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	46,637	0,802	58,13	0,000	
T	19,074	0,637	29,92	0,000	1,00
pH	0,248	0,637	0,39	0,703	1,00
Tuz	2,990	0,637	4,69	0,000	1,00
Akım	17,920	0,637	28,11	0,000	1,00
t*t	1,29	1,68	0,77	0,454	2,91
Ph*pH	0,81	1,68	0,48	0,637	2,91
Tuz*Tuz	0,48	1,68	0,28	0,780	2,91
Akım*Akım	-3,97	0,676	-2,37	0,031	2,91
t*pH	1,149	0,676	1,70	0,109	1,00
T*Tuz	0,627	0,676	0,93	0,367	1,00
T*Akım	8,014	0,676	11,85	0,000	1,00
Ph*Tuz	-2,307	0,676	-3,41	0,004	1,00
pH*Akım	0,701	0,676	1,04	0,315	1,00
Tuz*Akım	2,623	0,676	3,88	0,001	1,00

Modal Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2,70447	99,16%	98,42%	95,08%

Analysis of Variance

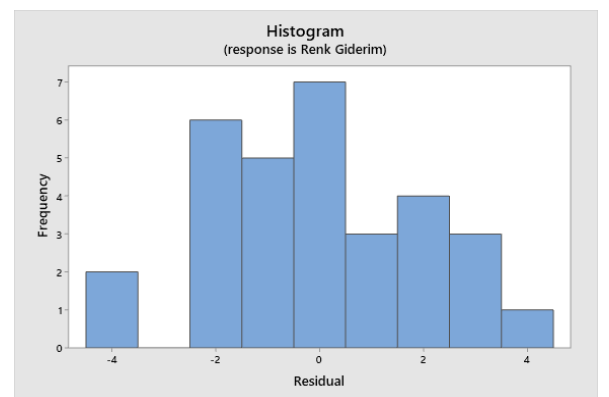
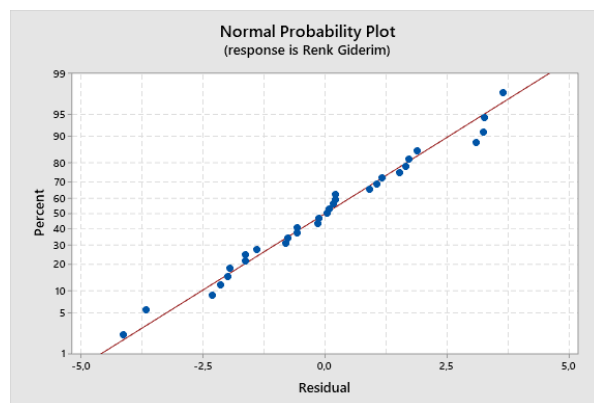
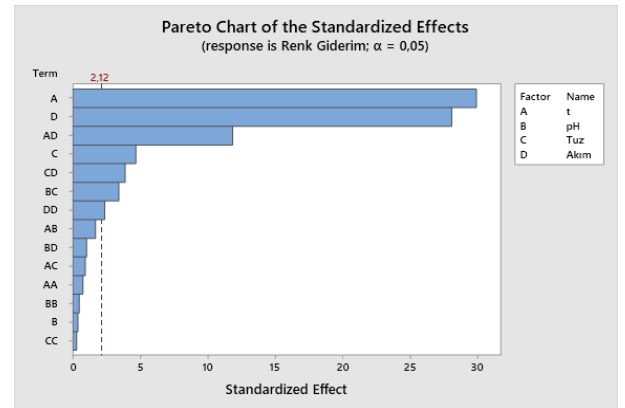
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	13796,9	985,49	134,74	0,000
Linear	4	12491,3	3122,83	426,96	0,000
T	1	6549,0	6549,02	895,39	0,000
pH	1	1,1	1,11	0,15	0,703
Tuz	1	160,9	160,92	22,00	0,000
Akım	1	5780,3	5780,28	790,29	0,000
Square	4	47,6	11,89	1,63	0,216
t*t	1	4,3	4,30	0,59	0,454
Ph*pH	1	1,7	1,69	0,23	0,637
Tuz*Tuz	1	0,6	0,59	0,08	0,780
Akım*Akım	1	41,0	40,97	5,60	0,031
2-Way Interaction	6	1258,0	209,67	28,67	0,000
t*pH	1	21,1	21,11	2,89	0,109
T*Tuz	1	6,3	6,30	0,86	0,367
T*Akım	1	1027,5	1027,52	140,48	0,000
Ph*Tuz	1	85,2	85,19	11,65	0,004
pH*Akım	1	7,9	7,87	1,08	0,315
Tuz*Akım	1	110,0	110,04	15,04	0,001
Error	16	117,0	7,31		
Lack-of-fit	10	96,2	9,62	2,77	0,112
Pure Error	6	20,8	3,47		
Total	30	13913,9			

