

**BAŞTA DENİM YIKAMA SULARI OLMAK ÜZERE
TEKSTİL YIKAMA SONUCU OLUŞAN ATIKSULARIN
SIFIR ATIK/TEMİZ ÜRETİM YAKLAŞIMI İLE GERİ
KAZANIMI İÇİN TAŞINABİLİR BİR PROSES
TASARIMI VE PROTOTİP GELİŞTİRİLMESİ**

Eren ER



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAŞTA DENİM YIKAMA SULARI OLMAK ÜZERE TEKSTİL YIKAMA
SONUCU OLUŞAN ATIKSULARIN SIFIR ATIK/TEMİZ ÜRETİM
YAKLAŞIMI İLE GERİ KAZANIMI İÇİN TAŞINABİLİR BİR PROSES
TASARIMI VE PROTOTİP GELİŞTİRİLMESİ**

Eren ER
0000-0001-8139-1338

Prof. Dr. Taner YONAR
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Eren ER tarafından hazırlanan “BAŞTA DENİM YIKAMA SULARI OLMAK ÜZERE TEKSTİL YIKAMA SONUCU OLUŞAN ATIKSULARIN SIFIR ATIK/TEMİZ ÜRETİM YAKLAŞIMI İLE GERİ KAZANIMI İÇİN TAŞINABİLİR BİR PROSES TASARIMI VE PROTOTİP GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA 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. Feza KARAER 0000-0002-2986-0114 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	:	Prof. Dr. Orhan Taner CAN 0000-0003-3386-975X Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	:	Prof. Dr. Baybars Ali FİL 0000-0003-3085-224X Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali KARA
Enstitü Müdürü

.././.....

B.U.Ü. 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.

16/06/2023

Eren ER

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
16/06/2023

Eren ER
16/06/2023

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Doktora Tezi

BAŞTA DENİM YIKAMA SULARI OLMAK ÜZERE TEKSTİL YIKAMA SONUCU OLUŞAN ATIKSULARIN SIFIR ATIK/TEMİZ ÜRETİM YAKLAŞIMI İLE GERİ KAZANIMI İÇİN TAŞINABİLİR BİR PROSES TASARIMI VE PROTOTİP GELİŞTİRİLMESİ

Eren ER

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Taner YONAR

Bu tez çalışması kapsamında laboratuvar ortamında sentetik olarak hazırlanan indigo mavisi sulu çözeltisinin Sn/Sb/Ni-Ti anot ve Pt-Ti katot kullanılarak elektrooksidasyonun yöntemiyle renk ve KOİ giderimi araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında NaCl, KCl, Na₂SO₄ ve K₂SO₄ tuzları ile çalışılarak uygun destek elektrolit türü araştırılmıştır. Çalışmalara en uygun destek elektrolit türü olarak NaCl ile devam edilmiştir. Elektrooksidasyon da etkin olan pH, akım yoğunluğu, destek elektrolit konsantrasyonu ve zaman parametreleri Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) yoluyla tasarlamak için Yanıt Yüzeyi Yöntemi (YYY) kullanılmıştır. Tasarım, 4 faktör ve bunların 3 farklı seviyeleri ile 7 merkez deneyi içermektedir. Renk ve KOİ giderimi için YYY neticesinde önerilen kvadratik modelin F değeri renk giderimi için 22,71 ve KOİ giderimi için 29,59 olarak ölçülmüştür. Korelasyon katsayısı değeri (R²) ise renk ve KOİ giderimi için sırasıyla % 95,21 ve % 96,28 olarak elde edilmiştir. Yüksek R² değeri, deney aralığında hesaplanan ve gözlemlenen sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu göstermektedir YYY sonucunda optimum koşullar pH: 11, akım yoğunluğu: 51,01 mA/cm², destek elektrolit konsantrasyonu: 1565,66 mg/l ve süre: 120 dakika olarak bulunmuştur. Optimum şartlar altındaki gerçekleştirilen kontrol deneyinde renk ve KOİ giderimi sırasıyla % 98,93 ve % 97,43, ayrıca enerji tüketimi 17,49 kWh/kg KOİ olarak bulunmuştur. Çalışmanın son aşamasında bir prototip dizayn edilmiştir. Silindirik şeklindeki polietilen (PE) tank içerisinde yerleştirilen teflon şase içerisindeki 3 anot ve 4 katot ile pilot ölçekte elektrooksidasyon yöntemiyle deneme çalışmaları yapılmıştır. YYY sonucunda bulunan optimum koşullarda gerçekleştirilen çalışma neticesinde renk ve KOİ giderimi için sonuçlar sırasıyla, % 95,26 ve % 92,16 bulunmuştur. Çalışmanın bulgularına göre, elektrooksidasyon yöntemiyle başta denim yıkama suları olmak üzere tekstil yıkama sonucu oluşan atıksuların arıtılması için umut verici olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: İndigo mavisi, yanıt yüzey yöntemi, elektrooksidasyon, prototip tasarımı

2023, xiv + 102 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

DEVELOPING A PORTABLE PROCESS DESIGN AND PROTOTYPE FOR THE RECOVERY OF WASTEWATER ORIGINATED FROM TEXTILE WASHING, ESPECIALLY DENIM WASHING WATER, WITH A ZERO WASTE/CLEAN PRODUCTION APPROACH

Eren ER

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

Supervisor: Prof. Dr. Taner YONAR

In this thesis, color and COD removal of a synthetically prepared indigo blue aqueous solution was investigated by electrooxidation using Sn/Sb/Ni-Ti anode and Pt-Ti cathode. In the first stage of the study, NaCl, KCl, Na₂SO₄ and K₂SO₄ salts were used to investigate the appropriate support electrolyte type. The studies continued with NaCl as the most suitable support electrolyte type. Response Surface Methodology (RSM) was used to design the pH, current density, support electrolyte concentration and time parameters that are effective in electrooxidation through Central Composite Design (CCD). The design included 7 central experiments with 4 factors and their 3 different levels. The F value of the quadratic model proposed as a result of RSM for color and COD removal was 22.71 for color removal and 29.59 for COD removal. The correlation coefficient value (R^2) was 95.21% and 96.28% for color and COD removal, respectively. The high R^2 value indicates that there is a good agreement between the calculated and observed results in the experimental range: 11, current density: 51.01 mA/cm², support electrolyte concentration: 1565.66 mg/l and duration: 120 minutes. In the control experiment performed under optimum conditions, color and COD removal was 98.93% and 97.43%, respectively, and energy consumption was 17.49 kWh/kg COD. In the last stage of the study, a prototype was designed. Pilot scale electrooxidation experiments were carried out with 3 anodes and 4 cathodes in Teflon chassis placed in a cylindrical polyethylene (PE) tank. As a result of the study carried out under the optimum conditions found as a result of RSM, the results for color and COD removal were 95.26% and 92.16%, respectively. According to the findings of the study, it is thought that the electrooxidation method is promising for the treatment of textile washing wastewaters, especially denim washing waters.

Key words: Indigo blue, response surface method, electrooxidation, prototype design
2023, xiv + 102 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim ve çalışmalarım sırasında gerek bilgi aktarımı, gerekse manevi destekleriyle yanımda olan, önderlik eden danışman hocam sayın Prof. Dr. Taner YONAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Beraber aynı yolda yürüdüğümüz doktora hayatım ve laboratuvar çalışmalarım sırasında büyük yardımlarını gördüğüm ekip arkadaşım, yoldaşım Arş. Gör. Leyla GAZİGİL'e ve tezin düzenlemesindeki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Burak ÇALIŞKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesindeki sayın hocalarım Prof. Dr. Melike YALILI KILIÇ ve Prof. Dr. Baybars Ali FİL'e tez çalışmasının oluşması sürecinde vermiş oldukları katkı için teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sırasında boya temini konusunda yardımlarından ötürü Dystar Türkiye firmasına ve Uğurcan AYGÜN'e teşekkürlerimi sunarım.

119C122 proje numarasıyla 2244 Sanayi Doktora Programı kapsamında beni destekleyen TUBİTAK BİDEB'e teşekkürlerimi sunarım. Program doğrultusunda görev aldığım Bursa Teknoloji Koordinasyon ve Ar-Ge Merkezi (BUTEKOM) A.Ş. ve kıymetli çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarım sırasında her zaman yanımda olan ve hiçbir desteği esirgemeyen değerli ailem; annem Mahbube ER, babam Ali Er, ablam Gonca ER İLHAN ve eşi Erol İLHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan, desteğini her zaman hissettiğim, bana sabır gösterip destek olan eşim Gül Deniz YİĞİT ER'e teşekkürlerimi sunarım.

Eren ER
16/06/2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Denim Endüstrisi, Su Kullanım Yerleri ve Özellikleri	4
2.2. Tekstil ve Denim Endüstrisi Arıtma ve Geri Kazanım Uygulamaları	14
2.3. Türkiye’deki Tekstil Endüstrisi Su Geri Kazanım Potansiyeli, Teknik ve Yasal Altyapı.....	24
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	28
3.1. Çalışmanın Planlanması	28
3.2. Materyal	29
3.2.1. Sentetik denim yıkama atıksuyu	29
3.2.2. Anot ve Katot Materyallerinin Laboratuvar Ortamında Kaplanması	31
3.2.3. Elektrokoksiasyon deney düzeneği	33
3.2.4. Pilot Ölçekli Tesis	33
3.2.5. Kimyasallar	37
3.3. Metot	37
3.3.1. Deneysel prosedür	37
3.3.2. Analitik prosedür.....	37
3.3.3. Deney Tasarımı ve yanıt yüzey yöntemi (YYY)	40
3.3.4. Hesaplamalar ve kullanılan eşitlikler	46
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	47
4.1. Destek elektrolit türünün belirlenmesi	47
4.2. YYY ile belirlenen şartlarda yürütölen elektrokoksiasyon çalışmasının deney sonuçları	49
4.2.1. Renk Giderimi	53
4.2.2. KOİ Giderimi	68
4.2.3. Proses optimizasyonu.....	84
4.2.4. Enerji Tüketimi	85
4.2.5. Pilot Ölçek Çalışmaları	86
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR	94
ÖZGEÇMİŞ	102

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb}$	Kurşun asetat
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
$\bullet\text{OH}$	Hidroksil radikali
A	Amper
Ag_2SO_4	Gümüş sülfat
$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	Etil alkol
$\text{C}_8\text{H}_5\text{KO}_5$	Potasyum hidrojen ftalat
cm	Santimetre
cm^2	Santimetre kare
Cr	Krom
dk.	Dakika
g	Gram
H_2O_2	Hidrojen peroksit
H_2SO_4	Sülfürik asit
HgSO_4	Civa sülfat
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	Potasyum dikromat
K_2SO_4	Potasyum sülfat
KCl	Potasyum klorür
kg	Kilogram
kWh	Kilovatsaat
l	Litre
M	Molarite
m^3	Metreküp
mA	Miliamper
mg	Miligram
mS	Milisiemens
Na_2SO_4	Sodyum sülfat
NaCl	Sodyum klorür
NaOCl	Sodyum hipoklorit
$\text{NH}_4\text{-N}$	Amonyum azotu
NiO	Nikel oksit
nm	Nanometre
O_3	Ozon
Pt/Ti	Platin/titanyum
PtCl_6H_2	Kloroplatinik asit
Pt-co	Platin-Kobalt
S^{-2}	Sülfür
sa.	Saat
Sb_2O_3	Antimon trioksit
$\text{SnCl}_2\text{x}2\text{H}_2\text{O}$	Kalay klorür dehidrat
SnO_2	Kalay oksit
Sn-Sb-Ni/Ti	Kalay-antimon-nikel/titanyum
SO_3	Kükürt trioksit
Ti/PtO _x	Titanyum-Platin oksit

V	Volt
w/v	Hacimde ağırlıkça yüzde

Kısaltmalar	Açıklama
AKM	Askıda katı madde
ANOVA	Varyans Analizi (Analysis of Variance)
BOİ	Biyolojik oksijen ihtiyacı
DC	Direkt akım (direct current)
DT	Deney tasarımı
EK	Elektrokoagülasyon
EO	Elektrooksidasyon
F	Fisher varyans oranı (Fisher variance ratio)
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
Kons.	Konsantrasyon
MKY	Merkezi kompozit tasarım
NF	Nanofiltrasyon
P	P değeri (P value)
PE	Polietilen
SKKY	Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği
TÇKM	Toplam çözünmüş katı madde
TO	Ters Osmoz
UF	Ultrafiltrasyon
Yoğ.	Yoğunluk
YYY	Yanıt yüzey yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Denim Kumaş Üretim Aşamaları.....	6
Şekil 2.2. İndigo bitkisi (Indigofera Tinctoria L.).....	7
Şekil 2.3. Leyko indirgeme/yükseltgeme reaksiyonu	7
Şekil 3.1. Kaplanmış anot ve katot materyali	32
Şekil 3.2. Elektrooksidasyon düzeneğinin şematik olarak gösterimi.....	33
Şekil 3.3. Pilot ölçek tesise ait teknik çizimler ve kesitleri.....	34
Şekil 3.4. Pilot ölçek tesise 3 boyutlu çizim	35
Şekil 3.5. Teflon şase içerisindeki anot ve katoda ait görünüşler	36
Şekil 3.6. a) Şase ve EO tankı b) DC güç kaynağı.....	36
Şekil 3.7. İndigo mavisi sulu çözeltisine ait renk kalibrasyon eğrisi	38
Şekil 3.8. İndigo mavisi sulu çözeltisine ait KOİ kalibrasyon eğrisi	40
Şekil 3.9. Bir sistem veya sürece ait şematik gösterim	41
Şekil 3.10. 2 ³ MKT çözüm düzlemi	43
Şekil 4.1. Farklı destek elektrolit türlerinin zamana karşı renk giderim verimi ...	48
Şekil 4.2. Farklı destek elektrolit türlerinin zamana karşı KOİ giderim verimi ...	48
Şekil 4.3. Renk giderim verimi için standartlaştırılmış pareto grafiği.....	55
Şekil 4.4. Renk giderim verimi için gerçek-model sonuçlarının karşılaştırması	57
Şekil 4.5. Renk giderim verimi üzerine pH-akım yoğunluğu ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği	58
Şekil 4.6. Renk giderim verimi üzerine pH-akım yoğunluğu ilişkisine ait kontur grafiği	59
Şekil 4.7. Renk giderim verimi üzerine pH-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği	60
Şekil 4.8. Renk giderim verimi üzerine pH-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait kontur grafiği	60
Şekil 4.9. Renk giderim verimi üzerine pH-süre ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği	61
Şekil 4.10. Renk giderim verimi üzerine pH-süre ilişkisine ait kontur grafiği	62
Şekil 4.11. Renk giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği	63
Şekil 4.12. Renk giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-destek elektrolit konsantrasyonu-akım ilişkisine ait kontur grafiği.....	63
Şekil 4.13. Renk giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-süre ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği	65
Şekil 4.14. Renk giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-süre ilişkisine ait kontur grafiği	65
Şekil 4.15. Renk giderim verimi üzerine destek elektrolit konsantrasyonu-süre ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği	67
Şekil 4.16. Renk giderim verimi üzerine destek elektrolit konsantrasyonu-süre ilişkisine ait kontur grafiği	67
Şekil 4.17. KOİ giderim verimi için standartlaştırılmış pareto grafiği	70

Şekil 4.18.	KOİ giderim verimi için gerçek-model sonuçlarının karşılaştırması ...	72
Şekil 4.19.	KOİ giderim verimi üzerine pH-akım yoğunluğu ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği	74
Şekil 4.20.	KOİ giderim verimi üzerine pH-akım yoğunluğu ilişkisine ait kontur grafiği	74
Şekil 4.21.	KOİ giderim verimi üzerine pH-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği	76
Şekil 4.22.	KOİ giderim verimi üzerine pH-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait kontur grafiği	76
Şekil 4.23.	KOİ giderim verimi üzerine pH-süre ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği	77
Şekil 4.24.	KOİ giderim verimi üzerine pH-süre ilişkisine ait kontur grafiği	78
Şekil 4.25.	KOİ giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği	79
Şekil 4.26.	KOİ giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait kontur grafiği	80
Şekil 4.27.	KOİ giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-süre ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği	81
Şekil 4.28.	KOİ giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-süre ilişkisine ait kontur grafiği	81
Şekil 4.29.	KOİ giderim verimi üzerine destek elektrolit konsantrasyonu-süre ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği	83
Şekil 4.30.	KOİ giderim verimi üzerine destek elektrolit konsantrasyonu-süre ilişkisine ait kontur grafiği	83
Şekil 4.31.	En iyi renk ve KOİ giderimi için optimizasyon çözümü	85
Şekil 4.32.	Pilot tesise ait genel görünüm	86
Şekil 4.33.	Pilot tesise çalışmasına ait giriş ve çıkış numuneleri	88

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Tipik denim boyama reçetesi	10
Çizelge 2.2. Denim üretimi sırasında su kirliliği kaynakları ve özellikleri	11
Çizelge 2.3. Denim boyama sırasında su kirliliği	11
Çizelge 2.4. Denim yıkama sırasında su kirliliği	12
Çizelge 2.5. Denim boyama işleminden kaynaklanan atık suyun özellikleri	12
Çizelge 2.6. Bazı denim üreticisi ülkelerdeki atık deşarj limitleri	13
Çizelge 2.7. Su kirliliği kontrol yönetmeliği tablo 10.3. Tekstil Sanayii (Pamuklu Tekstil ve Benzerleri) deşarj standartları.....	25
Çizelge 3.1. İndigo mavisi boya çözeltilisinin özellikleri	29
Çizelge 3.2. İndigo mavisi boya çözeltilisinin atıksu karakterizasyonu	30
Çizelge 3.3. İndigo mavisi sulu çözeltilisine ait renk kalibrasyon değerleri.....	38
Çizelge 3.4. İndigo mavisi sulu çözeltilisine ait KOİ kalibrasyon değerleri.....	39
Çizelge 3.5. YYY ile oluşturulan tasarım faktörleri ve seviyeleri.....	44
Çizelge 3.6. YYY ile oluşturulan deney tasarımı matrisi	44
Çizelge 4.1. YYY ile oluşturulan deney tasarımı matrisine göre renk giderim sonuçları (gerçek-tahmin)	50
Çizelge 4.2. YYY ile oluşturulan deney tasarımı matrisine göre KOİ giderim sonuçları (gerçek-tahmin)	51
Çizelge 4.3. Renk giderim verimine ait kodlanmış katsayılar	53
Çizelge 4.4. Renk giderim verimine ait ANOVA testi sonuçları.....	54
Çizelge 4.5. KOİ giderim verimine ait kodlanmış katsayılar.....	68
Çizelge 4.6. KOİ giderim verimine ait ANOVA testi sonuçları	69
Çizelge 4.7. En iyi renk ve KOİ giderimi için optimizasyon çözümleri.....	84
Çizelge 4.8. Optimum koşullarda gerçekleşen pilot ölçek çalışmasına ait sonuçlar	87

1. GİRİŞ

Hızlı nüfus artışı, düzensiz kentleşme, sanayi devrimi ile birlikte hızlı ve plansız sanayi gelişimi çevreyi olumsuz etkileyen en önemli etkenlerdir. Tüm bu etkenlerle hız kazanan sanayileşme yoğun su kullanımını beraberinde doğurmuş ve doğal kaynaklarının bilinçsizce tüketilmesine neden olmuştur. Bilinçsiz olarak kullanılan ve kirletilen bu suların arıtılmadan doğaya verilmesi bazen geri dönülmez sonuçlar doğurmakta, yaptığı etkiler önemli düzeyde çevreye dolayısıyla insan sağlığına zarar vermektedir. Doğal kaynakları korumak ve gelecek nesillere emanet etmek hepimizin görevidir.

Dünya üzerinde oluşan atıksuların büyük kısmını endüstriyel atıksular oluşturmaktadır. Günümüzün en büyük sorunlarından biri su kalitesi ve yönetimidir. Su Dünya üzerinde en bol bulunan element olmasına rağmen, yaklaşık olarak sadece % 0,3'lük kısmı kullanılabilir niteliktedir (Cassardo & Jones, 2011). Su tüketiminin artması ve buna bağlı olarak su kıtlığının ortaya çıkması, suyun geri dönüşümü ve yeniden kullanımına odaklı yeni çevre politikalarının oluşturulmasına neden olmaktadır. Bu yüzden atıksuların arıtılması veya tekniğe uygun bir şekilde uzaklaştırılmasıyla birlikte doğal kaynaklara olan etkiler azaltılabilir.

Tekstil endüstrisi; özellikle boyama, yıkama ve apre gibi işlemler nedeniyle en büyük su tüketicilerinden biridir. Tekstil endüstrileri, yüksek Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) ve inorganik yüklere sahip önemli miktarlarda renkli atıksuya neden olan boyama, terbiye, haşıl işlemleri, çoklu yıkama ve durulama döngüleri nedeniyle yüksek su ve kimyasal tüketimi ile karakterize edilir (Kim vd., 2002; Lin & Chen, 1997b; Orhon vd., 2001; Vandevivere vd., 1998; Zylła vd., 2006).

Ayrıca tekstil endüstrisinde kullanılan boyalar ve kimyasalların içerikleri nedeniyle kolay parçalanamayan atıksular meydana gelmektedir. Bu atıksular, organik ve inorganik malzemeler, ağır metaller ve renklendiriciler gibi yüksek kirletici içeriği ile karakterize edilir (Verma vd., 2012). Genel olarak, tekstil endüstrisi 1 kg kumaş başına yüksek renk konsantrasyonu, yüksek KOİ ve geniş pH aralığında karakterize edilen 100-170 litre atıksu meydana getirmektedir (Mohan vd., 2007)

Tekstil atıksuları için geleneksel arıtma yöntemleri esas olarak fiziko-kimyasal (Golob vd., 2005; Kim vd., 2002, 2004) veya biyolojiktir (Chang vd., 2002; Kim vd., 2002; Libra vd., 2004). Organik maddelerin giderimini sağlamada biyolojik arıtma yöntemleri kimyasal arıtmaya göre daha güvenilirdir (Orhon vd., 2001). Konvansiyonel atık su prosesleri ile yüksek KOİ giderim verimliliği mümkün olsa da, renk giderimi o kadar etkili değildir (Chang vd., 2002; Libra vd., 2004; Pala & Tokat, 2003).

Ülkemizde “yeraltı ve yerüstü su kaynakları potansiyelinin korunması ve en iyi şekilde kullanımının sağlanması, su kirlenmesinin önlenmesini sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir şekilde gerçekleştirmek üzere gerekli olan hukuki ve teknik esasları belirlemek” için 31.12.2004 tarihli ve 25687 sayılı Resmi Gazetede “Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği” yayımlanmıştır. “Bu Yönetmelik su ortamlarının kalite sınıflandırmaları ve kullanım amaçlarını, su kalitesinin korunmasına ilişkin planlama esasları ve yasaklarını, atıksuların boşaltım ilkelerini ve boşaltım izni esaslarını, atıksu altyapı tesisleri ile ilgili esasları, su kirliliğinin önlenmesi amacıyla yapılacak izleme, denetleme usul ve esaslarını kapsamaktadır” (*Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği*, 2004).

Bu yönetmelik kapsamında, Tekstil Endüstrisiyle ilgili deşarj kriterleri yönetmelik eki Tablo 10: Tekstil Sanayii Atıksularının Alıcı Ortama Deşarj Standartları olarak belirlenmiştir. 24.04.2011 tarih ve 27914 sayılı Resmi Gazete’ de yayımlanan yönetmelik ile ek satır eklenerek renk parametresi ilave edilmiştir.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 14.12.2011 tarih ve 28142 sayılı Resmi Gazete’ de yayımlanan “Tekstil Sektöründe Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Tebliği” ile sektörün çevreye verdiği zararların en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Bu tebliğ kapsamında kapasitesi 10 ton/gün üzerinde olan tekstil işletmeleri temiz üretim tekniklerinin kullanılması, oluşan atıksuların kaynağında azaltılması ve geri kazanılması, ayrıca yapmış oldukları ve yapacakları iyileştirmeleri her sene temiz üretim planı olarak bakanlığa sunulması yasal olarak zorunlu kılınmıştır. 10.03.2015 tarih ve 29291 sayılı Resmi Gazetede tebliğ ile sularda tuzluluk ve iletkenlik sorunlarının çözümü adına alkalinin geri kazanımı zorunluluğu getirilmiştir.

30.12.2022 tarihinde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan 2022/20 numaralı “Tekstil Sektöründe Temiz Üretim Uygulamaları” genelgesi ile sektörün çevreye etkileri en aza indirilmesine yönelik olarak, su kirliliğinin önlemek ve su tüketiminin azaltılması için temiz üretim tekniklerinin kullanılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda arıtılmış ve renk giderimi sağlanmış atıksuların yeniden değerlendirilmesi, renk giderimi yapılan boya banyo atıksularının yeniden yıkama işlemlerine ilişkin tekniklerden faydalanılması zorunlu hale gelmiştir. Su tasarrufu için atıksuların geri kazanılarak mümkün olan yerlerde tekrar kullanımı zorunlu hale getirilmiştir.

Renk parametresinin ilavesi ve atıksuların geri kazanılmasını zorunlu kılan yasal düzenlemeler ile birlikte deşarj için konvansiyonel yöntemler tek başına yeterli olmamaktadır. Ayrıca konvansiyonel arıtma yöntemlerinden kimyasal arıtma neticesinde oluşan arıtma çamuru (Kurniawan vd., 2006), biyolojik arıtmanın ise mikroorganizmaların kimyasal türlerine duyarlılığı, uzun arıtma süreleri geniş fiziksel alan ihtiyacı (Brillas & Martínez-Huitle, 2015) gibi nedenlerle her zaman uygun değildir.

Çevresel düzenlemeler katılaştıkça, çeşitli atık su türlerinin nispeten düşük işletme maliyetiyle verimli şekilde arıtılması için yeni ve özgün proseslere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda araştırmacılar, organik bileşiklerin bozunması için elektrokimyasal oksidasyon, ozonlama, fotokatalitik yöntem gibi çeşitli ileri oksidasyon yöntemlerini araştırmaktadırlar (Leshem vd., 2006). Bu gelişmelere istinaden tüm Dünya’da yaşanan küresel ısınma, iklim değişikliği gibi konuların beraberinde getirdiği su kıtlığı, sıkı kanunlar ve su maliyetlerinin artması ile birleşince atıksuların tekrar kullanımına karşı olan ilgiyi her geçen gün daha da artırmıştır.

Çalışmanın amacı, başta denim sektörü ve tekstil yıkama sonucu oluşan yıkama sularının elektrokimyasal olarak yeni nesil Sn/Sb/Ni-Ti anot ve katot Pt-Ti katot yardımıyla arıtılması ve geri kazanılmasının araştırılmasıdır. Laboratuvar ortamında elde edilen sonuçlar neticesinde ise bir prototip tasarlanıp işletilmesi amaçlanmaktadır. Böylelikle, tekstil endüstrisi için gerekli olan büyük miktardaki kaliteli su ihtiyacının, hem ekonomik hem de ekolojik anlamda karşılanması hedeflenmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Denim Endüstrisi, Su Kullanım Yerleri ve Özellikleri

Tekstil endüstrisi, gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerde önemli bir role sahip rekabetçi bir endüstridir (GilPavas & Correa-Sanchez, 2020). Günümüzde üretimi yapılan tekstil ürünleri arasında denim ürünler gün geçtikte öne çıkmaktadır. Denim kumaş, konfeksiyon üretiminde en popüler kumaş türüdür. Çok uzun yıllardır kullanılan halen güncelliğini kaybetmeyen bu kumaş türünün özelliği; çözügünün indigo boya ile boyanmış, atkının ise boyanmamış olmasıdır (Birinci, 2009). Denim, yırtılma ve aşınma direncinin yüksek olması nedeniyle yıllardır üretilen pamuklu bir kumaştır. Bu fiziksel özellikleriyle denim, poplin ve gabardin gibi kumaş türlerinden daha üstün görülmektedir. Üretimi ve tüketimi her gün artan denim kumaştan gömlek, ceket, pantolon, çanta, iş elbisesi vb. üretilmektedir (Mezarciöz & Toksöz, 2014). Denim kumaşlar günümüzde farklı kullanım amaçları için çeşitli özelliklerde üretilmekte olup, "canlı renk" olarak bilinen indigo renklendirici artık sentetik olarak üretilmektedir (Lale, 2018).

Denim kumaşın kökeni 16. yüzyıla kadar uzanmaktadır. Hindistan'da yetişen indigofera bitkisinden elde edilen indigo boyarmaddesi ile boyanmış yün karışımlı bir kumaştır. Bu bitki Anadolu'da çivit otu olarak bilinmektedir. Denim kumaş ilk olarak Fransa'nın tarihi bir tekstil merkezi olan Nimes kasabasında üretilmiştir. Bu kumaş, "Serge de Nimes" veya "Tissu de Nimes" olarak adlandırılmış ve sonradan "denim" olarak bilinmeye başlamıştır (Fidan, 2013).

Denim, 17. yüzyıldan günümüze kadar dokunmuş, kullanılmış ve atılmış; döşemelik, pantolon ve tente olarak yapılmış; müzelerde, tavan aralarında, antika dükkanlarında ve arkeolojik kazılarda bulunmuş; sıkı ve dürüst çalışmanın kumaşı ve öfkeli isyanın ifadesi olarak giyilmiş; efsaneye göre Kolomb'un gemilerinin yelkenleri için kullanılmış ve gerçekte Amerikan kovboyları tarafından giyilmiştir (Downey, 2014).

Amerika'da denim kumaşa ait ilk yazılı kaynak 1789 yılına dayanmaktadır. Rhode Island'da yayınlanan bir gazete yerel denim üretimini (diğer kumaşların yanı sıra) haber yapmıştır. 1792'de yayınlanan "The Weavers Draft Book and Clothiers Assistant" adlı

kitap, çeşitli denimler için dokuma yöntemlerinin teknik çizimlerini içermektedir (Downey, 2014). Denim tarihi incelendiği zaman Levi Strauss denim pantolonları keşfetmiş kişi olarak bilinmektedir. Maden işçilerinin kullanımı için üretilen dayanıklı denim kumaşlar, zamanla her kesimden herkes tarafından benimsenmiştir (Tağaç, 2006).

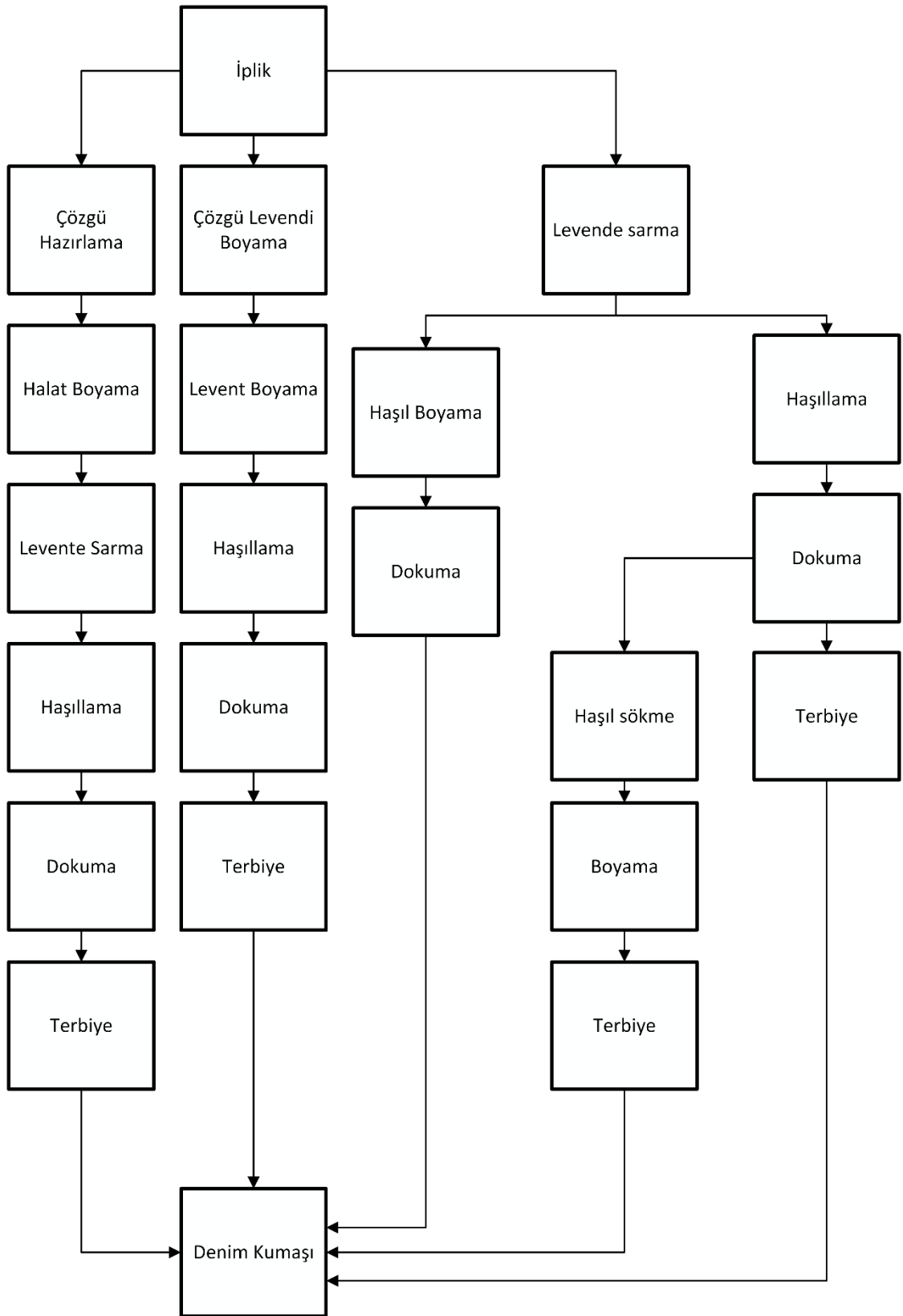
Gelişen ve sürekli değişen moda sektörünün bir parçası olan denim kumaşlar son yıllarda popülaritesini daha da arttırmış olarak insanlar tarafından kullanılmaktadır. Denim kumaşın üretimi için gerekli olan iplik üretimi, çözümlü hazırlama, dokuma, haşılama, boyama ve apre işlemleri gibi temel kumaş üretimi aşamalarıyla birlikte, üretilen kumaşın kullanılacağı yere uygun şekilde şekillendirilmesi için bir dizi proses uygulanmaktadır. Şekil 2.1’de tipik bir denim kumaş üretimi için işlem basamakları gösterilmektedir.

Çözgü Hazırlama: Denim kumaş üretimi sırasında en önemli aşamadır. Üretim ve kalite bu bölümdeki tercih edilen boyama ve haşıl yöntemleri, reçeteleri ve reaksiyon ve oksidasyon sürelerine bağlıdır (Koç & Ayyıldız, 2005). Çözgü hazırlama işleminden sonra farklı yöntemler ile boyama prosesleri gerçekleştirir.

Halat Sarma: Çağlıklardaki bobinlerden, çözgü iplikleri halat halinde çekilir ve sarılır. Bu sayede, çözgü iplikleri boyama işlemine hazır hale gelir.

Boyama: Boyama işlemi farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir (halat boyama, açık en boyama, ilmek boyama). En bilinen en eski yöntem halat boyamadır. Boyama işlemi indigo boyalar kullanılarak gerçekleştirilir.

Literatürde bilinen en eski doğal boyalardan biri olan indigo, 4000 yıldır (özellikle Hindistan, Çin ve Mısır’da) tekstil renklendiricisi olarak kullanılmaktadır (Steingruber, 2004). Araştırmacılar 2016 yılında Peru’daki Huaca Prieta’da 6000 yıllık indigo ile boyanmış en eski pamuklu kumaş keşfedilmiştir (Splitstoser vd., 2016). Sentetik süreçler icat edilmeden önce, tamamen doğal indigo; Indigofera tinctoria bitki türünden elde edilmiştir (Chavan, 2015).



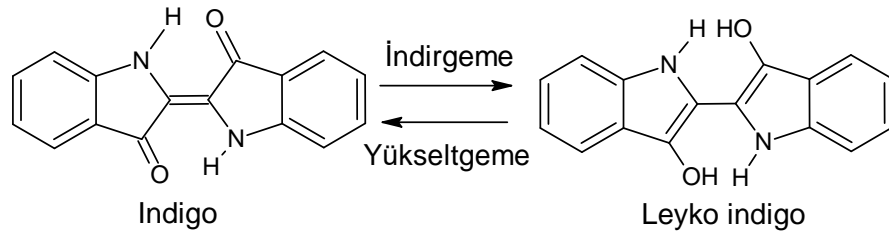
Şekil 2.1. Denim Kumaş Üretim Aşamaları (Shamsuzzaman vd., 2021)

İndigonun benzersiz fiziksel haslık ve kimyasal direnç özellikleri, onu tekstil endüstrisinde, özellikle de denimde en popüler boya olmasına neden olmuştur (Kaplan & Seferoğlu, 2023).



Şekil 2.2. İndigo bitkisi (*Indigofera Tinctoria* L.)

İndigo, selüloz lifleri için hiçbir kalıcılığı olmayan suda çözünmeyen katı mavi bir pigmenttir. Boyama banyosunu hazırlamak için indigoyu uygun bir indirgeyici madde ile alkalın bir bileşik kullanarak leyko-çözünür forma (leyko indigo formu) indirgemek gerekir (Meksi & Mhenni, 2015).



