

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan GÜNEY

**TEKSTİL ENDÜSTRİLERİNDE KULLANILAN BOYAR
MADDELERİN İLERİ OKSİDASYON YÖNTEMLERİYLE
ATIKSUDAN GİDERİMİ**

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA-2019

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

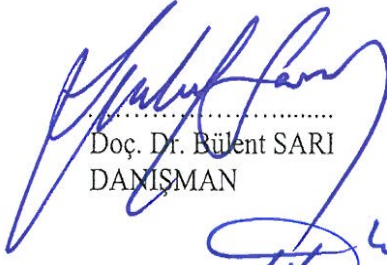
TEKSTİL ENDÜSTRİLERİNDE KULLANILAN BOYAR MADDELERİN
İLERİ OKSİDASYON YÖNTEMLERİYLE ATIKSUDAN GİDERİMİ


Hakan GÜNEY


YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 25/07/2019 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.


Doç. Dr. Bülent SARI
DANIŞMAN


Dr. Öğr. Üyesi Demet KALAT
ÜYE


Dr. Öğr. Üyesi Hakan DULKADİROĞLU
ÜYE

Bu Tez Enstitümüz Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TEKSTİL ENDÜSTRİLERİNDE KULLANILAN BOYAR
MADDELERİN İLERİ OKSİDASYON YÖNTEMLERİYLE ATIKSUDAN
GİDERİMİ**

Hakan GÜNEY

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman : Doç. Dr. Bülent SARI
Yıl : 2019, Sayfa: 77
Jüri : Doç. Dr. Bülent SARI
: Dr. Öğr. Üyesi Demet KALAT
: Dr. Öğr. Üyesi Hakan DULKADİROĞLU

Bu çalışmada, tekstil endüstrisi boyama proseslerinde yaygın olarak kullanılan Reactive Black 5 (RB5) boyar maddesinin sulu çözeltideki giderimi araştırılmıştır. Bunun için ileri oksidasyon yöntemlerinden ozonlama ve fotooksidasyon (ozonlama+UV) yöntemleri kullanılmış ve elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Ayrıca pH, ozon dozu ve başlangıç boyar madde konsantrasyonu gibi değişkenlerin ozonlama prosesi ve boyar madde giderimi üzerine etkisi incelenmiştir.

Çalışmada elde edilen verilere dayalı olarak ozonlama ve ozonlama+UV proseslerinde boyar madde gideriminin tahmin edilebilmesi için matematiksel modeller geliştirilmiştir. %95 güven düzeyinde pH-temas süresi, boyar madde-temas süresi ve ozon dozu-temas süresi değişkenleri ile boyar madde giderimi tahmin modelleri oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ozonlama, UV, Reactive Black 5, Boyarmadde Giderimi.

ABSTRACT

MSc THESIS

**REMOVAL OF DYE MATERIALS USED IN TEXTILE INDUSTRIES BY
ADVANCED OXIDATION METHODS**

Hakan GÜNEY

**ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Bülent SARI
Year : 2019, Pages: 77
Jury : Assoc. Prof. Dr. Bülent SARI
: Dr. Lect. Demet KALAT
: Dr. Lect. Hakan DULKADİROĞLU

In this study, the color removal of Reactive Black 5 (RB5) dyestuff, which is widely used in textile industry dyeing processes, was investigated. For this, ozonation and photooxidation (ozonation + UV) methods which are advanced oxidation methods were used and the obtained datas were evaluated. In addition, the main factors such as pH, ozone dose, initial dye concentration were investigated.

Based on the data obtained in the study, mathematical models have been developed to estimate the removal of dyes in ozonation and ozonation + UV processes. 95% confidence level pH-contact time, dyestuff-contact time and ozone doze-contact time variables and dyestuff removal estimation models were established.

Key Words: Ozonation, UV, Reactive Black 5, Dyestuffs Removal.

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Tekstil endüstrisi, hayvansal, bitkisel veya sentetik liflerin kullanıldığı dokuma proseslerini gerçekleştiren bir sanayi koludur. Tekstil endüstrisinde imalat süreçlerinde yaş (ıslak) prosesler ile kuru proseslerden yararlanılmaktadır. Islak proseslerin içinde yer alan boyama işlemlerinin karakteristik kirletici parametrelerinden biri renk olup; bu tür atıksularda çözünmüş ve kolloidal yapıda olabilen rengin başlıca kaynağı ise boyar maddelerdir. Boyar madde içeren atıksular, deşarj edildiği su ortamındaki ışık geçirgenliğini azaltır ve fotosentetik aktiviteyi olumsuz yönde etkiler; ötrofikasyona, çözünmüş oksijen seviyesinin azalmasına ve su kalitesinin düşmesine neden olurlar. Boyar maddelerin bazı sucul organizmalarda birikmesi, toksik ve kanserojenik etkinin oluşmasına da neden olmaktadır. Yukarıda kısaca özetlenmeye çalışılan sebeplerden ötürü atıksu arıtımında renk/boyar madde giderimi hem deşarj kriterlerinin sağlanması hem de alıcı ortam sağlığı açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, tekstil atıksularında bulunan ve geleneksel arıtma yöntemleri ile giderilmesi güç olan reaktif boyar maddelerden RB5'in ileri oksidasyon prosesleri (Ozonlama ve Fotooksidasyon) ile giderimi araştırılmıştır. Ayrıca bekletme süresi, pH, ozon dozu, başlangıç boyar madde konsantrasyonu gibi prosesin performansını etkileyen değişkenlerin etkileri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan boyar madde içeren su numuneleri laboratuvarında sentetik olarak hazırlanmış olup su numunelerindeki boyar madde konsantrasyon ölçümleri UV-VIS spektrofotometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ozonlama işleminde kullanılan ozon, kuru ve saf oksijen (%99,99) kullanılarak ozon jeneratörü ile üretilmiştir. Fotooksidasyon için iki adet monokromatik UV-A lamba (365nm – 11,5 W) kullanılmıştır. Oksidasyon deneyleri cam malzemedan imal edilmiş 10 cm çapında, 100 cm yüksekliğinde yaklaşık 7,85 L hacmindeki reaktörde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde RB5 gideriminde ozonlama işleminin etkisi araştırılmıştır. Ozonlama işleminde temas süresinin RB5 giderimi üzerindeki etkisini belirlemek için 5-90 dk aralığında temas süreleri denenmiştir. Temas

süresinin artması ile boyar madde konsantrasyonunun ve neden olduğu rengin azaldığı, dolayısıyla renk gideriminin arttığı gözlenmiştir. Bunun yanında, 60 dakika ve daha uzun temas sürelerinde (60-90 dk) boyar madde giderim oranında anlamlı bir değişim olmadığı tespit edilmiştir.

Ozonlama işlemi ile RB5 gideriminde, pH 2, 5, 8, 10, 12'de yürütülen çalışmalarda, veriler değerlendirildiğinde, sulu çözeltideki RB5'in giderilmesinde alkali pH ortamlarının daha etkili olduğu belirlenmiştir. En etkili RB5 giderimi pH 8'de %92 olarak gerçekleşmiştir.

Yapılan çalışmada, ozon debisinin RB5 giderimi üzerine etkisini belirlemek için 0,1-0,5 g/saat aralığında değişen ozonlama hızları kullanılmıştır. 60 dakikalık optimal temas süresi dikkate alındığında, 0,1 g/saat ozonlama hızında RB5 giderim oranı %27 iken, 0,5 g/saat ozonlama hızında RB5 giderim oranı %92 olarak elde edilmiştir.

RB5'in ozon ile oksidasyonunda, başlangıç RB5 konsantrasyonunun etkisini belirlemek için 100-500 mg/L aralığında değişen başlangıç konsantrasyonları denenmiştir. Daha önce belirlenen optimal şartlarda (60 dk; pH 8; 0,5 gO₃/saat) gerçekleştirilen deneylerde başlangıç RB5 konsantrasyonunun 100 mg/L'den 500 mg/L'ye çıkmasıyla giderim oranı %92'den %44'e düşerek, %48 azalmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde ozonlama ve fotoksidasyon işlemlerinin (ozonlama+UV) RB5 giderimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Optimal ozonlama şartları altında, UV ilavesi ile RB5 gideriminde ilk dakikalarda %3'lük bir artış gözlemlenmiş, temas süresinin artmasıyla giderim oranında dikkate değer bir artış olmadığı tespit edilmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen deneysel veriler ile regresyon analizi kullanılarak %95 güven düzeyinde pH-temas süresi, başlangıç boyar madde konsantrasyonu-temas süresi ve ozon dozu-temas süresi değişkenleri ile boyar madde giderimi tahmin modelleri oluşturulmuştur. Elde edilen tahmin modellerinin R² değerleri sırasıyla 0,988, 0,991 ve 0,997 olarak bulunmuştur.

TEŞEKKÜR

Gerek yüksek lisans tezimde gerekse lisans öğrenimim sürecinde yardımlarını ve değerli bilgilerini esirgemeyen başta danışman hocam Sayın Doç. Dr. Bülent SARI'ya ve emekleri geçen diğer hocalarıma sonsuz teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmamda yardımlarını esirgemeyen değerli meslektaşım Selman TÜRKEŐ'e ayrıca teşekkür ederim.