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned} \text{Renk Giderim} = & 11,4 - 0,104 t + 1,78 \text{ Ph} + 0,0086 \text{ Tuz} + 0,506 \text{ Akım} + 0,00322 t*t + 0,202 \\ & \text{pH*pH} + 0,000002 \text{ Tuz*Tuz} - 0,00993 \text{ Akım*Akım} + 0,0287 t*\text{pH} + \\ & 0,000063 t*\text{Tuz} + 0,02003 t*\text{Akım} - 0,002307 \text{ pH*Tuz} + 0,0175 \text{ pH*Akım} + \\ & 0,000262 \text{ Tuz*Akım} \end{aligned}$$

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Renk Giderim	Fit	Resid	Std Resid
4	36,24	40,38	-4,14	-2,62 R
12	91,67	88,41	3,26	2,06 R
13	47,21	43,56	3,65	2,31 R



EK-2

Response Surface Regression: KOI Giderim versus t; pH;Tuz; Akım

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	32,20	1,04	31,01	0,000	
t	4,402	0,825	5,4	0,000	1,00
pH	1,997	0,825	2,42	0,028	1,00
Tuz	-2,966	0,825	-3,60	0,002	1,00
Akım	8,277	0,825	10,03	0,000	1,00
t*t	-19,06	2,17	-8,77	0,000	2,91
pH*pH	-2,69	2,17	-1,24	0,233	2,91
Tuz*Tuz	-1,68	2,17	-0,77	0,451	2,91
Akım*Akım	13,89	2,17	6,39	0,000	2,91
t*pH	-0,688	0,875	-0,79	0,443	1,00
t*Tuz	1,036	0,875	1,18	0,254	1,00
t*Akım	3,661	0,875	4,18	0,001	1,00
pH*Tuz	-1,989	0,875	-2,27	0,037	1,00
pH*Akım	1,018	0,875	1,16	0,262	1,00
Tuz*Akım	3,952	0,875	4,52	0,000	1,00