Şekil 2.3. Leyko indirgeme/yükseltgeme reaksiyonu (Chavan, 2015)

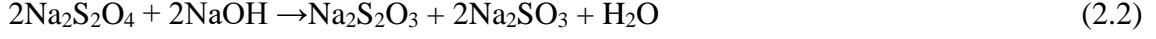
İndigo öncelikle indirgenerek çözünür forma getirilmelidir. İndigo pigmenti, başlıca olarak hidrosülfid veya sodyum ditiyonit olarak adlandırılan bir indirgen madde kullanılarak çözünür hale getirilir. Hidrosülfid, indirgeme potansiyeli açısından pratik ihtiyaçları karşılamak için uygun bir seçenek sunmaktadır. Diğer indirgen maddeler ise genellikle özel amaçlar için kullanılmakta veya henüz pratikte yaygın olarak kabul görmemektedir. Hidrosülfidin parçalanma reaksiyonları aşağıda gösterilmiştir (Şimşekler, 2009)

a) Hidrolitik parçalanma:

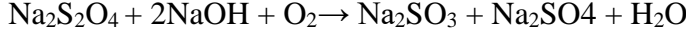
Nötr ortam:



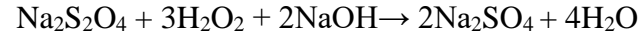
Alkali ortam:



b) Atmosferik oksijen ile reaksiyon (alkali ortam)

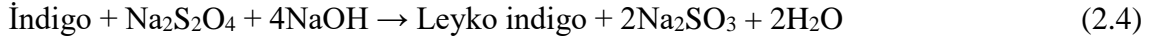


c) Hidrojen peroksit ile reaksiyon (alkali ortam) (2.3)

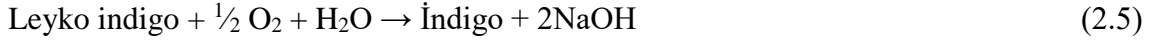


Oluşan indirgeme ve oksidasyon reaksiyonları ise;

• İndirgenme:



• Oksidasyon:



Doğal indigo, suda çözünmediği için hidrosülfid-kostik bileşiği kullanılarak sodyum leykoya indirgenir ve böylece suda çözünen sarı renkli bir çözelti elde edilir. İndirgenme süreci neticesinde sarı renge dönüşen boya selülozu boyar, böylece lif yüzeyindeki indirgenme ürünü atmosferdeki oksijen ile birlikte tekrar mavi renkli indigoya oksitlenir. Güçlü alkali şartlarda ve oksijen olmadığında stabil bir formdadır. Atmosferdeki oksijene duyarlı olduğu için her zaman fazla miktarda hidrosülfid bulunmalıdır. Alkali bir ortamda, atmosferdeki oksijenin varlığıyla birlikte hidrosülfid, sodyum hidroksiti tüketerek oksitlenir ve sodyum sülfid oluşur. İndirgeme sıcaklığı ve boyama süresi genellikle 50°C ve 30 dakikadır. İndirgeme işlemi bittiğinde, çözelti sarı renge dönüşür ve temiz cam parçası içine batırılıp çıkartıldığında 12-15 saniye içinde yeşil renge dönüşür. Eğer çözelti berrak değilse, sarı renkli değilse veya hızlıca yeşile dönüyorsa, biraz daha hidrosülfid eklenmesi gerekmektedir. Ancak hidrosülfid aşırı kullanıldığında düzensiz boyama oluşabilir ve çevresel zararlar artabilir (Şimşekler, 2009).

Haşılama: Özellikle denim dokumacılığındaki kalite ve verimliliği doğrudan etkileyen önemli bir işlem olan haşıl işlemi; ipliklerin üst yüzeylerinin kuvvetlendirici bir filmle

kaplanmasıdır. Yıkama prosesi aşamasında sıcak suda çözünmesi adına tercihen indigo haşılı suda çözünabilen özellikte seçilir (Solak & Öztürk, 2018).

Dokuma: Denim kumaş dokumasının klasik dokumadan temel farkı, kullanılan çözümlenir ipliklerinin indigo ile önceden boyanarak ve haşıl olarak kullanılmasıdır.

Terbiye: Dokuma prosesinden gelen kumaşa uygulanan gazeleme, yıkama, haşıl sökme gibi işlemler uygulanarak satışa hazır hale getirilir. Terbiye işlemleri ıslak ve kuru işlemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu işlemler sırasında kullanılan kimyasallar, boyalar ve diğer maddeler suya karışır, atıksu olarak deşarj edilir. Islak terbiye işlemleri neticesinde oluşan atıksular, sağlık, çevre ve iklimle ilgili risklere sebep olan denim atık suların % 80'inden sorumludur (Shamsuzzaman vd., 2021).

Denim kumaşların üretimi sırasında, çözümlenir ipliklerinde haşıl maddesi üzerinde kalır ve bu nedenle giysi dikildikten sonra da üzerinde haşıl kalır. Haşıl, giyim konforunu olumsuz yönde etkiler, bu nedenle giysiler yıkanır. Denim kumaşlar, taş yıkama, enzim yıkama, ağartma, normal yıkama (rinse), silikon yıkama ve kum yıkama gibi farklı yıkama yöntemleriyle işlenebilir (Fidan, 2013).

Taş yıkama; denim kumaşları yıkamak için endüstriyel yıkama makinelerinde ponza taşı adı verilen doğal taşlar kullanılır. Ponza taşları aşındırıcıdır ve boyanın kumaşa yapışmasını önleyerek soluk ve yıpranmış bir görünüm elde edilmesini sağlar.

Enzim yıkama; denim kumaştaki selüloz liflerini parçalamak için selülaz enzimlerinin kullanılmasını içerir ve daha pürüzsüz bir yüzey oluşturur. Enzim yıkama kumaş üzerinde daha naziktir ve daha az yıpranmış bir görünüm oluşturmak için kullanılır.

Ağartma; kumaştan rengi kısmen veya tamamen çıkarmak için kimyasalların kullanılması işlemidir. Kimyasalın seçimi, konsantrasyonu ve süresi, istenen sonuca ve kumaşta kullanılan boyalara göre belirlenir. Hipoklorit, ağartmada yaygın olarak kullanılan bir kimyasaldır.

Durulama yıkama olarak da bilinen rinse yıkama; mevcut olabilecek haşıl malzemesini ve kirleri gidermek için kumaşın yıkanmasını içerir. Silikon yıkama kumaşta yumuşak ve ipeksi bir görünüm oluşturmak için kullanılırken, kum yıkama kumaşın kumla yıkanarak pürüzlü ve yıpranmış bir görünüm oluşturulmasını sağlamaktadır.

Denim üretimi için su kullanımı, pamuk lifi üretimini, ıslak işlemleri ve tüketicinin kullanım sonrası yıkamayı içerir. Su tüketen tekstillerin piramidinde, denim en üst sırada yer almaktadır (Amutha, 2017). Denim ve jean üretimi, tekstil endüstrisinin en önemli alt sektörlerinden biridir ve ürünleri, özellikle gençler tarafından sürekli moda kullanımı ve tüketici tercihi ile tekstil giyiminde en çok kullanılan ürünlerdendir. Boyama ve apre/yıkama prosesleri, bu sektördeki atık su kirliliğinin ana kaynaklarıdır ve ortaya çıkan atık su, büyük miktarlarda boyarmadde ve alkali kimyasallar içmektedir (Uzal, 2015). Denim üretiminde, boyama ve terbiye atık suları da önemli miktarda askıda katı madde (AKM), dispersiyon maddeler, tuzlar ve eser metaller içerir. Çizelge 2.1’de denim endüstrisi için tipik bir boyama reçetesi ve kullanılan kimyasallar verilmektedir (Uzal, 2007).

Çizelge 2.1. Tipik denim boyama reçetesi

Reçete	Miktar (%)
Boya	34
Kompleks yapıcı	3
Sodyum hidrosülfid ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$)	31
Sodyum hidroksit	29
Stabilize edici	1

Çizelge 2.2’de denim üretimi sırasında su kirliliği oluşturan kaynaklar ve kirleticilerin özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. Denim üretimi sırasında su kirliliği kaynakları ve özellikleri

Kaynak	Kirleticilerin özellikleri
Haşılama	Nişasta, genellikle renkli, yüksek BOİ, askıda katı madde, poli(vinil alkol), koku, yumuşatıcı, katı yağlar
Haşıl sökme	Nişasta, hidrolize nişasta, enzimler, tuz, asidik pH
Yıkama	Alkaliler, yüzey aktif maddeler, sabunlaştırılmış yağlar, hidrolize pektinler, proteinler, askıda katı maddeler, yağ, yüksek pH, yüksek KOİ'li silikatlar, doğal renkler, TÇKM
Ağartma	Klorlar, hipoklorit, alkali, peroksitler, silikatlar, askıda katı maddeler, yağlı alkol
Boyama	Boyalar, tuz, alkaliler, asitler, deterjanlar, krom gibi ağır metaller, bakır, yüksek BOİ, KOİ, TÇKM
Baskı	Boyalar, alkali, asitler, krom, bakır, kıvam arttırıcılar, polimerler, deterjanlar yüksek BOİ ve KOİ, mumlar, yağlar yağlı alkol, formaldehit bağlayıcı, üre, yüzey aktif maddeler, askıda katı maddeler
Terbiye	Silikonlar, oksitleyici maddeler, formaldehit, enzimler, katyonik bileşikler organik ve inorganik bileşikler, askıda ve çözünmüş katı maddeler

Denim endüstrisinde çoğu işlem, bir ortam görevi gören su yardımıyla gerçekleştirilir. Bununla birlikte, bu işlenmiş sular en büyük kirlilik kaynağıdır. Bu kirli su, boyar madde, çözüldürücü kimyasallar, tampon/pH kontrolörü, elektrolit, boyama yardımcıları ve haşıl maddeleri gibi çok miktarda kirletici madde içermektedir (A. P. Periyasamy & Militky, 2017). Çizelge 2.3 ve 2.4'te sırasıyla denim boyama ve yıkama işlemleri sırasında oluşan su kirliliği kaynakları ve özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. Denim boyama sırasında su kirliliği

Boya sınıfı	Kirlilik tipi
İndigo	Alkali, oksitleyici maddeler, indirgeyici maddeler
Sülfür	Alkali, oksitleyici maddeler, indirgeyici maddeler
Pigmentler	Sabitlenmemiş pigmentler, dispersiyon ajanı, katyonik geciktiriciler, bağlayıcılar
Reaktifler	Sabitlenmemiş boyalar, tuz, alkaliler

Çizelge 2.4. Denim yıkama sırasında su kirliliği

Yıkama adımları	Kimyasallar
Ön Yıkama	Enzim, yüzey aktif maddeler, deterjanlar
Ağartma	Klor, adsorbe edilebilir organik halojenler, deterjan
Antiklor yıkama	Sodyum/disodyum tiyosülfat
Taş/asit/enzim yıkama	Taşlar, enzimler, asitler, pH, biyolojik oksijen ihtiyacı sorunları
Yumuşatıcı	Yağ asitleri

Denim endüstrisinde üretim, boyama, yıkama gibi farklı aşamalardan, meydana gelmiş atık sular, uygun arıtma yapılmadığı takdirde çevreye oldukça zarar veren çok miktarda kirlenici madde içerir (Uzal, 2015). Çizelge 2.5’te tipik denim fabrikası atık sularının yanı sıra indigo boyama atık sularının karakterizasyonu özetlenmiştir.

Çizelge 2.5. Denim boyama işleminden kaynaklanan atık suyun özellikleri

Parametreler	İndigo boyama atıksuyu	Kükürt boyama atıksuyu	Denim fabrikası atıksuyu
KOİ (mg/l)	750 - 950	2.500 - 3.500	1.500 - 3.100
Renk (Pt-co)	5.500 - 7.000	24.000 – 34.000	1.147 – 3.547
AKM(mg/l)	50 - 300	100 - 340	150 - 300
TÇKM (mg/l)	-	-	4.000 - 8.000
pH	10,5 - 11,5	10 - 11	9 - 13
İletkenlik (mS/cm)	-	-	6 - 12
Toplam fosfor (mg/l)	-	-	0 - 3
Toplam azot (mg/l)	-	-	17 - 23

Denim üretim tesislerinden atık su deşarjı için önemli denim üreticisi ülkeler tarafından uygulanan düzenleyici limitler Çizelge 2.6’da gösterilmektedir. Levi Strauss şirketinde belirli bir sürdürülebilirlik sağlamak amacıyla tedarik zinciri yüklenicileri için katı atık su deşarj limitlerini zorunlu kılan küresel atık su yönetmelikleri belirlemiştir

Çizelge 2.6. Bazı denim üreticisi ülkelerdeki atık deşarj limitleri

Parametreler	Türkiye	Çin	Romanya	Pakistan	Bangladeş	Hindistan	Levi Strauss
KOİ (mg/l)	225	80	500	150	200	250	-
BOİ (mg/l)	-	20	300	80	50	30	30
AKM (mg/l)	160	50	350	-	150	-	30
NH ₄ -N (mg/l)	5	10	30	-	50	50	-
Serbest klor (mg/l)	0,3	0,5	0,5	-	-	-	-
Toplam Cr/Cr(VI) (mg/l)	2		1,5	1,0	0,5/0,1	2,0/0,1	0,1
S ⁻² (mg/l)	0,1	-	1,0	-	1	2,0	-
SO ₃ (mg/l)	1	0,5	2	-	-	10	-
Yağ ve gres (mg/l)	10	-	-	10	10		-
Balık akut toksisite testi	4	-	-	-	-	10	-
Renk (pt-co)	280	50	-	-	150	-	
pH	6-9	6-9	6,5-8,5	6-10	6-9	5,5-9,0	6-9

2.2. Tekstil ve Denim Endüstrisi Arıtma ve Geri Kazanım Uygulamaları

Lin ve Chen (1997), büyük bir boyama ve apre fabrikasının ikincil atık su arıtma tesisinden çıkan suyu arıtmak için elektrokimyasal yöntem kullanmışlardır. Elektrokimyasal yöntemin arıtılmış atık suyun kalitesini yükseltmedeki genel etkinliğinin, az miktarda hidrojen peroksit (H_2O_2) ilavesiyle önemli ölçüde arttığını ifade etmişlerdir. Çalışma değişkenlerinin, özellikle hidrojen peroksit miktarı ve elektrokimyasal işlem süresinin, proses performansları üzerindeki etkilerini incelemek ve bu değişkenlerin optimum çalışma aralıklarını belirlemek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elektrokimyasal yöntemle iyon değişiminin dâhil edilmesiyle, kombine arıtmadan sonra atıksu kalitesinin tekstil endüstrileri için yeniden kullanım standardını aştığı gözlemlenmiş ve arıtılmış atık su yeniden kullanım için düşünülebileceği sonucuna varmışlardır. (Lin & Chen, 1997a).

Ciardelli ve Ranieri (2001), iki farklı oksidasyon işlemi olan ozonlama ve elektroflokülasyonu, tekstil endüstrilerinin atık sularından kirletici maddelerin giderilmesindeki etkinliklerini test etmek için pilot ölçekte denemişlerdir. Ozon arıtımı sayesinde çok yüksek renk giderimi (% 95-99) elde edilmiş ve arıtılmış sular açık renklerde bile boyamada tatmin edici bir şekilde yeniden kullanmışlardır. Bu kanıt, arıtılmış suların kimyasal oksijen ihtiyacının, özellikle açık renklerin boyanması için genellikle geri dönüşüm amacıyla çok yüksek olduğu düşünülen bir aralıkta (75-120 mg/l, % 60'a varan bir düşüş) olmasına rağmen elde etmişlerdir. Elektrokimyasal arıtma, rengin (% 80-100) ve kimyasal oksijen ihtiyacının (% 70-90) giderilmesinde çok etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, klorür ve sülfat iyonlarında bilimli bir azalma tespit etmişlerdir (Ciardelli & Ranieri, 2001).

Chen ve diğeleri (2005), membran filtrasyon aşaması ile birlikte bir elektrokimyasal oksidasyon aşaması kullanılarak tekstil atık suyunun yeniden kullanım için arıtılması rapor etmişlerdir. Membran filtrasyon süreçleriyle birleştirilmiş elektrokimyasal oksidasyon dizilerini göstermek ve yeniden kullanımı için potansiyel bir boyahane atık su arıtma sistemi geliştirmek için ark şeklindeki transfer-akış membran modülünün performansını incelemişlerdir. Sonuçlar, ark şeklinde kaynaklanmış elyafların mekanik özelliklerini etkili bir şekilde geliştirebileceğini ve elektrokimyasal oksidasyon ve

membran filtrasyonunun ardışık işlemler olarak uygulanabilir olduğunu açıkça göstermiştir. Elektrokimyasal oksidasyon, atık suyun KOİ'sini yüksek oranda giderirken (% 89,8 verimlilik), membran filtre de toplam AKM (neredeyse % 100 azaltma) ve bulanıklık (% 98,3 giderme) neredeyse tamamen giderilmiştir. Bu araştırma sonucunda, tekstil atık sularının geri dönüştürülmesi için umut verici bir yol sunulmuştur (Chen vd., 2005).

Leshem vd. (2006), ozon ve elektrokimyasal oksidasyon arıtma teknolojilerini, tekstil endüstrisinde atık su geri dönüşümü için değerlendirmişlerdir. Çalışma için kullanılan tekstil atık sularını, farklı boyama prosesleri kullanan sekiz tekstil fabrikasından toplamışlardır. Hem ozon hem de elektrokimyasal oksidasyon asit, reaktif ve doğal boyalar içeren atık sudan rengi uzaklaştırırken, pigment ve dispers boyalarla karışık sonuçlar elde etmişlerdir. Atık suyun reaktif boya için yeniden kullanımında renk kriteri $\Delta E \leq 2$ olarak belirtmişlerdir. Bu arıtma seviyesi, koyu renk boyama işlemlerinde ve durulama suyunda yeniden kullanım için kabul edilebilir bir kalıntı renk seviyesi sağladığı sonucuna ulaşmışlardır. Açık renk boyama işlemlerinde atık suyun yeniden kullanımını için boya konsantrasyonunun ve yardımcı kimyasalların yeniden formüle edilmesi gerekmediğini belirtmişlerdir (Leshem vd., 2006).

Ergas vd. (2006), tekstil endüstrisi için suyun yeniden kullanımında uygulama için arıtma teknolojileri değerlendirmişlerdir. Test edilen teknolojiler arasında elektrokimyasal oksidasyon, hipoklorit oksidasyonu, ozonlama, granüler aktif karbon (GAK) adsorpsiyonu, bisülfid katalizli sodyum borohidrit indirgemesi, Fenton reaktifi, koagülasyon ve anaerobik biyolojik bozunma yer almıştır. Çalışma, bir jig boyama işleminden elde edilen kullanılmış boya banyosu atıksuyu kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Her teknolojiyi, renk ve KOİ giderim etkinliği ve beklenen işletme maliyetleri açısından değerlendirmişlerdir. Ozon, granüler aktif karbon ve elektrokimyasal oksidasyon sonucunda yeniden kullanıma uygun yüksek kaliteli su elde etmişlerdir (Ergas vd., 2006).

Mohan ve arkadaşlarının 2007 yılında yaptıkları çalışmada, tekstil atık sularında bulunan organik kirleticilerin elektrokimyasal bir arıtma tekniği kullanılarak arıtılması

amaçlamışlardır. Deneyle, çalışma koşullarında geniş bir aralığı kapsayan kesikli bir elektrokimyasal hücrede gerçekleştirmişlerdir. Atık su başlangıç konsantrasyonu, pH, destekleyici elektrolit konsantrasyonu ve anot malzemesinin kirletici bozunması üzerindeki etkisi kritik bir şekilde incelemişlerdir. Mevcut araştırmada ayrıca, arıtılmış atık suyun boyama amacıyla yeniden kullanılmasını denemişlerdir. Arıtılmış tekstil atıksuyu ile çeşitli boyama işlemleri gerçekleştirilmiş ve boyama işleminin her döngüsünde boya alımı ve su kalitesi kritik olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, elektrokimyasal olarak tekstil atık suyunun arıtılması için uygulanabilir bir teknik olduğunu ve elektrokimyasal olarak arıtılmış atık suyun boyama uygulaması için etkili bir şekilde yeniden kullanılabilceğini göstermişlerdir (Mohan vd., 2007).

Raghu ve Basha 2007'de yaptıkları çalışmada, kimyasal veya elektrokoagülasyon arıtma prosesinin, ardından tekstil boya atıklarının iyon değiştirme prosesinin kullanımını incelemişlerdir. Her işlem için KOİ giderimi, renk giderimi ve güç tüketiminin etkinliklerini araştırmışlardır. Kimyasal veya elektrokimyasal arıtma öncelikle atık suyun rengini ve KOİ'sini gidermek için kullanılırken iyon değişimi renk, KOİ, Fe konsantrasyonu, alkalinite, iletkenlik ve toplam çözünmüş katı madde (TÇKM) giderme verimliliğini daha da geliştirmek için kullanmışlardır. Sonuç olarak kimyasal pıhtılaşma, 300 mg/l pıhtılaştırıcıda yaklaşık % 81,3 maksimum KOİ azalması elde edilirken, elektrokoagülasyon işleminde yaklaşık 19,29 kWh/kg enerji tüketimi ile yaklaşık % 92,31 (0,25 A/dm²) maksimum KOİ giderimi elde etmişlerdir. Çalışma boyunca elde edilen tüm deneysel sonuçlar, kimyasal veya elektro-koagülasyon işleminin ardından iyon değiştirme yöntemlerinin çok etkili olduğunu ve arıtılmış atık suyun kalitesini tekstil endüstrisinin yeniden kullanım standardına yükseltme yeteneğine sahip olduğunu göstermişlerdir (Raghu & Ahmed Basha, 2007).

Şahinkaya ve ark. (2008), denim tekstil atıksu kalitesini yeniden kullanım kriterlerine göre iyileştirmek için aktif çamur arıtmasının nanofiltrasyon ile birleştirilmesini amaçlamışlardır. Biyolojik arıtma, oldukça etkili bir şekilde çalışırken atıksu yeniden kullanım gereksinimlerini karşılamamaktadır. Nanofiltrasyondan önce kaba partikülleri uzaklaştırmak için 5 µm gözenek boyutuna sahip mikrofiltrasyon uygulamışlardır. Nanofiltrasyon ile renk giderimi tamamlamış ve permeat rengi her zaman 10 Pt-Co'dan

düşük ölçmüşlerdir. Benzer şekilde, KOİ için oldukça yüksek giderimler gözlemlenmişlerdir (% 80-100). Sonuç olarak, denim tekstil atıksuları için yeniden kullanım kriterlerini karşılamak için biyolojik arıtma sonrası nanofiltrasyon uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Sahinkaya vd., 2008).

Lu vd. (2010), biyolojik arıtma sistemleri ve membran teknolojisi ile atıksu ıslahının 600 m³/günlük bir pilot tesisi araştırmışlardır. Sonuçlar, KOİ, renk ve bulanıklığın ortalama giderme verimlerinin sırasıyla yaklaşık % 93, % 94,5 ve % 92,9 olduğunu göstermiştir. Arıtılan atık su kalitesi, açık renklenme hariç boyama ve terbiye prosesi için su kalitesi şartını karşılamıştır. Bu nedenle, tekstil atık sularının ıslahı ve yeniden kullanımı, hem mevcut su kaynağını koruyabilen veya tamamlayabilen hem de Çin'deki çevre kirliliğini azaltabilen veya ortadan kaldıracı bir alternatif olarak değerlendirilmiştir (Lu vd., 2010).

Uzal ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları çalışmada, indigo boyamadan durulanan atıksuyun, prosesin kendisinde muhtemel geri kullanımı için membran bazlı bir arıtma stratejisi geliştirmişlerdir. Denim fabrikasının indigo boyama prosesinin ilk durulama tankından toplanan atık su için üç farklı nanofiltrasyon ve iki farklı ters osmoz performansları değerlendirilmiştir. Test edilen tüm nanofiltrasyon ve ters osmoz membranlarından çıkış kalitesi, KOİ ve renk açısından yeniden kullanım için kabul edilebilir olarak tespit etmişlerdir (Uzal vd., 2010).

2012 yılında yapılmış bir derleme çalışmasında Sala ve Gutierrez-Bouzan, tekstil endüstrisine uygulanan elektrokimyasal teknikleri gözden geçirmişlerdir. Özellikle tekstil atıklarının rengini gidermek için etkili bir yöntem olduğunu bildirmişlerdir. Rengi giderilmiş atık suyun yeniden kullanılmasının mümkün olduğu ve bununla da önemli bir tuz ve su tasarrufu elde edileceği sonucuna varmışlardır (Sala & Gutiérrez-Bouzan, 2012).

Lopez-Grimau vd. 2012 yılında yapılan çalışmada, reaktif boyalar içeren çeşitli sentetik atık sular, Ti/PtO_x elektrotları ile bir elektrokimyasal hücrede arıtılmışlardır. Renk giderme işleminin verimliliğini ve ek bir UV ışığı kullanımını değerlendirmişlerdir. Sentetik

atıklarda koşullar oluşturulduktan sonra, bir pamuk fabrikasından toplanan iki tip kullanılmış reaktif boya banyosunda çalışılmıştır. Arıtılmış suyun deşarjı yerine, başka bir alternatif olarak rengi giderilmiş atık suların yeni bir boyama prosesi için yeniden kullanılmasıdır. Bu anlamda çeşitli deneyler yapılmış ve atık suların yeniden kullanım koşulları oluşturulmuştur. Boyama atıklarının yeniden kullanılması, tuz ve su tüketiminde önemli bir azalmanın yanı sıra boşaltılan atıkların tuzluluğunun azalması için umut verici olduğunu ortaya koymuşlardır (López-Grimau vd., 2013).

Sala ve Guierrez-Bouzan 2014 yılında yaptıkları çalışmada, boya ve tuz içeren, kullanılmış boyama atıklarının elektrokimyasal olarak renk giderilmesini hedeflemişlerdir. Arıtılan atık sular geri kazanılmış ve boyama işleminde yeniden kullanmışlardır. İlk olarak, reaktif boyalarından birini içeren sentetik atıklar, laboratuvar ölçeğinde arıtmışlardır. Daha sonra, bu boyaların karışımı olan atığı bir İspanyol şirketinde toplamış ve laboratuvar ölçeğinde çalışmışlardır. Son olarak, optimize edilmiş prosesi bir İspanyol fabrikasında yarı endüstriyel bir pilot tesis (400 l) vasıtasıyla yerinde uygulamışlardır. Referans boyamalar ve arıtılmış atık sularla boyanmış kumaşlar arasında önemli bir renk farkı tespit etmemişlerdir. Boyama atıklarının yeniden kullanımı, proses suyu tüketiminde % 70 ve tuz deşarjında % 60 azalma sağladığını tespit etmişlerdir (Sala & Gutiérrez-Bouzán, 2014).

Sala vd. (2014), tekstil boyama atıklarında renk giderimi için bir foto-elektrokimyasal yöntemin etkinliği tartışmışlardır. Reaktif boya içeren sentetik bir atık suda renk giderimi, farklı yoğunluklarda (2 A, 5 A ve 10 A) bir elektrokimyasal işlem ve ardından ultraviyole uygulayarak gerçekleştirmişlerdir. Her iki arıtmanın kombinasyonu optimize etmişlerdir. Farklı reaktif boyalarla hazırlanan dokuz simüle edilmiş boyama atıksularının arıtılmasına uygulamışlardır. Son olarak, arıtılmış dokuz atık su yeni boyama işlemlerinde yeniden kullanılmış ve bir referansa göre renk farklılıklarını değerlendirmişlerdir. Arıtılmış atık suların yeniden kullanımı tatmin edici boyama sonuçları sağlamış olup, su tüketiminde ve tuz deşarjında önemli bir azalma sağladığını belirtmişlerdir (Sala vd., 2014).

Dasgupta vd (2015), yapmış oldukları inceleme yazısında, membran teknolojisinin tekstil atıksu arıtımı ve bitmemiş ham madde geri kazanımına yönelik katkılarını açıklamışlardır. Ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon gibi membran bazlı tekniklerle geri kazanılan suyun birincil boyahanelerde veya yardımcı durulama kazanlarında yeniden kullanım olanaklarını da araştırmışlardır. Bu tekniklerin her biri ile ilişkili avantajlar ve membran tıkanması gibi dezavantajlarını vurgulamışlardır. Son olarak, bu membran bazlı tekstil atıksu arıtma proseslerinin tekno-ekonomik değerlendirmesi ile ilgili çeşitli hesaplar sağlamışlardır (Dasgupta vd., 2015).

Morali vd. (2016) yaptıkları çalışmada, tekstil endüstrisinin önde gelen alt sektörlerinden biri olan denim üreten bir tesiste, atık su arıtılabilirlik çalışmaları, teknik olarak en uygulanabilir temiz üretim alternatiflerinin alkali terbiye atık sularından kostik geri kazanımı ve membran filtrasyon uygulaması yoluyla indigo boyama atık sularının yeniden kullanımı olduğunu ortaya koymuşlardır (Morali vd., 2016).

Buscio vd (2016), tekstil atık sularını arıtmak için nanofiltrasyon membranlarını elektrokimyasal işlemlerle birleştirmenin fizibilitesini değerlendirmek için reaktif boya Cibacron Yellow S-3R seçmişlerdir. Sentetik boyama atık suları, iki nanofiltrasyon membranı vasıtasıyla arıtmışlardır. % 98'e kadar boya giderimi sağlamışlardır. Arıtma süresi ile uygulanan akım yoğunluğu arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermişlerdir. Hem permeatlar hem de elektrokimyasal olarak rengi açılmış atık sular yeni boyama proseslerinde yeniden kullanmışlardır (permeatın % 100 'ü ve rengi giderilmiş konsantrelerin % 70 'i). Boyanan kumaşlar orijinal boyama açısından değerlendirmişler ve renk farklılıklarının kabul aralığında olduğunu bulmuşlardır (Buscio vd., 2016).

Rahman Bhuiyan ve arkadaşları (2016), kombine tekstil atık sularını bozunma ve dekontamine etmek için yüksek enerjili gama radyasyonunun kullanımını ve bunun tekstil ıslak işleme ve sulama amaçlı yeniden kullanımındaki potansiyel uygulamasını araştırmışlardır. Işınlanmış atık suyun pH'ındaki değişim, renk giderme, toplam askıda katı, toplam çözünmüş katılar, BOİ, KOİ, elektriksel iletkenlik ve ağır metal içeriği kapsamlı bir şekilde araştırmışlardır. Daha sonra arıtılmış atık su pamuklu kumaş işleme

için geri dönüştürülmüş ve Malabar ıspanak bitkisinin sulanmasında yeniden kullanılmışlardır. Gama ışınlamasının tekstil atık sularının bozunması ve dekontaminasyonu için, tekstil ıslak işlemede güvenli geri dönüşümü ve gübreleme özelliklerine sahip sulama suyu olarak yeniden kullanımı için umut verici bir araç olduğu sonucuna varmışlardır (Rahman Bhuiyan vd., 2016).

Aydiner ve diğerleri (2016) tekstil yıkama atıksularından tekrar kullanıma uygun suyun geri kazanılması amacıyla ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters osmoz membran proseslerini kullanmışlardır. Bu bağlamda, saha ölçeğinde membran proseslerinin kurulumunda ana belirleyici parametre olan membran türünün, arzu edilen kalitede yıkama suyu geri kazanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, tekstil yıkama atıksularından UF/NF/TO birleşik sistemi kullanılarak, 6,34 pH, 6 mg/l toplam çözünebilir katı, 34 mg/l KOİ ve 14 mg/l TOK değerlerinde tekrar kullanıma uygun kalitede suyun geri kazanılabileceği ortaya koymuşlardır. (Aydiner vd., 2016).

Benitez vd. 2017 yılında, indigo mavi boya ve nonilfenol dekaetoksilat içeren denim atıksuyunun sulu çözeltilisinin elektrooksidasyon performansını incelemişlerdir. Bor katkılı elmas anot kullanılarak kesikli hücrelerde üç farklı konfigürasyon sistemi değerlendirilmiştir. Çalışmada katot olarak bakır, demir ve bor katkılı elmas kullanılmışlardır. Prosesler, kimyasal oksijen ihtiyacı ve toplam organik karbon açısından analiz etmişlerdir (Vences-Benitez vd., 2017).

Gergin ve Cuci 2017 yılında yaptıkları çalışmada, tekstil endüstrisindeki atık suların geri kazanılmasında, membran sistemlerin kullanılması ve bu geri kazanım çalışmasında kimyasal ön arıtımla birlikte kullanılarak geri kazanım için giderim verimlerini arttırmayı hedeflemişlerdir. Kimyasal bir ön arıtma için ham suda farklı koagülantlar kullanarak pH, iletkenlik, renk, KOİ giderim verimleri belirlenerek kıyaslanmıştır. En iyi renk giderimine sahip koagülant olan DCD-F maddesi kimyasal ön arıtmada kullanılmıştır. Kimyasalın bu parametrelerde ileri arıtımın verimini arttırmada etkili olduğu görülmüş ve atıksuyun mevcut karakteristiğine göre nano özellikli ters osmoz ve ters osmoz membran çıkış suyunda 0 mg/l KOİ ve 0 Pt-co renk değerlerine ulaşmışlardır. Kullanılan DCD-F koagülantın atıksuda meydana getirdiği KOİ giderim verimi % 20 civarında

olması suyun daha iyi arıtılmasına katkı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır (Gergin & Cuci, 2017).

Riberio vd. (2017), geleneksel aktif çamur prosesi ile arıtılan ve ileri oksidasyon prosesleri ile ileri arıtmaya tabi tutulan tekstil atık sularının yeniden kullanımını doğrulamışlardır. Üç alternatif prosesi tartışmışlar: Fenton, foto-Fenton ve UV/H₂O₂. İşlemlerin etkilerinin değerlendirilmesi, yanıt değişkenlerinin maksimum KOİ giderimi ve arıtılmış atık sudaki minimum kalıntı H₂O₂ konsantrasyonu olduğu faktöriyel deney tasarımına dayanmaktadır. Bir tekstil fabrikasının geleneksel arıtma tesisinden toplanan gerçek atık suya seçilen tekniği uygulamışlardır. İlave arıtmadan önce ve sonra atık suyun kalitesi, endüstriyel tekstil kullanımına tabi tutulan suların karakterizasyonunu izlemişlerdir. Son olarak, ek arıtmadan sonra atık suyun bir örneği, boyalı kumaşların kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla pilot ölçekte yeniden kullanım için test etmişlerdir. Sonuçlar, arıtılmış atık suyun yeniden kullanım için fizikokimyasal kalite yönergelerine kısmen uygun olduğunu göstermiştir (Ribeiro vd., 2017).

Silva vd. 2018 yılında yaptıkları çalışmada, çevreye deşarjı ve tekstil endüstrisinde yeniden kullanımı ile ilgili olarak, bir tekstil atık suyunun iyileştirilmesi için çeşitli kimyasal ve elektrokimyasal ileri oksidasyon proseslerinin uygulanmasına odaklanmıştır. Tekstil atıksuyu daha önce biyolojik arıtma ve filtrasyona tabi tutulmuştur. kimyasal ve elektrokimyasal ileri oksidasyon proseslerinin verimliliği, renk giderme ve mineralizasyon açısından değerlendirmişlerdir. Geri dönüştürülmüş tekstil atık sularının tekstil işlemede kullanılmasının, hidrofilitiklik, renk farkı ve beyazlık indeksi dikkate alınarak yıkama, ağartma ve boyama işlemleri için kullanılabilirliği kanıtlamışlardır (L. G. M. Silva vd., 2018).

Nunez vd. (2019), bir tekstil endüstrisinin endüstriyel sıvı atıklarındaki kirleticilerin etkin bir şekilde arıtılması için elektrokoagülasyonun kullanılması olasılığını araştırmışlardır. Prosesin performansı renk, bulanıklık ve KOİ analizi ile değerlendirmişlerdir. Bir model oluşturmuşlar ve modelden elde edilen sonuçlar ve deneysel ölçümler ile tepki yüzeyleri elde etmişlerdir. Bu yanıt yüzeyleri, çalışılan değişkenlerin (pH, akım yoğunluğu ve arıtma süresi) farklı değerleri için elektrokoagülasyon davranışını öngörmüşlerdir. Elde

edilen sonuçlara göre, atık su, operasyonel değişkenler için optimum değerler kullanılarak arıtılmışlardır. Arıtmadan sonra % 86 renk, % 82 bulanıklık ve % 59 KOİ giderilmiştir. Yün boyama işleminde arıtılmış suyun tekrar kullanılmasının, boyanan kumaşın kalitesine olumsuz bir etkisinin olmadığı ortaya koymuşlardır. Böylece su tüketimini azaltmak için prosesi tekstil endüstrisinde uygulamanın mümkün olduğunu iddia etmişlerdir (Núñez vd., 2019).

Bilinska vd. 2019 yaptıkları çalışmada, elektrokoagülasyon (EK) ve ozonlamanın (O₃) tek aşamalı ve iki aşamalı işlemler olarak birleştirilmesinin avantajlarını sunmuşlardır. Her ikisi de tuzlu ortamda iyi çalışan EK ve O₃ kombinasyonu, sulu çözeltiler ve reaktif siyah 5 içeren gerçek endüstriyel atık su durumunda çok iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. % 95' ten fazla olmak üzere çok yüksek renk giderimi çok kısa bir arıtma süresinde elde etmişlerdir. Renk giderimi ve mineralizasyon analizi sonuçları hem tek aşamalı hem de iki aşamalı işlemlerinin yüksek verimliliğini göstermiştir, ancak maliyet değerlendirmesi iki aşamalı işleminin daha avantajlı olduğunu ortaya konulmuştur. Geri dönüşüm denemelerinde çok umut verici sonuçlar elde etmişlerdir (Bilińska vd., 2019).

Nasr vd. 2019 yılında yaptıkları çalışmada, tekstil atık sularından KOİ ve rengin giderilmesi için EK uygulamasını araştırmışlardır. pH, akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin giderim yüzdesi üzerindeki etkisini araştırmak için demir elektrotlar kullanılarak toplu deneyler yapmışlardır. Sonuçlar, EK'nın renk ve KOİ gidermede etkili olduğunu kanıtlamıştır. Arıtılmış atık suların endüstriyel proseslerde yeniden kullanılması veya atık limitlerinde toplam çözünmüş katıların dikkate alınması tavsiye etmişlerdir (Nasr vd., 2019).

Orts vd. (2019), yaptıkları çalışmada katkılı SnO₂ anotları ile elektrokimyasal oksidasyon-indirgeme işleminin etkili olduğu önceki çalışmalarında doğrulamışlardır. Bu çalışmalarında özellikle, üç reaktif boyanın karışımı ait olan atıksulardan, KOİ ve TOK' da önemli bir azalmanın yanı sıra renk giderimide sağlamıştır. Bir sonraki adım, bu arıtılmış suların sonraki boyalarda yeniden kullanılabilmesini ve boyanmış kumaşlarda kabul edilebilir renk eşitleme değerlerinin elde edilebileceğini incelemeye ve doğrulamaya devam etmişlerdir (Orts vd., 2019).

Silva vd. (2020), Tekstil endüstrisinde yeniden kullanımını amaçlayan gerçek bir tekstil atık suyunun giderilmesini, iki işlemin entegre edilmesiyle gerçekleştirmişlerdir: (i) Fenton' un organik bozunma reaksiyonuna dayalı bir kimyasal veya elektrokimyasal ileri oksidasyon işlemi ve (ii) bir fenton'un reaksiyona dayalı süreçlerinde etkili olan demirin uzaklaştırılması için deniz makroalglerinin kullanıldığı katyon değişim süreci. Geri kazanılan tekstil atıksuyunu, yıkama, ağartma ve boyama işlemlerinde başarıyla yeniden kullanmışlardır (L. G. M. Silva vd., 2020).

Cifcioglu-Gozuacik vd. (2021), elektrot çifti olarak grafit elektrotların kullanıldığı elektrooksidasyon prosesini, gerçek tekstil baskı atıksuyundan kimyasal oksijen ihtiyacı amonyak azotu ve renk giderimi için kullanmışlardır. Çözelti pH'ı, sodyum klorür dozajı, en eski ve halen en önemli klor bazlı ağartıcı olan sodyum hipoklorit dozajı ve oksidasyon süresinin giderim verimleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Elektrooksidasyon reaktörünün çalışma koşulları; 1 mA/cm² akım yoğunluğu, elektrotlar arası 2 cm mesafe, 150 dk çalışma süresi ve 500 rpm karıştırma hızı olarak uygulamışlardır. Optimum koşul olarak 9,5 pH, 1 mA/cm² akım yoğunluğu, 8 g/l NaCl, 44,4 mg/l NaOCl ve 150 dk süre olarak tespit etmişlerdir.