Bugün bulunduğum noktada olmamı sağlayan, beni yetiştiren aileme şükran ve minnetlerimi sunarım. Ayrıca tüm girişimlerimde beni destekleyen ve daima yanımda olan sevgili eşim Melis ÇELİK GÜNEY'e minnetle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XIV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tekstil Endüstrisi ve Türkiye’deki Yeri.....	1
1.2. Boyama (Renklendirme)	3
1.3. Boyar Madde İçeren Atıksuların Çevresel Önemi	3
1.4. Atıksulardan Renk/Boyar Madde Giderme Yöntemleri.....	5
1.4.1. Biyolojik Yöntemler.....	6
1.4.2. Fiziksel Yöntemler	7
1.4.3. Elektrokimyasal Yöntemler.....	7
1.4.4. Kimyasal Yöntemler.....	8
1.5. Ozonun Tarihçesi, Özellikleri ve Reaksiyonları	12
1.5.1. Ozonun Tarihçesi	12
1.5.2. Ozon Özellikleri ve Reaksiyonları	13
1.6. Ultraviyole	17
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	19
2.1. Renk/Boyar Madde Gideriminde Kullanılan Metodlar.....	19
2.2. Renk/Boyar Madde Gideriminde Kullanılan Karma Metodlar.....	20
2.3. Renk/Boyar Madde Gideriminde Kullanılan İleri Oksidasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	22
2.4. Renk/Boyar Madde Giderimine Etki Eden Faktörlerin Araştırılması.....	25

2.5. Boyar Madde Gideriminin Tahmin Modeli İle İlgili Çalışmalar	30
3. MATERYAL VE METOD.....	33
3.1. Reaktif Black 5 Boyar Maddesi ve Ölçümü.....	33
3.2. Asit-Baz Çözeltileri ve pH Ölçümü	35
3.3. Ozon Üretimi ve Ozonlama Prosesi	36
3.4. Ozonlama + UV Prosesi.....	37
3.5. Regresyon Analizi.....	37
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	39
4.1. Araştırma Bulguları.....	39
4.1.1. Ozonlama Prosesinde Temas Süresinin RB5 Giderimi Üzerine Etkisi.....	39
4.1.2. Ozonlama Prosesinde pH'nın RB5 Giderimi Üzerine Etkisi	40
4.1.3. Ozonlama Prosesinde Ozon Debitinin RB5 Giderimi Üzerine Etkisi	41
4.1.4. Ozonlama Prosesinde RB5 Başlangıç Konsantrasyonunun RB5 Giderimi Üzerine Etkisi.....	41
4.1.5. Ozonlama + UV.....	42
4.2. Tartışma	43
4.2.1. Ozonlama Prosesinde Temas Süresinin RB5 Giderimine Etkisi.....	43
4.2.2. Ozonlama Prosesinde pH'nın RB5 Giderimine Etkisi	44
4.2.3. Ozonlama Prosesinde Ozon Dozunun RB5 Giderimine Etkisi	46
4.2.4. RB5 Başlangıç Konsantrasyonunun Etkisi.....	48
4.2.5. Ozonlama + UV Prosesinin RB5 Giderimine Etkisi	50
4.3. Regresyon Analizi.....	51
4.3.1. pH ve Temas Süresine Bağlı RB5 Giderimi.....	51
4.3.2. Ozon Dozu ve Temas Süresine Bağlı RB5 Giderimi	54
4.3.3. RB5 Başlangıç Konsantrasyonu ve Temas Süresine Bağlı RB5 Giderimi	56
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	61

KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	73
EKLER.....	74





ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 1.1. Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne Göre Tekstil Sanayi Atık Suları İçin İzin Verilen Deşarj Standartları (Yün Yıkama, Terbiye, Dokuma ve Benzerleri).....	5
Çizelge 1.2. Oksidatif Türler ve Elektriksel Potansiyelleri.....	10
Çizelge 3.1. RB5'in Genel Özellikleri ve Kimyasal Yapısı	33
Çizelge 4.1. Ozonlama Prosesinde Temas Süresinin RB5 Giderimi Üzerine Etkisi	40
Çizelge 4.2. Ozonlama Prosesinde pH'ın RB5 Giderimi Üzerine Etkisi.....	40
Çizelge 4.3. Ozonlama Prosesinde Ozon Debisinin RB5 Giderimi Üzerine Etkisi	41
Çizelge 4.4. Ozonlama Prosesinde RB5 Başlangıç Konsantrasyonunun RB5 Giderimi Üzerine Etkisi.....	42
Çizelge 4.5. Ozonlama + UV Prosesinin RB5 Giderimi Üzerine Etkisi.....	42
Çizelge 4.6. Katsayılar İle İlgili Sonuçlar.....	52
Çizelge 4.7. Varyans Analiz Tablosu.....	52
Çizelge 4.8. Modelin Uygunluğunun Test Edilmesinde Kullanılan İstatistikler	52
Çizelge 4.9. Katsayılar İle İlgili Sonuçlar.....	54
Çizelge 4.10. Varyans Analiz Tablosu.....	52
Çizelge 4.11. Modelin Uygunluğunun Test Edilmesinde Kullanılan İstatistikler	55
Çizelge 4.12. Katsayılar İle İlgili Sonuçlar.....	57
Çizelge 4.13. Varyans Analiz Tablosu.....	57
Çizelge 4.14. Modelin Uygunluğunun Test Edilmesinde Kullanılan İstatistikler	57



ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 1.1.	Tekstil Endüstrisinde Temel İşlemler.....	2
Şekil 1.2.	Boyar Madde İçeren Atıksuların Arıtımında Kullanılan Prosesler	6
Şekil 1.3.	İleri Oksidasyon Yöntemlerinin Gruplandırılması	9
Şekil 1.4.	Kısmi Basınç Altında Ozonun Saf Suda Çözünürlüğü.....	14
Şekil 1.5.	Ozonun Sulu Çözeltide Gerçekleşen İki Tip Reaksiyonu	15
Şekil 1.6.	Elektromanyetik Spektrum Bölgeleri.....	18
Şekil 3.1.	RB5 Ölçümünde Kullanılan Kalibrasyon Eğrisi	34
Şekil 3.2.	Kalibrasyon Eğrisi Verileri	35
Şekil 3.3.	Yarı Kesikli İşletilen Reaktör.....	36
Şekil 4.1.	Temas Süresinin RB5 Giderim Verimine Etkisi	43
Şekil 4.2.	Ozonlama Prosesinde pH'nın RB5 Giderimine Etkisi	45
Şekil 4.3.	Ozonlama Prosesinde Ozon Dozunun RB5 Giderimine Etkisi	47
Şekil 4.4.	Reactive Black 5 Başlangıç Konsantrasyonunun RB5 Giderimine Etkisi.....	49
Şekil 4.5.	Ozonlama + UV Prosesinin RB5 Giderimine Etkisi	50
Şekil 4.6.	pH ve Temas Süresine Bağlı RB5 Giderimininde Tahmin Değerleri ile Deneysel Değerlerin Karşılaştırılması.....	51
Şekil 4.7.	Ozon Dozu ve Temas Süresine Bağlı RB5 Giderimininde Tahmin Değerleri ile Deneysel Değerlerin Karşılaştırılması.....	53
Şekil 4.8.	RB5 Başlangıç Konsantrasyonu ve Temas Süresine Bağlı RB5 Giderimininde Tahmin Değerleri ile Deneysel Değerlerin Karşılaştırılması.....	56



SİMGELER VE KISALTMALAR

AKM	: Askıda katı madde
MAC	: Aktif karbon
Atm	: Atmosfer (Basınç birimi)
BOİ	: Biokimyasal oksijen ihtiyacı
CAS	: Chemical Abstracts Service (Kimyasal sınıflandırma servisi)
Cl	: Klor elementi
CO ₂	: Karbondioksit
DB71	: Direct Blue 71
DGB	: Direct Green B (Direkt yeşil B)
dk	: Dakika
EDTA	: Etilen-diamin tetraasetik asit
EDTMPA	: Etilendiamin tetrametilen fosfonik asit
Fe	: Demir elementi
g	: Gram
GAC	: Granüler aktif karbon
H	: Plank sabiti
H ₂ O ₂	: Hidrojen peroksit
Hz	: Hertz
İOP (AOP)	: İleri oksidasyon prosesi (Advanced Oxidation Processes)
k _{1,2,3,...,n}	: Denge sabiti
KOİ	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
LD50	: Toksik bir maddenin veya radyasyonun ortalama öldürücü dozu
L	: Litre
m ³	: Metreküp
mg	: Miligram

mL	: Mililitre
MBBR	: Biyofilm reaktörü
M	: Molar
NFN	: Nikel ferrit nanopartikül
NH ₄ -N	: Amonyum azotu
Kg	: Kilogram
OH	: Hidroksil
O ₂	: Oksijen
O ₃	: Ozon
pKa	: Asidik iyonlaşma sabitinin negatif logaritması
Pt- Co	: Kloroplatinat iyonunun sebep olduğu 1 mg platin/L renk birimi
RB5	: Reaktif Black 5
RO16	: Reactive Orange 16 (Reaktif turuncu 16)
RR195	: Reactive Red 195 (Reaktif kırmızı 195)
RRRB	: Remazol Red RB (Remazol kırmızı RB)
R	: Radikal grup
R ²	: Belirtme katsayısı
S	: Kükürt
s	: Saniye
TiO ₂	: Titanyumdioksit
TOK	: Toplam organik karbon
UV	: Ultraviyole
US	: Ultrases
V	: Volt
VUV	: Vakum ultraviyole
ZSF	: Zehirlilik seyreltme faktörü
°C	: Celsius

1. GİRİŞ

1.1. Tekstil Endüstrisi ve Türkiye'deki Yeri

Tekstil endüstrisi, hayvansal, bitkisel veya sentetik liflerin kullanıldığı dokuma proseslerini gerçekleştiren bir sanayi koludur. Tekstil ve hazır giyim sektörü, Dünya'daki diğer gelişmekte olan ülkelerde olduğu gibi Türkiye'de de halen lokomotif sektörler arasında yer almaktadır. Günümüzde, tekstil ve hazır giyim sektörü birlikte değerlendirildiğinde, gayri safi yurt içi hâsıla, imalat sanayi ve sanayi üretimindeki pay, ihracat, ekonomiye sağladığı net döviz girdisi, istihdam, yatırım gibi makroekonomik büyüklükler açısından Türkiye'nin önemli sektörlerinden biridir (Sevim ve Kuyumcu, 2008; Alüftekin ve ark., 2009). İplik üretimi Kahramanmaraş, İstanbul, Adıyaman, Gaziantep, Bursa gibi illerde yoğun olarak yapılırken; Denizli'de havlu, bornoz, ev tekstili imalatı; Uşak'ta iplik, battaniye, geri dönüşüm; Çorlu ve Çerkezköy'de terbiye; Adana'da pamuklu dokuma ve terbiye; Gaziantep'te polipropilen, dokusuz yüzey, makine halıcılığı; İstanbul'da konfeksiyon ve örme üretimi ön plana çıkmaktadır (Ekti, 2013).