Modal Summary

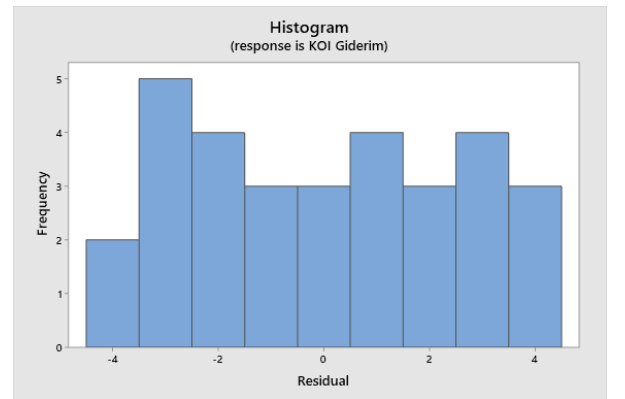
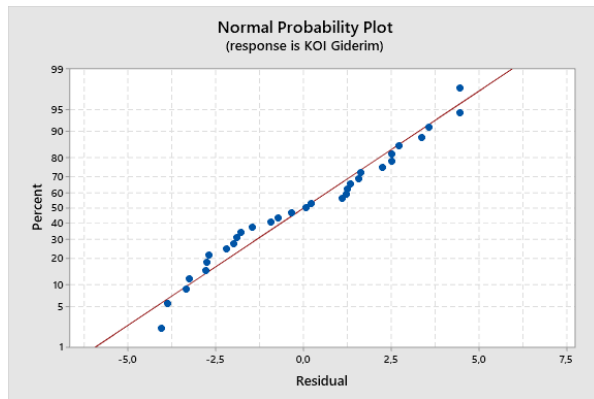
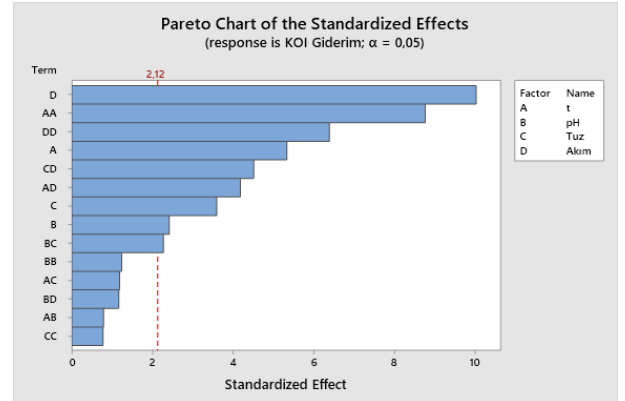
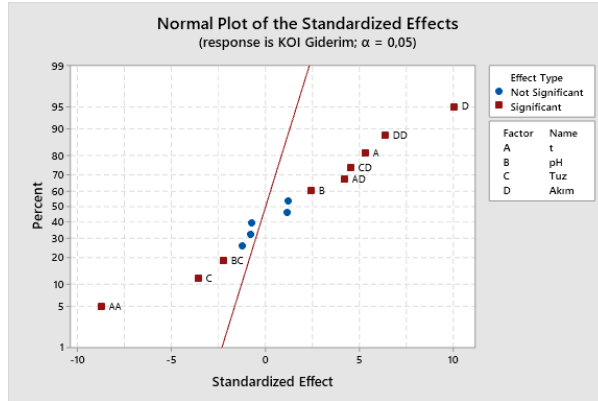
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3,49946	95,35%	91,28%	79,70%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	4018,93	287,07	23,44	0,000
Linear	4	1811,92	452,98	36,99	0,000
T	1	348,74	348,74	28,48	0,000
pH	1	71,76	71,76	5,86	0,028
Tuz	1	158,36	158,36	12,93	0,002
Akım	1	1233,06	1233,06	100,69	0,000
Square	4	1638,09	409,52	33,44	0,000
t*t	1	942,72	942,72	76,98	0,000
Ph*pH	1	18,84	18,84	1,54	0,233
Tuz*Tuz	1	7,32	7,32	0,60	0,451
Akım*Akım	1	500,37	500,37	40,86	0,000
2-Way Interaction	6	568,92	94,82	7,74	0,000
t*pH	1	7,58	7,58	0,62	0,443
T*Tuz	1	17,16	17,16	1,40	0,254
T*Akım	1	214,40	214,40	17,51	0,001
Ph*Tuz	1	63,32	63,32	5,17	0,037
pH*Akım	1	16,59	16,59	1,35	0,262
Tuz*Akım	1	249,88	249,88	20,40	0,000
Error	16	195,94	12,25		
Lack-of-fit	10	182,70	18,27	8,28	0,009
Pure Error	6	13,24	2,21		
Total	30	4244,87			

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned} \text{KOI Giderim} = & -28,2 + 2,821 \text{ t} + 12,17 \text{ Ph} + 0,0065 \text{ Tuz} - 2,517 \text{ Akım} - 0,04765 \text{ t}^* \text{ t} - 0,674 \\ & \text{pH}^* \text{ pH} - 0,000007 \text{ Tuz}^* \text{ Tuz} + 0,03471 \text{ Akım}^* \text{ Akım} - 0,0172 \text{ t}^* \text{ pH} + \\ & 0,000104 \text{ t}^* \text{ Tuz} + 0,00915 \text{ t}^* \text{ Akım} - 0,00915 \text{ t}^* \text{ Akım} - 0,001989 \text{ pH}^* \text{ Tuz} + \\ & 0,0255 \text{ pH}^* \text{ Akım} + 0,000395 \text{ Tuz}^* \text{ Akım} \end{aligned}$$



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Seda BALCI
Doğum Yeri ve Tarihi : Osmangazi/BURSA 11.10.1994
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Cem Sultan Lisesi
Lisans : Balıkesir Üniversitesi
Çevre Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Mavi Yeşil Danışmanlık

İletişim (e-posta) : sbsedabalci@gmail.com

Yayınları :Balcı, S., Yonar, T., (2022, Mart 18-20). *RY145 Boyar Maddesinin Elektrokimyasal Oksidasyon Yöntemi İle Gideriminin Yanıt Yüzey Yöntemiyle (YYY) Optimizasyonu*. VIII. INSAC International Congress on Social and Education Sciences, Konya, Türkiye.