Ramesh vd. (2021) yaptıkları çalışmada, biyolojik olarak ön arıtılmış tekstil atık suyundan KOİ ve renk giderimi için bir ileri oksidasyon prosesi olarak elektrokimyasal oksidasyon tekniğini denemişlerdir. Çalışmada, sırasıyla anot olarak titanyum ve katot olarak paslanmaz çelik ile küçük bir reaktör düzeneği kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. KOİ ve renkteki azalmayı 3 dakikalık bir elektroliz süresinde sırasıyla % 64 ve % 90 olarak elde etmişlerdir. Yaptıkları maliyet analizi neticesinde, atık su arıtımı ve boyalı kumaş üretimi ile ilgili maliyetlerde önemli ölçüde tasarruf sağlandığını göstermişlerdir.

Zhang vd. 2021 yılında yapmış oldukları çalışmada, Çin'in Guangdong eyaletindeki bir kanalizasyon arıtma tesisindeki denim tekstil atık su arıtma sistemini incelemişler ve modifiye etmişlerdir. Mevcut atık su arıtma sistemine dayanarak, membran biyoreaktör sistemi ve ters osmoz membran teknolojisini kullanarak sistemi geliştirmişlerdir. Atık su kalite parametreleri, su kalitesi deşarj standardını karşılamıştır. Ayrıca, arıtılmış atık

suyun yeniden kullanım kabiliyetinin musluk suyundan belirgin bir farkı olmadığını ortaya koymuşlardır.

Pinto vd. 2022 yılında yapmış oldukları çalışmada, bor katkılı elmas anot kullanılarak, yeniden kullanım için gerekli kalitede ve tuzların tamamen geri kazanıldığı arıtılmış tekstil boyama atık suyu sağlamak için elektrooksidasyonun uygulanabilirliğini değerlendirmişlerdir. 60 ve 100 mA/cm²'de 10 saat elektrooksidasyondan sonra, sırasıyla 200 mg/l'nin altında (orta kalite) ve 50 mg/l (yüksek kalite) KOİ ile rengi giderilmiş tekstil boyama atıksuyu elde etmişlerdir. Tuz içeriği her iki arıtma koşulunda da değişmemiştir, bu da herhangi bir tuz ilavesi olmadan ardışık yeniden kullanıma olanak sağlamıştır. Çalışma neticesinde, suyun yeniden kullanımı ve tam tuz tasarrufunun yanı sıra, elektrooksidasyon 18,6 kata kadar ekotoksisite azaltımı sağladığını aktarmışlardır (Pinto vd., 2022).

2.3. Türkiye'deki Tekstil Endüstrisi Su Geri Kazanım Potansiyeli, Teknik ve Yasal Altyapı

Çevre, tüm canlıların ortak varlığıdır. Çevrenin sürdürülebilir bir şekilde ve sürdürülebilir kalkınma ilkelerine uygun olarak korunması amaçlanmaktadır. Bu sebeple ülkemizde 1983 yılında 2872 sayılı “Çevre Kanunu” yayımlanmıştır (*Çevre Kanunu*, 1983). Bu kanun doğrultusunda, atıksu deşarjı ve deşarj izinleri esaslarını, atıksu arıtılmasıyla ilgili tesislerin esaslarını, su kirliliğinin önlenmesi amaçlayan usul ve esasları içeren 2004 yılında 25687 sayılı Resmi Gazete 'de yayımlanarak yürürlüğe girmiş olan “Su Kalitesi Kontrolü Yönetmeliği” yayımlanmıştır (*Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği*, 2004).

Bu yönetmelik kapsamında denim sektörü özelinde bir deşarj kriteri belirlenmemiş olup, tekstil endüstrisine ait deşarj kriterleri yönetmelik eki Tablo 10: Tekstil Sanayii Atıksularının Alıcı Ortama Deşarj Standartları olarak belirlenmiştir. Denim atıksuları yönetmelik ekindeki Tablo 10.3 (Tekstil Sanayii (Pamuklu Tekstil ve Benzerleri))'te yer alan kriterlere göre deşarj edilmektedir.

Çizelge 2.7. Su kirliliği kontrol yönetmeliği tablo 10.3. Tekstil Sanayii (Pamuklu Tekstil ve Benzerleri) deşarj standartları

Parametreler	Birim	2 saatlik kompozit numune
KOİ	(mg/l)	225
AKM	(mg/l)	160
Amonyum azotu (NH ₄ -N)	(mg/l)	5
Serbest klor	(mg/l)	0,3
Toplam krom	(mg/l)	2
Sülfür (S ⁻²)	(mg/l)	0,1
Sülfid	(mg/l)	1
Yağ ve gres	(mg/l)	10
Balık biyodeneyi	-	4
pH	-	6-9
Renk	(Pt-Co)	280

2020 yılı Türkiye İstatistik Kurumu (TUİK) tarafından yayınlanan resmi bültene göre, ülkemizde kaynaklardan çekilen su miktarı 18.238.293.500 m³/yıl 'dır. Arıtılmış olsun olmasın alıcı ortama veya yeraltına deşarj edilen su miktarı ise 15.294.155.400 m³/yıl 'dır. Deşarj edilen atıksuyun % 62'si soğutma suları, % 38'lik kısmını ise diğer atıksular oluşturmuştur. Soğutma suları hariç doğrudan deşarj edilen atıksuyun % 79,7'si arıtılmıştır. Aynı bültende atıksu arıtma tesisi sayısı imalat sanayi için 2814, termik santraller için 76, maden işletmeleri için 212, organize sanayi bölgeleri için 106 ve belediyeler için 1068 olmak üzere toplam 4276 adet olarak belirtilmiştir. Kaynaktan çekilen suların kullanımını neticesinde oluşan atıksulardan, 4.991.537.203 m³/yıl kadarı bu arıtma tesislerinde arıtılmaktadır (Türkiye İstatistik Kurumu, 2020).

AB tarafından desteklenen AQUAREC Projesi (2006) kapsamında, arıtılmış atıksuların yeniden kullanımı için bir model geliştirmişlerdir. Bu model, 2000 yılındaki mevcut yeniden kullanım miktarlarını ve 2025 yılında ülkelerin arıtılmış atıksuların yeniden kullanım potansiyellerini tahmin etmektedir. Buna göre, Türkiye 2000 yılında çok düşük bir yeniden kullanım miktarına sahipken, 2025 yılında İspanya, İtalya ve Bulgaristan'ın ardından 287 milyon m³/yıl yeniden kullanım potansiyeliyle 4. sırada yer almaktadır.

(European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Wintgens, T., Bixio, 2006). Bu potansiyel göz önüne alındığında, ülkemizde arıtılmış atıksuların yeniden kullanımıyla ilgili araştırmaların ve mevzuat hazırlıklarının yapılmasının önem arz etmiştir. Tekstil endüstrisi en çok su kullanan sektörlerin başında geldiği için bu sektör özelinde atıksuların geri kazanımını teşvik eden ve zorunlu kılan uygulamalar yasal uygulamalar hayata geçirilmiştir.

Zamanının Çevre ve Orman Bakanlığı 20.03.2010 tarihinde 27527 sayılı Resmi Gazete’ de “Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği” ile atıksu arıtma tesislerinin tasarım kriterleri, atıksuların dezenfeksiyonu, yeniden kullanımı ve çamur bertarafı konularında teknik usul ve esasları belirlenmesi amacıyla yayımlanmıştır. Bu tebliğin EK-7’sinde “Arıtılmış Atık Suların Sulama Suyu Olarak Geri Kullanım Kriterleri” yer almaktadır (*Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği*, 2010). 25.10.2022 tarihinde 31994 sayılı Resmi Gazete” de yayımlanan “Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ” ile EK-7 “Arıtılmış Atıksuların Yeniden Kullanım Alanları ve Kriterleri” olarak yeniden belirlenmiştir. Bu düzenlemeyle birlikte, atık suların kullanım alanları genişletilerek çeşitlendirilmiştir. Endüstriyel tesislerde proses, kazan besleme ve soğutma kulesi suları olarak kullanımlarına ek olarak, çevresel alanda yangın söndürme ve genel temizlik suları olarak da kullanılmalarına olanak sağlayacak kriterler belirlenmiştir (*Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ*, 2022). Bu önlem, suyun döngüsel ekonomi ilkelerine uygun bir şekilde kullanılmasını teşvik ederek su kullanımının azaltılmasını hedeflemektedir. Aynı zamanda, arıtılan atık suların farklı alanlarda yeniden kullanılması sayesinde su kaynaklarının miktarı ve kalitesinin korunması amaçlanmaktadır.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 14.12.2011 tarih ve 28142 sayılı Resmi Gazete ’de yayımlanan “Tekstil Sektöründe Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Tebliği” ile sektörün çevreye verdiği zararların en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Bu tebliğ kapsamında kapasitesi 10 ton/gün üzerinde olan tekstil işletmeleri temiz üretim tekniklerinin kullanmak, oluşan atıksuların kaynağında azaltmak ve geri kazanmak, ayrıca yapmış oldukları ve yapacakları iyileştirmeleri her sene temiz üretim planı olarak bakanlığa sunması yasal olarak zorunlu kılınmıştır (*Tekstil Sektöründe Entegre Kirlilik Önleme ve*

Kontrol Tebliği, 2011). 10.03.2015 tarih ve 29291 sayılı Resmi Gazetede tebliğ ile sularda tuzluluk ve iletkenlik sorunlarının çözümü adına alkalinin geri kazanımı zorunluluğu getirilmiştir (*Tekstil Sektöründe Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Tebliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ*, 2015).

Arıtılmış atıksuyun yeniden kullanımını teşvik etmek amacıyla, ülkemizde atıksu arıtma tesislerinin enerji maliyetlerini destekleyen bir teşvik programı uygulanmaktadır. Bu program ile atıksu arıtma tesislerinin yeniden kullanım süreçleri teşvik edilmektedir. 15.06.2022 tarihinde 7410 sayılı Çevre Kanunu ile Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanunun 29. maddesinin 3. fıkrasında yapılan değişiklikle, ileri arıtma teknikleriyle arıtılmış atıksuyu yeniden kullanan kuruluşlara yüzde 100'e varan geri ödeme imkânı sağlanarak işletmeler atıksularını geri kazanmaya teşvik edilmiştir (*Çevre Kanunu ile Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun*, 2022). Böylelikle mevcut durumda % 3,55 olan geri kazanılmış atıksu kullanım oranının 2023 senesinde % 5, 2030 senesinde ise % 15 olması hedeflenmiştir.

30.12.2022 tarihinde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan 2022/20 numaralı “Tekstil Sektöründe Temiz Üretim Uygulamaları” genelgesi ile sektörün çevreye etkileri en aza indirilmesine yönelik olarak, su kirliliğinin önlemek ve su tüketiminin azaltılması için temiz üretim tekniklerinin kullanılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda arıtılmış ve renk giderimi sağlanmış atıksuların yeniden kullanılması, renk giderimi yapılan boya banyo atıksularının yeniden yıkama işlemlerinde kullanılmasına ilişkin tekniklerin kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Su tasarrufu için atıksuların geri kazanılarak mümkün olan yerlerde tekrar kullanımı zorunlu hale getirilmiştir (*Tekstil Sektöründe Temiz Üretim Uygulamaları*, 2022).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Çalışmanın Planlanması

Tez çalışması, aşağıda belirtilen hedefler doğrultusunda sırasıyla gerçekleştirilerek, bilimsel araştırmaya katkıda bulunmak amaçlanmıştır.

- Elektrooksidasyon çalışmasında kullanılacak olan dayanıklı anot materyali (Sn-Sb-Ni/Ti) ve katot materyalinin (Pt/Ti) laboratuvar ortamında üretilmesi ve tez kapsamında bütün elektrooksidasyon çalışmalarının bu anot, katot çifti ile yürütülmesi,
- Çalışmada kullanılacak olan denim yıkama suyunu temsilen sentetik indigo mavisi sulu çözeltisi hazırlanması,
- Hazırlanan çözeltinin karakterizasyonu tespit edilmiş, renk ve KOİ ölçümleri için metot oluşturulması,
- Çalışmalar için kullanılacak optimum destek elektrolit türü tespit edilmesi,
- Destek elektrolit türünü belirlemek için NaCl, KCl Na₂SO₄ ve K₂SO₄ tuzlarını kullanılması,
- Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) kullanılarak, literatür araştırmaları ve ön deneysel çalışmalar sonucunda bağımsız değişkenleri ve bu değişkenlere ait aralık değerleri merkezi kompozit tasarım esas alınarak belirlenmesi, oluşturulan deney tasarımı matrisi ile deneylerin tamamlanması,
- İndigo mavisi çözeltisi ile elektrooksidasyon prosesinde yapılan giderim çalışmaları için renk ve KOİ giderim veriminin tahmini için modellerin ortaya çıkarılması, bu modellere varyans analizi yapılarak modellerin geçerliliğinin teyit edilmesi ve optimum şartların YYY ile tespit edilmesi,
- Model ile tespit edilen şartların laboratuvar ortamında uygulanarak renk ve KOİ giderim verimlerinin uyumluluklarının belirlenmesi,
- Prototip olarak tasarlanan elektrooksidasyon sistemi için Sn-Sb-Ni/Ti anot malzemesinin büyük boyutlarda üretilmesi,
- Model ile belirlenmiş optimum koşullar altında, tasarlanan prototip sistemde deneylerin yürütülerek, renk ve KOİ giderim verimlerinin tespit edilmesi ve sonuçların uygulanabilirliğinin araştırılması,

3.2. Materyal

3.2.1. Sentetik denim yıkama atıksuyu

Çalışmaların yürütülmesi için Dystar Türkiye firmasından indigo vat % 40 çözeltisi temin edilmiştir. Bu çözelti önceden indirgenmiş indigo boyası içermektedir. Ayrıca Dystar firmasının web sitesinde ürünün bir çözünebilir leyko formunda indigo olması haricinde daha az koku ve toz kirliliği, indigoda % 15, kostik soda/hidrosülfid kullanımında % 70'e varan tasarruf ve en önemlisi daha az atıksu kirliliği (KOİ, AKM, Sülfatlar vb.) gibi bazı avantajlarından bahsedilmiştir (*DyStar Indigo Vat 40% Solution*, 2023).

Dystar firmasından temin edilen boyaya ait güvenlik bilgi formuna göre boyanın özellikleri Çizelge 3.1'de görülmektedir.

Çizelge 3.1. İndigo mavisi boya çözeltisinin özellikleri

Fiziksel ve kimyasal özellikler	Form	Sıvı
	Renk	Sarıdan kahverengiye kadar
	Koku	Ürüne özgü
	Donma derecesi	< -6 °C
	Kaynama aralığı	dan itibaren 100 °C
	Alevlenme noktası	> 100 °C
	Yoğunluk	yaklaşık 1,23 g/cm ³ . (20 °C)
	Suda çözünürlük	kolay çözünür, C.I. Reduced Vat Blue 1
	pH değeri	13,0 (20°C) seyreltilmemiş
Toksikolojik etkileri	Akut oral toksisite	LD50 > 2.000 mg/kg (Sıçan)

Çizelge 3.1. İndigo mavisi boya çözeltisinin özellikleri (devam)

	Akut inhalatif toksisite	(8 sa, sıçan) Metot: Solunum risk testi 20 °C ile zenginleştirilmiş ve/veya doymuş atmosfere maruz kalmada ölüm görülmemiştir.
	Akut dermal toksisite:	LD50 > 2.000 mg/kg (Sıçan)
	Deride iritan etki:	İritan (Tavşan)
	Gözde iritan etki:	Söz konusu vakada ciltteki tahriş etkisinden dolayı gözde de aynı teşhis beklenmektedir
	Sensibilizasyon:	Duyarlaştırıcı değildir (İnsan) Metot: patch-testi Analog bir ürünün test sonuçları
Ekolojik etkileri	Balık toksisitesi	LC50 > 100 mg/l (96 sa, <i>Oncorhynchus mykiss</i>)
	Daphnia toksisitesi	EC 50 > 100 mg/l (48 sa, <i>Daphnia magna</i>)
	Alg toksisitesi	EC 50 > 100 mg/l (72 sa, <i>Scenedesmus subspicatus</i>)
	Bakteri toksisitesi	C50 > 100 mg/l (Canlı çamur) Metot: DIN 38412 T.27

İndigo vat 40% çözeltisi 488 g/L indigo boyar maddesi içermektedir. Çalışmalar için günlük olarak hazırlanan stok çözeltiler, 100 mg/l indigo boya içerecek şekilde seyreltilmiştir. Hazırlanan çözeltilere ait karakterizasyonu Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. İndigo mavisi boya çözeltisinin atıksu karakterizasyonu

Parametreler	Sonuçlar
KOİ	204,72 ± 8,43
Renk	103,69 ± 10,68
pH	10,79 ± 0,06
İletkenlik	118,76 ± 10,72
TÇKM	57,49 ± 7,02

3.2.2. Anot ve Katot Materyallerinin Laboratuvar Ortamında Kaplanması

Materyallerin Temizlenmesi

Anot (2,5 x 2,5 cm) ve katot (5 x 5 cm) için titanyum örgüler (Dexmet) uygun boyutlarda kesilmiştir. Titanyum örgünün orta noktasına gelecek şekilde titanyum tel puntalanmıştır. Titanyum örgü ve telin üzerinde bulunan kirlilikleri gidermek için kaynayan oksalik asit (% 10 w/v) çözeltisinde 30-40 dakika boyunca bekletilmiştir. Çözeltiden çıkartılan materyaller 10 dakika boyunca ultrasonik banyoda (Çalışkan-LAB.ULT.4002) tutulmuştur. Bu işlem 3 defa tekrarlanmıştır. Sonrasında malzeme kuruması için 103 derecedeki etüvde (Binder-E-115) tutulmuştur. Titanyum örgü kuruduktan sonra kaplamaya hazırdır.

Anot Materyalinin Kaplanması

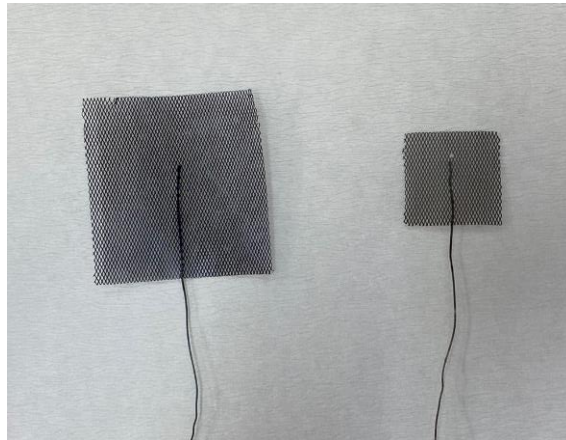
Materyalin kaplanması için molar olarak 500:8:1 oranında Sn-Sb-Ni çözeltisi hazırlanmıştır. Bu amaçla hassas terazi (Precisa XB 220A) yardımıyla 0,585 gram Sb_2O_3 , 28,2 gram $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ ve 0,02 gram NiO tartılmıştır. Tartılan kimyasallar balon jöje içerisinde bulunan 100 ml C_2H_6O ile beraber homojen bir şekilde çözünmesi için ultrasonik banyoda işlem görmüştür. Artık dip daldırma yöntemi ile kaplama için çözelti hazırdır. Anot için hazırlanmış 2,5 x 2,5 cm ebatlarındaki titanyum materyal bu çözelti içerisine daldırılmış ve 2 dakikalık süre boyunca bekletilmiştir. Çözeltiden çıkartılan anot materyali öncelikle 15 (ilk döngüde 20 dakika) dakikalık süre boyunca 103 °C'ye ayarlanmış etüvde bekletilmiştir. Etüvden çıkartılan anot materyali 520 °C'ye ısıtılmış bir kül fırınına (Mikrotek-1005) yerleştirilerek 15 dakikalık süre boyunca kürlenmiştir. Daldırma, etüvde bekleme ve kül fırınında bekleme adımlarını içeren kaplama işlemi 20 defa tekrarlanmıştır. 20. döngü sırasında kül fırınındaki kürlenme işlemi 75 dakika boyunca sürmüştür ve anot materyali kullanıma hazır hale gelmiştir (Christensen vd., 2013; Y.-H. Wang vd., 2005).

Katot Materyalinin Kaplanması

Katot materyalinin kaplanması için öncelikle beşik (cradle) hazırlanmalıdır. Bu beşiğin ebatları katot materyali olarak kaplanacak titanyum malzemeyi tamamen içine alabilecek büyüklükte iki plaka ihtiva edecek şekilde hazırlanmıştır. İki plaka dört köşesinden birbirlerine titanyum teller yardımıyla puntalanarak bağlanmıştır.

Katot materyalinin kaplamak için hazırlanan çözeltide 0,0617 gram $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb} \times 3 \text{H}_2\text{O}$ ve 5 gram PtCl_6H_2 hassas terazide tartıldıktan sonra 5 M hidroklorik asit ile balon jöje içerisinde 250 ml'ye tamamlanmıştır. Çözelti homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Öncelikle beşik uygun boyutlardaki bir behere yerleştirilmiştir. Sonrasında istenilen boyutlarda kesilerek hazırlanmış olan katot materyali beşiğin içerisine yerleştirilmiş ve üzerine hazırlanan kaplama çözeltisi ilave edilmiştir. Programlanabilir DC Güç kaynağının (Owon ODP3033) kırmızı (+) ucu hazırlanan beşik ile, siyah (-) ucu ise kaplanacak olan katot materyaline bağlanmıştır. Bağlantılar tamamlanmasıyla beraber 3 dakika süresinde 0,68 amperde düşük akım uygulandıktan sonra, akım 1,36 ampere yükseltilecek şekilde 2 dakika süreyle işleme devam edilmiştir. Bu işlemlerden sonra katot materyali önce 2 dakika boyunca 103 °C'ye ayarlanmış etüvde bekletilmiştir. Etüvden çıkartılan katot materyali 550 °C'ye ısıtılmış bir kül fırınında 75 dakika süreyle bekletildikten sonra işlem bitirilerek katot materyali kullanıma hazır hale gelmiştir.

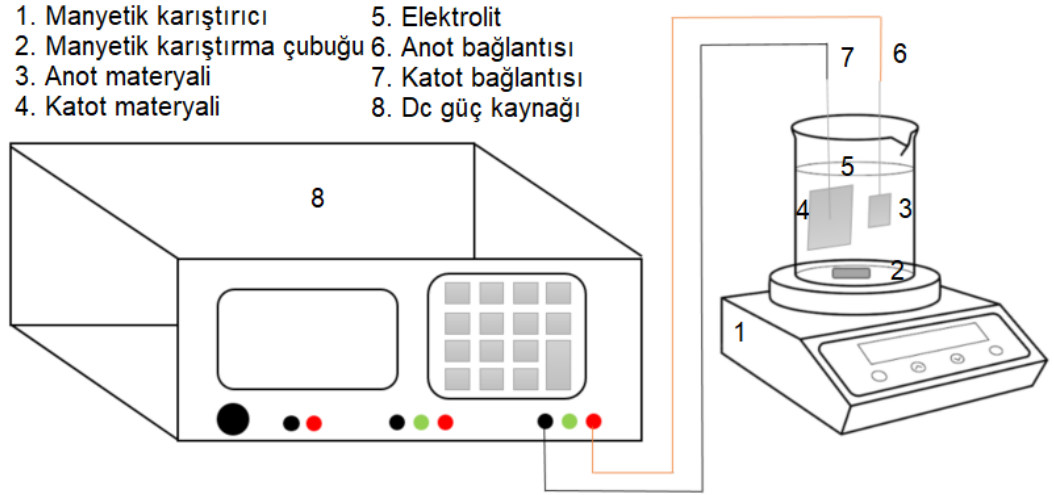
Şekil 3.1'de kaplama işlemi tamamlanan anot ve katot materyalinin gösteren görsel görülmektedir.



Şekil 3.1. Kaplanmış anot ve katot materyali

3.2.3. Elektrokodasyon deney dzenegđi

Elektrokodasyon deneyleri Şekil 3.2’de gđsterilmiŐ laboratuvar ۆlgegđindeki deney dzenegđiyle gercekleŐtirilmiŐtir.

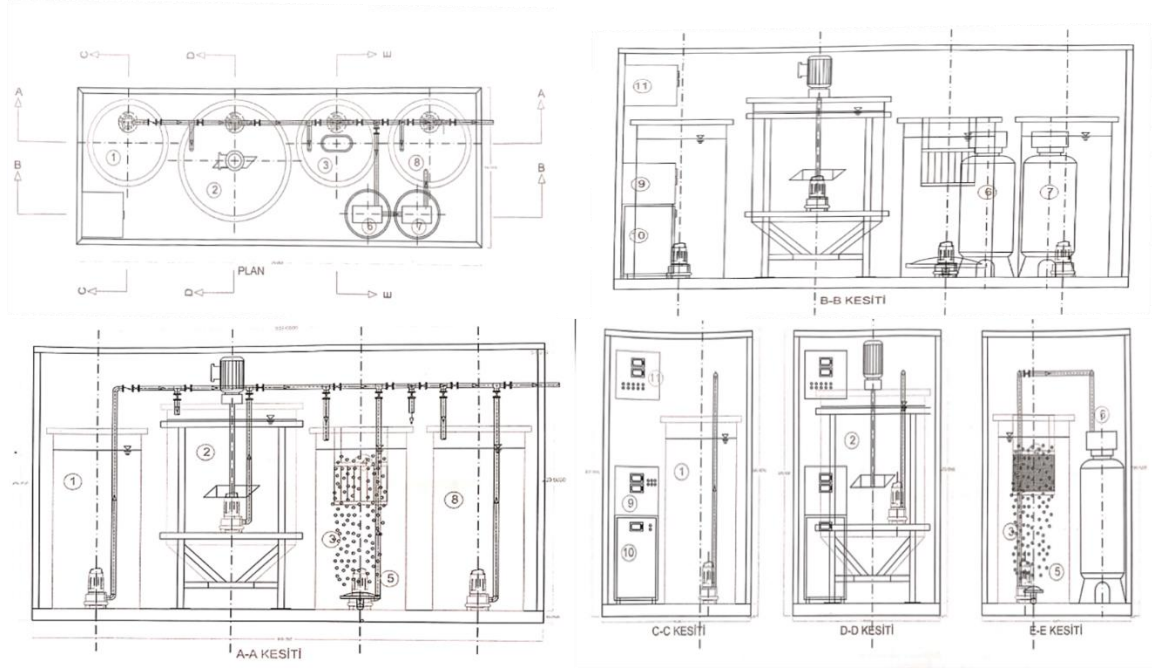


Şekil 3.2. Elektrokodasyon dzenegđinin Şematik olarak gđsterimi

Deney dzenegđi, elektrokodasyon prosesi sırasında tam karışımı sağlamak için manyetik karıştırıcı üzerinde gercekleŐtirilmiŐtir. Tam karıŐımın sağlanması için beher içerisine manyetik karıştırma çubuğu atılmıŐtır. Anot ve katot materyalleri programlanabilir DC gc kaynağına (0-30 V, 0-3 A) anot ve katot için bağlantı kabloları ile bağlanmıştır. Deneysel alıŐmalar 250 ml hacime sahip cam beher içerisinde gercekleŐtirilmiŐtir. Ayrıca anot ve katot arasındaki mesafe yalıtkan olarak tasarlanmış malzeme ile 1 cm olarak sabit tutulmuştur. Çalışma sırasında kullanılan anodun aktif yüzey alanı 6,25 cm², katodun ise aktif yüzey alanı ise 25 cm²’dir.

3.2.4. Pilot ۆlgegđli Tesis

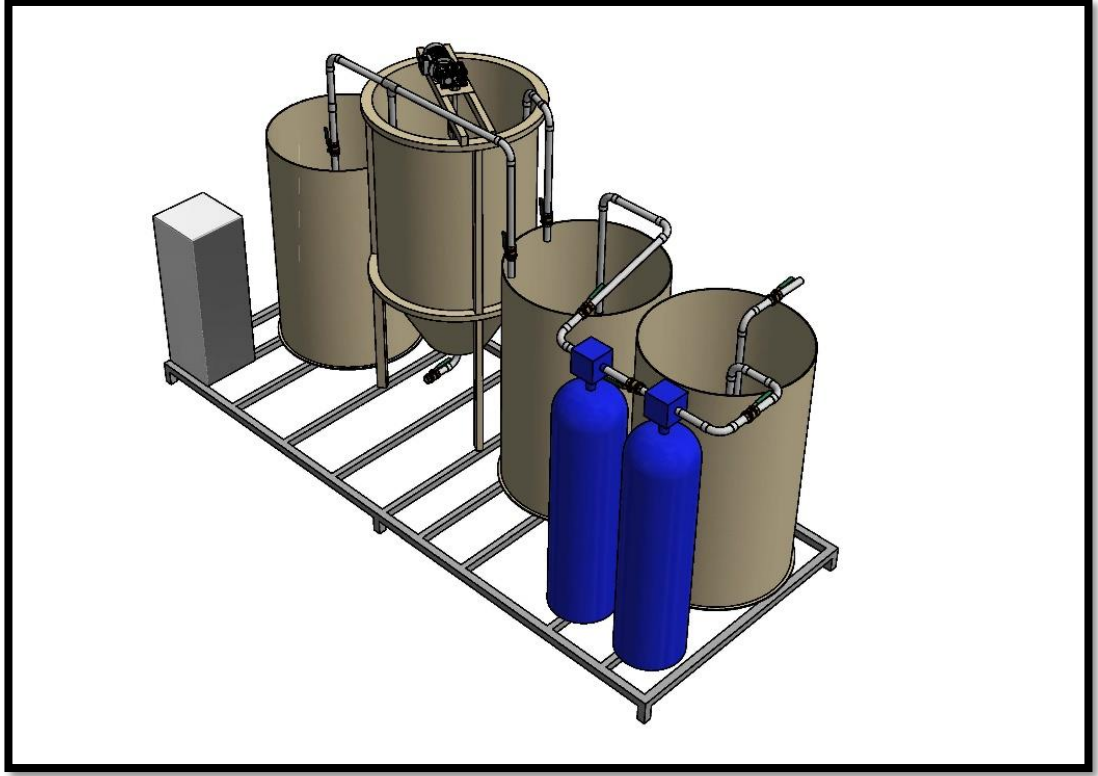
Çalışmada kullanılan pilot ۆlgegđli tesis, tekstil iŐletmelerindeki değişken karakterizasyona sahip atıksuların arıtılması/geri kazanımı için ayrı ayrı veya birlikte farklı senaryolarda çalıŐtırılabilecek proseslere sahip bir yapıdadır. Pilot ۆlgegđ tesise ait teknik çizimler ve kesitleri Şekil 3.3’ te gđsterilmektedir.



Şekil 3.3. Pilot ölçek tesise ait teknik çizimler ve kesitleri

Çizimlerde numaralandırması yapılmış ekipmanlar, 1- Dengeleme Tankı, 2- Kimyasal Arıtma Tankı, 3- Elektrooksidasyon/Ozon Temas Tankı, 4- Elektrotlar, 5- Ozon Difüzörü, 6- Kum Filtresi, 7- Aktif Karbon Ünitesi, 8- Ürün Suyu Deposu, 9- DC Güç Kaynağı, 10- Ozon Jeneratörü, 11-Elektrik Panosu şeklindedir. Pilot tesis farklı senaryolarda çalışmaya hazır şekilde kurgulanmıştır. Tesise kabul edilen atıksuyun özelliklerine göre bazı prosesler ve ekipmanlar çalıştırılmayabilecektir.

Yine tasarlanmış tesise ait CAD programı yardımıyla çizilmiş 3 boyutlu görüntüsü Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Pilot ölçek tesise 3 boyutlu çizim

Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalarda elektrooksidasyon prosesi kullanılmıştır. Dengeleme tankında alınan atıksular buradan pompa vasıtasıyla elektrooksidasyon tankına alınmıştır. Çalışma gerekli optimum koşullarda tamamlandıktan sonra ürün suyu deposuna pompalar ile gönderilmiştir. Elektrooksidasyon çalışmaları 0,5 m³ hacime sahip silindir şeklindeki polietilen (PE) tankta gerçekleştirilmiştir. PE tankın boyutları: taban çapı: 65 cm ve yükseklik: 157 cm'dir. Tank içerisine anot ve katodun yerleştirilmesi için öncelikle teflon malzemenin şase üretilmiştir. Hazırlanan teflon şaseye ait görüntüler Şekil 3.5'te sunulmaktadır.

Pilot ölçek denemelerinde kullanılmak üzere laboratuvar ortamında 3 adet anot malzemesi kaplanmıştır. Bölüm 3.2.2'de anlatılan şekilde kaplanan anot malzemesinin boyutları 20 x 30 cm ebatlarındadır.

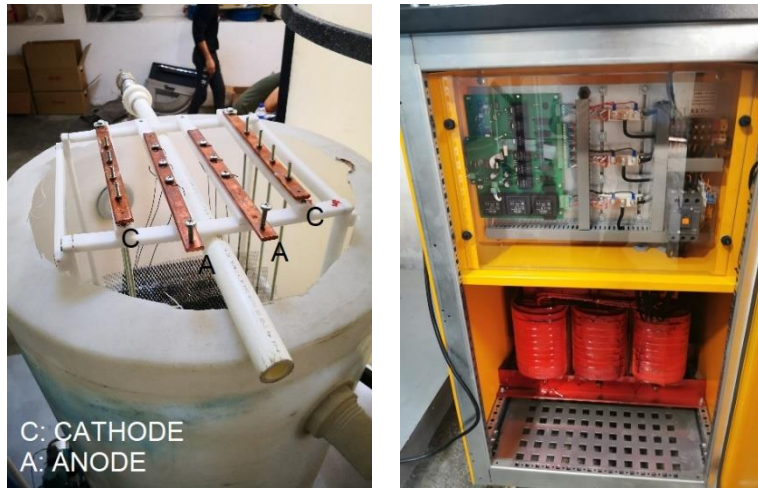
Katot malzemesi için kolay elde edilebilirliği ve maliyeti daha düşük olan 4 adet 30 x 30 cm 316 paslanmaz çelik kullanılmıştır. Teflon şase içerisine yerleştirilen anot ve katotlara

ait görünüşler Şekil 3.5’de gösterilmektedir. Anotlar ve katotlar arasındaki mesafe 2,5 cm olacak Şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.5. Teflon Şase içerisindeki anot ve katota ait görünüşler

Hazırlanan Şase elektrooksidasyon prosesinin gerçekleşeceği tankın içerisine anot ve katot tamamen indigo çözeltisi içerisine batacak Şekilde daldırılmıştır. Şekil 3.6’da elektrooksidasyon tankı ve Şaseye ait görsel sunulmaktadır. Akım Őiddeti Aygün Elektrik marka programlanabilir (0-2000 amper 0-200 V) DC güç kaynağıyla sağlanmıştır.



a)

b)

Şekil 3.6. a) Şase ve EO tankı b) DC güç kaynağı

3.2.5. Kimyasallar

Anot, katot malzemenin kaplanması, deneylerin yürütülmesi ve analizlerin gerçekleştirilmesi sırasında kullanılan bütün kimyasal maddeler analitik saflıkta ve Merck markadır. Çalışma sırasında kullanılan İndigo mavisi % 40 çözeltisi DyStar firması tarafından satılan ticari bir üründür ve Dystar Türkiye'den temin edilmiştir. Çalışma boyunca çözeltilerin hazırlanması, seyreltmelerin yapılması ve analizler için ultra saf su kullanılmıştır.

3.3. Metot

3.3.1. Deneysel prosedür

100 mg/l indigo boya konsantrasyona sahip olacak şekilde hazırlanan indigo mavisi sulu dereceli silindir ile ölçülerek 250 ml hacmine sahip behere alınmıştır. Behere alınan çözeltinin başlangıç pH, iletkenlik ve TÇKM değerleri kaydedilmiştir. pH ayarlamaları derişik ve seyreltik (0,1 ve 0,01 M) konsantrasyona sahip H₂SO₄ veya NaOH çözeltiler ile yapılmıştır. Destek elektrolit ilavesinden sonra pH, iletkenlik ve TÇKM değerleri tekrar ölçülmüştür. 2 anot ve katot arasında mesafe 1 cm olarak yalıtkan malzeme ile sabit tutulmuş olup, akım ve gerilim kontrollü dijital DC güç kaynağına bağlantıları yapıldıktan sonra deneysel çalışma başlatılmıştır. Çalışmalar sırasında homojenizasyonu sağlamak için manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Her çalışma öncesinde ve sonrasında alınan numunelerde giderim veriminin belirlenmesi için renk ve KOİ ölçümleri yapılmıştır. Çalışmada enerji tüketimi hesabı yapılabilmesi için voltaj değerleri belirli aralıklarla not edilmiştir. Elektrooksidasyon çalışması tamamlandıktan sonra anot ve katot materyali ultra saf su ile temizlenmiştir

3.3.2. Analitik prosedür

Renk Tayini

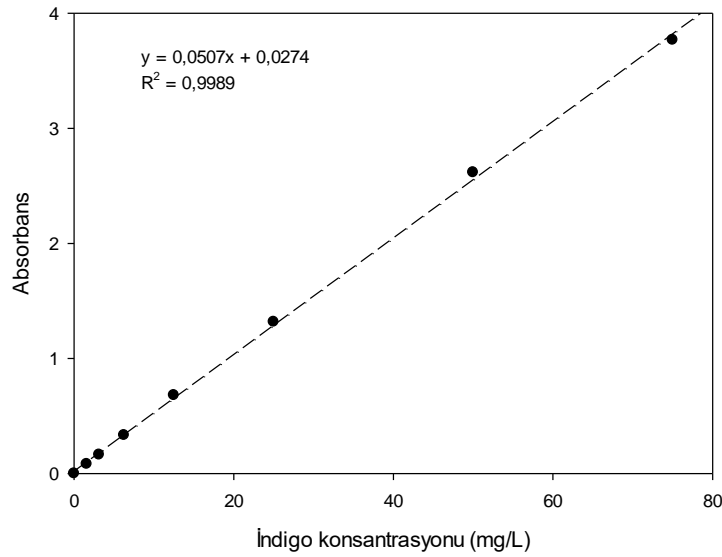
Renk analizleri Hach marka DR5000 serisi spektrofotometre yardımıyla yapılmıştır. Seyreltilmiş indigo boya çözeltisi spektrofotometrede 400-700 nm arasında dalga boyu taraması yapılmıştır. Yapılan dalga boyu taraması neticesin 666 nm dalga boyu optimum

olarak tespit edilmiştir. Dalga boyu tespitinden sonra 75-50-25-12,5-6,25-3,125-1,5625 mg/l konsantrasyonlarında hazırlanmış stok çözeltiler 666 nm’de spektrofotometre yardımıyla absorbans değerleri okunarak kalibrasyon eğrisi çizilmiştir. Spektrofotometre 4 absorbans değerinin üzerinde okuma gerçekleştirememektedir. Bu sebeple 75 mg/l üzerinde olan konsantrasyonlarda yapılan okumalarda numuneler 1/2 oranında seyreltilmiştir.