Tekstil endüstrisinde imalat süreçlerinde terbiye, boyama, baskı ve apreleme işlemleri gibi yaş (ıslak) prosesler ile dokuma, örme, eğirme, kurutma, fikse işlemleri gibi kuru proseslerden yararlanılmaktadır. Tekstil endüstrisinde uygulanan üretim zincirindeki temel işlemler ve ıslak prosesler Şekil 1.1.'de şematik olarak gösterilmiştir (Babu ve ark., 2007; Tübitak, 2013).

1.2. Boyama (Renklendirme)

Tekstil boyaları yılda yaklaşık 700000 ton üretilimiyle, pazara sunulan organik bileşiklerin en geniş gruplarından biri olarak görülür ve Dünya çapında üretilen boyaların %1 ile %20'si tekstil endüstrisinde boyama proseslerinde kullanılmaktadır (Dehghani ve Mahdavi, 2015; Dehghani ve ark., 2016). Islak proseslerin içinde yer alan boyama (renklendirme) işlemi, müşteri talepleri dikkate alınarak, düz boyama ya da baskı şeklinde yapılır. Düz boyama sonucunda kumaş homojen bir renk görüntüsü kazanır. Baskı ise bölgesel ve istenildiğinde çok renkli olarak yapılan bir renklendirme işlemidir (Tübitak, 2013).

Boyama işlemleri sonucu oluşan atık suların en karakteristik kirletici parametrelerinden birisi renk olup; bu tür atık sularda çözünmüş ve kolloidal yapıda olabilen rengin başlıca kaynağı söz konusu işlemlerde kullanılan boyar maddelerdir (Ölmez ve ark., 2006). Kullanılan boyaların, ozon, azot peroksit, ışık hidrolizi ve klor gibi kimyasallara karşı dayanıklı olması için boyama işleminde; lif üzerine boyanın tutunmasını arttırmak amacıyla; metaller, tuzlar, formaldehit, sülfid, sülfür, yüzey aktifler gibi atık suda temel kirlilik yaratan kimyasallar suya eklenebilmektedir. Bu nedenle boyama süreci sonunda yüksek renk ve düşük organik madde içeriğine sahip atık sular oluşmaktadır (Kocaer ve Alkan, 2002; Tübitak, 2013).

Boyamada kullanılan boyar maddeler birkaç şekilde sınıflandırılabilir. Sınıflandırmada; çözünürlük, kimyasal yapı, boyama özellikleri, kullanılış yerleri gibi çeşitli karakteristikler dikkate alınmaktadır. Boyar maddelerin sınıflandırılması EK 1'de verilmiştir (Başer ve İnancıcı, 1990; Aydın 2011).

1.3. Boyar Madde İçeren Atıksuların Çevresel Önemi

Son yıllarda sanayi kaynaklı renkli atık suların alıcı ortamlara doğrudan veya arıtılarak deşarj edilmesi, çevrecilerin ve girişimcilerin dikkatini çekmiştir. Renkli atık sular sadece alıcı ortamların su şeffaflığını ve estetiğini etkilememektedir. Aynı zamanda bazı organik boyaların olası toksisitesi ve karsinojenitesi hakkında

çevresel kaygılara da neden olmaktadır (Mustapha, 2015). Yapılan çalışmalar da göstermiştir ki; boyar madde içeren atıksuların deşarj edilmesi, çevre kalitesinin ve alıcı ortamın bozulmasına neden olmaktadır. Proseslerde kullanılan kimyasalların ve boyar maddelerin biyolojik olarak parçalanabilirliği düşük olduğundan dolayı, oluşan atık suyun biyolojik olarak arıtılabilirliği zordur. Renkli atık sular, deşarj edildiği su ortamındaki ışık geçirgenliğini azalttığından fotosentetik aktiviteyi olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca deşarj edildiği alıcı ortamlarda ötrofikasyona, çözünmüş oksijen seviyesinin azalmasına ve su kalitesinin düşmesine neden olmaktadır (Nakhjirgan ve Dehghani, 2015; Dehghani ve ark., 2016). Boyar maddelerin bazı sucul organizmalarda birikmesi, toksik ve kanserojenik ürünlerin meydana gelme riskini beraberinde getirmektedir (Kocaer ve Alkan, 2002). Test edilen 4000 boyar maddenin %90'undan fazlasının LD50 (toksik bir maddenin veya radyasyonun ortalama öldürücü dozu) değerleri 2×10^3 mg/kg'dan yüksektir. En yüksek toksisite oranları “basic” ve “diazo direct” boyar maddeler arasında bulunmuştur (Shore, 1996; Joshi ve ark., 2004). Almanya Hükümeti 1994 yılında karsinojenik oldukları gerekçesiyle arilamin, benzidin ve türevlerini içeren azo boyar maddelerinin kullanımını yasaklamıştır (Shore, 1996). Bu nedenle boyar madde içeren tekstil endüstrisi atıksularının renk giderimi ekolojik açıdan önemlidir.

Tekstil endüstrisinin farklı süreçlerinde oluşan atıksu karakterizasyonları EK 2'de verilmiştir (Bisschops ve Spanjers, 2003; Tübitak, 2013).

Ülkemizde, 24.04.2011 tarihli ve 27914 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren, Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne (SKKY, 2004) renk parametresinin deşarj kriteri olarak eklenmesi ile, 2 saatlik kompozit numune için 280 Pt-Co, 24 saatlik kompozit numune için 260 Pt-Co renk sınır değeri getirilmiştir (SKKY, 2004). Bu değişiklik ülke genelinde ve özellikle tekstil sanayinin yaygın olduğu bölgemizde, mevcut arıtma tesislerinin yetersiz kalmasına ve ilave ileri arıtma proseslerinin kullanılmasına neden olmuştur. Örnek teşkil etmesi amacıyla Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne göre tekstil sanayi atık

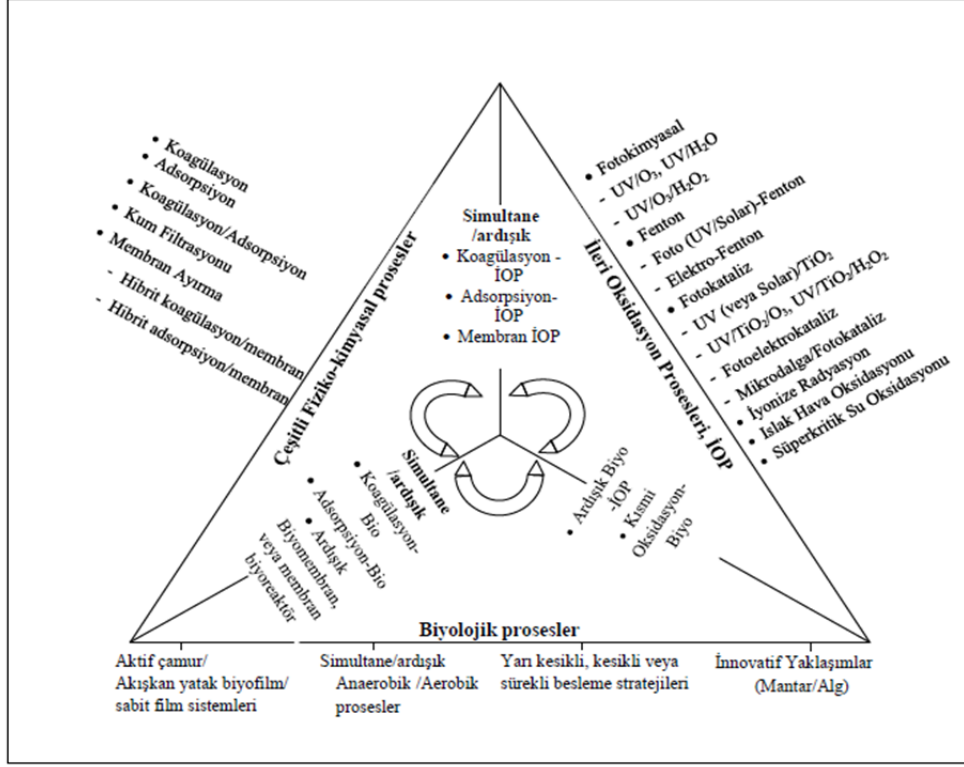
sularında izin verilen deşarj standartlarını (Yün Yıkama, Terbiye, Dokuma ve Benzerleri için) içeren değerler Çizelge 1.1.'de verilmiştir. Bu yönetmelikte bazı parametreler için izin verilen deşarj standardı proses ve ham madde özelliklerine göre değişiklik gösterirken; renk parametresi için deşarj standardı tüm proses ve ham maddeler için aynıdır.

Çizelge 1.1. Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne Göre Tekstil Sanayi Atık Suları İçin İzin Verilen Deşarj Standartları (Yün Yıkama, Terbiye, Dokuma ve Benzerleri) (SKKY, 2004)

PARAMETRE	BİRİM	KOMPOZİT NUMUNE 2 SAATLİK	KOMPOZİT NUMUNE 24 SAATLİK
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	(mg/L)	400	300
Askıda Katı Madde (AKM)	(mg/L)	400	300
Amonyum Azotu (NH ₄ -N)	(mg/L)	5	-
Serbest Klor	(mg/L)	0,3	-
Toplam Krom	(mg/L)	2	1
Sülfür (S ²⁻)	(mg/L)	0,1	-
Sülfid	(mg/L)	1	-
Yağ Ve Gres	(mg/L)	200	100
Balık Biyodenyeyi (ZSF)		4	3
pH		6-9	6-9
Renk	(Pt-Co)	280	260

1.4. Atıksulardan Renk/Boyar Madde Giderme Yöntemleri

Atıksulardan renk/boyar madde gideriminde kimyasal, fizikokimyasal ve biyolojik prosesler kullanılabilir. Bu proseslere bakıldığında; biyolojik yöntemlerin fiziksel ve kimyasal yöntemlere göre daha ekonomik ve çevre dostu olduğu görülmektedir. Ancak, yapılan çalışmalarda bu yöntemlerden sadece birinin kullanılmasının çoğu zaman yeterli olmadığı, birçok yöntemi bir arada kullanmanın teknik ve ekonomik açıdan daha uygun olduğu belirlenmiştir (Tübitak, 2013). Tekstil atıksularından renk/boyar madde gideriminde kullanılan arıtım teknolojileri Şekil 1.2.'de verilmiştir (Hai ve ark., 2007; Tübitak, 2013).



Şekil 1.2. Boyar Madde İçeren Atıksuların Arıtımında Kullanılan Prosesler (Hai ve ark., 2007; Tübitak, 2013)

1.4.1. Biyolojik Yöntemler

Biyolojik arıtım, endüstriyel proseslerden alıcı sistemlere transfer olan organikler için en önemli giderim prosesidir. Tekstil endüstrisi atıksuları için önerilen fiziksel ve kimyasal yöntemlerin yüksek maliyet gerektirmeleri ve her boya için kullanılamıyor olmaları, uygulanmalarının sınırlı olmasına neden olmuştur. Son zamanlarda yapılan çalışmalar birçok boya türünü atık sudan giderebilme yeteneğine sahip yaygın mikroorganizma türlerinin mevcudiyetini vurgulamış ve biyoteknolojik metodları ön plana çıkarmıştır. Yani, teorik olarak biyolojik arıtma sistemlerinin kimyasal ve fiziksel arıtma yöntemlerine göre daha az çamur üretmesi, maliyetinin daha düşük olması ve alıcı ortamlar için zararlı yan ürünleri oluşturmaması gibi özelliklerinden dolayı tekstil endüstrisi atık sularının

arıtımı için ideal çözüm olarak kabul edilmektedir. Uygulanan biyolojik yöntemler; aerobik yöntem, anaerobik yöntem ve biyosorpsiyondur (Kocaer ve Alkan, 2002). Boyar madde, KOİ ve BOİ gideriminde aerobik-anaerobik yöntemlerin birlikte uygulanmaları, tek başına uygulanan aerobik ve anaerobik sistemlere göre daha verimli olmaktadır. Bunların yanında kültür ortamında yetiştirilen bakteriler, algler, funguslar ve mayalar boyar madde gideriminde kullanılmaktadır (Joshi ve ark., 2004).

Bunun yanında su kirlenmesinin önlenmesi amacıyla deşarj standartlarının her geçen gün daha da sıkılaştırılması, daha düşük renk içeren arıtılmış su talebini ortaya çıkarmıştır. Bu da tekstil atıksularının arıtılmasında biyolojik proseslerin çoğu zaman yetersiz kalmasına neden olmuş ve biyolojik proseslerin ileri arıtma yöntemleri ile birlikte kullanılmasının teknik ve ekonomik açıdan daha uygun olduğu ifade edilmiştir (Kocaer ve Alkan, 2002).

1.4.2. Fiziksel Yöntemler

Renk/boyar madde gideriminde fiziksel yöntem olarak; adsorpsiyon, membran filtrasyonu ve iyon değiştirme uygulamaları kullanılmaktadır (Kocaer ve Alkan, 2002). Boyar madde gideriminde aktif karbon; kitin, odun talaşı gibi bioadsorbentler; tarımsal, hayvansal ve mikrobiyal biyoküteller; lignoselülozlar (çeltik kabuğu, pamuk atıkları gibi lignin ve selülozun birleşimi); kül, kil, boksit gibi inorganik maddeler; anyonik ve katyonik iyon değiştiriciler; polimer atıklar adsorbent olarak kullanılmaktadır (Joshi ve ark., 2004).

1.4.3. Elektrokimyasal Yöntemler

Bu sistemde demir hidroksitler üreten elektrokimyasal hücreler bulunur. Bu hücreler küçük aralıklarla birbirinden ayrılmış çok miktarda elektrot tarafından çevrelenmiş cam elyaf gövdelerden oluşur. Atıksu bu aralıklardan geçerken elektrotlarla temas halindedir. Bu elektrotlardan doğru akım geçtiğinde anot demir iyonları, katot hidrojen gazı ve hidroksi iyonları yayar (Joshi ve ark., 2004).

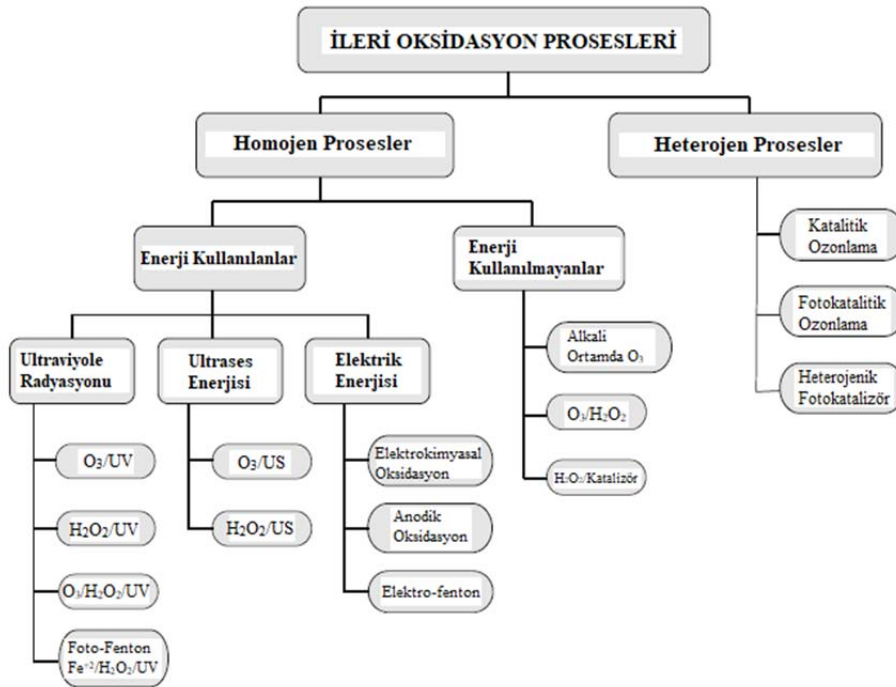
Prosesinin etki mekanizması, adsorpsiyon çöktürme, koagülasyon ve flotasyon mekanizmalarının biri veya bir kaçına dayanmakla birlikte, alüminyum ve demir gibi metal anotların anodik çözünmeye uğraması ve hidrolizi ile çok az çözünen $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_2$ ve $Fe(OH)_3$ gibi metal hidroksitlerin oluşması şeklindedir (Özyonar ve Karagözoğlu, 2012). Basit ve etkili bir yöntem olmasının yanı sıra ayrıca kimyasal madde ilavesi söz konusu olmadığından ikincil kirlilik problemi yaratmamakta; basit ekipman, daha az iş gücü ve daha küçük alanlarda uygulanabilmektedir (Bayar ve ark., 2012). Bu sistemlerin renk, ağır metal, $KOİ$, $BOİ$, TOK, çözünmüş ve askıda katıları giderdiği kanıtlanmıştır (Joshi ve ark., 2004; Özyonar ve Karagözoğlu, 2012).

1.4.4. Kimyasal Yöntemler

Tekstil atık sularının kimyasal yöntemlerle arıtılması uzun yıllardan beri en çok ilgi gören yöntem olmuştur. Bunun en büyük nedeni şüphesiz atık su kalitesinde meydana gelen değişikliklerin, kullanılan kimyasalda veya uygulanan dozda yapılan değişikliklerle kolayca tolere edilebilir olmasıdır (Socha, 1991; Kocaer ve Alkan, 2002). Tekstil endüstrisi atık sularının arıtımında en yaygın olarak kullanılan kimyasal yöntemler; oksidasyon yöntemleri, kimyasal çöktürme ve flokülasyon yöntemi ve Cucurbituril ile arıtımdır (Kocaer ve Alkan, 2002). Koagülasyon - flokülasyon sistemleri renk ve bulanıklık veren partiküllerin çöktürülerek sudan ayrılmasında yıllar boyunca kullanılan en ekonomik yöntem olmuştur (Joshi ve ark., 2004).

İleri oksidasyon prosesleri (İOP), organiklerin oksidatif olarak parçalanması için hidroksil radikallerinin ($\bullet OH$) üretilmesi prensibine dayanan bir prostedir (Lorraine ve Glaze, 1992; Yalılı Kılıç ve Kestioğlu, 2008). O_3 , O_3/H_2O_2 , VUV, H_2O_2/UV , O_3/UV , $O_3/H_2O_2/UV$, Fenton, foto-Fenton, sonokimyasal oksidasyon (Ultrasound/ H_2O_2 , Ultrasound/ O_3 vb), fotokataliz prosesi gibi kombine ileri oksidasyon proseslerinin yüksek oksidasyon kapasitesine sahip radikal üretimi yapan prosesler olduğu bilinmektedir (Legrini ve ark., 1993; Zhou ve Smith, 2002;

Gogate ve Pandit, 2004a; Gogate ve Pandit, 2004b; Yonar, 2005; Yalılı Kılıç ve Kestioğlu, 2008). İleri oksidasyon prosesleri homojen ve heterojen olarak sınıflandırılmaktadır. Enerji kullanılan ve enerji kullanılmayan prosesler homojen süreçlerin altında ayrıca gruplanmaktadır (Poyatos ve ark., 2010). İleri oksidasyon proseslerinin gruplandırılması Şekil 1.3.'de gösterilmiştir (Poyatos ve ark., 2010).