Çizelge 3.3. İndigo mavisi sulu çözeltisine ait renk kalibrasyon değerleri

Konsantrasyon (mg/l)	Absorbans
75,0	3,768
50,0	2,618
25,0	1,317
12,5	0,680
6,25	0,332
3,125	0,163
1,5625	0,082
0,0	0,000

Renk Kalibrasyon Eğrisi



Şekil 3.7. İndigo mavisi sulu çözeltisine ait renk kalibrasyon eğrisi

KOİ Tayini

KOİ tayini Standart Metotlar 5220 D belirtilen kapalı reflux metodu takip edilerek yapılmıştır. Ölçümleri için ilk olarak $C_8H_5KO_5$ yardımıyla hazırlanan çözelti ile kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur. Kalibrasyon değerleri Çizelge 3.4'te ve kalibrasyon eğrisi grafiği Şekil 3.8'de verilmiştir.

Parçalama çözeltisi = 10,216 gram $K_2Cr_2O_7$ ve 33,0 gram $HgSO_4$ (derişik), 167,0 mililitre H_2SO_4 içerisinde çözdürülmüş ve bir litrelik balon joje içerisinde çizgiye kadar tamamlanmıştır.

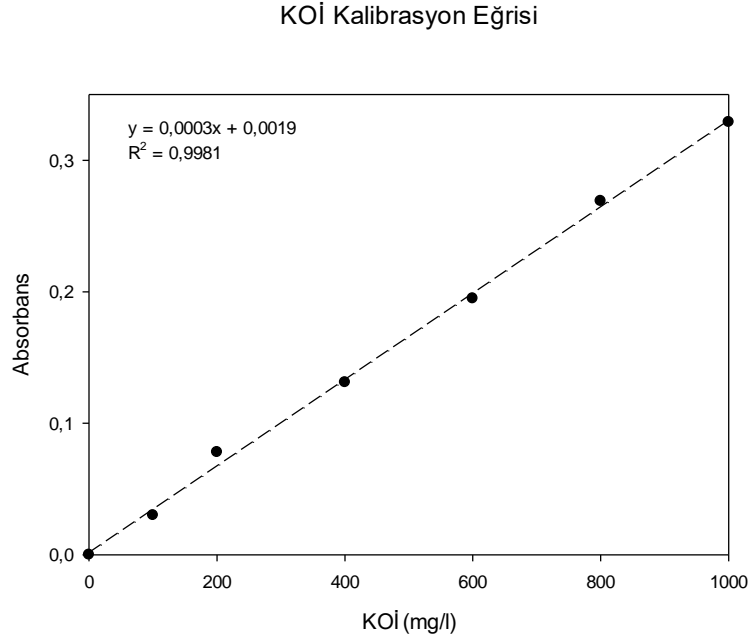
Asit çözeltisi = 11,0 gram Ag_2SO_4 bir litre H_2SO_4 (derişik) içerisinde çözdürülmüştür.

Potasyum Hidrojen Ftalat = ($C_8H_5KO_5$) KOİ tayini için kalibrasyon eğrisinin oluşturulması için kullanılmıştır.

Analizin yapılışı = 1,5 ml numune çekilerek cam (borosilikat) tüplere alınmıştır. Üzerine 1 ml parçalama, 2 ml asit çözeltisi eklenmiştir. Bu karışım termoreaktörde (Hach LT 200) $148^\circ C$ 'de 2 saat boyunca kaynatılmış ve oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Soğuma işleminden sonra, 600 nm dalga boyunda spektrofotometre (Hach DR 5000) kullanılarak absorbans değerleri ölçülmüş ve standart KOİ eğrisinden KOİ konsantrasyonları belirlenmiştir.

Çizelge 3.4. İndigo mavisi sulu çözeltisine ait KOİ kalibrasyon değerleri

Konsantrasyon (mg/l)	Absorbans
1000	0,329
800	0,269
600	0,195
400	0,131
200	0,078
100	0,03
0	0



Şekil 3.8. İndigo mavisi sulu çözeltisine ait KOİ kalibrasyon eğrisi

pH ölçümleri

pH ölçümleri için Mettler Toledo marka Seven2go model pH metre cihazı kullanılmıştır.

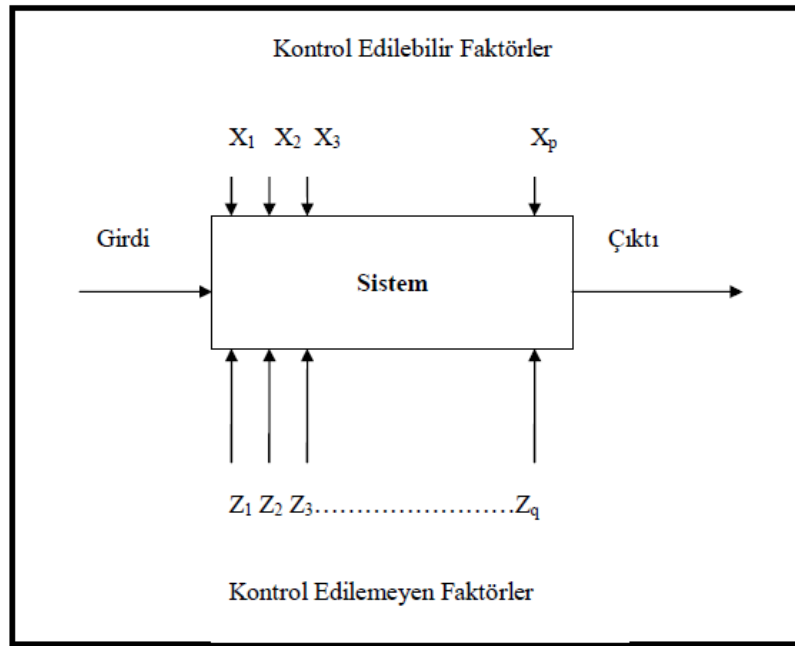
İletkenlik ve TÇKM ölçümleri

İletkenlik ve TÇKM ölçümleri için Hach marka Sension5 model cihazı kullanılmıştır.

3.3.3. Deneysel Tasarımı ve yanıt yüzey yöntemi (YYY)

Deneysel tasarımı (DT), R. A. Fisher tarafından 1920'lerde, tarımsal araştırmaların Fisher'in yöntemleriyle yeniden şekillendirildiği Rothamsted Deneysel İstasyonu'nda çalışırken geliştirilmiştir. Fisher'in istatistiksel yöntemleri tarımsal araştırmalarla sınırlı kalmamış ve 1950'lerin sonuna gelindiğinde psikoloji, sosyoloji, eğitim, kimya, tıp, mühendislik, ekonomi, kalite kontrol gibi disiplinlerde de kullanılmaya başlanmıştır (Parolini, 2015). DT, bir prosesin girdi değişkenlerinde istenen değişikliklerin uygulanarak, cevap değişkenindeki değişkenliğin gözlenmesi, elde edilmesi ve yorumlanması olarak tanımlanabilir (Besterfield vd., 2012).

Deney, sistemin veya sürecin girdi değişkenlerinde amaçlı değişikliklerin yapıldığı, böylece çıktı yanıt değişkenindeki değişikliklerin gözlemlenebildiği ve bunların nedenlerinin tespit edilebildiği bir test veya bir dizi çalışma olarak tanımlanabilir. Bazı süreç değişkenleri X_1, X_2, \dots, X_p kontrol edilebilirken, diğer değişkenler Z_1, Z_2, \dots, Z_q kontrol edilemez olabilir (Sahu & Andhare, 2018). Şekil 3.9’da bir sistem veya süreci temsil eden modele ait şematik genel gösterim verilmektedir.



Şekil 3.9. Bir sistem veya sürece ait şematik gösterim (Er, 2016)

DT teknikleri, mevcut durumu düzeltmek ve bir prosesin performansını artırmak için kullanılarak yeni bir proses geliştirme sürecinde büyük fayda sağlar ve önemli bir rol oynar. Temel hedef, güvenilir bir proses geliştirmektir. Bu süreçte, kontrol edilemeyen parametrelerin etkisinin mümkün olduğunca az olduğu bir proses geliştirmek amaçlanmaktadır (Montgomery, 2017).

Yanıt yüzeyi yöntemi (YYY), araştırılan cevabın birden fazla değişken tarafından etkilendiği ve cevabı optimize etmek amacıyla kullanılan istatistiksel ve matematiksel tekniklerin bir kombinasyonudur. Yöntem, 1951 senesinde Box ve Wilson tarafından tanıtılmıştır. Optimal bir cevap eldesi amacıyla, tasarlanmış bir takım deneyleri kullanır

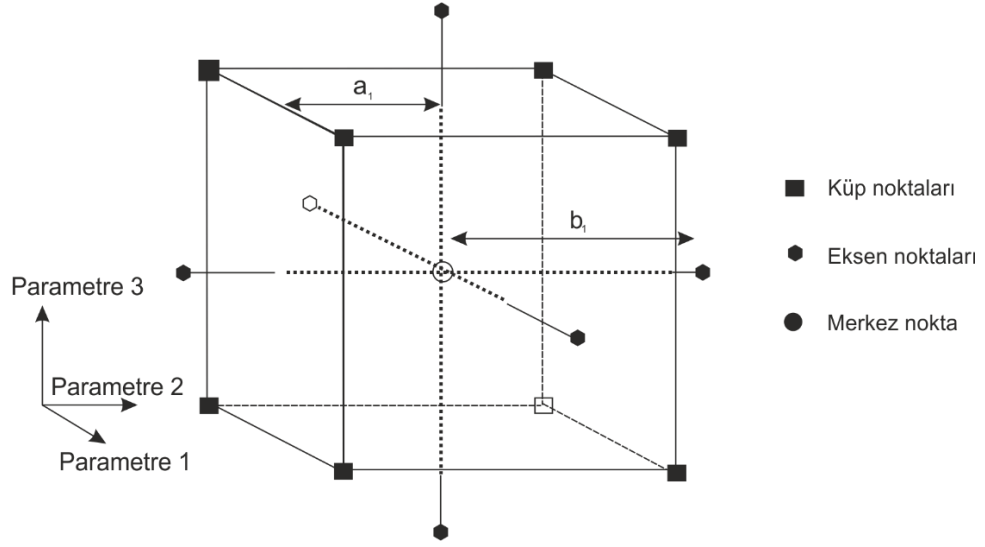
ve bunu ikinci dereceden bir polinom modeli (Yuangyai & Nembhard, 2010) kullanarak yapar (Sahu & Andhare, 2018).

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

Bu yöntem, prosesleri etkileyen parametreler arasındaki etkileşimleri belirleyebilir, hangi etkileşimin daha etkin olduğunu belirleyebilir ve prosesin optimizasyonu için hangi parametreye daha duyarlı olduğunu belirleyebilir. Bu özellikleri nedeniyle birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. YYY'nin en önemli avantajlarından biri, tespit edilen optimum şartların endüstriyel olarak uygulanması mümkün olmasa dahi, bu şartlara en yakın durum ek deneyler gerektirmeksizin tahmin ederek gösterebilmesidir. Bu, prosesin optimize edilmiş koşullar altında nasıl çalışacağını tahmin etmek için ek deneylere ihtiyaç duyulmadığı anlamına gelir. Bu özellik, zaman ve maliyet tasarrufu sağlar ve prosesin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini hızlandırır (Türkyılmaz, 2011).

YYY'nin Box-Behnken, karışım tasarımı ve merkezi kompozit tasarım (MKT) gibi farklı uygulanabilir çeşitleri bulunmaktadır. Bu türlerden en sıklıkla kullanılan yöntem MKT'dir. MKT, 3^k faktöryel tasarımlara alternatif olarak ortaya çıkmıştır ve tasarım sonucu ortaya çıkan modelin geçerliliği varyans (ANOVA) testiyle açıklanabilir.

MKT'nin 2 düzeyli 3 faktörlü deneme düzeninde, bileşenlerin çözüm uzayındaki konumları gözlemlenebilir. Çözüm uzayı, 3 faktörün olduğu tasarımda bir küp şeklinde temsil edilir. Bu küpün köşelerinde, 8 farklı faktör kombinasyonunu temsil eden noktalar bulunur ($2^3 = 8$). Her bir nokta, deneme düzenindeki faktör değerlerini temsil eder. Ayrıca, bu deneme düzeninde, küpün her bir yüzeyinden geçen ve merkez noktaya α kadar uzaklıkta olan 6 eksen noktası yer alır. Bu eksen noktaları, deneme düzenindeki faktörlerin etkisini analiz etmek için kullanılabilir ve çözüm uzayının farklı bölgelerini temsil eder.



Şekil 3.10. 2^3 MKT çözüm düzlemi (Er, 2016)

YYY kullanılarak modelin oluşturulması

Elektrooksidasyon yönteminde renk ve KOİ giderimini etkileyen değişkenler ve bunların seviyeleri yapılan ön çalışmalarla ve literatüre dayalı olarak belirlenmiştir. Deney tasarımı Trial versiyon Minitab Statistical Software 21.3 ile yapılmıştır. YYY'nin MKT metodu kullanılmıştır. Tasarım, 4 tane faktörü ve bu faktörlerin 3 farklı seviyesi ile 7 adet merkezi deney çalışmasını içermektedir. Bağımsız değişkenler pH, süre, akım yoğunluğu ve destek elektrolit konsantrasyonudur. Bu bağımsız değişkenlerin düşük, orta ve yüksek seviyeleri Çizelge 3.5'de verilmektedir. Bağımsız değişken olarak elektrooksidasyon prosesinde arıtma verimi üzerinde en etkili parametreler olan;

- pH (X_1)
- Akım yoğunluğu (X_2)
- Destek elektrolit konsantrasyonu (X_3)
- Süre (X_4)

belirlenmiştir. Bu parametreler yardımıyla

- KOİ giderimi (Y_1)
- Renk giderimi (Y_2) parametreleri için ikinci dereceden bir model oluşturulmuştur.

Çizelge 3.5. YYY ile oluşturulan tasarım faktörleri ve seviyeleri

Bağımsız Değişkenler	Seviyeler		
	-1	0	1
pH	5	7	11
Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	50	75	100
Destek elektrolit konsantrasyonu (mg/l)	1000	1500	2000
Süre (dk)	30	75	120

Program tarafından oluşturulan deneysel koşullara ait Tablo Çizelge 3.6'da sunulmaktadır. Burada, deneyler çevresel şartların en aza indirilebilmesi için karışık sıra ile gerçekleştirilmiş olup Çizelge 3.6'da daha anlaşılır olabilmesi adına deney sırasıyla gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. YYY ile oluşturulan deney tasarımı matrisi

Deney No	pH (X₁)	Akım yoğunluğu (mA/cm²) (X₂)	Destek elektrolit konsantrasyonu (mg/l) (X₃)	Süre (dakika) (X₄)
1	5	50	1000	30
2	11	50	1000	30
3	5	100	1000	30
4	11	100	1000	30
5	5	50	2000	30
6	11	50	2000	30
7	5	100	2000	30
8	11	100	2000	30
9	5	50	1000	120
10	11	50	1000	120
11	5	100	1000	120
12	11	100	1000	120
13	5	50	2000	120
14	11	50	2000	120

Çizelge 3.6. YYY ile oluşturulan deney tasarımı matrisi (devam)

15	5	100	2000	120
16	11	100	2000	120
17	5	75	1500	75
18	11	75	1500	75
19	8	50	1500	75
20	8	100	1500	75
21	8	75	1000	75
22	8	75	2000	75
23	8	75	1500	30
24	8	75	1500	120
25	8	75	1500	75
26	8	75	1500	75
27	8	75	1500	75
28	8	75	1500	75
29	8	75	1500	75
30	8	75	1500	75
31	8	75	1500	75

Çalışma sonrasında oluşturulan bu modellerin geçerliliği ANOVA testi ile tespit edilmiştir. Bu yöntem kullanılarak her bir faktörün lineer, kare ve etkileşim etkilerinin %95 güven düzeyinde yanıtlar üzerindeki istatistiksel değerlendirmeleri Fischer (F-testi) testi yapılarak belirlenmiştir. Modelin uygunluğu için regresyon (R^2) ve düzeltilmiş regresyon kullanılarak belirlenmiştir.

Optimizasyon

Optimizasyon işlemleri için yine Minitab Statistical Software 21.3 trial versiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Burada optimizasyon işlemleri bağımsız değişkenlere ve bağımlı değişkenlere göre yapılabilmektedir. Her değişken için maksimizasyon,

minimizasyon, belirli bir hedef değere göre optimizasyon, belirli bir aralığa göre optimizasyon ve belirli bir değerde optimizasyon gibi seçenekler uygulanabilmektedir.

3.3.4. Hesaplamalar ve kullanılan eşitlikler

Akım yoğunluğu (mA/cm²) = Akım yoğunluğunu hesaplamak için aşağıdaki eşitlikten faydalanılmıştır.

$$J = \frac{I}{A} \quad (3.2)$$

Bu formülde; J = Akım yoğunluğunu (mA/cm²), I = Akım şiddetini (miliamper), A = Anot alanını (cm²) temsil etmektedir.

Giderim veriminin hesaplanması (%) = Renk ve KOİ giderim verimlerini hesaplamak için aşağıdaki eşitlikten faydalanılmıştır.

$$\frac{C_0 - C_s}{C_0} \times 100 \quad (3.3)$$

Bu formülde; C₀ = Başlangıç renk veya KOİ konsantrasyonunu (mg/l), C_s = Kalan renk veya KOİ konsantrasyonunu (mg/l) temsil etmektedir.

Enerji tüketimi hesaplanması (kWh/kg KOİ) = 1 kg KOİ giderilmesi için harcanan elektrik maliyetini (kWh) hesaplamak için aşağıdaki eşitlikten faydalanılmıştır.

$$\text{Enerji tüketimi} = \left(\frac{kWh}{kg} \right) = \frac{U \times I \times t}{v \times (KOİ_0 - KOİ_t) \times 1000} \quad (3.4)$$

Bu formülde; U = elektrokimyasal prosesin ortalama voltajını (V), I = uygulanan akımı (A), t = elektrooksidasyon süresini (h), v = ise çözelti hacmini (m³), KOİ₀ başlangıç kimyasal oksijen ihtiyacını miktarını (mg/l) ve KOİ_t ise bitiş kimyasal oksijen ihtiyacı miktarını (mg/l) temsil etmektedir.

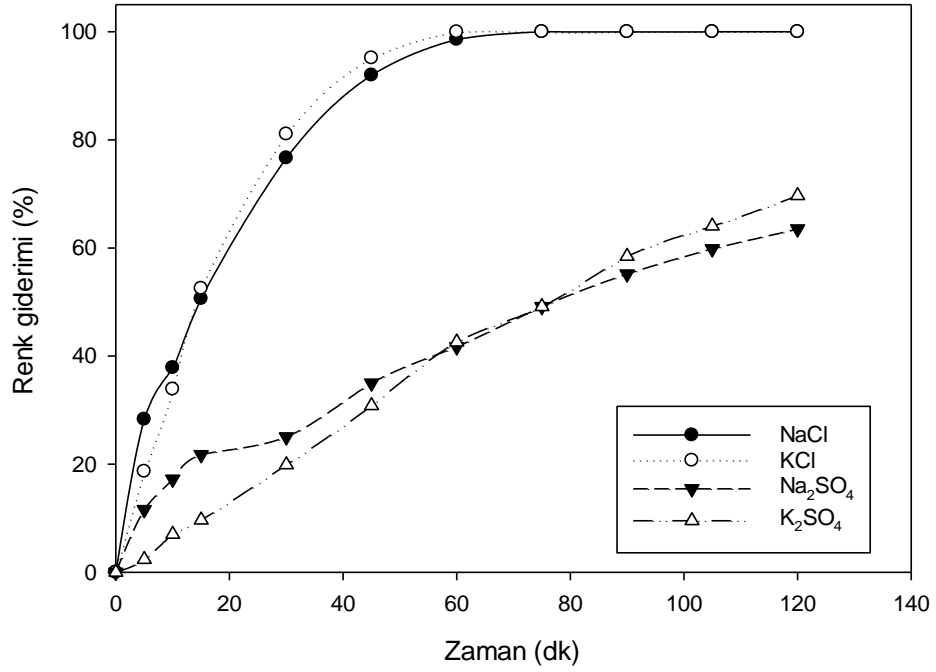
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Yürütülen tez çalışmasının amacı, denim yıkama suları neticesinde oluşan atıksularının geri kazanılması ve geri kazanım için bir proses tasarımı ve prototip geliştirilmesidir. Bunun için elektrooksidasyon yöntemi seçilmiştir. Elektrooksidasyon prosesinde yeni nesil Sn-Sb-Ni/Ti anot ve Pt/Ti katot kullanılarak indigo mavisi sulu çözeltisinin maksimum renk ve KOİ giderimi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda öncelikle destek elektrolit türü belirlenmiş, sonrasında ise elektrooksidasyon prosesini en çok etkilediği düşünülen pH, destek elektrolit konsantrasyonu, akım yoğunluğu ve süre parametreleri yanıt yüzey yöntemiyle optimize edilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında optimum koşullardaki enerji tüketimi hesaplanmıştır. Son olarak tasarlanan prototip yanıt yüzey yöntemiyle tespit edilen optimum koşullarda çalıştırılmıştır.

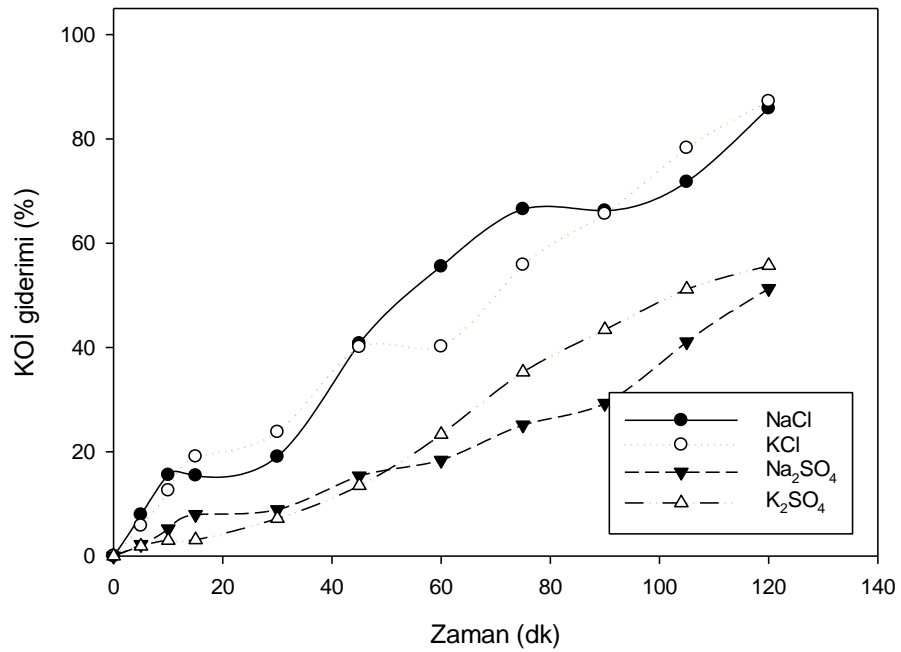
4.1. Destek elektrolit türünün belirlenmesi

Elektrooksidasyon proseslerinin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için atıksuyun yüksek bir iletkenliğe sahip olması önemlidir. Bu nedenle, destek elektrolit eklenerek suyun iletkenliği artırılır. Destek elektrolitler, sadece iletkenliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda prosesin hızını ve verimini de artırmak için kullanılır. Ortamdaki tuz veya iyonik bileşikler, elektrooksidasyon prosesinde hem iletkenliği artırır hem de dolaylı olarak elektrooksidasyonu artırabilir. İyonlar, elektrotlar arasında daha iyi iletim sağlayarak reaksiyon hızını artırır. Ayrıca, bazı iyonlar, elektrokimyasal reaksiyonların katalizörü olarak işlev görebilir ve oksidasyon sürecini hızlandırabilir. Bu sebeple yanıt yüzey yöntemi kullanılarak optimizasyon çalışması öncesinde destek elektrolit türü belirlenerek optimizasyon çalışmalarına bu elektrolit türü ile devam edilmiştir.

Çalışma için destek elektrolit türü en yaygın kullanılan NaCl, KCl, Na₂SO₄ ve K₂SO₄ tuzları tercih edilmiştir. 1000 mg/l destek elektrolit konsantrasyonunda, 50 mA/cm² akım yoğunluğunda, doğal pH (10,81) şartlarında ve 120 dakika süresince çalışma yapılmıştır. Dört farklı destek elektrolit türü ile yapılan çalışmalar neticesinde renk ve KOİ giderim etkinlikleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen renk ve KOİ giderim verimlilikleri sırasıyla Şekil 4.1 ve 4.2’de sunulmaktadır.



Şekil 4.1. Farklı destek elektrolit türlerinin zamana karşı renk giderim verimi



Şekil 4.2. Farklı destek elektrolit türlerinin zamana karşı KOİ giderim verimi

Şekil 4.1 incelendiğinde farklı destek elektrolit türlerinin renk giderimi üzerine etkisi görülmektedir. NaCl ve KCl destek elektrolitleri ile yapılan çalışmalarda 80. dakikadan itibaren % 100 renk giderim verimi elde edilmiştir. Buna karşın Na₂SO₄ ve K₂SO₄ destek elektrolitleri ile yapılan çalışmalarda toplam süre sonunda dahi sadece sırasıyla % 63.51, % 69.69 renk giderim verimine ulaşılmıştır.

Şekil 4.2 ise farklı destek elektrolit türlerinin KOİ giderimi üzerine etkisini göstermektedir. Burada 120 dakikalık sürenin sonunda NaCl, KCl, Na₂SO₄ ve K₂SO₄ destek elektrolitleri için sırasıyla % 85,88 , % 87,24 , % 51,32 ve % 55,72 KOİ giderim verimi hesaplanmıştır.

NaCl ve KCl destek elektrolitlerine ait giderim verimlerinin yüksek olması, klor iyonlarının renk ve KOİ gideriminde daha etkin rol aldığını gösterdiği düşünülmektedir. Bunun sebebi, klorür ile farklı kirleticilerin elektrolizinde, klor/hipokloritin dolaylı elektrokimyasal oksidasyon etkisi olarak açıklanmıştır (Doğan & Türkdemir, 2005). Başka bir çalışmada ise bu durumu yine klor/CLO⁻ ve bir boya molekülü arasında meydana gelen kirleticinin dolaylı elektro-oksidasyonu olarak belirtmişler (Belal vd., 2021).

Sonuçlar incelendiği zaman renk ve KOİ giderim verimleri için NaCl ve KCl destek elektrolitleri arasında benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Her iki destek elektrolit türü ile yapılan çalışmalarda 120 dakikalık süre sonunda % 100 renk giderime ulaşılrken, KOİ giderimi için ise % 85,88 , % 87,24 giderim verimleri elde edilmiştir. Bu noktada NaCl ve KCl destek elektrolitleri arasından daha ekonomik olması sebebiyle NaCl destek elektrolit olarak tercih edilmiştir. Bu noktadan sonra yanıt yüzey yöntemi ile yapılan optimizasyon çalışmalarında destek elektrolit olarak NaCl ile devam edilmiştir.

4.2. YYY ile belirlenen şartlarda yürütülen elektrooksidasyon çalışmasının deney sonuçları

Denim yıkama suları neticesinde oluşan atıksuların elektrooksidasyon prosesiyle artırılması durumunda, pH, destek elektrolit konsantrasyonu, akım yoğunluğu ve süre bağımsız değişkenlerinin renk ve KOİ bağımlı değişkenlerine karşı etkisinin belirlenmesi

amacıyla Minitab Statistical Software yardımıyla merkezi kompozit tasarım (MKT) dizayn edilmiştir. Tasarım, 4 faktör ve bunların 3 farklı seviyeleri ile 7 merkez deneyi içermektedir (Çizelge 3.5). Deneyler, çevresel şartların en aza indirilebilmesi ve sistematik hatayı önlemek için karışık sıra ile gerçekleştirilmiş olup, daha anlaşılır olabilmesi adına sırayla gösterilmiştir. MKT'dan elde edilen dizayna ait renk ve KOİ giderimine ait sonuçlar ve tahmini değerler sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. YYY ile oluşturulan deney tasarımı matrisine göre renk giderim sonuçları (gerçek-tahmin)

Deney No	pH (X₁)	Akım yoğunluğu (mA/cm²) (X₂)	Destek elektrolit konsantrasyonu (mg/l) (X₃)	Süre (dakika) (X₄)	Renk giderim verimi (%) gerçek	Renk giderim verimi (%) tahmin
1	5	50	1000	30	97,15	95,70
2	11	50	1000	30	95,24	93,79
3	5	100	1000	30	98,05	98,91
4	11	100	1000	30	93,38	94,20
5	5	50	2000	30	82,50	83,48
6	11	50	2000	30	82,92	84,28
7	5	100	2000	30	100,00	98,63
8	11	100	2000	30	97,88	96,62
9	5	50	1000	120	100,00	101,18
10	11	50	1000	120	100,00	101,38
11	5	100	1000	120	95,80	94,46
12	11	100	1000	120	92,92	91,85
13	5	50	2000	120	96,95	96,14
14	11	50	2000	120	100,00	99,06
15	5	100	2000	120	100,00	101,36
16	11	100	2000	120	100,00	101,46

Çizelge 4.1. YYY ile oluşturulan deney tasarımı matrisine göre renk giderim sonuçları (gerçek-tahmin) (devam)

17	5	75	1500	75	100,00	100,61
18	11	75	1500	75	100,00	99,70
19	8	50	1500	75	97,99	97,74
20	8	100	1500	75	100,00	100,55
21	8	75	1000	75	99,46	100,54
22	8	75	2000	75	100,00	99,23
23	8	75	1500	30	92,08	93,61
24	8	75	1500	120	100,00	98,78
25	8	75	1500	75	100,00	99,87
26	8	75	1500	75	100,00	99,87
27	8	75	1500	75	100,00	99,87
28	8	75	1500	75	100,00	99,87
29	8	75	1500	75	100,00	99,87
30	8	75	1500	75	100,00	99,87
31	8	75	1500	75	100,00	99,87

Çizelge 4.2. YYY ile oluşturulan deney tasarımı matrisine göre KOİ giderim sonuçları (gerçek-tahmin)

Deney No	pH (X ₁)	Akım yoğunluğu (mA/cm ²) (X ₂)	Destek elektrolit konsantrasyonu (mg/l) (X ₃)	Süre (dakika) (X ₄)	KOİ giderim verimi (%) gerçek	KOİ giderim verimi (%) tahmin
1	5	50	1000	30	51,01	46,19
2	11	50	1000	30	49,66	50,38
3	5	100	1000	30	23,46	28,32
4	11	100	1000	30	34,26	29,76
5	5	50	2000	30	20,83	19,02
6	11	50	2000	30	18,95	19,85

Çizelge 4.2. YYY ile oluşturulan deney tasarımı matrisine göre KOİ giderim sonuçları (gerçek-tahmin)(devam)

7	5	100	2000	30	37,46	35,54
8	11	100	2000	30	33,98	33,61
9	5	50	1000	120	100,00	99,36
10	11	50	1000	120	100,00	99,44
11	5	100	1000	120	90,43	87,05
12	11	100	1000	120	83,57	84,38
13	5	50	2000	120	65,15	67,18
14	11	50	2000	120	69,77	63,90
15	5	100	2000	120	91,00	89,26
16	11	100	2000	120	80,89	83,23
17	5	75	1500	75	100,00	107,44
18	11	75	1500	75	100,00	106,52
19	8	50	1500	75	40,06	50,10
20	8	100	1500	75	46,91	50,83
21	8	75	1000	75	61,91	69,43
22	8	75	2000	75	48,83	55,27
23	8	75	1500	30	48,65	55,61
24	8	75	1500	120	100,00	107,00
25	8	75	1500	75	86,68	80,86
26	8	75	1500	75	86,27	80,86
27	8	75	1500	75	88,86	80,86
28	8	75	1500	75	87,13	80,86
29	8	75	1500	75	86,19	80,86
30	8	75	1500	75	86,04	80,86
31	8	75	1500	75	86,69	80,86

4.2.1. Renk Giderimi

Denim yıkama suları neticesinde oluşan atıksuların elektrooksidasyon prosesiyle arıtılması ve geri kazanılması çalışması için, tekstil sektörü atıksularındaki büyük sorunlardan olan renk parametresinin yüzde giderimi için çalışmalar yapılmıştır. Rengin yüzde gideriminin performans değerlendirmesi tespit edilmiş olan 666 nm’de yapılan ölçümler ile ortaya konulmuştur.

Renk giderim verimine ait gösterilen sonuçlardan Minitab yardımıyla yapılan analiz sonucunda kodlanmış katsayılarına ait sonuçlar Çizelge 4.3’te verilmektedir.

Çizelge 4.3. Renk giderim verimine ait kodlanmış katsayılar

Kodlanmış Katsayılar					
Terim	Katsayı (coef)	Se katsayısı (se coef)	T-değeri (T-Value)	P-değeri (P-value)	VIF
Sabit (Constant)	99,867	0,408	245,05	0,000	
pH	-0,451	0,324	-1,39	0,183	1,00
Akım Yoğ. (mA/cm ²)	1,405	0,324	4,34	0,001	1,00
Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	-0,653	0,324	-2,02	0,061	1,00
Süre(dk.)	2,581	0,324	7,97	0,000	1,00
pH*pH	0,287	0,853	0,34	0,740	2,91
Akım Yoğ. (mA/cm ²)*Akım Yoğ. (mA/cm ²)	-0,719	0,853	-0,84	0,411	2,91
Destek Elektrolit Kons.(mg/l)* Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	0,017	0,853	0,02	0,984	2,91
Süre(dk.)*Süre(dk.)	-3,672	0,853	-4,31	0,001	2,91
pH*Akım Yoğ. (mA/cm ²)	-0,702	0,343	-2,04	0,058	1,00
pH* Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	0,676	0,343	1,97	0,067	1,00
pH*Süre(dk.)	0,528	0,343	1,54	0,143	1,00
Akım Yoğ. (mA/cm ²)* Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	2,984	0,343	8,69	0,000	1,00
Akım Yoğ. (mA/cm ²)*Süre(dk.)	-2,483	0,343	-7,23	0,000	1,00
Destek Elektrolit Kons.(mg/l)*Süre(dk.)	1,797	0,343	5,23	0,000	1,00

Renk giderim verimi üzerine etki eden parametrelerin önem seviyelerinin tespit edilmesi amacıyla modelde kullanılan her değişkenin model üzerine olan etkileri üzerindeki etkilerinin tespiti için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Renk giderim verimi için ANOVA testi sonuçları Çizelge 4.4'te sunulmaktadır.

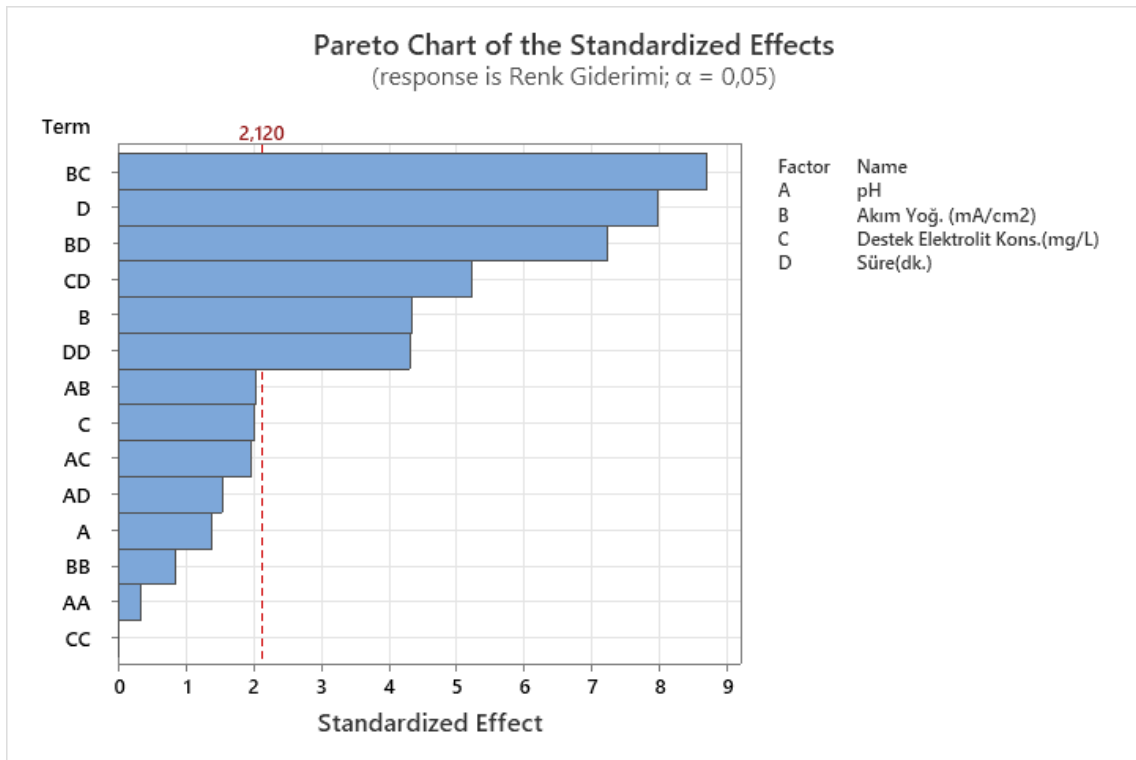
Çizelge 4.4. Renk giderim verimine ait ANOVA testi sonuçları

Varyans Analizi (ANOVA)					
Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-değeri (F-value)	P-değeri (P-value)
Model	14	600,150	42,868	22,71	0,000
Linear	4	166,802	41,701	22,10	0,000
pH	1	3,659	3,659	1,94	0,183
Akım Yoğ. (mA/cm ²)	1	35,526	35,526	18,82	0,001
Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	1	7,674	7,674	4,07	0,061
Süre(dk.)	1	119,943	119,943	63,55	0,000
Square	4	120,848	30,212	16,01	0,000
pH*pH	1	0,214	0,214	0,11	0,740
Akım Yoğ. (mA/cm ²)*Akım Yoğ. (mA/cm ²)	1	1,343	1,343	0,71	0,411
Destek Elektrolit Kons.(mg/l)* Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	1	0,001	0,001	0,00	0,984
Süre(dk.)*Süre(dk.)	1	34,994	34,994	18,54	0,001
2-Way Interaction	6	312,499	52,083	27,60	0,000
pH*Akım Yoğ. (mA/cm ²)	1	7,890	7,890	4,18	0,058
pH* Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	1	7,311	7,311	3,87	0,067
pH*Süre(dk.)	1	4,468	4,468	2,37	0,143
Akım Yoğ. (mA/cm ²)* Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	1	142,479	142,479	75,49	0,000
Akım Yoğ. (mA/cm ²)*Süre(dk.)	1	98,676	98,676	52,28	0,000
Destek Elektrolit Kons.(mg/l)*Süre(dk.)	1	51,675	51,675	27,38	0,000
Error	16	30,197	1,887		
Lack-of-Fit	10	30,197	3,020	*	*
Pure Error	6	0,000	0,000		
Total	30	630,347			

S:1,37380 **R-sq:** 95,21% **R-sq(adj):** 91,02%

Çizelge 4.4'te renk giderim verimi için YYY neticesinde önerilen quadratik modelin ANOVA tablosu yer almaktadır. Modellerin Fisher variation ratio (F) değeri renk giderimi için 22,71 olarak ölçülmüştür. Bu yüksek F değeri ile birlikte, P değerinin de renk giderim verimi modeli için 0,05'den küçük olması modellerin bir bütün halinde anlamlı olduğunu göstermektedir (Gönen & Aksu, 2008; Yıldız vd., 2014). P değerinin 0,1'den büyük olması anlamsız olduğunu ifade etmektedir (Bashir vd., 2010).