Şekil 1.3. İleri Oksidasyon Yöntemlerinin Gruplandırılması (Poyatos ve ark., 2010)

İleri oksidasyon proseslerinde, organik madde oksidasyonundan sorumlu başlıca reaktif ara ürün hidroksil radikalleridir. Hidroksil radikalleri (OH•), suda bulunan birçok organik ve inorganik kimyasal madde ile seçici olmaksızın hızlı bir şekilde reaksiyona giren oksidant maddelerdir. Hidroksil radikali flordan sonra ikinci yüksek oksidasyon gücüne sahiptir (Küni, 2009). Oksidatif türler ve elektriksel potansiyelleri Çizelge 1.2.'de verilmiştir (Clarke ve Knowles, 1982; Küni 2009).

Çizelge 1.2. Oksidatif Türler ve Elektriksel Potansiyelleri (Clarke ve Knowles, 1982; Küni 2009)

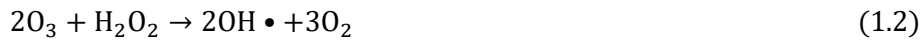
Oksidatif Türler	Elektriksel Potansiyel (Volt)
Flor	3,03
Hidroksil Radikali (OH•)	2,80
Atomik Oksijen	2,40
Ozon	2,07
Hidrojen peroksit	1,78
Perhidroksil Radikali	1,70
Permanganat	1,69
Hipobromöz Asit	1,59
Klordioksit	1,56
Hipokloröz Asit	1,50
Hipoiodöz Asit	1,46
Klor	1,36
Brom	1,09
İyot	0,73

İleri oksidasyon proseslerinden bazıları aşağıdaki şekilde açıklanmıştır.

Yüksek pH'da Ozonlama; pH arttıkça ozonun sudaki parçalanma oranı yükselir. Örneğin, pH 10'da, su içindeki ozonun yarı ömrü bir dakikadan kısa sürer. Moleküler ozon ve OH• reaksiyonlarının kombinasyonu sonucu, saf türlerin oksidasyonu gerçekleşebilir (Baig ve Liechti, 2001; Hassaan ve El Nerm, 2017).



Ozon–Hidrojen Peroksit Prosesi; Hidrojen peroksit su içerisinde ozon molekülleri ile çok yavaş reaksiyona girerken, hidrojen peroksitin sudaki reaksiyonu sonucu oluşan HO₂⁻ moleküler ozon ile çok hızlı bir şekilde reaksiyona girmektedir (Arslan, 2000; Yalılı Kılıç ve Kestioğlu, 2008).



Hidrojen Peroksit–UV Prosesi; UV ışınlaması altında, H₂O₂'nin fotolizi sonucunda iki adet hidroksil radikali oluşmaktadır. Oluşan radikaller daha sonra organik kirleticilerle reaksiyona girer veya bir H₂O₂ parçalanma-oluşma döngüsüne uğrar (Crittenden ve ark., 1999; Yalılı Kılıç ve Kestioğlu, 2008).



O₃/H₂O₂/UV Prosesi; O₃/H₂O₂/UV prosesinde meydana gelen hidroksil radikalleri ile organik kirleticiler fotookside ve mineralize olurlar. UV ışınlaması altındaki elektron transferiyle H₂O₂, ozonun parçalanmasını başlatır ve bu reaksiyon sonucunda OH• radikalleri üretilir (Huang ve ark.,1993; Zayas ve ark., 2007; Yalılı Kılıç ve Kestioğlu, 2008).



Vakum Ultraviyole Prosesi (VUV); 190 nm'lik dalga boyundan daha düşük UV dalga boylarındaki yüksek enerji, suyu fotolize ederek OH• ve •H radikallerinin artışına neden olmaktadır (Gonzalez ve ark., 1994; Yalılı Kılıç ve Kestioğlu, 2008). Bunun yanı sıra, hedef maddenin fotohomolizi içinde kullanıldığı durumlarda, suyun VUV fotolizi maddeyi parçalamak veya çözmek için saldırıda bulunan hidroksil radikallerini yüksek verimlilikte üretir.



Ozon–UV Prosesi; O₃/UV prosesi, ozon moleküllerini aktive etmek için UV fotonlarının kullanımı ile gerçekleşir. Bu proses sonucunda hidroksil radikalleri meydana gelir (Zhou ve Smith, 2002; Yalılı Kılıç ve Kestioğlu, 2008; Hassaan ve El Nerm, 2017).



1.5. Ozonun Tarihçesi, Özellikleri ve Reaksiyonları

1.5.1. Ozonun Tarihçesi

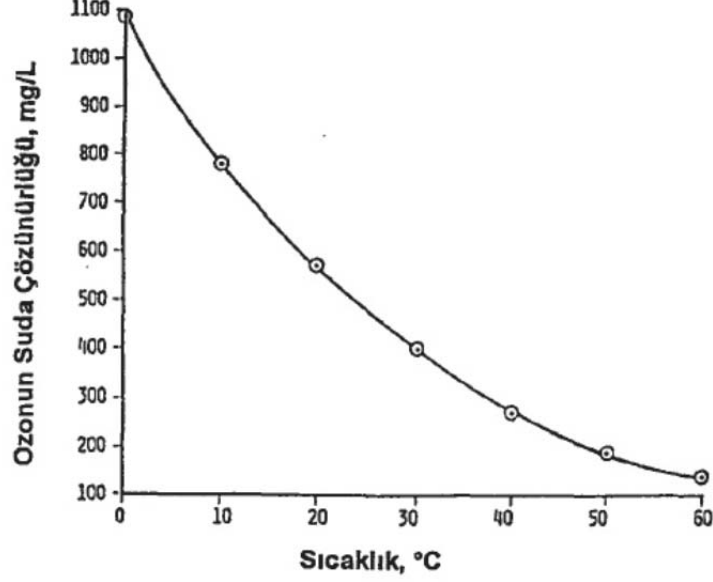
Ozon, ayrı bir kimyasal bileşik olarak ilk kez Basel Üniversitesi Kimya Profesörü Christian Friedrich Schönbein tarafından 1828'de tanımlanmıştır. 1865 yılında Soret tarafından ozonun moleküler formülü belirlenmiş ve 1867'de yine Soret tarafından teyit edilmiştir. 13 Mart 1839'da Schönbein, Basel'deki yerel Doğa Araştırmacıları Derneği'ne elektroliz edilen suyun, bir ark tarafından elektrotlar arasında üretilen koku ile aynı kokuyu verdiğini bildirmiştir. Bu koku, oksijenli atmosferin yıldırımlara maruz kaldığında ortaya çıkardığı kokuyla aynıdır. Schönbein'den çok önce elektrik makinelerinin geliştirildiği dönemde Martin Van Marum açık havada çalışan bu makinelerin çalışmasına eşlik eden kokuyu, elektriğin kendisine atfetmiştir ve "elektiriğin kokusu" olarak tanımlamıştır (Rubin, 2001).

Tarih boyunca, farklı bilim adamları tarafından ozon; elektrikli oksijen, fosforlu oksijen, yeni oluşan/ongunlaşmamış oksijen, kokulu oksijen olarak isimlendirilmiştir. Schönbein, kokunun farklı bir kimyasal maddenin ürünü olduğuna dair öneriyi 1840 yılında bir konferansta sunarken yeni maddenin adını Yunancada koku anlamına gelen "ozein" kelimesinden esinlenerek ozon olarak tanımlamıştır (Rubin, 2001). Başlangıçta kimyasal bir koku olarak keşfedilen ozon, daha sonra organik sentez için bir reaktif, doğal ürünlerin yapısını belirlemek için son derece yararlı bir araç olmuştur. Daha yakın zamanda da sisin ve üst atmosferin önemli bir bileşeni olduğu kanıtlanmıştır (Rubin, 2001).

İlk ticari ölçekte ozon sistemi 1893'te Hollanda'daki Oudshoorn şehrinde içme suyunun dezenfeksiyonu için kullanılmıştır. Bu sistem zamanla, Hollanda, Fransa, Avusturya, Almanya, İsviçre ve diğer ülkelerdeki bazı şehirlerde su dezenfeksiyonu için standart bir uygulama haline gelmiştir. Bununla birlikte 1940'lara gelindiğinde, ABD'de ozonun kullanıldığı ilk içme suyu arıtma tesisi kurulmuştur (Lamarre, 1997). Daha sonraki yıllarda ozon, bulanıklık, renk ve mikrokirleticilerin giderimi, dezenfeksiyon yan ürünlerinin ve uçucu organik karbonların kontrolünde, koagülasyona ve biyolojik arıtmaya yardımcı olarak kullanılmaya başlanmıştır (Sevimli ve Sarıkaya, 2002).

1.5.2. Ozon Özellikleri ve Reaksiyonları

Ozon (O_3 ; triatomik oksijen CAS No: 10028-15-6); oda koşullarında ($25^\circ C$ ve 1 atm) keskin kokulu ve renksiz bir gazdır. Hem gaz hem de çözelti halinde güçlü bir yükseltgen olan ozonun $20^\circ C$ 'de teorik olarak suda çözünürlüğü 570 mg/L'dir (Uzun, 2011). Sıcaklık tüm gazlarda olduğu gibi ozonun çözünürlüğünde de etkilidir. Çözünürlük Henry Kanunu'na göre kısmi basınca bağlı olduğundan, normal sıcaklık ve basınç altında litrede birkaç mg'dan daha fazla konsantrasyon elde etmek zordur. Ozonun kısmi basınç altında saf suda sıcaklığa bağlı olarak çözünürlüğü Şekil 1.4.'de verilmiştir (Bayraktar, 2012).

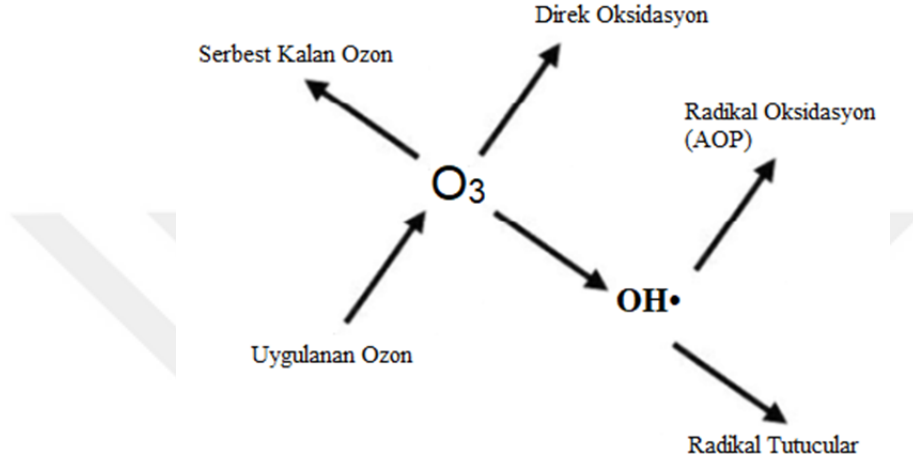


Şekil 1.4. Kısmi Basınç Altında Ozonun Saf Suda Çözünürlüğü (Bayraktar, 2012)

Ozon, $2,14 \text{ kg.m}^{-3}$ (0°C ve 1 atm) yoğunluğunda olup -112°C 'de sıvılaşarak indigo mavisi renge son derece kararsız bir hal alır (Küni, 2009). Oksijen molekülünün (O_2) kararsız iki oksijen (O) atomuna parçalanması ve oluşan oksijen atomlarının oksijen molekülü (O_2) ile reaksiyona girmesi sonucu Ozon (O_3) oluşur. Ozon, kuru hava veya saf oksijenden UV ışımaya veya corona-discharge gibi metotlarla üretilir. Kuru havaya nazaran, oksijenden ozon üretimi yaklaşık 2-2,5 kat daha fazla olmasına rağmen pahalı bir süreçtir (Tübitak, 2013).

Ozon, su ortamında moleküler ozon (O_3) olarak veya ozonun parçalanma ürünü olan hidroksil ($\text{OH}\cdot$) radikalleri aracılığıyla yükseltgen etki gösterir. Moleküler ozon ve hidroksil radikalinin su ortamındaki dağılımı, suyun pH değerine bağlıdır. Düşük pH değerlerinde etkili yükseltgen tür moleküler ozon iken daha yüksek pH'larda radikal türleri baskındır. Nötr pH değerlerinde oluşan hidroksil radikalleri üzerinden gerçekleşen oksidasyonun hızı çok yüksektir. Hidroksil radikali, moleküler ozona göre daha güçlü yükseltgendir. Bu nedenle radikal türü oluşturmak için UV veya hidrojenperoksit kullanılabilir. 1 mol ozon

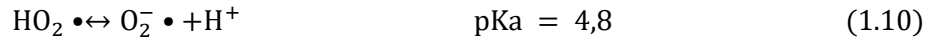
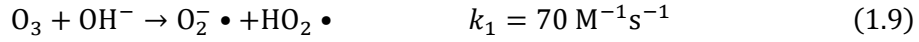
1,5 mol hidroksil radikali oluşturur. Ancak radikal türün yarılanma ömrü daha kısa olduğundan sudaki miktarı 10-12 M'ı geçmez (EPA, 1999; Uzun, 2011). Ozonun sulu çözeltideki reaksiyonları Şekil 1.5.'de verilmiştir (Küni, 2009).



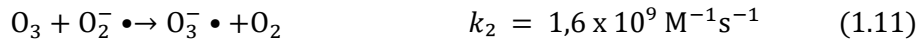
Şekil 1.5. Ozonun Sulu Çözeltide Gerçekleşen İki Tip Reaksiyonu (Küni, 2009)

Ozonun parçalanma zincir mekanizması aşağıda verilmiştir:

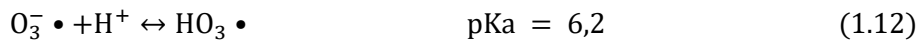
1. Başlatma adımı:

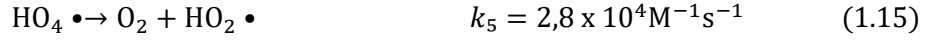
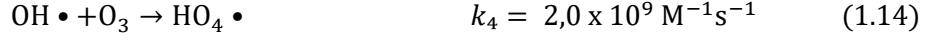
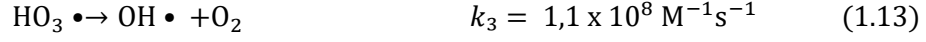


2. Radikal zinciri:



Ozon ve $O_2^- \cdot$ reaksiyonu sonucu ozonür anyon radikali ($O_3^- \cdot$) oluşur ve bu radikal hızlıca hidroksit radikaline bozunur.





$\text{HO}_4 \bullet$ radikalinin oksijen ve perhidroksil radikaline bozunmasıyla fonksiyonel gruplara sahip bazı organik maddeler $\text{OH} \bullet$ radikali ile reaksiyona girerek organik radikaller oluşturabilmektedir.

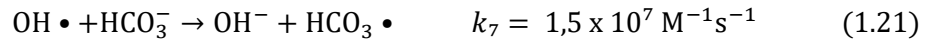
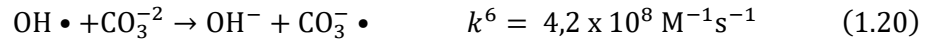


Eğer ortamda oksijen varsa,



OH^- iyonları tarafından başlatılan O_3 'un bozunması bir zincir reaksiyonunu başlatır ve sonuçta seçici olmayan $\text{OH} \bullet$ radikalleri üretilir.

3. Bitirme-son adım:



Zincir reaksiyonunu sonlandıran bir başka reaksiyon ise iki radikalın reaksiyonudur.



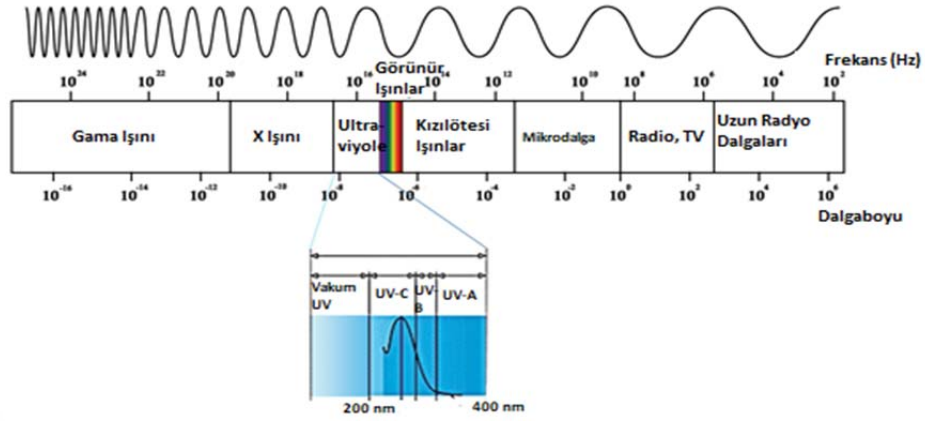
Gerçekleşen radikalik mekanizmanın net reaksiyonu aşağıdaki gibidir (Küni, 2009).



1.6. Ultraviyole

Işık, görünür ışık enerjisi anlamına gelmekle birlikte, güneş ışığı gibi doğal aydınlatma kaynaklarını veya bir lamba ve armatürler gibi yapay kaynakları da ifade edebilir (Sloney, 2016). Modern fizik, ışığı; elektromanyetik alandaki bir dalga veya foton olarak isimlendirilen kütsüz parçacık akışı olarak tanımlamaktadır. Işık, elektromanyetik spektrumda incelendiğinde, farklı dalga boyları nedeniyle farklı tiplere ayrılmaktadır. Bunlar; gama ışını, X ışını, ultraviyole (UV) ışını, görünür ışık, kızıl ötesi ışınlar vd. olarak sınıflandırılmaktadır.

UV dalgaları 100-400 nm aralığındaki dalga boyuna sahip ışınlardır. Görünür ışıktan daha kısa dalga boyuna sahip olduğundan insan gözü UV ışığını görememektedir. UV ışını dalga boyuna göre; vakum UV, yakın (UV-A, 320-400 nm), orta (UV-B, 280-320 nm), ve uzak (UV-C, 200-280 nm) UV olarak dört kısma ayrılmıştır (Perincek ve ark., 2007). Şekil 1.6.'da elektromanyetik spektrum bölgeleri gösterilmiştir (Anonymous, 2019).



Şekil 1.6. Elektromanyetik Spektrum Bölgeleri (Anonymous, 2019)

UV ışık evsel ve endüstriyel alanlarda; dezenfeksiyon, sterilizasyon, sağlık, matbaa, oksidasyon vb. gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

Flordan sonra en güçlü oksitleyici tür olan hidroksil köklerinin üretilmesi ve müteakip reaksiyonlar gerçekleşmesi için bir katalizör görevi gören UV, ileri oksidasyon proseslerinde kullanılmaktadır (Hassaan ve El Nemr, 2017). Oksidasyon materyali olarak ozon kullanıldığında hidroksil radikalini oluşturmak için kullanılan UV'nin etkisiyle gerçekleşen parçalanma reaksiyonları eşitlik (1.6), (1.7), (1.8)'de gösterilmiştir. Hidroksil radikali, moleküler ozona göre daha güçlü bir yükseltgendir (EPA, 1999; Uzun, 2011).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Renk/Boyar Madde Gideriminde Kullanılan Metodlar

Boyar madde içeren tekstil endüstrisi atıksularından renk giderim prosesleri genellikle renk veren moleküllerin kısmen ya da tamamen parçalanmasını ya da rengin çamurda yoğunlaştırılmasını içermektedir. Boyar madde giderimi için fiziksel, kimyasal ve biyolojik metodlar tek başına veya farklı kombinasyonları kullanılarak sağlanmaktadır. Geleneksel aktif çamur sistemleri tek başına etkili bir renk giderimi sağlayamadığı için genellikle anaerobik, kimyasal ya da fiziksel yöntemlerle birlikte kullanılmaktadır. Anaerobik arıtmayla boyar maddeye rengini veren kromofor grupları parçalanabilmektedir. Kombine bir anaerobik-aerobik prosesle hem etkili bir renk giderimi sağlanabilmekte hem de yüksek bir KOİ giderim verimine ulaşabilmektedir (Kocaer ve Alkan, 2002).