Pareto grafiği, en büyük etkiden en küçük etkiye doğru standartlaştırılmış etkilerin mutlak değerlerini gösterir. Grafik ayrıca hangi etkilerin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermek için bir referans çizgisi çizer (L. Wang vd., 2020). Yapılan çalışmada renk giderim verimi için standartlaştırılmış etkilerin mutlak değerini büyükten küçüğe doğru gösteren pareto grafiği Şekil 4.3'de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Renk giderim verimi için standartlaştırılmış pareto grafiği

Şekil 4.3 incelendiğinde pareto grafiği standartlaştırılmış etkilere ait referans çizgisi çizmektedir. Buna göre akım yoğunluğu*destek elektrolit konsantrasyonu, süre, akım yoğunluğu*süre, destek elektrolit konsantrasyonu*süre, akım yoğunluğu ve süre*süre

parametrelerinin standartlaştırılmış etkileri referans çizgisini geçmektedir. Yani bu terimler renk giderme verimliliği üzerinde istatistiksel olarak 0,05 düzeyinde anlamlıdır.

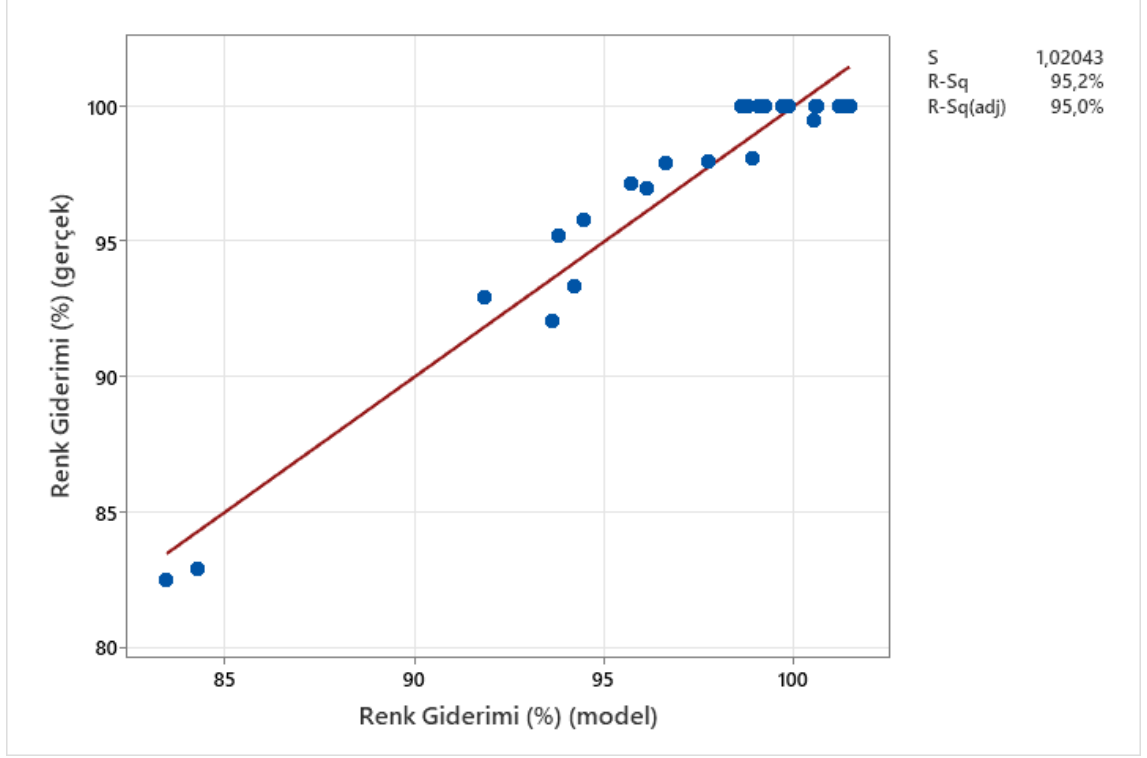
Yapılan çalışmada korelasyon katsayısı değeri (R^2) renk giderim verimi için % 95,21 olarak elde edilmiştir. Yüksek R^2 değeri, deney aralığında hesaplanan ve gözlemlenen sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu gösterir (Bashir vd., 2010). Buna göre toplam farklılığın renk giderimi için % 4,79 kısmının model ile açıklanamayabileceği anlamı taşımaktadır. Uyumlu bir model için R^2 değeri en az 0,80 olmalıdır. Modellerin yüksek R^2 değerine sahip olması sonuçların tutarlılığını göstermektedir (Nabavi vd., 2023).

Renk giderim verimi için Minitab tarafından kodlanmamış değerler ve kodlanmış değerler ile elde edilen modelin regresyon denklemi Eşitlik 4.1 ve 4.2'deki gibi bulunmuştur. Kodlanmış değerler pH (X_1), Akım yoğunluğu (mA/cm^2) (X_2), Destek elektrolit konsantrasyonu (mg/l) (X_3), Süre (dakika) (X_4) şeklindedir.

$$\begin{aligned} \text{Renk giderim verimi (\%)} = & 105,60 - 0,93 \text{ pH} + 0,111 \text{ Akım Yoğ. (mA/cm}^2) - 0,0290 \text{ Tuz} \\ & \text{Kons.(mg/l)} + 0,3438 \text{ Süre(dk.)} + 0,0319 \text{ pH*pH} - 0,00115 \text{ Akım Yoğ. (mA/cm}^2) * \text{Akım} \\ & \text{Yoğ. (mA/cm}^2) + 0,000000 \text{ Tuz Kons.(mg/l)*Tuz Kons.(mg/l)} - 0,001813 \\ & \text{Süre(dk.)*Süre(dk.)} - 0,00936 \text{ pH*Akım Yoğ. (mA/cm}^2) + 0,000451 \text{ pH*Tuz Kons.(mg/l)} \\ & + 0,00391 \text{ pH*Süre(dk.)} + 0,000239 \text{ Akım Yoğ. (mA/cm}^2) * \text{Tuz Kons.(mg/l)} - 0,002207 \\ & \text{Akım Yoğ. (mA/cm}^2) * \text{Süre(dk.)} + 0,000080 \text{ Tuz Kons.(mg/l)*Süre(dk.)} \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Renk giderim verimi (\%)} = & 105,60 - 0,93 X_1 + 0,111 X_2 - 0,0290 X_3 + 0,3438 X_4 + 0,0319 \\ & X_1 * X_1 - 0,00115 X_2 * X_2 + 0,000000 X_3 * X_3 - 0,001813 X_4 * X_4 - 0,00936 X_1 * X_2 + 0,000451 \\ & X_1 * X_3 + 0,00391 X_1 * X_4 + 0,000239 X_2 * X_3 - 0,002207 X_2 * X_4 + 0,000080 X_3 * X_4 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Şekil 4.4'te renk giderim verimi için, deneysel çalışmalar yoluyla elde edilen gerçek ve model ile tahmin edilen değerler arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 4.4. Renk giderim verimi için gerçek-model sonuçlarının karşılaştırması

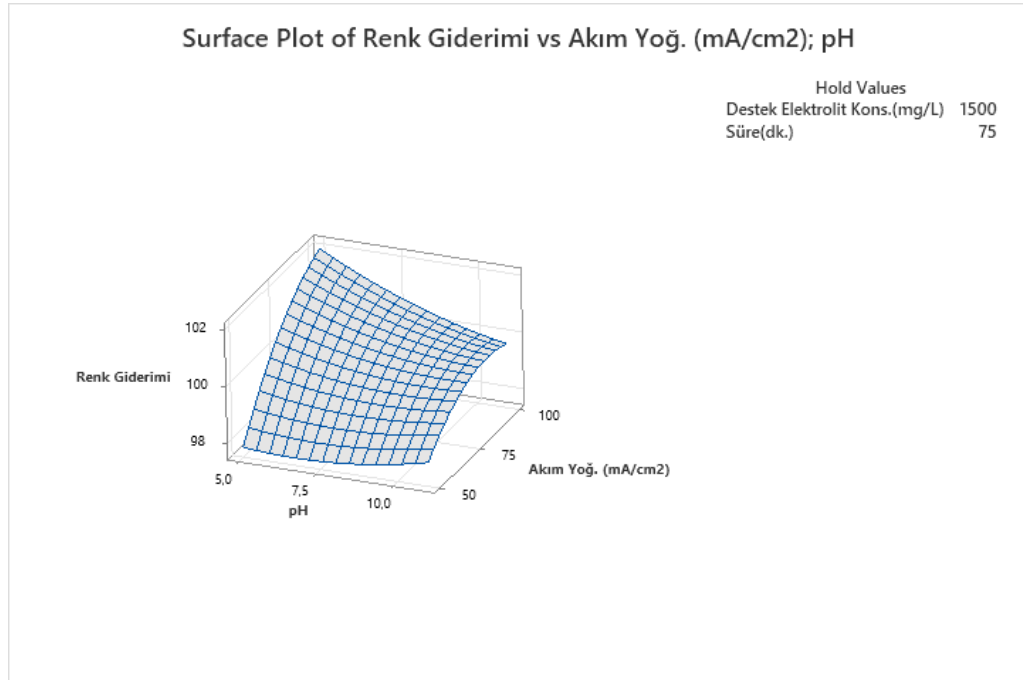
Görülebileceği gibi, tüm noktalar düz bir çizgiye yakın olduğundan, deneysel veriler oluşturulan ikinci dereceden model tarafından tahmin edilen değerlerle iyi bir uyum içindedir.

Bu istatistiksel değerlendirmelerin sonucuna göre, pH, destek elektrolit konsantrasyonu, akım yoğunluğu ve süre gibi bağımsız değişkenlerin belirli aralık değerleri dikkate alındığında, oluşturulan modelin renk giderimi verimini tahmin etmek için kullanılabilmesi sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, modelin oluşturulmasında kullanılan değişkenlerin önemli bir etkiye sahip olduğunu ve bu değişkenlerin doğru bir şekilde ayarlandığında renk giderimi verimini etkileyebileceğini göstermektedir. Bu bilgi, renk giderimi süreçlerinin optimize edilmesi ve verimliliğin artırılması için değerli bir araç sağlamaktadır.

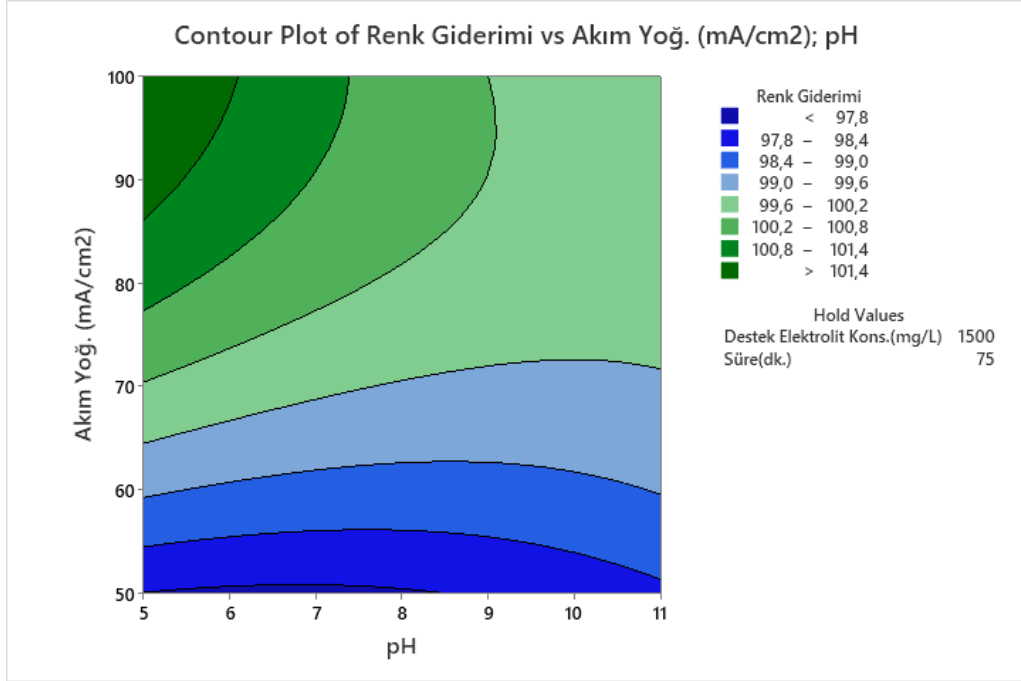
Yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri, Minitab Statistical Software 21.3 yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Bu grafiklerde iki parametre sabit tutularak diğer iki parametrenin renk giderim verimine etkisi gösterilmektedir.

Şekil 4.5 ve 4.6'daki yanıt yüzey ve kontur grafiklerinde destek elektrolit konsantrasyonunun 1500 mg/l ve sürenin 75 dk. olduğu koşullarda, renk giderim verimi üzerine pH ve akım yoğunluğu ilişkisi gösterilmektedir.

Şekil 4.5 ve 4.6 incelendiği zaman akım yoğunluğunun artmasıyla birlikte renk giderim veriminde artış gözlemlenmiş fakat giderim verimini çok fazla etkilememiştir. 50 mA/cm² akım yoğunluğunda ortalama % 98 olarak hesaplanan renk giderim verimliliği, 100 mA/cm² akım yoğunluğuna çıkıldığı zaman % 100 olarak ölçülmüştür. Jalife-Jacobo ve diğerleri yapmış oldukları çalışmada akım yoğunluğunun 7,5 mA/cm²'den 50 mA/cm²'ye çıkartılmasıyla beraber renk giderim verimi % 14'ten % 23'e çıkmıştır. Bu artışın düşük olduğunu belirtmişlerdir (Jalife-Jacobo vd., 2016). Bu çalışmada Jalife-Jacobo'nun yapmış oldukları çalışmaya paralellik göstermektedir. Buradaki artışın sebebi oksitleyici radikallerin artışı olarak düşünülmektedir (Günaşlan & Fil, 2023). YYY'nin vermiş olduğu model ve incelenen şekillere göre akım yoğunluğuna karşı, pH parametresi renk giderim verimi üzerine çok etkin bir parametre değildir.



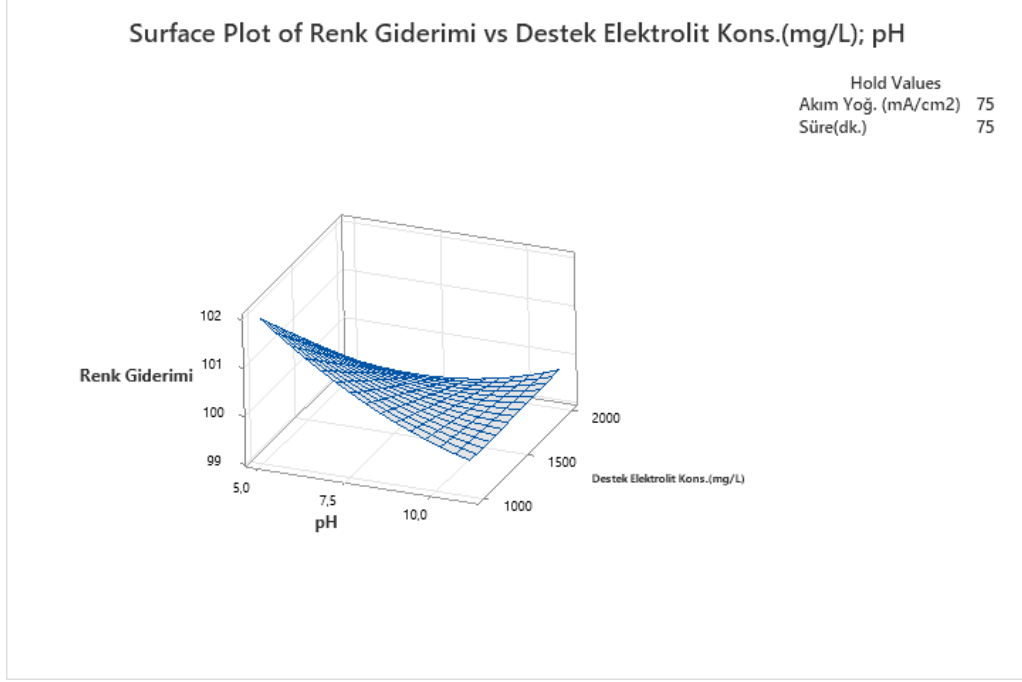
Şekil 4.5. Renk giderim verimi üzerine pH-akım yoğunluğu ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği



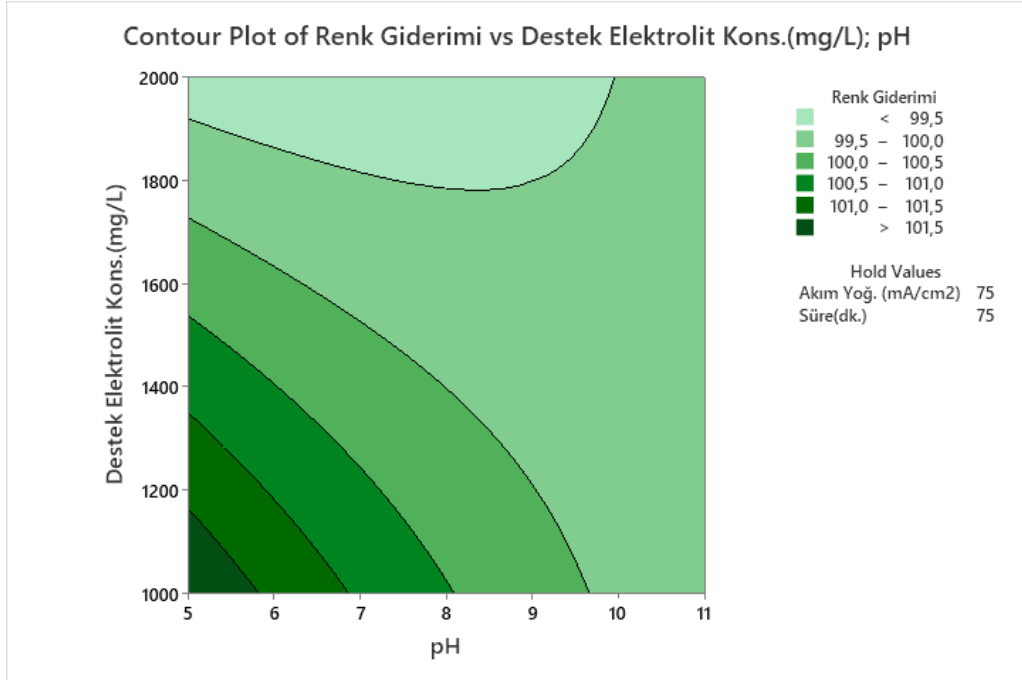
Şekil 4.6. Renk giderim verimi üzerine pH-akım yoğunluğu ilişkisine ait kontur grafiği

Şekil 4.7 ve 4.8'deki yanıt yüzey ve kontur grafiklerinde akım yoğunluğunun 75 mA/cm² ve sürenin 75 dk. olduğu koşullarda, renk giderim verimi üzerine pH ve destek elektrolit konsantrasyonu etkisi gösterilmektedir.

Şekiller incelendiği zaman 1000 mg/l destek elektrolit konsantrasyonu için pH 5, 8 ve 10 olduğu koşullarda renk giderim verimi sırasıyla % 100, % 100 ve % 99,70 olarak hesaplanmıştır. Destek elektrolit konsantrasyonu 1500 mg/l'ye çıkartıldığı zaman pH 5, 8 ve 11 olduğu koşullarında sonuçlar % 100, % 99,86 ve % 99,70 olarak hesaplanmaktadır. Destek elektrolit konsantrasyonunun 2000 mg/l'ye çıkartıldığında ise yine pH 5, 8, ve 11 koşullarında renk giderim verimleri sırasıyla % 99,26, % 99,23 ve % 99,74 olarak hesaplanmıştır. Buna göre pH ve destek elektrolit konsantrasyonu parametrelerinin ikili etkisinin renk giderim verimi üzerine etkisinin çok olmadığı yorumuna ulaşılmıştır.



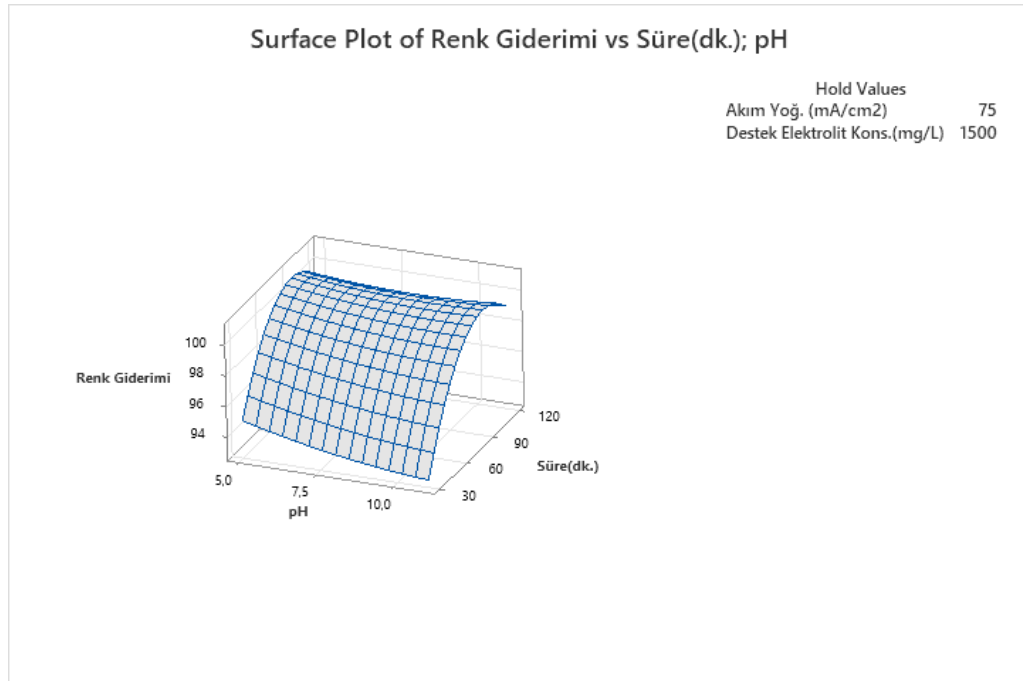
Şekil 4.7. Renk giderim verimi üzerine pH-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği



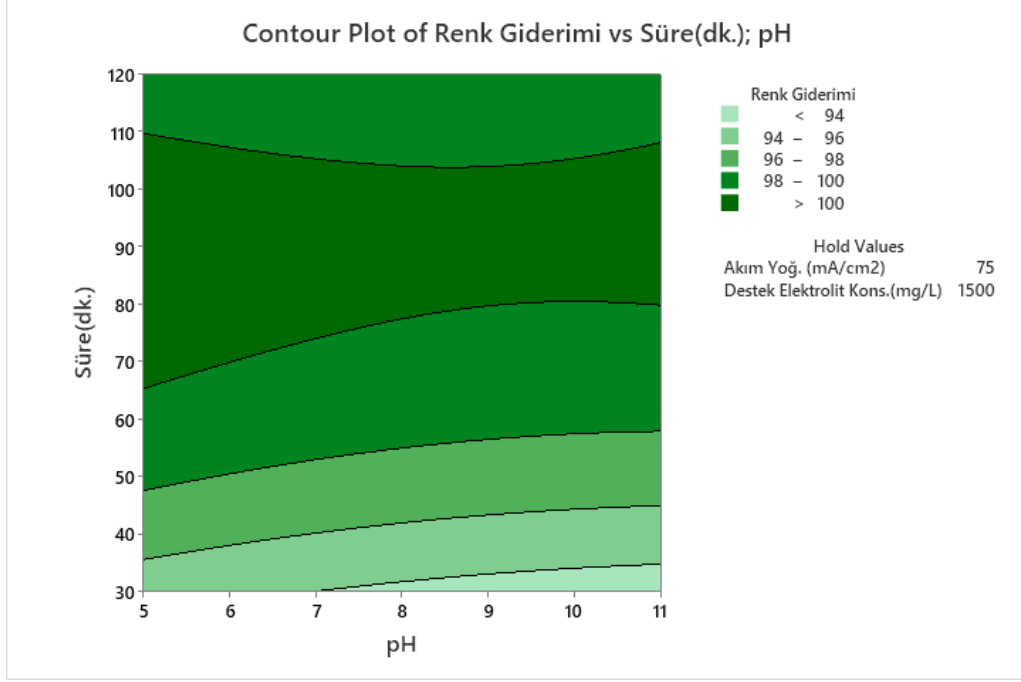
Şekil 4.8. Renk giderim verimi üzerine pH-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait kontur grafiği

Şekil 4.9 ve 4.10'daki yanıt yüzey ve kontur grafiklerinde akım yoğunluğunun 75 mA/cm² ve destek elektolit konsantrasyonunun 1500 mg/l olduğu koşullarda, renk giderim verimi üzerine pH ve süre etkisi gösterilmektedir.

Grafikler incelendiği zaman renk giderim veriminin süre artışıyla beraber artmış olduğu gözlemlenmektedir. Çalışmanın pH 5 koşullarında 30. dakikasında renk giderim verimi % 94,88 olarak hesaplanmışken bu değer çalışmanın 120. dakikasında % 100 olarak hesaplanmaktadır. Saleh vd. yaptıkları çalışmada da süre arttıkça renk giderim veriminin arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca onların çalışmasında da optimum süre 120 dk olarak tespit edilmiştir (Saleh vd., 2021). Yapılan bu çalışma Saleh vd. ile paralellik göstermektedir. Zamanın artışıyla beraber elektrotlar arasında üretilen oksidanların konsantrasyonları artmaktadır (Rajkumar & Muthukumar, 2017). İlerleyen sürelerdeki yüksek renk giderimi bundan dolayı olabilir. Yine grafikler incelendiği zaman 30 dakikada pH 5'de % 94,88 olan renk giderim verimi pH 11'de % 92,92 giderim verime düşmüştür. İhmal edilebilecek seviyede olan bu değişim renk giderim verimi üzerinde pH etkisinin az olduğunu ortaya koyabilmektedir.



Şekil 4.9. Renk giderim verimi üzerine pH-süre ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği

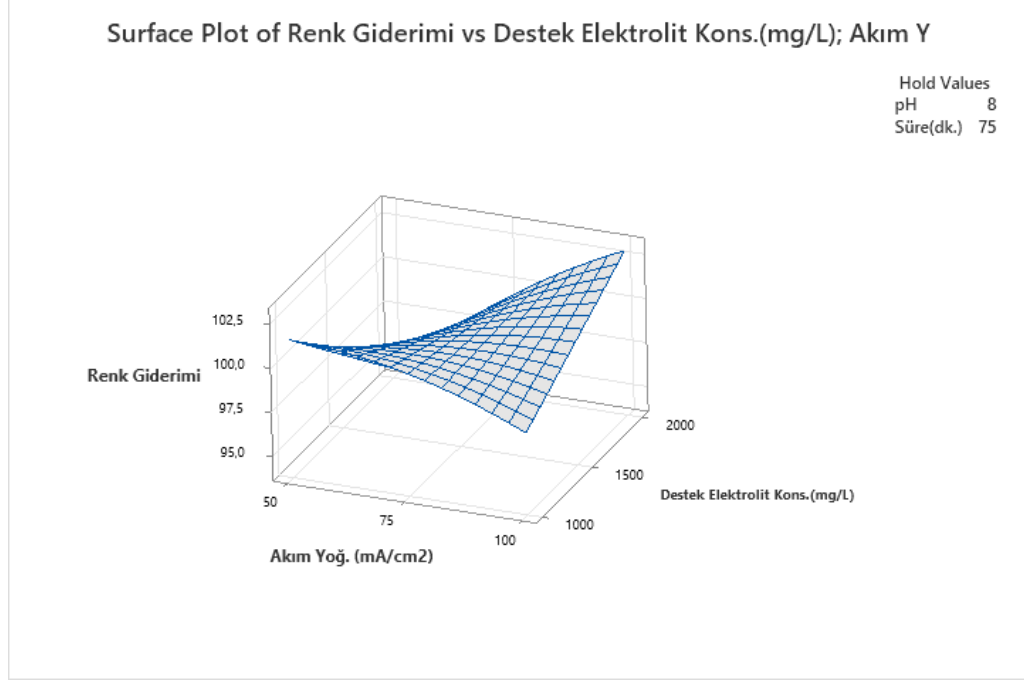


Şekil 4.10. Renk giderim verimi üzerine pH-süre ilişkisine ait kontur grafiği

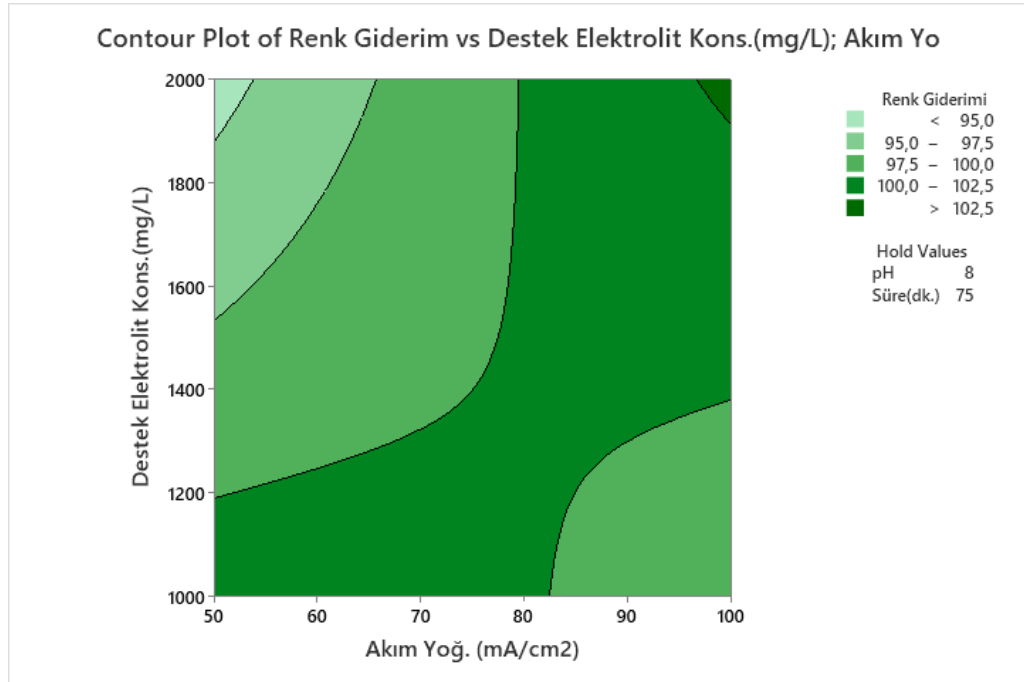
Şekil 4.11 ve 4.12'deki yanıt yüzey ve kontur grafiklerinde pH 8 ve sürenin 75 dakika olduğu koşullarda, renk giderim verimi üzerine destek elektrolit konsantrasyonu ve akım yoğunluğu üzerine etkisi gösterilmektedir.

Şekiller incelendiği zaman 1000 mg/l destek elektrolit konsantrasyonunda ve 50, 75 ve 100 mA/cm² akım yoğunluklarında renk giderim verimleri sırasıyla % 100, % 100 ve % 98,23 olarak hesaplanmıştır. 1500 mg/l destek elektrolit konsantrasyonunda ise renk giderim verimleri 50, 75 ve 100 mA/cm² koşullarında sırasıyla % 97,74, % 99,86 ve % 100 olarak hesaplanmıştır. Destek elektrolit konsantrasyonu 2000 mg/l'ye çıktığında renk giderimleri aynı akım yoğunlukları için % 94,12, % 99,23 ve % 100 olarak hesaplanmıştır. Buna göre akım yoğunluğunun artmasıyla beraber renk giderim verimi artmaktadır. Farizoglu vd. yaptıkları çalışmada akım yoğunluğunun renk giderim etkisini araştırmışlar ve 30 dakikalık elektrooksidasyon süresince akım yoğunluğunun 0,5 mA/cm²'den 1 mA/cm²'ye çıkardıkları zaman renk giderim veriminin % 89,96'dan % 99,67'ye artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Bunun sebebini ise daha yüksek akım yoğunluklarında klor/hipoklorit ve hidroksil radikalleri gibi oksidanların oluşum hızının artması nedeniyle olduğunu düşünmüşlerdir (Farizoğlu vd., 2018). Bu doktora

çalışmasında da akım yoğunluğu artışıyla beraber olan renk giderim verimindeki artışın benzer sebepten olduğu düşünülmektedir.



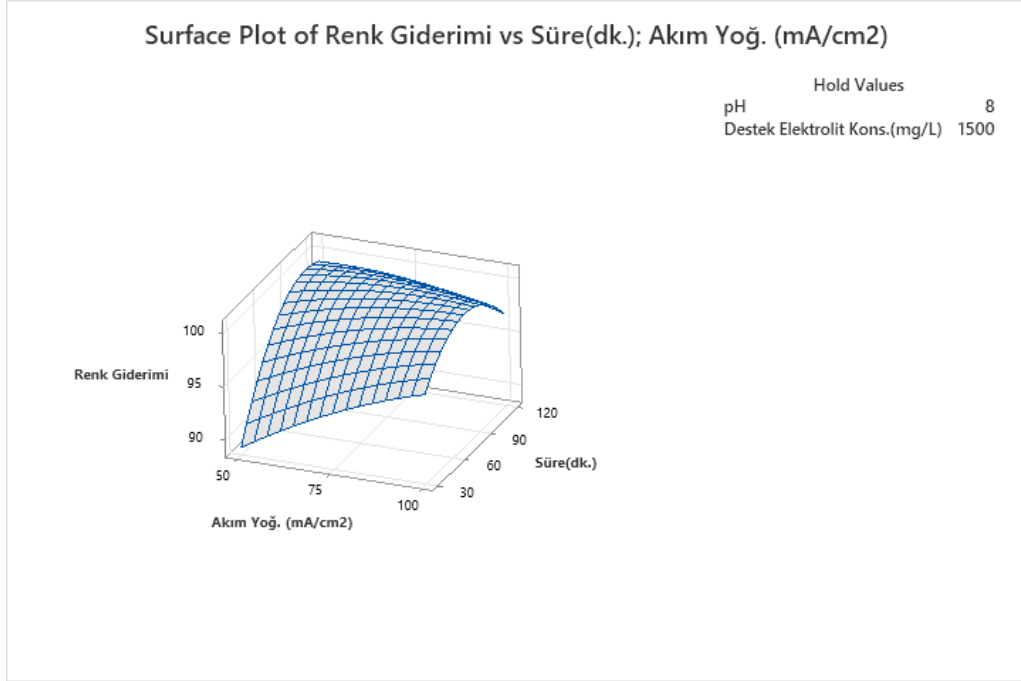
Şekil 4.11. Renk giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği



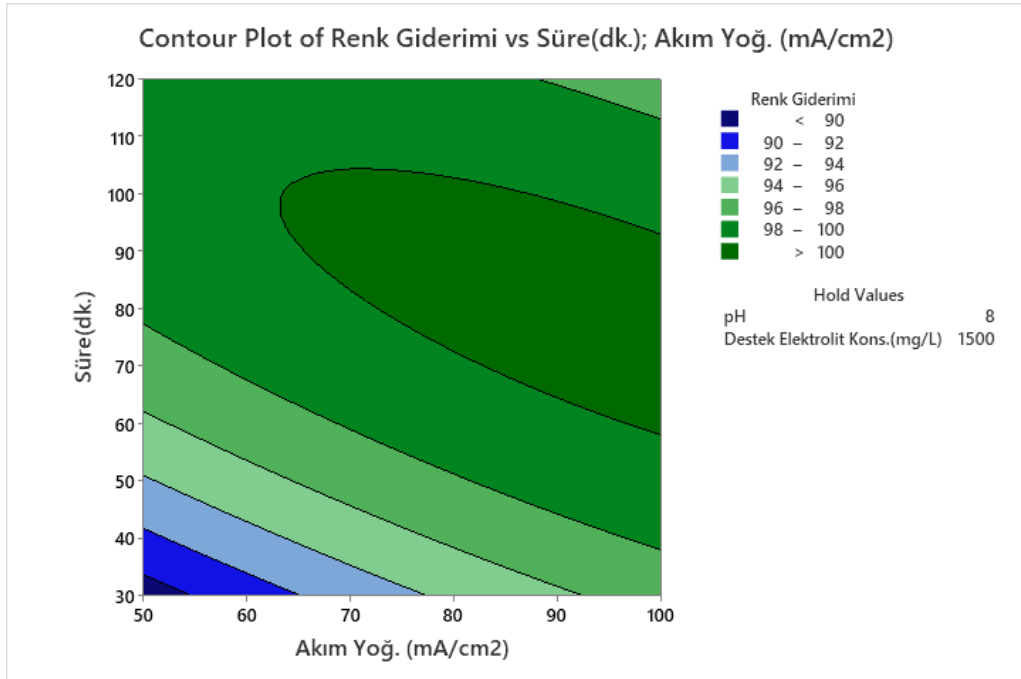
Şekil 4.12. Renk giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait kontur grafiği

Şekil 4.13 ve 4.14'deki yanıt yüzey ve kontur grafiklerinde pH 8 ve destek elektrolit konsantrasyonunun 1500 mg/l olduğu koşullarda, renk giderim verimi üzerine destek elektrolit konsantrasyonu ve akım yoğunluğu üzerine etkisi gösterilmektedir.

Şekiller incelendiği zaman 50 mA/cm² akım yoğunluğunda sırasıyla 30, 75 ve 120 dakika sonrasında renk giderim verimleri sırasıyla, % 89, % 97,74 ve % 99,14 olarak hesaplanmıştır. Artan zaman ile beraber renk giderim veriminde artış görülmektedir. Saleh vd. yaptıkları çalışmada da süre arttıkça renk giderim veriminin arttığını tespit etmişlerdir (Saleh vd., 2021). Yapılan bu çalışma Saleh vd. ile paralellik göstermektedir. Zamanın artışıyla beraber elektrotlar arasında üretilen oksidanların konsantrasyonları artmaktadır (Rajkumar & Muthukumar, 2017). İlerleyen sürelerdeki yüksek renk giderimi bundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Akım yoğunluğunun 75 mA/cm² olması durumunda 30, 75 ve 120 dakika sonrasında renk giderim verimleri % 93,61 , % 99,81 ve % 98,78 olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde akım yoğunluğunun 100 mA/cm² olması durumunda renk giderim verimleri 30, 75 ve 120. dakika için sırasıyla, % 96,78, % 100 ve % 96,98 olarak hesaplanmıştır. Akım yoğunluğundaki artışla beraber renk giderim verimleri 75. dakikaya kadar artış gösterirken bu süreden sonra az miktarda da olsa azalma olmaktadır. Artan akım yoğunluğunda renk giderim verimindeki azalmanın sebebi ortam da var olan •OH radikalleri arasında oluşan parazit reaksiyonlar O₂ gazı oluşturabilir veya radikallerin dimerleşmesine neden olabilir. Bu durum •OH radikalının oksidatif halini olumsuz etkileyebilir (Yang vd., 2018). Hernández-Rodríguez vd. yaptıkları çalışmada artan akım yoğunluğu ile giderim verimlerinin düştüğünü ifade etmişlerdir (Hernández-Rodríguez vd., 2022).



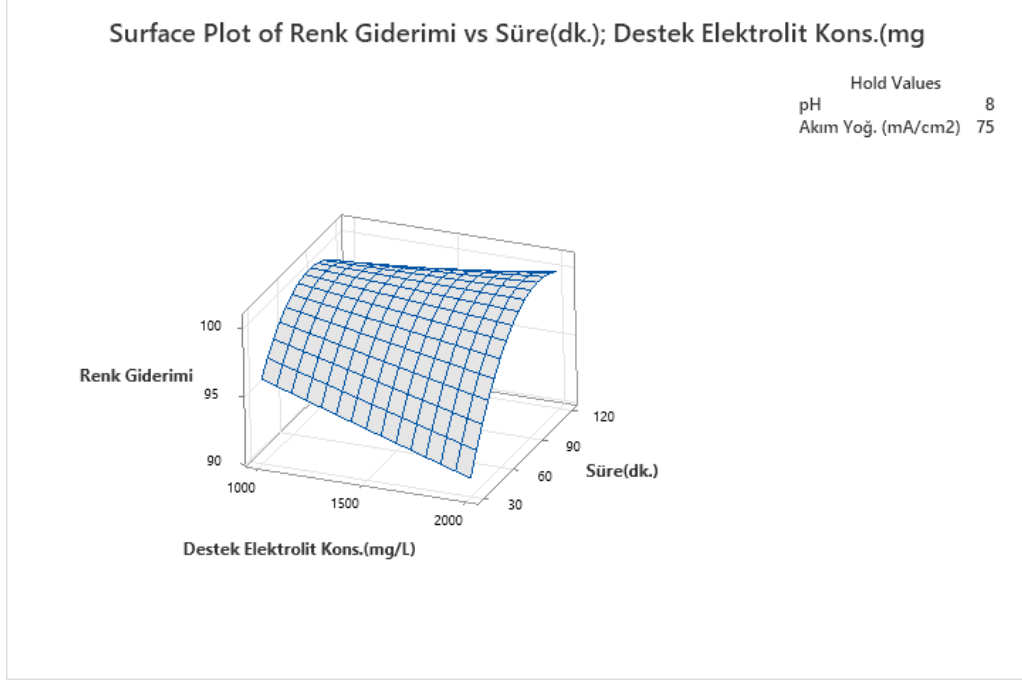
Şekil 4.13. Renk giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-süre ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği



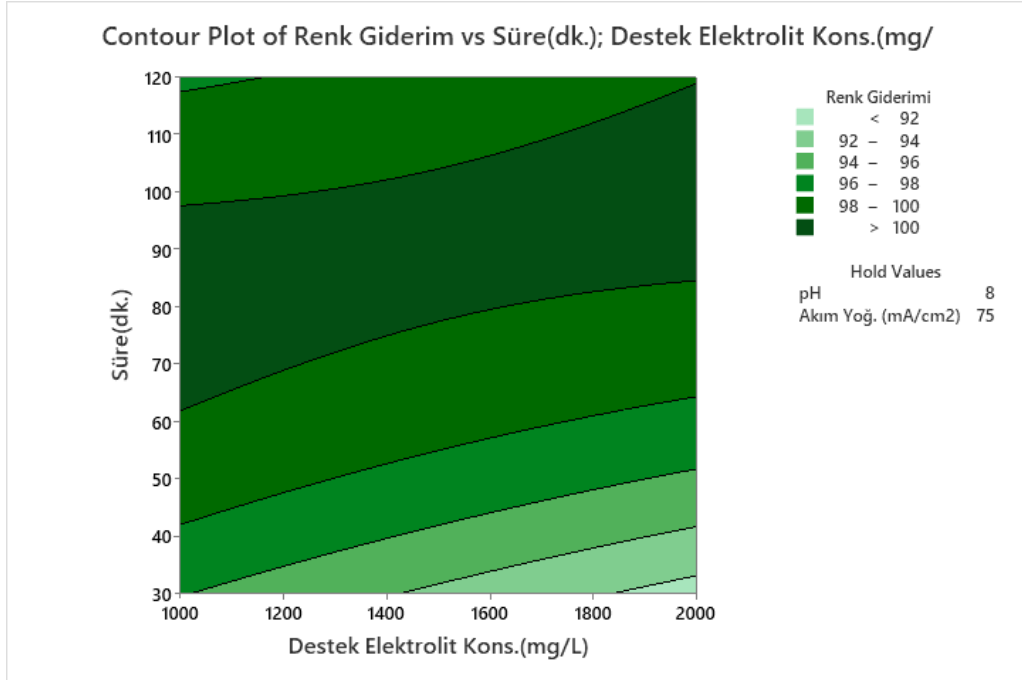
Şekil 4.14. Renk giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-süre ilişkisine ait kontur grafiği

Şekil 4.15 ve 4.16'deki yanıt yüzey ve kontur grafiklerinde pH 8 ve akım yoğunluğunun 75 mA/cm² olduğu koşullarda, renk giderim verimi üzerine destek elektrolit konsantrasyonu ve süre etkisi gösterilmektedir.

Şekiller incelendiği zaman, 1000 mg/l destek elektrolit konsantrasyonunda artan zaman süreleriyle beraber 30, 75 ve 120. dakikadaki renk giderim verimleri % 96,1, % 100 ve % 97,65 olarak hesaplanmıştır. Destek elektrolit konsantrasyonunun 1500 mg/l'ye çıkartılması durumunda renk giderim verimleri aynı zaman aralıklarında sırasıyla % 93,61, % 99,87 ve % 98,78 olarak hesaplanmıştır. Destek elektrolit konsantrasyonunun en üst seviyede denenmiş olduğu 2000 mg/l konsantrasyona çıkıldığı zaman 30, 75 ve 120 dakika süresi sonrasında renk giderim verimleri sırasıyla % 91,18, % 99,23 ve % 99,94 olarak hesaplanmıştır. Yüksek tuz konsantrasyonlarında sürenin artışıyla beraber renk giderim veriminde artış gözlemlenmektedir. Bunun sebebi daha önce açıklandığı gibi sürenin artmasıyla beraber ortamda oluşan oksidan miktarının artmasına bağlı olduğu düşünülmektedir (Farizoğlu vd., 2018; Rajkumar & Muthukumar, 2017). Destek elektrolit miktarı 1500 mg/l'ye kadar renk giderim verimini olumlu etkilerken, artan konsantrasyonlarla beraber olumsuz etkilemiştir. Bu durum katot yüzeyinin destek elektrolit ile kaplanmasıyla açıklanabilir. Çünkü destek elektrolit konsantrasyonu arttıkça, katot yüzeyinde •OH radikalleri oluşumunu engelleyebilir veya azaltabilir (Gazigil vd., 2023). Bu durumun renk giderim verimini olumsuz etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 4.15. Renk giderim verimi üzerine destek elektrolit konsantrasyonu-süre ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği



Şekil 4.16. Renk giderim verimi üzerine destek elektrolit konsantrasyonu-süre ilişkisine ait kontur grafiği

4.2.2. KOİ Giderimi

Denim yıkama suları neticesinde oluşan atıksuların elektrooksidasyon prosesiyle arıtılması ve geri kazanılması çalışması için, tekstil sektörü atıksularındaki büyük sorunlardan olan KOİ parametresinin yüzde giderimi için çalışmalar yapılmıştır. KOİ gideriminin yüzde performans değerlendirmesi Standart Metotlar 5220 D belirtilen kapalı reflux metodu kullanılarak yapılmıştır. Spektrofotometre yardımıyla 600 nm’de okumalar gerçekleştirilmiştir.

KOİ giderim verimine ait gösterilen sonuçlardan Minitab yardımıyla yapılan analiz sonucunda kodlanmış katsayılarına ait sonuçlar Çizelge 4.5’te verilmektedir.

Çizelge 4.5. KOİ giderim verimine ait kodlanmış katsayılar

Kodlanmış Katsayılar					
Terim	Katsayı (coef)	Se katsayısı (se coef)	T-değeri (T-Value)	P-değeri (P-value)	VIF
Sabit (Constant)	80,86	2,10	38,53	0,000	
pH	-0,46	1,67	-0,28	0,786	1,00
Akım Yoğ. (mA/cm ²)	0,36	1,67	0,22	0,830	1,00
Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	-7,08	1,67	-4,25	0,001	1,00
Süre(dk.)	25,70	1,67	15,41	0,000	1,00
pH*pH	26,12	4,39	5,95	0,000	2,91
Akım Yoğ. (mA/cm ²)*Akım Yoğ. (mA/cm ²)	-30,39	4,39	-6,92	0,000	2,91
Destek Elektrolit Kons.(mg/l)* Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	-18,51	4,39	-4,21	0,001	2,91
Süre(dk.)*Süre(dk.)	0,45	4,39	0,10	0,920	2,91
pH*Akım Yoğ. (mA/cm ²)	-0,69	1,77	-0,39	0,702	1,00
pH* Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	-0,84	1,77	-0,48	0,641	1,00
pH*Süre(dk.)	-1,03	1,77	-0,58	0,569	1,00
Akım Yoğ. (mA/cm ²)* Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	8,60	1,77	4,86	0,000	1,00
Akım Yoğ. (mA/cm ²)*Süre(dk.)	1,39	1,77	0,79	0,443	1,00
Destek Elektrolit Kons.(mg/l)*Süre(dk.)	-1,25	1,77	-0,71	0,489	1,00

KOİ giderim verimi üzerine etki eden parametrelerin önem seviyelerinin tespit edilmesi amacıyla modelde kullanılan her değişkenin model üzerine olan etkileri üzerindeki etkilerinin tespiti için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. KOİ giderim verimi için ANOVA testi sonuçları Çizelge 4.6’da sunulmaktadır.

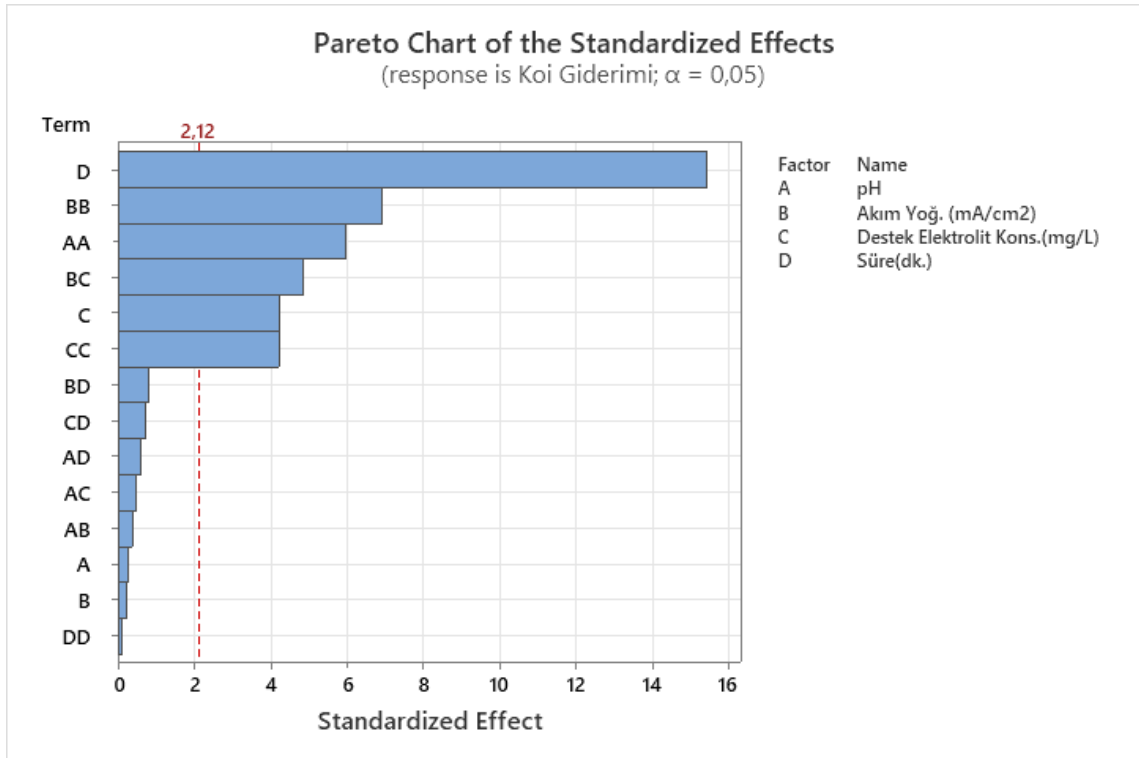
Çizelge 4.6. KOİ giderim verimine ait ANOVA testi sonuçları

Varyans Analizi (ANOVA)					
Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-değeri (F-value)	P-değeri (P-value)
Model	14	20732,2	1480,9	29,59	0,000
Linear	4	12794,6	3198,7	63,91	0,000
pH	1	3,8	3,8	0,08	0,786
Akım Yoğ. (mA/cm ²)	1	2,4	2,4	0,05	0,830
Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	1	902,3	902,3	18,03	0,001
Süre(dk.)	1	11886,2	11886,2	237,47	0,000
Square	4	6663,0	1665,7	33,28	0,000
pH*pH	1	1771,0	1771,0	35,38	0,000
Akım Yoğ. (mA/cm ²)*Akım Yoğ. (mA/cm ²)	1	2396,7	2396,7	47,88	0,000
Destek Elektrolit Kons.(mg/l)* Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	1	888,9	888,9	17,76	0,001
Süre(dk.)*Süre(dk.)	1	0,5	0,5	0,01	0,920
2-Way Interaction	6	1274,6	212,4	4,24	0,010
pH*Akım Yoğ. (mA/cm ²)	1	7,6	7,6	0,15	0,702
pH* Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	1	11,3	11,3	0,23	0,641
pH*Süre(dk.)	1	16,9	16,9	0,34	0,569
Akım Yoğ. (mA/cm ²)* Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	1	1182,8	1182,8	23,63	0,000
Akım Yoğ. (mA/cm ²)*Süre(dk.)	1	30,9	30,9	0,62	0,443
Destek Elektrolit Kons.(mg/l)*Süre(dk.)	1	25,1	25,1	0,50	0,489
Error	16	800,8	50,1		
Lack-of-Fit	10	795,3	79,5	85,47	0,000
Pure Error	6	5,6	0,9		
Total	30	21533,1			

S:7,07480 **R-sq:** 96.38% **R-sq(adj):** 93,03%

Çizelge 4.4'te renk giderim verimi için YYY neticesinde önerilen quadratik modelin ANOVA tablosu yer almaktadır. Modellerin Fisher variation ratio (F) değeri renk giderimi için 29,59 olarak ölçülmüştür. Bu yüksek F değeri ile birlikte, P değerinin de renk giderim verimi modeli için 0,05'den küçük olması modellerin bir bütün halinde anlamlı olduğunu göstermektedir (Gönen & Aksu, 2008; Yıldız vd., 2014). P değerinin 0,1'den büyük olması anlamsız olduğunu ifade etmektedir (Bashir vd., 2010).

Pareto grafiği, en büyük etkiden en küçük etkiye doğru standartlaştırılmış etkilerin mutlak değerlerini gösterir. Grafik ayrıca hangi etkilerin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermek için bir referans çizgisi çizer (L. Wang vd., 2020). Yapılan çalışmada renk giderim verimi için standartlaştırılmış etkilerin mutlak değerini büyükten küçüğe doğru gösteren pareto grafiği Şekil 4.17'de gösterilmektedir.



Şekil 4.17. KOİ giderim verimi için standartlaştırılmış pareto grafiği

Şekil 4.17 incelendiğinde pareto grafiği standartlaştırılmış etkilere ait referans çizgisi çizmektedir. Buna göre akım süre, akım yoğunluğu*akım yoğunluğu, pH*pH, akım yoğunluğu*destek elektrolit konsantrasyonu, destek elektrolit konsantrasyonu ve destek

elektrolit konsantrasyonu*destek elektrolit konsantrasyonu parametrelerinin standartlaştırılmış etkileri referans çizgisini geçmektedir. Yani bu terimler KOİ giderme verimliliği üzerinde istatistiksel olarak 0,05 düzeyinde anlamlıdır.

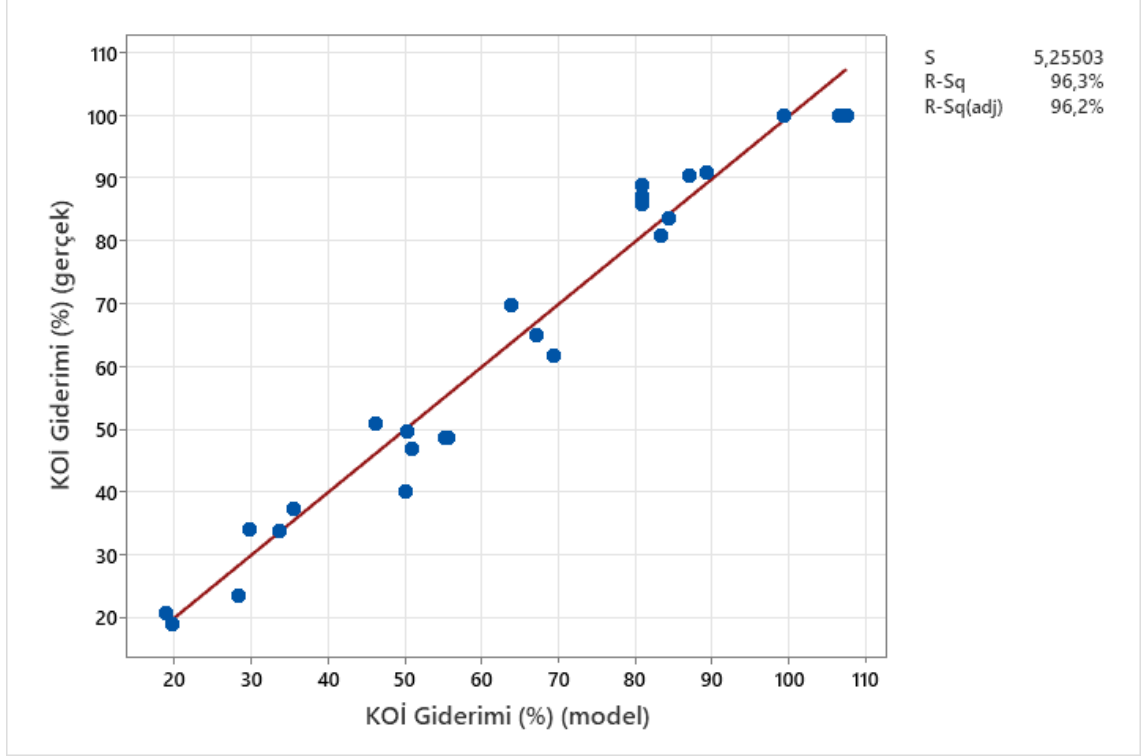
Yapılan çalışmada korelasyon katsayısı değeri (R^2) renk giderim verimi için % 96,28 olarak elde edilmiştir. Yüksek R^2 değeri, deney aralığında hesaplanan ve gözlemlenen sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu gösterir (Bashir vd., 2010). Buna göre toplam farklılığın renk giderimi için % 3,72 kısmının model ile açıklanamayabileceği anlamı taşımaktadır. Uyumlu bir model için R^2 değeri en az 0,80 olmalıdır. Modellerin yüksek R^2 değerine sahip olması sonuçların tutarlılığını göstermektedir (Nabavi vd., 2023).

KOİ giderim verimi için Minitab tarafından kodlanmamış değerler ve kodlanmış değerler ile elde edilen modelin regresyon denklemi Eşitlik 4.3 ve 4.4'deki gibi bulunmuştur. Kodlanmış değerler pH (X_1), Akım yoğunluğu (mA/cm^2) (X_2), Destek elektrolit konsantrasyonu (mg/l) (X_3), Süre (dakika) (X_4) şeklindedir.

$$\begin{aligned} \text{KOİ giderim verimi (\%)} = & -132,4 - 44,49 \text{ pH} + 6,26 \text{ Akım Yoğ. (mA/cm}^2) + 0,1650 \text{ Destek} \\ & \text{Elektrolit Kons. (mg/l)} + 0,589 \text{ Süre (dk.)} + 2,903 \text{ pH*pH} - 0,04862 \text{ Akım Yoğ.} \\ & \text{(mA/cm}^2) * \text{Akım Yoğ. (mA/cm}^2) - 0,000074 \text{ Destek Elektrolit Kons. (mg/l) * Destek} \\ & \text{Elektrolit Kons. (mg/l)} + 0,00022 \text{ Süre (dk.) * Süre (dk.)} - 0,0092 \text{ pH * Akım Yoğ. (mA/cm}^2) \\ & - 0,00056 \text{ pH * Destek Elektrolit Kons. (mg/l)} - 0,0076 \text{ pH * Süre (dk.)} + 0,000688 \text{ Akım Yoğ.} \\ & \text{(mA/cm}^2) * \text{Destek Elektrolit Kons. (mg/l)} + 0,00124 \text{ Akım Yoğ. (mA/cm}^2) * \text{Süre (dk.)} - \\ & 0,000056 \text{ Destek Elektrolit Kons. (mg/l) * Süre (dk.)} \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \text{KOİ giderim verimi (\%)} = & -132,4 - 44,49 (X_1) + 6,26 (X_2) + 0,1650 (X_3) + 0,589 (X_4) + \\ & 2,903 (X_1) * (X_1) - 0,04862 (X_2) * (X_2) - 0,000074 (X_3) * (X_3) + 0,00022 (X_4) * (X_4) - 0,0092 \\ & (X_1) * (X_2) - 0,00056 (X_1) * (X_3) - 0,0076 (X_1) * (X_4) + 0,000688 (X_2) * (X_3) + 0,00124 \\ & (X_2) * (X_4) - 0,000056 (X_3) * (X_4) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Şekil 4.18'te KOİ giderim verimi için, deneysel çalışmalar yoluyla elde edilen gerçek ve model ile tahmin edilen değerler arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 4.18. KOİ giderim verimi için gerçek-model sonuçlarının karşılaştırması

Görülebileceği gibi, tüm noktalar düz bir çizgiye yakın olduğundan, deneysel veriler oluşturulan ikinci dereceden model tarafından tahmin edilen değerlerle iyi bir uyum içindedir.

Bu istatistiksel değerlendirmelerin sonucuna göre, pH, destek elektrolit konsantrasyonu, akım yoğunluğu ve süre gibi bağımsız değişkenlerin belirli aralık değerleri dikkate alındığında, oluşturulan modelin KOİ giderimi verimini tahmin etmek için kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, modelin oluşturulmasında kullanılan değişkenlerin önemli bir etkiye sahip olduğunu ve bu değişkenlerin doğru bir şekilde ayarlandığında KOİ giderimi verimini etkileyebileceğini göstermektedir. Bu bilgi, KOİ giderimi süreçlerinin optimize edilmesi ve verimliliğin artırılması için değerli bir araç sağlamaktadır.

Yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri, Minitab Statistical Software 21.3 yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Bu grafiklerde iki parametre sabit tutularak diğer iki parametrenin KOİ giderim verimine etkisi gösterilmektedir.

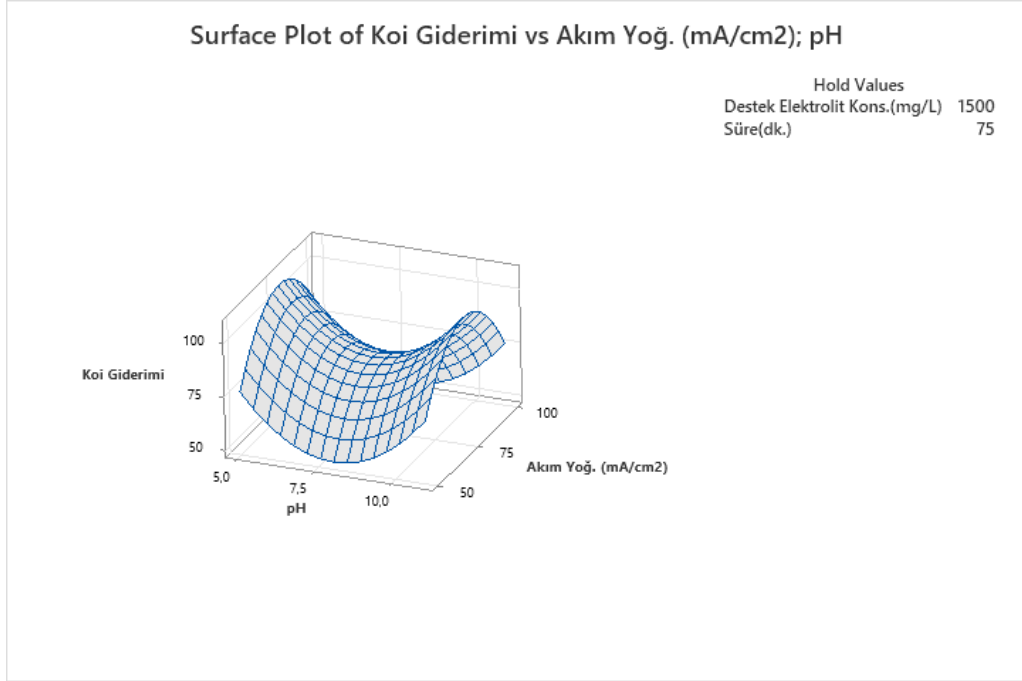
Şekil 4.19 ve 4.20'deki yanıt yüzey ve kontur grafiklerinde destek elektrolit konsantrasyonunun 1500 mg/l ve sürenin 75 dk. olduğu koşullarda, KOİ giderim verimi üzerine pH ve akım yoğunluğu ilişkisi gösterilmektedir.

Şekiller incelendiği zaman 50 mA/cm² akım yoğunluğunda pH 5, 8 ve 11 olduğu koşullarda KOİ giderim verimleri sırasıyla % 75,96, % 50,10 ve % 76,46 olarak hesaplanmıştır. Akım yoğunluğu 75 mA/cm²'ye yükseltildiğinde KOİ giderim verimleri pH 5,8 ve 11 olduğu şartlarda % 100, % 80,86 ve % 100 olarak bulunmuştur. 100 mA/cm² akım yoğunluğunda aynı pH şartlarında giderim verimleri ise % 78,10, % 50,83 ve % 75,80 olarak hesaplanmıştır. Buna göre asidik ve bazik koşullar altında daha yüksek KOİ giderim verimleri elde edildiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi elektrokimyasal oksidasyonda klorürün farklı formlara dönüşmesi olabilir (S. Periyasamy & Muthuchamy, 2018). Bu formlar hipoklorit, klor iyonu, klor gazı ve klorat gibi klorür bileşikleridir (Darvishmotevalli vd., 2019).

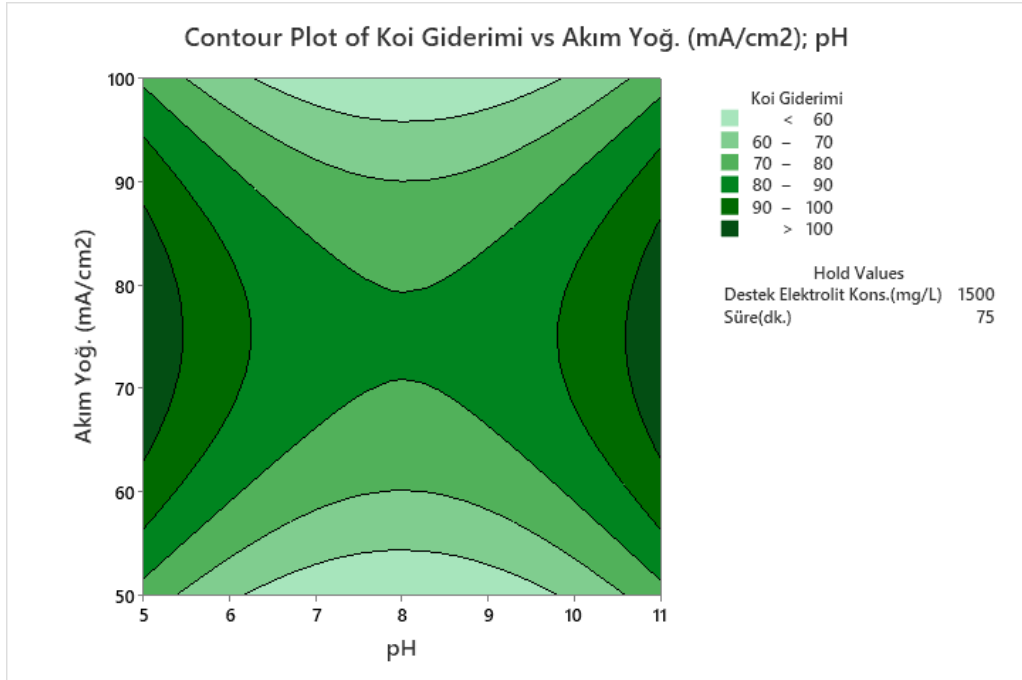


Yapılan çalışmalarda hem alkali hem de asidik koşullarda KOİ giderimi için uygun olduğunu tespit etmişlerdir. Hatta bazı çalışmalar nötr koşullarda da renk ve KOİ gideriminin yüksek olacağını tespit etmiştir (Darvishmotevalli vd., 2019; Isik vd., 2020; Liu vd., 2005).

Çalışma sırasında akım yoğunluğunun artışıyla beraber KOİ giderim verimleri 75 mA/cm²'ye kadar artış gösterirken sonrasında olan artışlarda KOİ giderim verimleri düşmüştür. Artan akım yoğunluğunda KOİ giderim verimindeki azalmanın sebebi ortam da var olan •OH radikalleri arasında oluşan parazit reaksiyonlar O₂ gazı oluşturabilir veya radikallerin dimerleşmesine neden olabilir. Bu durum •OH radikalinin oksidatif halini olumsuz etkileyebilir (Yang vd., 2018). Hernández-Rodríguez vd. yaptıkları çalışmada artan akım yoğunluğu ile giderim verimlerinin düştüğünü ifade etmişlerdir (Hernández-Rodríguez vd., 2022).



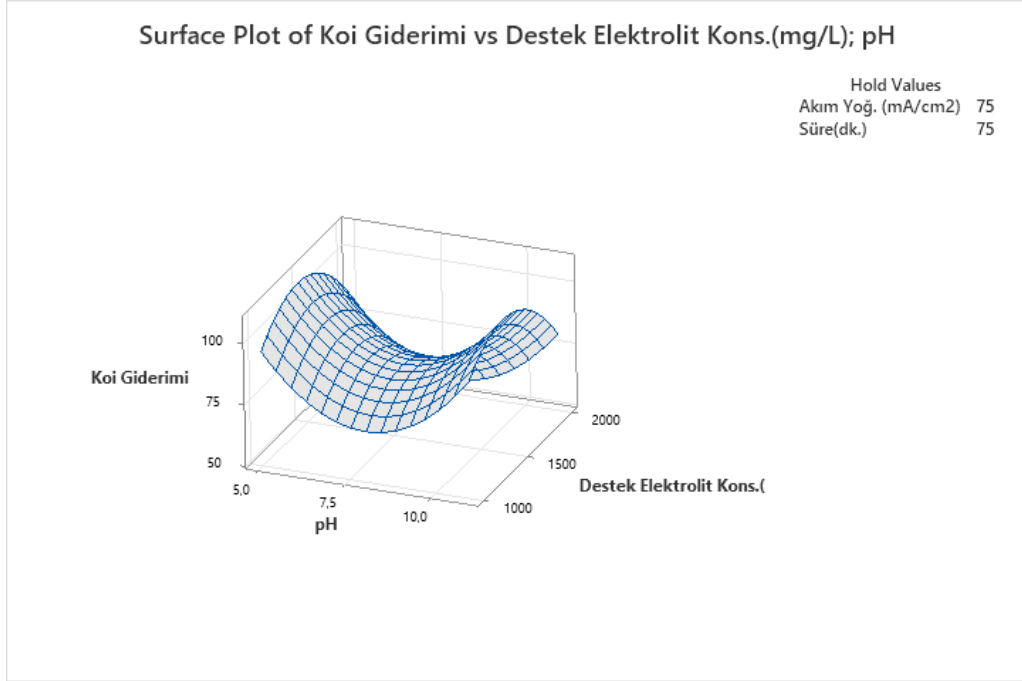
Şekil 4.19. KOİ giderim verimi üzerine pH-akım yoğunluğu ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği



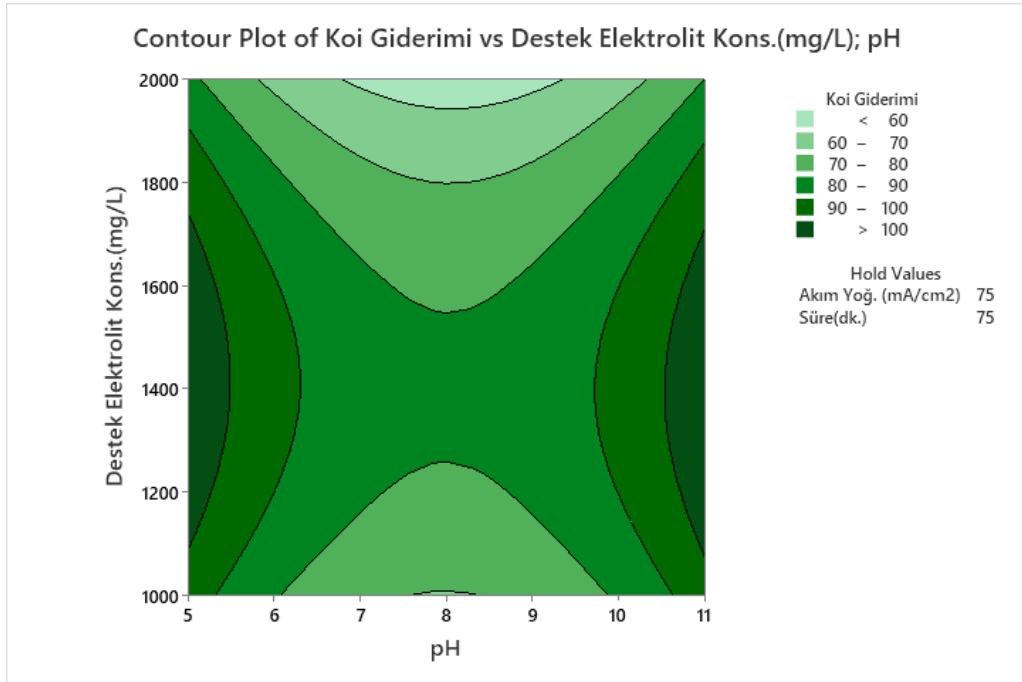
Şekil 4.20. KOİ giderim verimi üzerine pH-akım yoğunluğu ilişkisine ait kontur grafiği

Şekil 4.21 ve 4.22'deki yanıt yüzey ve kontur grafiklerinde akım yoğunluğunun 75 mA/cm² ve sürenin 75 dakika olduğu koşullarda, KOİ giderim verimi üzerine pH ve destek elektrolit ilişkisini gösterilmektedir.

Şekil 4.21 ve 4.22 incelendiği zaman, destek elektrolit konsantrasyonunun 1000 mg/l olduğu koşullarda pH konsantrasyonu 5,8 ve 11 olduğu şartlarda KOİ giderim verimleri % 95,17, % 69,43 ve % 95,93 olarak hesaplanmıştır. Destek elektrolit konsantrasyonu 1500 mg/l'ye yükseltildiğinde aynı üç noktadaki pH değerlerinde KOİ giderim verimleri % 100, % 80,86 ve % 100 olarak tahmin edilmektedir. Destek elektrolit konsantrasyonu için en yüksek değer olan 2000 mg/l şartlarında pH 5, 8 ve 11 için KOİ giderim verimleri % 82,69, % 55,27 ve % 80,1 olarak hesaplanmıştır. En yüksek giderim verimlerine pH 5 ve 11 şartlarında ulaşılmıştır. Bunun sebebi elektrokimyasal oksidasyonda klorürün farklı formlara dönüşmesi olabileceği düşünülmektedir (S. Periyasamy & Muthuchamy, 2018). Destek elektrolit konsantrasyonu pH 8 şartlarında 1000 mg/l'den 1500 mg/l'ye çıkartıldığı zaman KOİ giderim verimi % 69,43'ten % 80,86'ya artmaktadır fakat destek elektrolit konsantrasyonunun 1500 mg/l'den 2000 mg/l'ye doğru olan artış esnasında KOİ giderim verimi % 55,27'ye azalmaktadır. Bu durumun konsantrasyon arttıkça elektrolit çiftlerinin kaplanmasından veya yüksek tuz konsantrasyonu reaktörü terk eden klorür gazı üretimine yol açtığından kaynaklı olabileceği düşünülmüştür (Gazigil vd., 2023; Panizza & Cerisola, 2006). Optimum destek elektrolit konsantrasyonunun belirlenmesi KOİ giderimi için etkili olduğu kadar enerji tüketimi içinde önemlidir (S. Periyasamy & Muthuchamy, 2018).