El Bouraie ve El Din (2016), yaptıkları çalışmada RB5'in biyolojik olarak parçalanmasını ve tekstil atıksularından biyolojik prosesle renk giderimini araştırmışlardır. Çalışmada, bölgede bulunan tekstil atıksularından alınan numunelerden 42 farklı bakteriyi izole ederek Reaktif Black 5'in neden olduğu rengin giderimindeki etkisini araştırmışlardır. 100 mg/L boyar madde konsantrasyonuna sahip numunede, 41 bakterinin renk giderimine etkisi %23-60 arasında bulunmuştur. Bununla birlikte *Aeromonas hydrophila* bakterisinin, 24 saatlik proses sonunda %76 renk giderimi sağladığını ve RB5 boyar maddesi içeren atıksuların arıtımında *Aeromonas hydrophila*'nın kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

Tekstil atıksularının arıtımı üzerine yapılan çalışmalarda, geleneksel arıtma metodlarının (biyolojik arıtma gibi) farklı yapıdaki tekstil atıksularının arıtımında toleransının az olduğu belirtilmekte; ileri oksidasyon yöntemlerinin kullanılması durumunda spesifik kirliliklerin ve toksik yapıların daha iyi giderildiği bildirilmektedir. Çalışmalar, ileri oksidasyon yöntemlerinin seçiminde atıksuyun karakterinin dikkate alınması gerektiğini, oluşacak ara ürünlerin ve yan ürünlerin

tanımlanmasını ve bunların toksisitesinin incelenmesini, en uygun metodun seçilerek ekonomik bir uygulama olmasına dikkat edilmesini önermektedir (Al-Kdasi ve ark., 2004).

İleri oksidasyon yöntemleri (İOP), tekstil boyama atıksularının renksizleştirilmesi ve zor parçalananan (rekalsitran) maddelerin mineralizasyonu için olası alternatiflerden biridir. Bu işlem, flordan sonra en güçlü oksitleyici tür olan hidroksil köklerinin üretilmesi ve müteakip reaksiyona girmesi anlamına gelir. İOP'ler arasında, ozonun (genellikle H₂O₂, UV veya her ikisi ile birlikte), UV/H₂O₂ sisteminin, fenton ve foto-fenton tipi işlemlerin, reaktif boyaların tam mineralizasyonunda ve karmaşık yapıların biyolojik olarak daha kolay parçalanabilen yapılara dönüşümlerinde çok iyi sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır. Özellikle tek renk atıksularda renk gideriminde O₃ veya O₃ ile birlikte UV, US ve H₂O₂ kullanımının etkili olduğu ve arıtılmış atıksuyun toksikliğini azaltmak için bu proseslerin kullanılabilceği belirtilmektedir (Hassaan ve El Nemr, 2017).

2.2. Renk/Boyar Madde Gideriminde Kullanılan Karma Metodlar

Cardoso ve ark. (2016), tekstil endüstrisinden alınan gerçek numune üzerinde yaptıkları çalışmada renk gideriminde çok yönlü bir sistem geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bunun için fotokatalizasyonu, fotoelektrokristalizasyonu ve gaz akışı olarak ozon kullanarak doğrudan ozonlama proseslerini kullanmışlardır. Fotokatalitik ve fotoelektrokatalitik katalizör olarak TiO₂ nanotüp kullanarak, pH 3 ve pH 8'de ozonlama olmadan, 60 dakika reaksiyon sonrasında %50 renk giderimi sağlamışlardır. Sonrasında, 15 dakikalık ozon uygulaması ile her iki pH değerinde %90 renk giderimi sağlamışlardır. Ayrıca %85 renk gideriminin, atıkta herhangi bir değişiklik yapılmaksızın doğrudan ozonlama yoluyla elde edildiğini bildirmişlerdir. Sonuç olarak gerçek tekstil atıksuları için, ozonlamanın renk gideriminde umut verici bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Dehghani ve ark. (2016), atıksulardan metil orange ve metilen mavisinin renk giderimini iyileştirmek için, flotasyon yönteminde kullanılan poli-alüminyum

klorür, granül ferrik hidroksit, şap, demir sülfat ile UV/TiO₂/H₂O₂ ileri oksidasyon yönteminin (İOP) birlikte uygulanmasını araştırmışlardır. İki adet UV-C (15 W) lamba içeren, 100 mL/dakika akışlı 6 L'lik reaktörü flotasyon tankı olarak kullanmışlardır. pH 10'da, 5 mg/L alüm, 1 g/L TiO₂, 200 mL H₂O₂ konsantrasyon ve 100 mL/dakika hava akışı ile İOP/flotasyon sürecinde metil orange ve metilen mavisinin giderim verimi, sırasıyla %96-98 ve %90-95 elde edilmiştir. Bu çalışma, flotasyon yönteminin pıhtılaştırıcılarla birlikte sudaki çözünür bileşiklerin konsantrasyonunun azaltılması ve uzaklaştırılmasına ilişkin gelişmiş oksidasyon yöntemleriyle kombinasyonunun etkisini ortaya koymuştur.

Abidin ve ark. (2016), yaptıkları çalışmada reaktif kırmızı 120 (su ortamında yüksek çözünürlüğünden dolayı) boyar maddesi içeren tekstil atıksularından, ozonlama ön arıtımıyla biyolojik arıtımının renk ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderimindeki verimlerini incelemişlerdir. Deney iki aşamada düzenlenmiştir. Birincisinde; numune ozonlanarak elde edilen renk giderimi ve KOİ giderimi incelenmiştir. 100 mg/L boya konsantrasyonuna sahip numuneye, 10,2 mg/dk ozon uygulanmıştır. Farklı zaman aralıklarında ölçümler yapılarak 10 dk'nın sonunda %100'e yakın renk giderimi sağlanmıştır. Ayrıca KOİ gideriminin, 10 dakikanın sonunda %50 olduğunu bildirmişlerdir. İkinci aşamada ozonlanmış numuneyi biyolojik arıtmaya tabi tutmuşlardır. Çalışmanın sonunda; biyolojik arıtmanın ozonlama sonucunda oluşan organik yan ürünlerin mineralizasyonunda daha verimli olduğunu, fakat ozonlama işlemine göre renk azaltılmasında daha az etkili olduğunu bildirmişlerdir. Bu nedenle ozonlamanın, azo boya giderimi için uygulanabileceğini ve biyolojik arıtım için bir ön muamele olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Castro ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada, Reactive Orange 16 (RO16) azo boya maddesi içeren sulu çözeltiyi, ozonlama ve biyofilm reaktöründe (MBBR) biyolojik arıtma olarak iki ardışık işleme tabi tutmuşlardır. Biyolojik işlem için ön muamele olarak ozonlama koşullarını ve RO16'nın ozon oksidasyonundan kaynaklanan yan ürünlerinin toksisitesini değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, ozon

oksidasyonun 25-100 mg/L arasında değişen RO16 konsantrasyonlarına sahip boya çözeltilerinden 5 dakika içinde %97'den daha fazla renk giderimi sağladığını göstermiştir. Bununla birlikte, ozonlama sonucunda toplam organik karbon giderim oranının %48 olduğunu, bunun da boyanın kısmen mineralleştiğini gösterdiğini bildirmişlerdir. Boyar madde içeren solüsyonun toksisitesinin, 2 dakika ozonlama sonrasında azaldığını, fakat daha uzun temas sürelerinde arttığını belirtmişlerdir. Sonuçlar ayrıca, ozon oksidasyonunun, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) (%93±1) ve amonyum giderimi (%97±2) açısından MBBR'nin performansını etkilemediğini ortaya koymuştur. Ozon oksidasyonunun olmadığı ikinci bir MBBR sistemi karşılaştırma amacıyla paralel yürütüldüğünde KOİ (%90±1) ve amonyum gideriminin (%97±2) aynı olduğunu ancak renk gideriminde MBBR'nin etkisiz kaldığını belirtmişlerdir. Son olarak kısa ozonlama süreleri (5 dakika) ile kompakt bir MBBR'nin kullanılmasının, RO16 azo boya içeren simüle edilmiş tekstil atık suyunun işlenmesinde etkili olduğunu bildirmişlerdir.

2.3. Renk/Boyar Madde Gideriminde Kullanılan İleri Oksidasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Venkatesh ve ark. (2015), ozon prosesinde ozonlama süresinin, renk giderimine, KOİ giderimine ve boyar madde mineralizasyonuna etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında Acid Red 14, Direct Red 28 ve Reactive Black 5 azo boyar maddelerini kullanmışlardır. Başlangıç boyar madde konsantrasyonu 1500 mg/L olan 500 mL'lik numune hacimlerine 55,5 mg O₃/L ozon uygulamışlardır. Numune pH'ları Acid Red, Direct Red 28 ve Reactive Black 5 için sırasıyla 10,7; 9,76; 10,13'tür. 25 dk'nın sonunda KOİ giderimi boyar maddeler için sırasıyla %75, %67, %50; renk giderimi sırasıyla %93, %92, %94'tür. İyon kromatografisi ile analiz edilen ozonlama yan ürünleri, klorür, florür, sülfat, nitrat ve oksalat iyonları olarak belirtilmiştir.