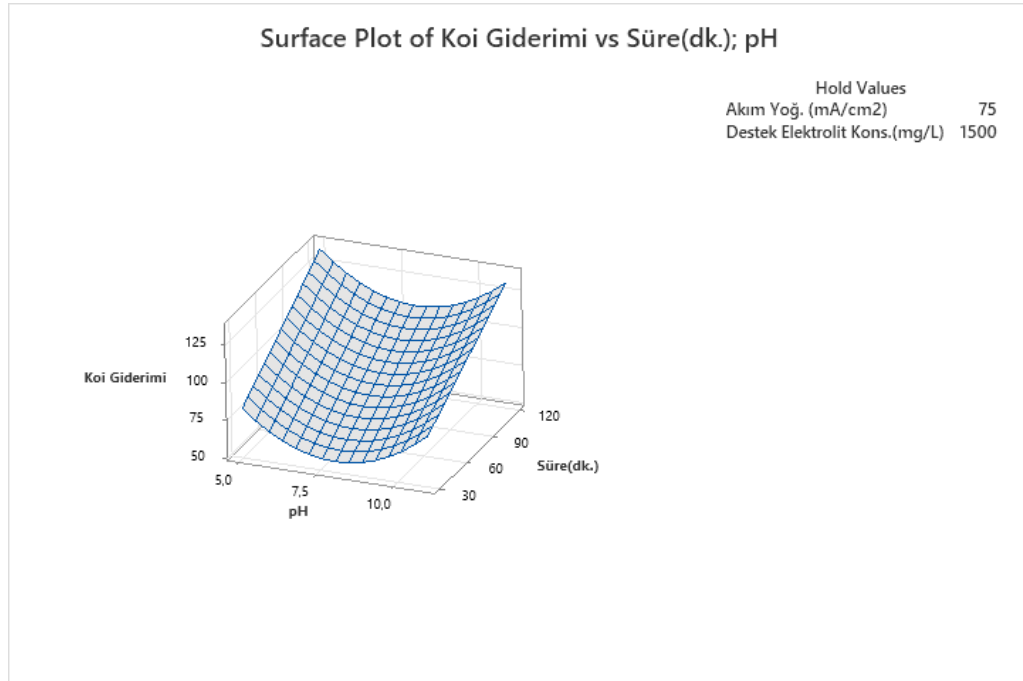
Şekil 4.21. KOİ giderim verimi üzerine pH-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği



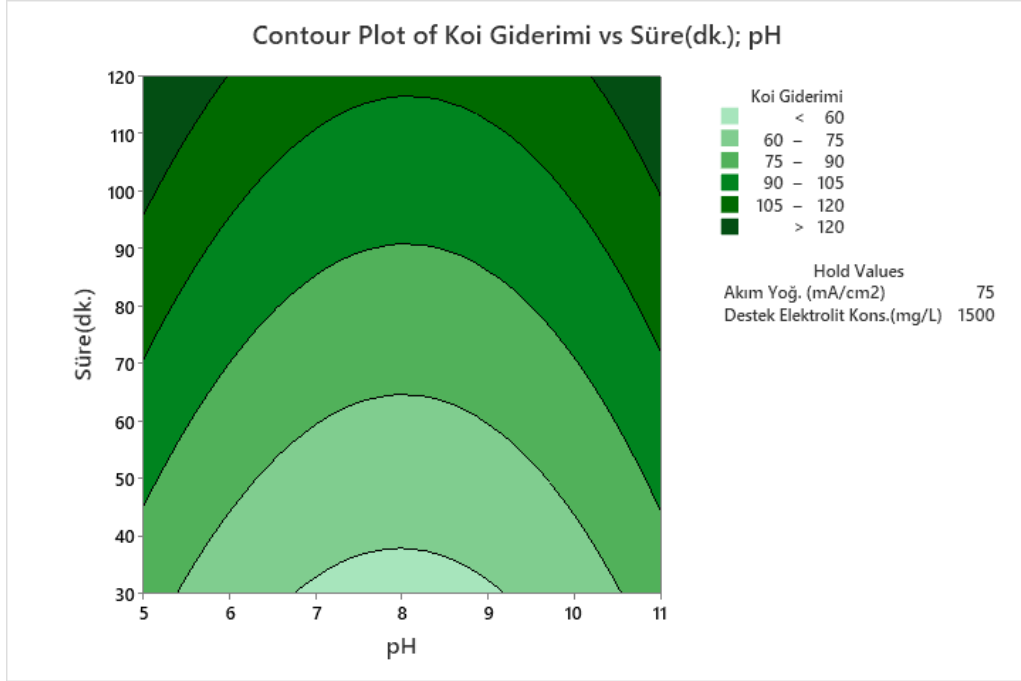
Şekil 4.22. KOİ giderim verimi üzerine pH-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait kontur grafiği

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'deki yanıt yüzey ve kontur grafiklerinde akım yoğunluğunun 75 mA/cm² ve destek elektrolit konsantrasyonunun 1500 mg/l olduğu koşullarda, KOİ giderim verimi üzerine pH ve süre ilişkisini gösterilmektedir.

pH 5 şartlarında sürenin 30,75 ve 120 dakika olduğu durumda KOİ giderim verimleri sırasıyla % 81,16, % 100 ve % 100 olarak hesaplanmıştır. pH 8'e yükseltildiği zaman çalışmanın 30, 75 ve 120. dakikalarında hesaplanan KOİ giderim verimi % 55,61, % 80,86 ve % 100'dür. pH 11 olduğu koşullarda aynı süre aralıkları içerisinde KOİ giderim verimleri sırasıyla % 82,30, % 100 ve % 100 olarak hesaplanmıştır. KOİ giderim verimi üzerine pH etkisi diğer grafiklerde açıklandığı gibi asidik ve bazik şartlarda daha etkilidir. Saleh vd. yaptıkları çalışmada da süre arttıkça KOİ giderim veriminin arttığını tespit etmişlerdir (Saleh vd., 2021). Yapılan bu çalışmaya benzerlik gösteren başka bir araştırmaya ise Sanni ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmadır. Onlarda giderim süresinin artması ile KOİ giderme veriminin arttığını ortaya koymuşlardır (Sanni vd., 2022). Zamanın artışıyla beraber elektrotlar arasında üretilen oksidanların konsantrasyonları artmaktadır (Rajkumar & Muthukumar, 2017). İlerleyen sürelerdeki yüksek KOİ giderimi bundan dolayı olabilir.



Şekil 4.23. KOİ giderim verimi üzerine pH-süre ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği

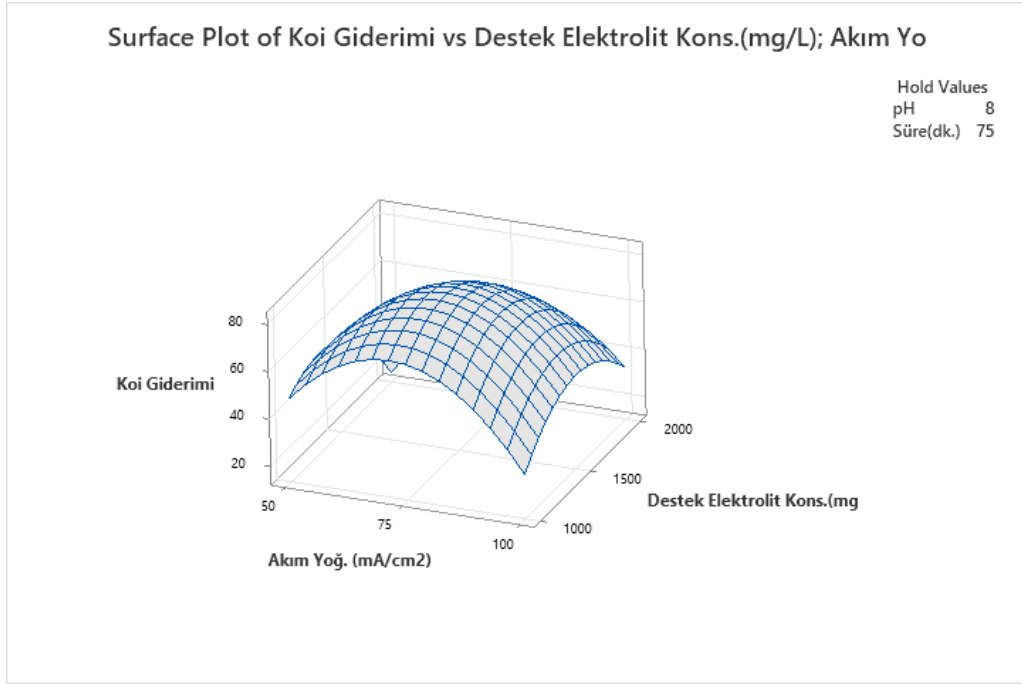


Şekil 4.24. KOİ giderim verimi üzerine pH-süre ilişkisine ait kontur grafiği

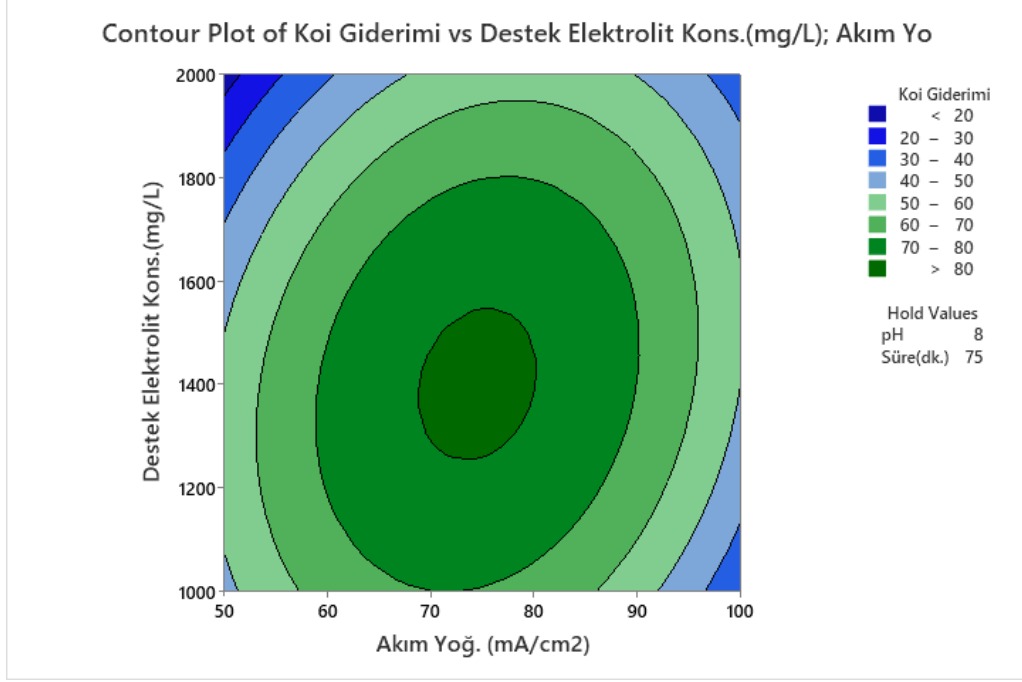
Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'daki yanıt yüzey ve kontur grafiklerinde pH 8 ve sürenin 75 dakika olduğu koşullarda, KOİ giderim verimi üzerine akım yoğunluğu ve destek elektrolit konsantrasyonunun etkisi gösterilmektedir.

Akım yoğunluğunun 50 mA/cm^2 olduğu koşullarda destek elektrolit konsantrasyonunun 1000, 1500 ve 2000 mg/l olması durumunda KOİ giderim verimi sırasıyla, % 42,27, % 50,10 ve % 15,92 olarak hesaplanmıştır. Şekillerde görülebileceği üzere akım yoğunluğunun 75 mA/cm^2 'ye çıkartılması durumunda en yüksek KOİ giderim verimlerine ulaşılmaktadır. Buna göre 1000, 1500 ve 2000 mg/l destek elektrolit konsantrasyonunda KOİ giderim verimleri, % 69,43, % 80,86 ve % 55,26 olarak hesaplanmıştır. Akım yoğunluğunun 100 mA/cm^2 'ye yükseltilmesi durumunda KOİ giderim verimlerinde düşüşler meydana gelmiştir. 1000, 1500 ve 2000 mg/l destek elektrolit konsantrasyonları için KOİ giderim verimleri % 30,80, % 50,83 ve % 33,84 olarak ölçülmektedir. Artan akım yoğunluğunda KOİ giderim verimindeki azalmanın sebebi ortam da var olan $\bullet\text{OH}$ radikalleri arasında oluşan parazit reaksiyonlar O_2 gazı oluşturabilir veya radikallerin dimerleşmesine neden olabilir. Bu durum $\bullet\text{OH}$ radikalının oksidatif halini olumsuz etkileyebilir (Yang vd., 2018). Hernández-Rodríguez vd. yaptıkları çalışmada artan akım yoğunluğu ile giderim verimlerinin düştüğünü ifade

etmişirler (Hernández-Rodríguez vd., 2022). Sonuçlar incelendiği zaman destek elektrolit konsantrasyonunun artışıyla birlikte KOİ giderim verimleri artarken bir noktadan sonra (1500 mg/l) azalmaktadır. Bu durumun sebebinde elektrolit çiftlerinin destek elektrolit ile kaplanması şeklinde olabileceği düşünülmektedir. Benzer durumların meydana geldiği çalışmalarda, konsantrasyon arttıkça elektrolit çiftlerinin kaplanmasından veya yüksek tuz konsantrasyonu rektörü terk eden klorür gazı üretimine yol açtığından kaynaklı olabileceği düşünülmüştür (Gazigil vd., 2023; Panizza & Cerisola, 2006).



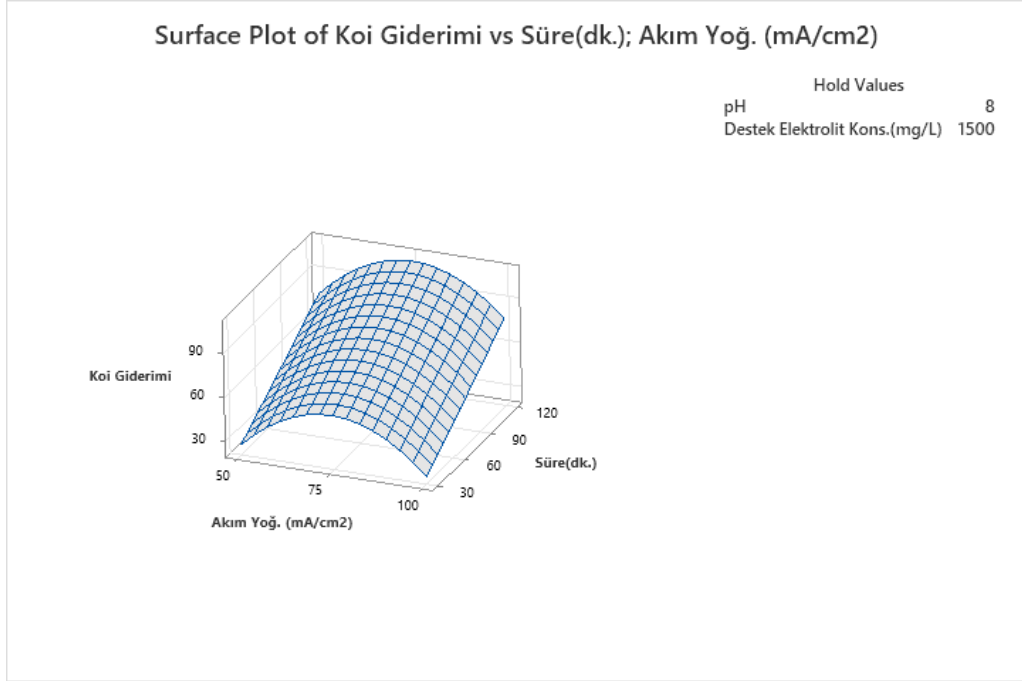
Şekil 4.25. KOİ giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği



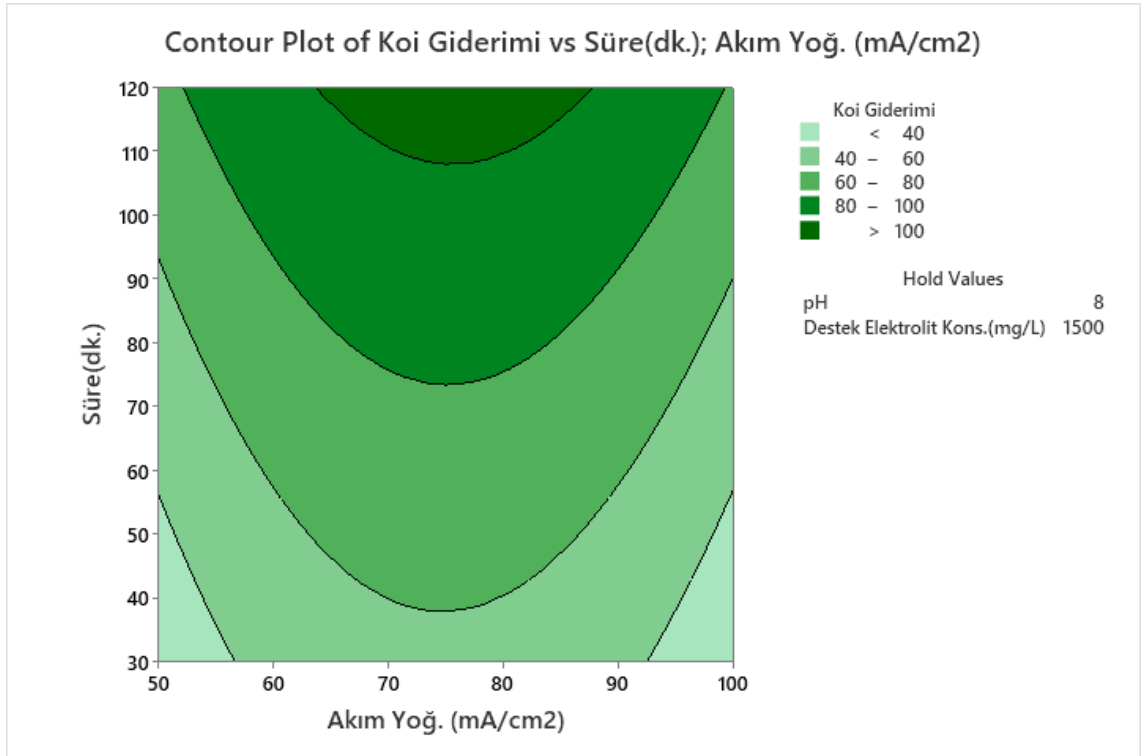
Şekil 4.26. KOİ giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-destek elektrolit konsantrasyonu ilişkisine ait kontur grafiği

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'deki yanıt yüzey ve kontur grafiklerinde pH 8 ve destek elektrolit konsantrasyonunun 1500 mg/l olduğu koşullarda, KOİ giderim verimi üzerine akım yoğunluğu ve sürenin etkisi gösterilmektedir.

Şekiller incelendiği zaman akım yoğunluğunun 50 mA/cm² olduğu koşullarda ilerleyen süre ile beraber KOİ giderim verimlerinin arttığı görülmektedir. 30,75 ve 120. dakikadaki KOİ giderim verimleri sırasıyla % 26,24, % 50,10 ve % 74,86 olarak hesaplanmıştır. 75 mA/cm² akım yoğunluğuna çıkıldığı zaman 30,75 ve 120 dakika süresince KOİ giderim verimleri % 55,61, % 80,86 ve % 100 olarak tespit edilmiştir. Akım yoğunluğunun 100 mA/cm²'ye çıkması durumunda KOİ giderim verimleri aynı sürelerde % 24,19, % 50,83 ve % 78,36 olarak hesaplanmaktadır. KOİ giderim verimi 75 mA/cm²'ye kadar artış gösterirken daha yüksek akım yoğunluklarında düşmüştür. Bunun sebebinin yine ortamda bulunan •OH radikalleri arasında oluşan reaksiyonlar ile açıklanabilir (Yang vd., 2018). Zamanın artışıyla beraber elektrotlar arasında üretilen oksidanların konsantrasyonları artmaktadır (Rajkumar & Muthukumar, 2017). İlerleyen sürelerdeki yüksek KOİ giderimi bundan dolayı olabilir.



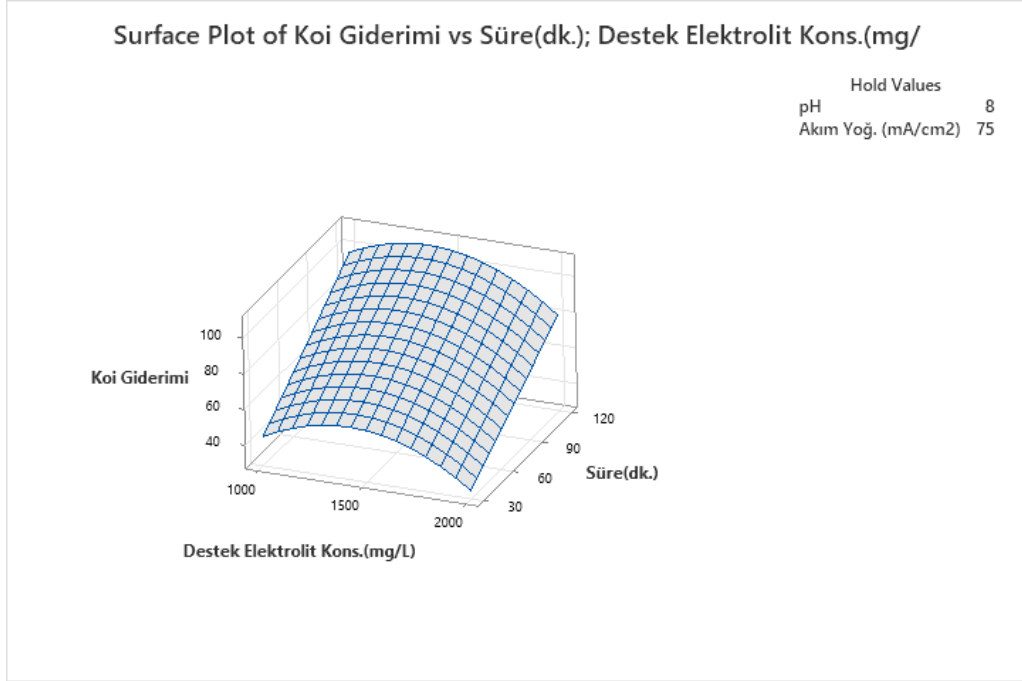
Şekil 4.27. KOİ giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-süre ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği



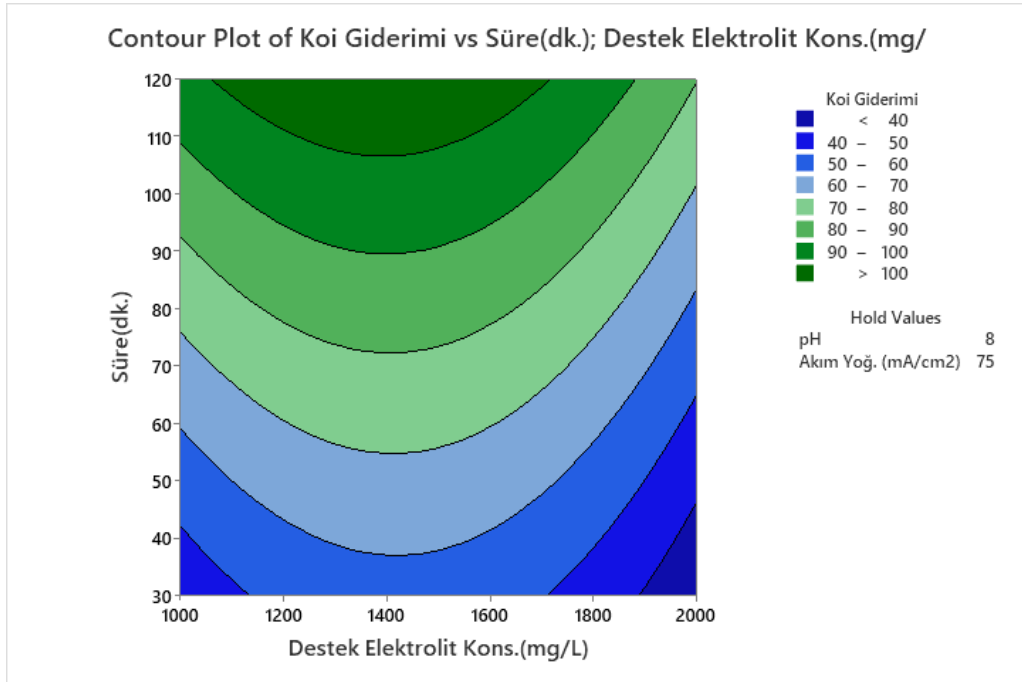
Şekil 4.28. KOİ giderim verimi üzerine akım yoğunluğu-süre ilişkisine ait kontur grafiği

Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'daki yanıt yüzey ve kontur grafiklerinde pH 8 ve destek elektrolit konsantrasyonunun 1500 mg/l olduğu koşullarda, KOİ giderim verimi üzerine akım yoğunluğu ve sürenin etkisi gösterilmektedir.

Şekiller incelendiği zaman 1000 mg/l destek elektrolit konsantrasyonunda ilerleyen sürelerle birlikte KOİ giderim veriminde artış görülmektedir. 30, 75 ve 120. dakikada KOİ giderim verimleri % 42,93, % 69,43 ve % 96,82 olarak hesaplanmıştır. Destek elektrolit miktarı 1500 mg/l'ye çıkartıldığı zaman süreyle KOİ giderim verimleri % 55,61, % 80,86 ve % 100 olarak hesaplanmıştır. Destek elektrolit miktarının en yüksek seviyesi olan 2000 mg/l konsantrasyonda KOİ giderim verimleri 30, 75 ve 120. dakikalarda % 31,37, % 55,27 ve % 80,16 olarak tespit edilmiştir. KOİ gideriminde reaksiyon süresinin artmasıyla beraber giderim verimi artmıştır. Buna karşın destek elektrolit konsantrasyonunda, NaCl miktarı 1500 mg/l'ye kadar KOİ giderimini olumlu etkilerken, artan konsantrasyon ile birlikte olumsuz etkilenmiştir. Bu durum katot yüzeyinin destek elektrolit ile kaplanmasıyla açıklanabilir. Çünkü destek elektrolit konsantrasyonu arttıkça, katot yüzeyinde •OH radikalleri oluşumunu engelleyebilir veya azaltabilir (Gazigil vd., 2023). Bu durumun KOİ giderim verimini olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Sürenin artmasıyla beraber meydana gelen KOİ giderim verimindeki artış elektrotlar arasında üretilen oksidanların konsantrasyonları artmasıyla açıklanabilir (Rajkumar & Muthukumar, 2017).



Şekil 4.29. KOİ giderim verimi üzerine destek elektrolit konsantrasyonu-süre ilişkisine ait yanıt yüzey grafiği



Şekil 4.30. KOİ giderim verimi üzerine destek elektrolit konsantrasyonu-süre ilişkisine ait kontur grafiği

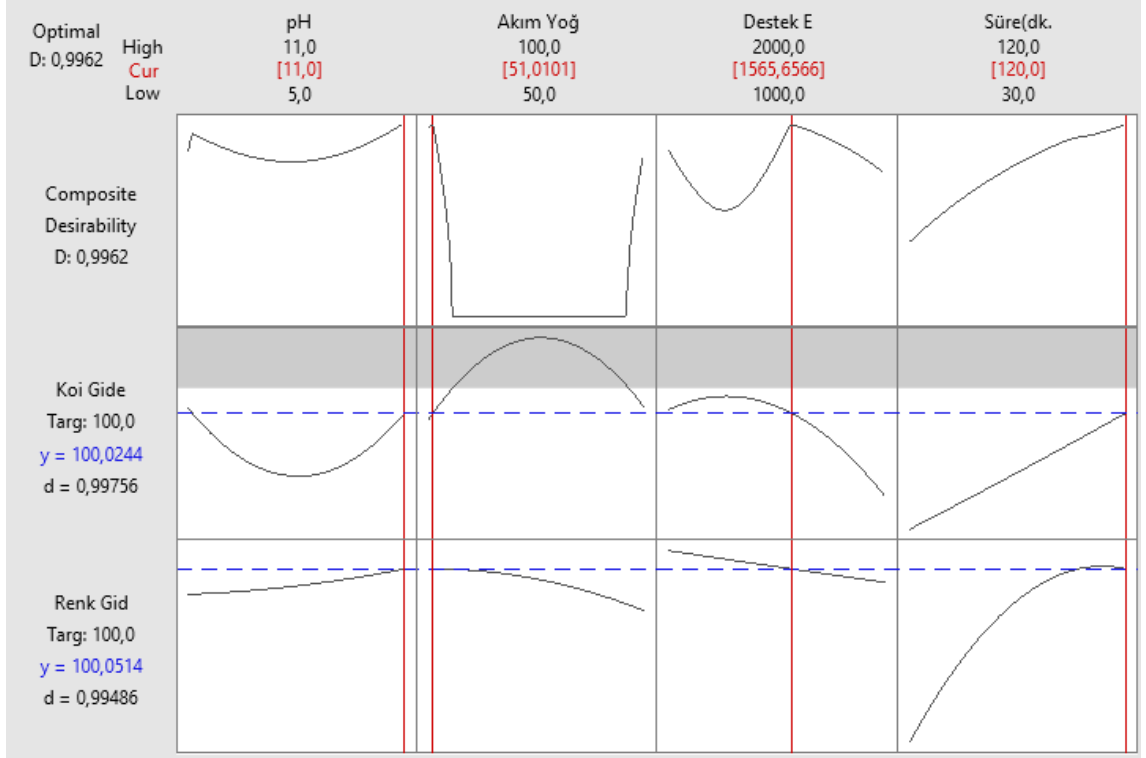
4.2.3. Proses optimizasyonu

Denim yıkama suları neticesinde oluşan atıksuların elektrooksidasyon prosesi ile renk ve KOİ giderimi için optimum işletme şartları seçilen kriterlere göre farklı senaryolar dahilinde belirlenerek optimize edilmiştir.

Optimizasyon çalışmasında bağımsız değişkenler olarak pH, destek elektrolit konsantrasyonu, akım yoğunluğu ve süre parametreleri belirlenmiştir. Bu değişkenler pH 8-11 aralığında, destek elektrolit konsantrasyonu 1000-2000 mg/l aralığında, akım yoğunluğu 50-100 mA/cm² aralığında ve süre 30-120 dakika aralığındadır. Minitab bilgisayar programıyla deneysel çalışmalar neticesinde elde edilerek analiz edilmiştir. Programdan 3 adet uygun çözüm üretmesi beklenmiştir. Optimizasyon için belirlenen hedef maksimum renk ve KOİ giderim verimi için % 100 olarak ayarlanmıştır. Minitab tarafından türetilen 3 adet optimum çözüm Çizelge 4.7’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.7. En iyi renk ve KOİ giderimi için optimizasyon çözümleri

Çözüm	pH	Akım Yoğ. (mA/cm ²)	Destek Elektrolit Kons.(mg/l)	Süre(dk.)	KOİ Giderimi Fit	Renk Giderimi Fit	İstenebilirlik
1	11	51,0101	1565,66	120	100,024	100,051	0,996208
2	11	50,1305	1000,94	120	99,758	101,364	0,927895
3	5	98,4401	1966,16	120	94,632	101,061	0,913612



Şekil 4.31. En iyi renk ve KOİ giderimi için optimizasyon çözümü

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.31’den de görülebileceği üzere istenebilirlik seviyesi en yüksek olan çözüm optimum çözüm olarak kabul edilmiştir. Destek elektrolit olarak seçilen NaCl ile yapılan deneyler sonucunda modelin optimum yanıtları; pH: 11, akım yoğunluğu: 51,01 mA/cm², destek elektrolit konsantrasyonu: 1565,66 mg/l ve süre: 120 dakika olarak belirlenmiştir. Optimum şartlar altında modelin vermiş olduğu renk ve KOİ giderim verimleri % 100’dür Bu sonucun onaylanması için belirlenen şartlarda yapılan deneysel çalışmalar 3 defa tekrarlanarak yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışma neticesinde neticesinde renk ve KOİ giderimi sırasıyla % 98,93 ve % 97,43’dır.

4.2.4. Enerji Tüketimi

Denim yıkama suları neticesinde oluşan atıksuların elektrooksidasyon prosesi ile renk ve KOİ giderimi için optimum işletme şartları optimize edilmiştir. Destek elektrolit olarak seçilen NaCl ile yapılan deneyler sonucunda modelin optimum yanıtları; pH: 11, akım yoğunluğu: 51,01 mA/cm², destek elektrolit konsantrasyonu: 1565,66 mg/l ve süre: 120 dakika olarak belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışma neticesinde renk ve KOİ giderimi sırasıyla % 98,93 ve % 97,43’dır.

Optimum şartlarda yapılan deneysel çalışma sonucunda % 97,43 verimle 1 kg KOİ gidermek için kullanılan enerji tüketimi 17,49 kWh/kg olarak hesaplanmıştır. Zou ve ark. gerçek tekstil atıksuyunu arıtmak için elektrokimyasal oksidasyon yönteminde BDD anodu kullanarak yapmışlardır. Bu çalışma kapsamında en iyi enerji tüketim sonucunun 11,12 kWh/kg olarak tespit etmişlerdir (Zou vd., 2017). Enerji tüketimi ile ilgili yapılan bir başka çalışma da ise 23,58 kWh/kg KOİ giderimi olarak gözlenmiştir (Bhatnagar vd., 2014). Yapılan birçok çalışmada benzer değerler elde edilmiştir.

4.2.5. Pilot Ölçek Çalışmaları

Yanıt yüzey yöntemi kullanılarak optimize edilen işletme şartları (pH: 11, akım yoğunluğu: 51,01 mA/cm², destek elektrolit konsantrasyonu: 1565,66 mg/l ve süre: 120 dakika) altında indigo sulu çözeltisi elektrooksidasyon yöntemiyle renk ve KOİ giderimi için pilot ölçekte deneme çalışması yapılmıştır. Pilot ölçek tesise ait genel görünüm Şekil 4.32' de gösterilmektedir.



Şekil 4.32. Pilot tesise ait genel görünüm

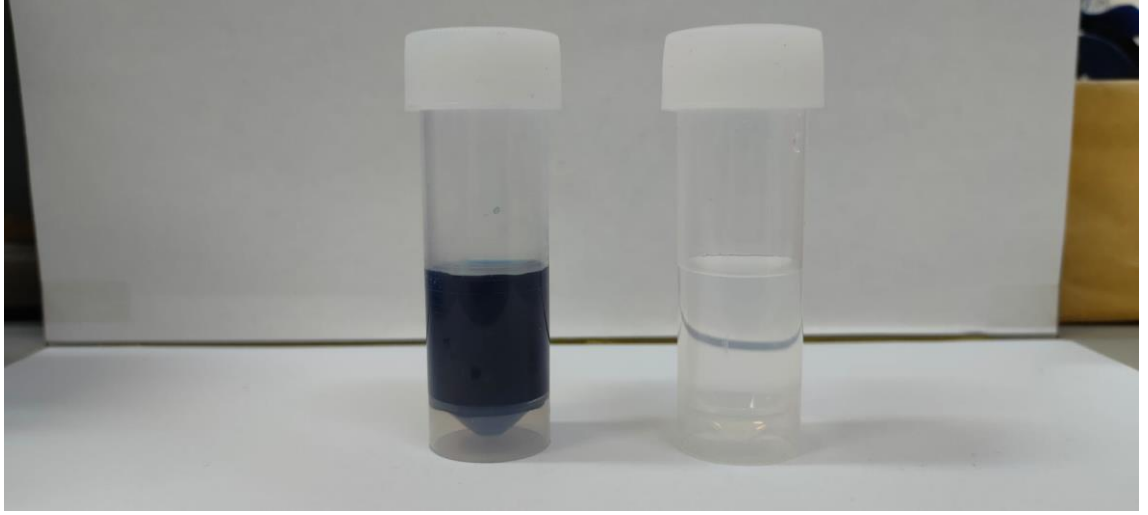
Pilot ölçek çalışması için tasarlanmış olan prototipin dengeleme tankı, elektrooksidasyon tankı, elektrotlar, ürün suyu deposu ve DC güç kaynağı kullanılmıştır. Dengeleme tankı içerisinde pH ayarlaması ve destek elektrot ilavesi yapılarak, tank üzerindeki karıştırıcı pervane yardımıyla homojen olması sağlanmıştır. Atıksu buradan pompa vasıtasıyla elektrooksidasyon tankına alınmıştır. Elektrooksidasyon tankı üzerine yerleştirilmiş olan anotlar ve katotların bulunduğu şase üzerindeki bağlantı noktalarından DC güç kaynağına gerekli bağlantılar sağlanmıştır. Elektrooksidasyon işlemine başlamadan önce başlangıç atıksu numunesi alınmıştır sonrasında DC güç kaynağı belirlenen akım yoğunluğuna ayarlanarak elektrooksidasyon işlemi başlatılmıştır. Belirlenen süre sonrasında işlem sonlandırılarak numune alınmış ve çalışma tamamlanmıştır.

Pilot ölçek çalışması, laboratuvar ortamında belirlenen optimum şartlarda gerçekleştirilmiştir (pH: 11, akım yoğunluğu: 51,01 mA/cm², destek elektrolit konsantrasyonu: 1565,66 mg/l ve süre: 120 dakika). Pilot ölçekli çalışma sonrasında yapılan analiz neticesinde renk ve KOİ giderim verimleri sırasıyla % 95,26 ve % 92,16 olarak hesaplanmıştır. Çalışmaya ait giriş ve çıkış atıksuyuna ait özellikler Çizelge 4.8' de verilmektedir.

Çizelge 4.8. Optimum koşullarda gerçekleşen pilot ölçek çalışmasına ait sonuçlar

Çalışma Şartları : pH: 11, akım yoğunluğu: 51,01 mA/cm ² , destek elektrolit konsantrasyonu: 1565,66 mg/l ve süre: 120 dakika		
Parametreler	Sonuçlar	
	Giriş	Çıkış
Renk	101,19 mg/l	4,79 mg/l
KOİ	203,85 mg/l	15,98 mg/l
pH	11,01	8,33
İletkenlik	2670 µS/cm	2650 µS/cm
TÇKM	1383 mg/l	1341 mg/l

Çalışma sırasında giriş ve çıkış atıksuyundan alınan numunelere ait görseller Şekil 4.33' te sunulmuştur.



Şekil 4.33. Pilot tesise çalışmasına ait giriş ve çıkış numuneleri

Pilot ölçekte elde edilen bu sonuçlar laboratuvar ölçeğinde elde edilen giderim verimi sonuçlarına paralellik göstermektedir. Elektroksidasyon prosesiyle denim yıkama sularının arıtılması ve geri kazanılması yönteminin endüstriyel ölçekte umut verici olabileceğini ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmanın amacı, başta denim sektörü ve tekstil yıkama sonucu oluşan yıkama sularının elektrokimyasal olarak yeni nesil Sn/Sb/Ni-Ti anot ve katot Pt-Ti katot yardımıyla arıtılması ve geri kazanılmasının araştırılmasıdır. Bu kapsamda laboratuvar ortamında hazırlanan indigo mavisi sulu çözeltisinden bu yeni nesil anot ve katotlar kullanılarak elektrooksidasyon yöntemiyle renk ve KOİ giderimi gerçekleştirilmiştir. Renk ve KOİ giderimleri için yanıt yüzey yöntemiyle oluşturulmuş olan deney matrisi takip edilmiş ve sonuçlar bu matris yardımıyla optimize edilerek elektrooksidasyon için optimum işletme koşulları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde ise bir prototip tasarlanmıştır. Tasarlanan prototip belirlenen optimum koşullarda işletilmiştir. Böylelikle, tekstil endüstrisi için gerekli olan büyük miktardaki kaliteli su ihtiyacı, hem ekonomik hem de ekolojik anlamda karşılanması hedeflenmektedir.

Laboratuvar çalışmalarına ait sonuçlar

Yanıt yüzey yöntemi kullanılarak optimizasyon çalışması öncesinde destek elektrolit türü belirlenerek optimizasyon çalışmalarına bu elektrolit türü ile devam edilmiştir. Çalışma için destek elektrolit türü en yaygın kullanılan NaCl, KCl, Na₂SO₄ ve K₂SO₄ tuzları tercih edilmiştir. 1000 mg/l destek elektrolit konsantrasyonunda, 50 mA/cm² akım yoğunluğunda, doğal pH (10,81) şartlarında ve 120 dakika süresince çalışma yapılmıştır. Dört farklı destek elektrolit türü ile yapılan çalışmalar neticesinde renk ve KOİ giderim etkinlikleri incelenmiştir. Sonuçlar incelendiği zaman renk ve KOİ giderim verimleri için NaCl ve KCl destek elektrolitleri arasında benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Her iki destek elektrolit türü ile yapılan çalışmalarda 120 dakikalık süre sonunda % 100 renk giderime ulaşılrken, KOİ gideriminde ise NaCl ve KCl destek elektrolitleri için giderim verimleri sırasıyla % 85,88 ve % 87,24 elde edilmiştir. Bu noktada iki giderim verimlerinin birbirine çok yakın olmasından dolayı ve destek elektrolitleri arasında daha ekonomik olması sebebiyle NaCl destek elektrolit olarak tercih edilmiştir. Bu noktadan sonra yanıt yüzey yöntemi ile yapılan optimizasyon çalışmalarında destek elektrolit olarak NaCl ile devam edilmiştir.

Denim yıkama suları neticesinde oluşan atıksuların elektrooksidasyon prosesiyle arıtılması durumunda, pH, destek elektrolit konsantrasyonu, akım yoğunluğu ve süre

bağımsız değişkenlerinin renk ve KOİ bağımlı değişkenlerine karşı etkisinin belirlenmesi amacıyla Minitab Statistical Software yardımıyla merkezi kompozit tasarım dizayn edilmiştir. Tasarım, 4 faktör ve bunların 3 farklı seviyeleri ile 7 merkez deneyi içermektedir. Deneyler, çevresel şartların en aza indirilebilmesi ve sistematik hatayı önlemek için karışık sıra ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada; pH, akım yoğunluğu, destek elektrolit konsantrasyonu ve zaman parametreleri yanıt yüzey yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen renk ve KOİ giderim denklemleri eşitlik 5.1 ve 5.2'deki gibidir.

$$\begin{aligned} \text{Renk giderim verimi (\%)} = & 105,60 - 0,93 \text{ pH} + 0,111 \text{ Akım Yoğ. (mA/cm}^2\text{)} - 0,0290 \text{ Tuz} \\ & \text{Kons.(mg/l)} + 0,3438 \text{ Süre(dk.)} + 0,0319 \text{ pH}^* \text{pH} - 0,00115 \text{ Akım Yoğ. (mA/cm}^2\text{)} * \text{Akım} \\ & \text{Yoğ. (mA/cm}^2\text{)} + 0,000000 \text{ Tuz Kons.(mg/l)} * \text{Tuz Kons.(mg/l)} - 0,001813 \\ & \text{Süre(dk.)} * \text{Süre(dk.)} - 0,00936 \text{ pH} * \text{Akım Yoğ. (mA/cm}^2\text{)} + 0,000451 \text{ pH} * \text{Tuz Kons.(mg/l)} \\ & + 0,00391 \text{ pH} * \text{Süre(dk.)} + 0,000239 \text{ Akım Yoğ. (mA/cm}^2\text{)} * \text{Tuz Kons.(mg/l)} - 0,002207 \\ & \text{Akım Yoğ. (mA/cm}^2\text{)} * \text{Süre(dk.)} + 0,000080 \text{ Tuz Kons.(mg/l)} * \text{Süre(dk.)} \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \text{KOİ giderim verimi (\%)} = & -132,4 - 44,49 \text{ pH} + 6,26 \text{ Akım Yoğ. (mA/cm}^2\text{)} + 0,1650 \text{ Destek} \\ & \text{Elektrolit Kons.(mg/l)} + 0,589 \text{ Süre(dk.)} + 2,903 \text{ pH}^* \text{pH} - 0,04862 \text{ Akım Yoğ.} \\ & \text{(mA/cm}^2\text{)} * \text{Akım Yoğ. (mA/cm}^2\text{)} - 0,000074 \text{ Destek Elektrolit Kons.(mg/l)} * \text{Destek} \\ & \text{Elektrolit Kons.(mg/l)} + 0,00022 \text{ Süre(dk.)} * \text{Süre(dk.)} - 0,0092 \text{ pH} * \text{Akım Yoğ. (mA/cm}^2\text{)} \\ & - 0,00056 \text{ pH} * \text{Destek Elektrolit Kons.(mg/l)} - 0,0076 \text{ pH} * \text{Süre(dk.)} + 0,000688 \text{ Akım Yoğ.} \\ & \text{(mA/cm}^2\text{)} * \text{Destek Elektrolit Kons.(mg/l)} + 0,00124 \text{ Akım Yoğ. (mA/cm}^2\text{)} * \text{Süre(dk.)} - \\ & 0,000056 \text{ Destek Elektrolit Kons. (mg/l)} * \text{Süre(dk.)} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Renk ve KOİ giderimi için yanıt yüzey yönetmi çalışması sonucunda eşitlik 5.1 ve 5.2'de verilen quadratik modelin F değeri renk giderimi için 22,71 ve KOİ giderimi için 29,59 olarak ölçülmüştür. Bu yüksek F değeri ile birlikte, P değeri modeli anlamlı kılmaktadır. Yapılan çalışmaya ait ANOVA tablosu incelendiği zaman korelasyon katsayısı değeri (R²) renk ve KOİ giderimi için sırasıyla % 95,21 ve % 96,28 olarak elde edilmiştir. Yüksek R² değeri, deney aralığında hesaplanan ve gözlemlenen sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu göstermektedir.

Renk giderme verimliliği ve proses değişkenleri arasındaki ilişki incelendiğinde, renk giderimi için süre ve akım yoğunluğu parametrelerinin daha etkin olduğu görülmüştür. Çalışmada incelenen pH ve destek elektrolit konsantrasyonu parametreleri ise daha az etkilidir. Pareto grafikleride bunu desteklemektedir. Grafiğe göre akım yoğunluğu*destek elektrolit konsantrasyonu, süre, akım yoğunluğu*süre, destek elektrolit konsantrasyonu*süre, akım yoğunluğu ve süre*süre parametrelerinin standartlaştırılmış etkileri referans çizgisini geçmektedir. Yani bu terimler renk giderme verimliliği üzerinde istatistiksel olarak 0,05 düzeyinde anlamlı olarak tespit edilmiştir.

KOİ giderme verimliliği için ise, süre ve destek elektrolit konsantrasyonu parametreleri daha etkin olmuş, pH ve akım yoğunluğu daha az etkin olduğu tespit edilmiştir. Yine pareto grafiği bunu desteklemektedir. Buna göre akım süre, akım yoğunluğu*akım yoğunluğu, pH*pH, akım yoğunluğu*destek elektrolit konsantrasyonu, destek elektrolit konsantrasyonu ve destek elektrolit konsantrasyonu*destek elektrolit konsantrasyonu parametrelerinin standartlaştırılmış etkileri referans çizgisini geçmektedir. Yani bu terimler KOİ giderme verimliliği üzerinde istatistiksel olarak 0,05 düzeyinde anlamlıdır.

Yanıt yüzey yöntemi neticesinde optimum koşullar pH: 11, akım yoğunluğu: 51,01 mA/cm², destek elektrolit konsantrasyonu: 1565,66 mg/l ve süre: 120 dakika olarak tespit edilmiştir. Optimum şartlar altında modelin vermiş olduğu renk ve KOİ giderim verimleri % 100'dür. Bu sonucun onaylanması için belirlenen şartlarda yapılan deneysel çalışmalar neticesinde renk ve KOİ giderimi sırasıyla % 98,93 ve % 97,43 olarak bulunmuştur. Optimum şartlar altındaki enerji tüketim hesabı ise 17,49 kWh/kg KOİ olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen renk ve KOİ giderim verimi modeli doğrultusunda pH ayarlaması yapılmadan doğal pH (10,81) şartlarında, akım yoğunluğu: 51,01 mA/cm², destek elektrolit konsantrasyonu: 1565,66 mg/l ve süre: 120 dakika çalışma yürütülmek istenirse renk ve KOİ giderimleri sırasıyla % 99,96 ve % 96,88 olarak model tarafından tahmin edilmektedir. Doğal pH şartlarında yapılan çalışmada da optimum pH değerine çok yakın giderim verimleri elde edilmektedir. Bu durum işletme açısından pH ayarlama maliyetini ortadan kaldırmaktadır.

İşletme açısından arıtma maliyetini arttıran önemli giderlerden olan elektrik sarfıyatı akım yoğunluğu ile doğrudan bağlantılıdır. Bu sebeple doğal pH (10,81) şartlarında, akım yoğunluğunun çalışma parametreleri arasında en düşük olduğu 50 mA/cm² şartlarında, destek elektrolit konsantrasyonu: 1565,66 mg/l ve süre: 120 dakika çalışılmış olması durumunda renk ve KOİ giderimleri sırasıyla % 99,96 ve % 94,38 olarak model tarafından tahmin edilmektedir. Optimum tespit edilen 51,01 mA/cm² değerine çok yakın bir değer olduğu için giderim verimleri neredeyse aynı tespit edilmiştir. Bu durumun çok az miktarlarda da olsa işletme maliyetlerine olumlu yansıtacağı düşünülmektedir.

Yürütülen YYY optimizasyonu sonuçları incelendiği zaman en kötü senaryoda dahi renk giderim verimi model tarafından yaklaşık % 85,43 olarak tespit edilmektedir. Bu durum çalışmada kullanılan indigo mavisi boyanın elektrooksidasyon yöntemiyle kolaylıkla parçalanabilir nitelikte olduğunu göstermiştir. Fakat KOİ için aynı durum söz konusu olmamakla birlikte bu şartlarda giderim verimi % 9,07 olarak model tarafından tahmin edilmektedir.

Pilot ölçek çalışmasına ait sonuçlar

Laboratuvar çalışması sonucunda elde edilen umut verici sonuçlara dayanarak endüstriyel sistemde karşılaşılabilecek sorunlarında bir nebze olsun üstesinden gelebilmek adına optimum koşullar altında pilot ölçek çalışması yapılmıştır.

Optimum şartlarda yapılan (pH: 11, akım yoğunluğu: 51,01 mA/cm², destek elektrolit konsantrasyonu: 1565,66 mg/l ve süre: 120 dakika) pilot ölçekli çalışma sonrasında yapılan analiz neticesinde renk ve KOİ giderim verimleri sırasıyla % 95,26 ve % 92,16 olarak hesaplanmıştır. Pilot ölçekte elde edilen bu sonuçlar laboratuvar ölçeğinde elde edilen giderim verimi sonuçlarına paralellik göstermektedir. Elektrooksidasyon prosesiyle denim yıkama sularının arıtılması ve geri kazanılması yönteminin endüstriyel ölçekte umut verici olabileceğini ortaya koymaktadır.

Pilot ölçek sistem tasarlanırken laboratuvar ölçeğinde kullanılmış olan Pt/Ti katot yerine paslanmaz çelik katot kullanılmıştır. Çünkü laboratuvar şartlarında 30 x 30 cm

ebatlarında Pt/Ti kaplamak için elverişli ortam yoktur. Ayrıca işletmede bu ebatlarda Pt/Ti katot kullanmak maliyeti aşırı derecede artıracaktır. Bir işletmenin mantalitesi en düşük yatırım ve işletme maliyetli ile en yüksek giderim verimi elde etmek olduğu düşünüldüğü zaman Pt/ti katot yerine paslanmaz çelik kullanmak daha uygundur.

Tasarlanan prototip sadece denim endüstrisi yıkama sularının geri kazanımı/arıtılması için değil tekstil ve diğer endüstriler neticesinde ortaya çıkan atıksularında arıtılması içinde kullanılmak üzere kurgulanmıştır. Pilot tesis elektrooksidasyon haricinde kimyasal arıtım, ozon ve filtre sistemlerini de içermektedir. Fakat elektrooksidasyon prosesinin getirmiş olduğu yüksek giderim verimlerinden dolayı denim yıkama sularında renk ve KOİ giderimi için diğer proseslere ihtiyaç duyulmamıştır. Bu durumda özellikle kimyasal arıtma prosesi neticesinde ortaya çıkan yoğun miktardaki çamur oluşumu engellenmiştir. Bu yöntem ile çamur oluşumunun önüne geçildiği için, işletmelere herhangi bir ek çamur bertaraf maliyeti oluşturmamasının yanı sıra, çevrede korunmuş olacaktır.

Bu çalışmayla elde edilen sonuçlarla başta denim yıkama suları olmak üzere tekstil endüstrisi yıkama sonucu oluşan atıksuların gerekli deşarj limitlerini sağlayabilmesinin yanında su geri kazanımı uygulamalarında da geleneksel yöntemlere göre daha çevreci, ekolojik ve ekonomik bir alternatif olarak düşünülebilir. Bundan sonraki aşamada tasarlanan pilot ölçekli tesis farklı tekstil işletmeleri ve farklı prosesler neticesinde oluşan atıksular için kullanılması öngörülebilir.

Çalışmanın bulgularına göre, bu yöntemin umut verici olduğunu düşünülmektedir. Yapılan bu çalışma ile diğer araştırmacılar için bir veri tabanı sağlanmış olacaktır.

Elektrooksidasyon yöntemi, başta denim yıkama suları olmak üzere tekstil endüstrisi atıksularının arıtılması ve geri kazanılması için alternatif bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Amutha, K. (2017). *Sustainable Practices in Textile Industry: Standards and Certificates* (ss. 79–107). https://doi.org/10.1007/978-981-10-2639-3_5
- Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği*, (2010).
- Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ*. (2022).
- Aydiner, C., Kırıl Mert, B., C. Doğan, E., Balcı, E., M.Tilki, Y., Aksu, Ş., & Y. Gören, A. (2016). Tekstil Yıkama Atıksularından Basınçlı Membran Proseslerle Su Geri Kazanımı Üzerine Membran Türünün Etkisinin Araştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(2). <https://doi.org/10.17482/uumfd.278011>
- Bashir, M. J. K., Aziz, H. A., Yusoff, M. S., & Adlan, M. N. (2010). Application of response surface methodology (RSM) for optimization of ammoniacal nitrogen removal from semi-aerobic landfill leachate using ion exchange resin. *Desalination*, 254(1–3), 154–161. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.12.002>
- Belal, R. M., Zayed, M. A., El-Sherif, R. M., & Abdel Ghany, N. A. (2021). Advanced electrochemical degradation of basic yellow 28 textile dye using IrO₂/Ti meshed electrode in different supporting electrolytes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 882, 114979. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.114979>
- Besterfield, D. H., Besterfield, G. H., Besterfield-Sacre, M., Urdhwareshe, R., Besterfield-Michna, C., & Urdhwareshe, H. (2012). *Total Quality Management Revised Third Edition For Anna University*.
- Bhatnagar, R., Joshi, H., Mall, I. D., & Srivastava, V. C. (2014). Electrochemical oxidation of textile industry wastewater by graphite electrodes. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 49(8), 955–966. <https://doi.org/10.1080/10934529.2014.894320>
- Bilińska, L., Blus, K., Gmurek, M., & Ledakowicz, S. (2019). Coupling of electrocoagulation and ozone treatment for textile wastewater reuse. *Chemical Engineering Journal*, 358(July 2018), 992–1001. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.093>
- Birinci, H. E. (2009). *Denim Kumaşlarda Görsel Etkiler*. Marmara Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü.
- Brillas, E., & Martínez-Huitle, C. A. (2015). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 166–167, 603–643. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.016>
- Buscio, V., García-Jiménez, M., Vilaseca, M., López-Grimau, V., Crespi, M., & Gutiérrez-Bouzán, C. (2016). Reuse of textile dyeing effluents treated with coupled nanofiltration and electrochemical processes. *Materials*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/ma9060490>
- Cassardo, C., & Jones, J. A. A. (2011). Managing Water in a Changing World. *Water*, 3(2), 618–628. <https://doi.org/10.3390/w3020618>
- Çevre Kanunu*. (1983).
- Çevre Kanunu ile Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun*. (2022).
- Chang, W. S., Hong, S. W., & Park, J. (2002). Effect of zeolite media for the treatment of textile wastewater in a biological aerated filter. *Process Biochemistry*, 37(7), 693–698. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(01\)00258-8](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(01)00258-8)
- Chavan, R. B. (2015). Indigo dye and reduction techniques. İçinde *Denim* (ss. 37–67).

- Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-843-6.00003-2>
- Chen, X., Shen, Z., Zhu, X., Fan, Y., & Wang, W. (2005). Advanced treatment of textile wastewater for reuse using electrochemical oxidation and membrane filtration. *Water SA*, *31*(1), 127–132. <https://doi.org/10.4314/wsa.v31i1.5129>
- Christensen, P. A., Zakaria, K., Christensen, H., & Yonar, T. (2013). The Effect of Ni and Sb Oxide Precursors, and of Ni Composition, Synthesis Conditions and Operating Parameters on the Activity, Selectivity and Durability of Sb-Doped SnO₂ Anodes Modified with Ni. *Journal of The Electrochemical Society*, *160*(8), H405–H413. <https://doi.org/10.1149/2.023308jes>
- Ciardelli, G., & Ranieri, N. (2001). The treatment and reuse of wastewater in the textile industry by means of ozonation and electroflocculation. *Water Research*, *35*(2), 567–572. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00286-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00286-4)
- Darvishmotevalli, M., Zarei, A., Moradnia, M., Noorisepehr, M., & Mohammadi, H. (2019). Optimization of saline wastewater treatment using electrochemical oxidation process: Prediction by RSM method. *MethodsX*, *6*, 1101–1113. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.03.015>
- Dasgupta, J., Sikder, J., Chakraborty, S., Curcio, S., & Drioli, E. (2015). Remediation of textile effluents by membrane based treatment techniques: A state of the art review. *Journal of Environmental Management*, *147*, 55–72. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.008>
- Doğan, D., & Türkdemir, H. (2005). Electrochemical oxidation of textile dye indigo. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, *80*(8), 916–923. <https://doi.org/10.1002/jctb.1262>
- Downey, L. (2014). *A Short Story of Denim*. <https://www.levistrauss.com/wp-content/uploads/2014/01/A-Short-History-of-Denim2.pdf>
- DyStar Indigo Vat 40% Solution. (2023). Dystar. <https://www.dystar.com/products/dyes/featured-dyes/dystar-indigo-vat-40-solution/>
- Er, E. (2016). *Yonga Levha Endüstrisi Atıksularının Kimyasal Arıtımı Ve Yanıt Yüzey Yöntemi İle Optimizasyonu*. Balıkesir Üniversitesi.
- Ergas, S. J., Therriault, B. M., & Reckhow, D. A. (2006). Evaluation of Water Reuse Technologies for the Textile Industry. *Journal of Environmental Engineering*, *132*(3), 315–323. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2006\)132:3\(315\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2006)132:3(315))
- European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Wintgens, T., Bixio, D. (2006). *Water reuse system management manual : Aquarec* (T. Wintgens & D. Bixio (Ed.)). Publications Office.
- Farizoğlu, B., Fil, B. A., Uzuner, S., Bicakci, S., Er, E., & Kara, E. N. (2018). Reactive Black 5 Removal with Electro-Oxidation Method using Ti/IrO₂/RuO₂ Anode and Stainless Steel Cathode. *International Journal of Electrochemical Science*, 3288–3296. <https://doi.org/10.20964/2018.04.58>
- Fidan, B. (2013). *Denim Kumaşlar İçin Ring ve Open-End Rotor İplik Makinelerinde Üretilen Şantuk İpliklerin Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Bir Araştırma*. Uludağ Üniversitesi.
- Gazgil, L., Er, E., & Yonar, T. (2023). Determination of the optimum conditions for electrochemical regeneration of exhausted activated carbon. *Diamond and Related Materials*, *133*, 109741. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109741>
- Gergin, M. N., & Cuci, Y. (2017). Recovering Of Textile Waste Water With Membrane Filtration Methods. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri*

- Dergisi*, 20(3), 96–105. <https://doi.org/10.17780/ksujes.340791>
- GilPavas, E., & Correa-Sanchez, S. (2020). Assessment of the optimized treatment of indigo-polluted industrial textile wastewater by a sequential electrocoagulation-activated carbon adsorption process. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101306. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101306>
- Golob, V., Vinder, A., & Simonič, M. (2005). Efficiency of the coagulation/flocculation method for the treatment of dyebath effluents. *Dyes and Pigments*, 67(2), 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2004.11.003>
- Gönen, F., & Aksu, Z. (2008). Use of response surface methodology (RSM) in the evaluation of growth and copper(II) bioaccumulation properties of *Candida utilis* in molasses medium. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1–3), 731–738. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.086>
- Günaslan, S., & Fil, B. A. (2023). Ti/IrO₂/RuO₂ Anot Kullanılarak Organik İçerikli Gerçek Atıksulardan Renk Giderilmesinde pH ve Akım Yoğunluğunun Etkisi. *1st International Conference on Scientific and Innovative Studies*, 262–267.
- Hernández-Rodríguez, E. A., Castillo-Suárez, L. A., Teutli-Sequeira, E. A., Martínez-Miranda, V., Vázquez Mejía, G., Linares-Hernández, I., Santoyo-Tepole, F., & Benavides, A. (2022). Electro-oxidation and solar electro-oxidation of commercial carbamazepine: effect of the support electrolyte. *Separation Science and Technology*, 57(3), 465–483. <https://doi.org/10.1080/01496395.2021.1900251>
- Isik, Z., Ozbey Unal, B., Karagunduz, A., Keskinler, B., & Dizge, N. (2020). Electrochemical Treatment of Textile Dye Bath Wastewater Using Activated Carbon Cloth Electrodes. *Avicenna Journal of Environmental Health Engineering*, 7(1), 47–52. <https://doi.org/10.34172/ajehe.2020.07>
- Jalife-Jacobo, H., Feria-Reyes, R., Serrano-Torres, O., Gutiérrez-Granados, S., & Peralta-Hernández, J. M. (2016). Diazo dye Congo Red degradation using a Boron-doped diamond anode: An experimental study on the effect of supporting electrolytes. *Journal of Hazardous Materials*, 319, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.02.056>
- Kaplan, G., & Seferoğlu, Z. (2023). The Synthetic Approaches for Preparation of Indigo and Applications in Denim Industry. *Current Organic Synthesis*, 20(4), 361–364. <https://doi.org/10.2174/1570179419666220830091956>
- Kim, T. H., Park, C., Lee, J., Shin, E. B., & Kim, S. (2002). Pilot scale treatment of textile wastewater by combined process (fluidized biofilm process-chemical coagulation-electrochemical oxidation). *Water Research*, 36(16), 3979–3988. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00113-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00113-6)
- Kim, T. H., Park, C., Yang, J., & Kim, S. (2004). Comparison of disperse and reactive dye removals by chemical coagulation and Fenton oxidation. *Journal of Hazardous Materials*, 112(1–2), 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.04.008>
- Koç, E., & Ayyıldız, Ç. (2005). Denim Kumaş Üretim Esasları, Dünya ve Türkiye'deki Ticaret Durumu. *Tekstil ve Mühendis*, 12(60), 35–42.
- Kurniawan, T. A., Lo, W. H., & Chan, G. Y. S. (2006). Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 129(1–3), 80–100. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.010>
- Lale, M. (2018). Definition, history of denim fabric and Turkey's denim clothing export in figures. *Industria Textila*, 69(04), 334–337. <https://doi.org/10.35530/IT.069.04.1420>
- Leshem, E. N., Pines, D. S., Ergas, S. J., & Reckhow, D. A. (2006). Electrochemical

- Oxidation and Ozonation for Textile Wastewater Reuse. *Journal of Environmental Engineering*, 132(3), 324–330. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2006\)132:3\(324\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2006)132:3(324))
- Libra, J. A., Borchert, M., Vigelahn, L., & Storm, T. (2004). Two stage biological treatment of a diazo reactive textile dye and the fate of the dye metabolites. *Chemosphere*, 56(2), 167–180. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.02.012>
- Lin, S. H., & Chen, M. L. (1997a). Textile wastewater treatment by enhanced electrochemical method and ion exchange. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 18(7), 739–746. <https://doi.org/10.1080/09593331808616592>
- Lin, S. H., & Chen, M. L. (1997b). Treatment of textile wastewater by-chemical methods for reuse. *Water Research*, 31(4), 868–876. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00318-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00318-1)
- Liu, H., Grot, S., & Logan, B. E. (2005). Electrochemically Assisted Microbial Production of Hydrogen from Acetate. *Environmental Science & Technology*, 39(11), 4317–4320. <https://doi.org/10.1021/es050244p>
- López-Grimau, V., Gutiérrez, C., Sala, M., & Crespi, M. (2013). Electrochemical decolourisation of cotton dye baths for reuse purposes: A way to reduce salinity of the textile wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 51(7–9), 1527–1532. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.714585>
- Lu, X., Liu, L., Liu, R., & Chen, J. (2010). Textile wastewater reuse as an alternative water source for dyeing and finishing processes: A case study. *Desalination*, 258(1–3), 229–232. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.002>
- Meksi, N., & Mhenni, M. F. (2015). Indigo dyeing technology for denim yarns. İçinde *Denim* (ss. 69–105). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-843-6.00004-4>
- Mezarciöz, S., & Toksöz, M. (2014). Investigation of effect of special washing processes on denim fabrics' properties. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 24(1), 86–95.
- Mohan, N., Balasubramanian, N., & Basha, C. A. (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>
- Montgomery, D. C. . (2017). *Design and Analysis of Experiments* (Eighth edi). John Wiley & Sons, Inc. www.wiley.com/go/permissions.%0Ahttps://lccn.loc.gov/2017002355
- Morali, E. K., Uzal, N., & Yetis, U. (2016). Ozonation pre and post-treatment of denim textile mill effluents: Effect of cleaner production measures. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.059>
- Nabavi, E., Shamskilani, M., Dezvareh, G. A., & Darban, A. K. (2023). ANN-Based Modeling of Combined O₃/H₂O₂ Oxidation, and Activated Carbon Adsorption Treatment System: Forest Polluting Site Leachate. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(2), 86. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06099-w>
- Nasr, F. A., Sadik, M. A., & El-Shafai, S. A. (2019). Innovative electrochemical treatment of textile dye wastewater. *Egyptian Journal of Chemistry*, 62(11), 2019–2032. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2019.10576.1683>
- Núñez, J., Yeber, M., Cisternas, N., Thibaut, R., Medina, P., & Carrasco, C. (2019). Application of electrocoagulation for the efficient pollutants removal to reuse the treated wastewater in the dyeing process of the textile industry. *Journal of Hazardous Materials*, 371(March), 705–711. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.030>

- Orhon, D., Babuna, F. G., & Insel, G. (2001). Characterization and modelling of denim-processing wastewaters for activated sludge. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 76(9), 919–931. <https://doi.org/10.1002/jctb.462>
- Orts, F., del Río, A. I., Molina, J., Bonastre, J., & Cases, F. (2019). Study of the reuse of industrial wastewater after electrochemical treatment of textile effluents without external addition of chloride. *International Journal of Electrochemical Science*, 14(2), 1733–1750. <https://doi.org/10.20964/2019.02.27>
- Pala, A., & Tokat, E. (2003). Activated Carbon Addition to an Activated Sludge Model Reactor for Color Removal from a Cotton Textile Processing Wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 129(11), 1064–1068. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2003\)129:11\(1064\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2003)129:11(1064))
- Panizza, M., & Cerisola, G. (2006). Olive mill wastewater treatment by anodic oxidation with parallel plate electrodes. *Water Research*, 40(6), 1179–1184. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.01.020>
- Parolini, G. (2015). The Emergence of Modern Statistics in Agricultural Science: Analysis of Variance, Experimental Design and the Reshaping of Research at Rothamsted Experimental Station, 1919–1933. *Journal of the History of Biology*, 48(2), 301–335. <https://doi.org/10.1007/s10739-014-9394-z>
- Periyasamy, A. P., & Militky, J. (2017). Denim processing and health hazards. İçinde *Sustainability in Denim* (ss. 161–196). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102043-2.00007-1>
- Periyasamy, S., & Muthuchamy, M. (2018). Electrochemical oxidation of paracetamol in water by graphite anode: Effect of pH, electrolyte concentration and current density. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(6), 7358–7367. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.036>
- Pinto, C., Fernandes, A., Lopes, A., Nunes, M. J., Baía, A., Ciriaco, L., & Pacheco, M. J. (2022). Reuse of Textile Dyeing Wastewater Treated by Electrooxidation. *Water*, 14(7), 1084. <https://doi.org/10.3390/w14071084>
- Raghu, S., & Ahmed Basha, C. (2007). Chemical or electrochemical techniques, followed by ion exchange, for recycle of textile dye wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 149(2), 324–330. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.087>
- Rahman Bhuiyan, M. A., Mizanur Rahman, M., Shaid, A., Bashar, M. M., & Khan, M. A. (2016). Scope of reusing and recycling the textile wastewater after treatment with gamma radiation. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3063–3071. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.029>
- Rajkumar, K., & Muthukumar, M. (2017). Response surface optimization of electro-oxidation process for the treatment of C.I. Reactive Yellow 186 dye: reaction pathways. *Applied Water Science*, 7(2), 637–652. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0276-0>
- Ribeiro, M. C. M., Starling, M. C. V. M., Leão, M. M. D., & de Amorim, C. C. (2017). Textile wastewater reuse after additional treatment by Fenton's reagent. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(7), 6165–6175. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6921-9>
- Sahinkaya, E., Uzal, N., Yetis, U., & Dilek, F. B. (2008). Biological treatment and nanofiltration of denim textile wastewater for reuse. *Journal of Hazardous Materials*, 153(3), 1142–1148. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.072>
- Sahu, N. K., & Andhare, A. (2018). Design of Experiments Applied to Industrial Process. İçinde V. Silva (Ed.), *Statistical Approaches With Emphasis on Design of*

- Experiments Applied to Chemical Processes.* InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73558>
- Sala, M., & Gutiérrez-Bouzán, M. C. (2012). Electrochemical techniques in textile processes and wastewater treatment. *International Journal of Photoenergy*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/629103>
- Sala, M., & Gutiérrez-Bouzán, M. C. (2014). Electrochemical treatment of industrial wastewater and effluent reuse at laboratory and semi-industrial scale. *Journal of Cleaner Production*, 65, 458–464. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.006>
- Sala, M., López-Grimau, V., & Gutiérrez-Bouzán, C. (2014). Photo-electrochemical treatment of reactive dyes in wastewater and reuse of the effluent: Method optimization. *Materials*, 7(11), 7349–7365. <https://doi.org/10.3390/ma7117349>
- Saleh, M., Yildirim, R., Isik, Z., Karagunduz, A., Keskinler, B., & Dizge, N. (2021). Optimization of the electrochemical oxidation of textile wastewater by graphite electrodes by response surface methodology and artificial neural network. *Water Science and Technology*, 84(5), 1245–1256. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.240>
- Sanni, I., Karimi Estahbanati, M. R., Carabin, A., & Drogui, P. (2022). Coupling electrocoagulation with electro-oxidation for COD and phosphorus removal from industrial container wash water. *Separation and Purification Technology*, 282, 119992. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119992>
- Shamsuzzaman, M., Kashem, M. A., Muhammad Sayem, A. S., Khan, A. M., Shamsuddin, S. M., & Islam, M. M. (2021). Quantifying environmental sustainability of denim garments washing factories through effluent analysis: A case study in Bangladesh. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125740. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125740>
- Silva, L. G. M., Moreira, F. C., Cechinel, M. A. P., Mazur, L. P., de Souza, A. A. U., Souza, S. M. A. G. U., Boaventura, R. A. R., & Vilar, V. J. P. (2020). Integration of Fenton's reaction based processes and cation exchange processes in textile wastewater treatment as a strategy for water reuse. *Journal of Environmental Management*, 272(July). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111082>
- Silva, L. G. M., Moreira, F. C., Souza, A. A. U., Souza, S. M. A. G. U., Boaventura, R. A. R., & Vilar, V. J. P. (2018). Chemical and electrochemical advanced oxidation processes as a polishing step for textile wastewater treatment: A study regarding the discharge into the environment and the reuse in the textile industry. *Journal of Cleaner Production*, 198, 430–442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.001>
- Şimşekler, M. (2009). *Tekstil Endüstrisi İndigo Atıksularınının Elektrokoagülasyon ve Diğer Fiziksel-Kimyasal Yöntemler ile Arıtımı*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Solak, M., & Öztürk, A. (2018). Endüstriyel Atıksu Arıtımında Kimyasal ve Elektrokimyasal Proseslerin Etkinliğinin Karşılaştırılması: Denim Ürün Üretim Sektörü. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7(2).
- Splitstoser, J. C., Dillehay, T. D., Wouters, J., & Claro, A. (2016). Early pre-Hispanic use of indigo blue in Peru. *Science Advances*, 2(9). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501623>
- Steingruber, E. (2004). Indigo and Indigo Colorants. İçinde *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.a14_149.pub2
- Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği* (Sayı 25687). (2004).
- Tağaç, M. (2006). *Kot Pantolon Üretimi ve Kalitesi Üzerine Değerlendirmeler*. Pamukkale Üniversitesi.

- Tekstil Sektöründe Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Tebliği*. (2011).
- Tekstil Sektöründe Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Tebliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ*. (2015).
- Tekstil Sektöründe Temiz Üretim Uygulamaları*. (2022).
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2020). *Su ve Atıksu İstatistikleri, 2020*. data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Su-ve-Atıksu-İstatistikleri-2020-37197
- Türkyılmaz, H. (2011). *Kurşun İyonlarının Kesikli Adsorpsiyon Prosesi ile Gideriminin Cevap Yüzey Yöntemiyle Optimizasyonu*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Uzal, N. (2007). *Recovery and Reuse of Indigo Dyeing Waste water Using Membrane Technology*. Department of Environmental Engineering.
- Uzal, N. (2015). Effluent treatment in denim and jeans manufacture. *İçinde Denim* (ss. 541–561). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-843-6.00019-6>
- Uzal, N., Yılmaz, L., & Yetis, U. (2010). Nanofiltration and reverse osmosis for reuse of indigo dye rinsing waters. *Separation Science and Technology*, 45(3), 331–338. <https://doi.org/10.1080/01496390903484818>
- Vandevivere, P. C., Bianchi, R., & Verstraete, W. (1998). Treatment and Reuse of Wastewater from the Textile Wet-Processing Industry: Review of Emerging Technologies. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 72(4), 289–302.
- Vences-Benitez, J. C., Martínez-Miranda, V., Linares-Hernández, I., Almazán-Sánchez, P. T., & Vázquez-Mejía, G. (2017). Electrooxidation Performance of Aqueous Solution of Nonylphenol Decaethoxylate and Denim Wastewater. *Water, Air, and Soil Pollution*, 228(10), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3576-1>
- Verma, A. K., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2012). A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. *Journal of Environmental Management*, 93(1), 154–168. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.012>
- Wang, L., Chen, L., & Wu, S. (Xiao). (2020). Nutrient Reduction of Dairy Manure Through Solid-Liquid Separation with Flocculation and Subsequent Microalgal Treatment. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 190(4), 1425–1437. <https://doi.org/10.1007/s12010-019-03185-w>
- Wang, Y.-H., Cheng, S., Chan, K.-Y., & Li, X. Y. (2005). Electrolytic Generation of Ozone on Antimony- and Nickel-Doped Tin Oxide Electrode. *Journal of The Electrochemical Society*, 152(11), D197. <https://doi.org/10.1149/1.2041007>
- Yang, B., Wei, T., Xiao, K., Deng, J., Yu, G., Deng, S., Li, J., Zhu, C., Duan, H., & Zhuo, Q. (2018). Effective mineralization of anti-epilepsy drug carbamazepine in aqueous solution by simultaneously electro-generated H₂O₂/O₃ process. *Electrochimica Acta*, 290, 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.09.067>
- Yıldız, N., Ateş, Ç., Yılmaz, M., Demir, D., Yıldız, A., & Çalımlı, A. (2014). Investigation of lichen based green synthesis of silver nanoparticles with response surface methodology. *Green Processing and Synthesis*, 3(4), 259–270. <https://doi.org/10.1515/gps-2014-0024>
- Yuanyai, C., & Nembhard, H. B. (2010). Design of Experiments. *İçinde Emerging Nanotechnologies for Manufacturing* (ss. 207–234). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1583-8.00008-9>
- Zou, J., Peng, X., Li, M., Xiong, Y., Wang, B., Dong, F., & Wang, B. (2017). Electrochemical oxidation of COD from real textile wastewaters: Kinetic study and energy consumption. *Chemosphere*, 171, 332–338.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.065>

Zyła, R., Sójka-Ledakowicz, J., Stelmach, E., & Ledakowicz, S. (2006). Coupling of membrane filtration with biological methods for textile wastewater treatment. *Desalination*, 198(1–3), 316–325. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.008>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Eren Er
Doğum Yeri ve Tarihi : Osmangazi / 25.06.1990
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Bursa Yabancı Dil Ağırlıklı Kız Lisesi
Lisans : Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre
Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans : Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre
Mühendisliği Anabilim Dalı

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : BUTEKOM Bursa Teknoloji ve Koordinasyon Ar-Ge
Merkezi

İletişim (e-posta) : erener90@gmail.com

Yayınları :

- Farizoğlu, B., Fil, B. A., Uzuner, S., Bıçakçı, S., Er, E., & Kara, E. N. (2018). Reactive Black 5 Removal with Electro-Oxidation Method using Ti/IrO₂/RuO₂ Anode and Stainless Steel Cathode. *International Journal of Electrochemical Science*, 3288–3296. <https://doi.org/10.20964/2018.04.58>
- Kurt, A., Er, E., Yonar, T., & Neselen, E. (2021). Electrochemical Removal of Cefazolin from Aqueous Media by Novel Composite Anodes: Effects of Electrolytes and Operating Parameters. *International Journal of Electrochemical Science*, ArticleID:211249. <https://doi.org/10.20964/2021.12.40>
- Gazigil, L., Er, E., Kestioğlu, O. E., & Yonar, T. (2022). Pilot-Scale Test Results of Electrodialysis Bipolar Membrane for Reverse-Osmosis Concentrate Recovery. *Membranes*, 12(1), 83. <https://doi.org/10.3390/membranes12010083>
- Gazigil, L., Er, E., & Yonar, T. (2023). Determination of the optimum conditions for electrochemical regeneration of exhausted activated carbon. *Diamond and Related Materials*, 133, 109741. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109741>