Azbar ve ark. (2004), polyester ve asetat elyaf boyama atıksularından renk ve KOİ gidermek için çeşitli ileri oksidasyon yöntemleri (O₃, O₃/UV, H₂O₂/UV,

$O_3/H_2O_2/UV$, Fe^{2+}/H_2O_2) ile kimyasal arıtma metodlarını ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, $FeCl_3$ ve $FeSO_4$) kıyaslamışlardır. İleri oksidasyon proseslerinin, konvansiyonel kimyasal arıtma metodlarına göre çok daha üstün olduğu sonucuna varmışlardır. $O_3/H_2O_2/UV$ kombinasyonunun diğer ileri arıtma proseslerine göre daha etkili olduğunu (KOİ gideriminde %99, renk gideriminde %96) belirterek, Fe^{2+}/H_2O_2 'nin KOİ ve renk gideriminde memnun edici seviyelerde ve asetat elyaf boyama atıksularından renk ve KOİ gidermede $O_3/H_2O_2/UV$ 'e göre daha ekonomik çözüm olduğunu belirtmişlerdir.

Küni (2009), Reaktif Kırmızı 195 (RR195) monoazoik azo boyar maddesinin 100 mg/L çözeltilerini hazırlayarak ozonlama (O_3), homojen fotokatalitik ozonlama (O_3/UV), heterojen fotokatalitik ozonlama ($O_3/UV/TiO_2$) proseslerini kullanarak boyar maddenin parçalanmasını araştırmıştır. Her bir oksidasyon işlemi için TOK ve renk giderimini saptamıştır. Yaptığı deneylerde boyar madde derişimi, TiO_2 'in miktarı ve pH gibi parametrelerin etkisini incelemiştir. Deneylerde ışık kaynağı olarak 365 nm dalga boyunda ışıma veren UV lambası kullanarak 100 mg/L RR195 boya konsantrasyonu için, ozonlamada pH 11, $O_3/UV/TiO_2$ sisteminde pH 7 ve 1 g/L TiO_2 miktarının optimum şartlar olduğunu belirlemiştir.

Yoon ve ark. (2014), Wonju/Kore bölgesinde bulunan bir domuz çiftliğinden aldıkları atıksuya filtrasyon sonrası renk giderimi için ileri oksidasyon yöntemlerinde kullanılan sadece ozon (O_3) ve ozon-hidrojen peroksit (Perokzon - O_3/H_2O_2) kombinasyonunu uygulayarak bu maddelerin renk giderimindeki etkilerini karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, ozon (O_3) uygulamasının nanafiltrasyondan sonra daha etkili, perokzon (O_3/H_2O_2) uygulamasının ise ultrafiltrasyondan sonra daha etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca ozonun (O_3) ve perokzonun (O_3/H_2O_2) renk giderimi açısından yatırım ve işletme maliyetlerinin ters ozmoz prosesleriyle kıyaslandığında iki uygulamanın da maliyetlerinin daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Bahar (2007), yapmış olduğu çalışmada reaktif kırmızı 195 (RR195) azo boyar maddesi içeren sudan renk gideriminde katalitik ozonlama prosesini

çalışmıştır. Moleküler ozona kıyasla daha yüksek elektrokimyasal oksidasyon potansiyeline sahip hidroksil radikallerinin üretimini sağlayan katalitik ozonlamanın etkisini, renk ve toplam organik karbon (TOK) giderimi için ozon, ozon/granüler aktif karbon (GAC) ve ozon/Mn yüklü GAC işlemleri kullanarak araştırmıştır. RR195 azo boyar maddesinin parçalanmasında Mn yüklü GAC katalizörlüğündeki ozonlamanın tek başına GAC ile ozonlamaya göre daha az etkili olduğunu bildirmiş, pH 11’de, 1 g/l GAC katalizörlüğünde ozonun kullanılmasını önermiştir. Ayrıca minerilizasyonun tam olarak gerçekleşmediğini, BOD, KOD ve TOK değeri yüksek tekstil atık sularında, ozon/GAC yönteminin bir ön arıtma işlemi olarak kullanılmasını önermiştir.

Ertugay ve Acar (2013), azo grubuna ait Direct Blue 71 (DB71) boyar maddesinin 20 kHz frekansta ultrases (US) ile aktif karbon (AC) ve t-butanol ilavesinin renk giderimine etkisini araştırmışlardır. Yalnız ultrases ile yapılan çalışmalarda yeterli verimin elde edilemediğini bildirmişlerdir. İlave edilen aktif karbon ile 100 mg/L DB71 boyar maddesi için %78,1, t-butanol ilavesi ile 50 mg/L DB71 için ise %48,4 renk giderim verimleri elde etmişlerdir. Hibrit çalışmada ise H₂O₂ ilave edip karşılaştırmalı deneyler yaparak 100 mg/L DB71 boyar maddesi için en yüksek renk gideriminin US/AC/H₂O₂ kombinasyonunda %81,9 olarak bulmuşlardır. Çalışma sonucunda ultrases kullanarak DB71 boyar maddesinin renk gideriminde aktif karbonun t-butanol’a göre daha etkili bir katalizör olduğunu belirtmişlerdir.

Mella ve ark. (2017), Acid Red 357 boyar maddesi içeren tabakhane atık suyundaki kirleticilerin uzaklaştırılması için düşük maliyetli alternatiflerin araştırılması amacıyla koagülasyon-flokülasyon/adsorpsiyon (CF-ADS) ve koagülasyon-flokülasyon/ozonasyon (CF-OZ) metodlarını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, CF-ADS için TOK, KOİ, Na⁺ ve renk giderimini sırasıyla %50,04, %53,13, %17,05 ve %61,13; CF-OZ için ise %46,50, %56,25, %11,10 ve %85,34 olarak bulmuşlardır. Ozon kullanımının renk giderimi konusunda adsorpsiyon yönteminden daha verimli olduğunu belirtmişlerdir.

Malik ve ark. (2017), koagülasyonun, ozonun, koagülasyon + ozon + koagülasyon ve potasyum ferrat süreçlerinin, çok kirlenmiş tekstil atık suyundan KOİ, renk ve toksisite giderimindeki verimlerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Deneysel sonuçlar sadece ferrat kullanımının KOİ, renk ve toksisite giderimi üzerinde herhangi bir etkisi olmadığını göstermiştir. Buna karşılık, diğer proseslerle kıyaslandığında en yüksek verimin potasyum ferrat (40 mg/L) + FeSO₄ [3 ml (1 M)] kombinasyonu ile %96,5 KOİ, %83 renk ve %75 toksisite giderimi sağladığını bildirmişlerdir. Potasyum ferrat prosesinin maksimum kirletici uzaklaştırmasının yanında daha az çamur üretmesi sebebiyle diğer proseslere göre daha ekonomik olduğunu belirtmişlerdir.

2.4. Renk/Boyar Madde Giderimine Etki Eden Faktörlerin Araştırılması

Gani ve ark. (2010), tekstil endüstrisinde, doğal ve sentetik ürünlerin boyanmasında kullanılan Direkt Mavi 53 azo boyar maddesinin ileri oksidasyon proseslerinden TiO₂/UV fotokatalitik oksidasyon yöntemi ile giderimini araştırmışlardır. Renk giderimine pH, başlangıç boyar madde derişimi ve katalizör miktarı gibi parametrelerin etkilerini incelemiştir. pH 3 değerinde adsorpsiyonla giderimin etkili olduğunu, katalizör miktarının artırılması ve başlangıç boyar madde derişiminin azaltılması ile renk gideriminin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca SO₄⁻², Cl⁻ gibi anyonların ve Fe⁺², Na⁺ gibi kationların TiO₂/UV prosesine etkileri incelemişler ve bunların varlığında adsorpsiyonla renk gideriminin arttığını, fotokatalitik proste renk gideriminin düştüğünü bildirmişlerdir.

Ölmez ve ark. (2006), tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan reaktif boyar maddelerden Procion Navy HEXL ile boyama proseslerinde iyon tutucu olarak kullanılan EDTA ve EDTMPA'nın yüksek pH'da ozon ile renk ve organik madde giderimi üzerine etkilerini deneysel olarak incelemiştir. İyon tutucuların bulunmadığı solüsyonda, 15 dakikalık reaksiyon süresi sonunda %72 KOİ giderim veriminin elde edildiğini ve rengin tamamına yakınının giderildiğini bildirmişlerdir. EDTMPA ve EDTA'nın ortamda tekil olarak bulunmaları

durumunda 90 dakikalık ozonlama sonunda, EDTMPA ve EDTA için sırasıyla 2,81 ve 3,32 mg O₃/mg giderilen KOİ ozon tüketim oranında, %80 ve %43 KOİ giderim verimleri elde edildiğini belirtmişlerdir. KOİ giderim hızlarına bakarak EDTMPA'nın (0,0291 l/dk) EDTA'ya (0,0258 l/dk) nazaran daha hızlı okside olduğunu tespit etmişlerdir. Boyar madde, ortamda EDTA ile birlikte bulunduğu 90 dakikalık reaksiyon süresi sonunda %78'lik KOİ gideriminin 2,88 mg O₃/mg giderilen KOİ ozon tüketim oranında gerçekleştiğini; boyar maddenin EDTMPA ile beraber bulunması durumunda ise bu değerlerin sırasıyla %90 ve 2,40 mg O₃/mg giderilen KOİ olduğunu belirtmişlerdir. İyon tutucuların boyar maddenin oksidasyonunu engellemediğini, ancak aynı seviyedeki oksidasyon için gerekli süreyi uzattığını tespit etmişlerdir.

Eren ve Anış (2006), ileri oksidasyon yöntemlerinden ozonlama ile tekstil boyama atıksularından renk giderimi konusunda yaptıkları çalışmada; pH, sıcaklık, mekanik hareket, atıksu bileşenleri ve ozon dozu gibi proses parametrelerinin ozonlamaya etkisini ve ozonlamanın renk ve organik kirlilik giderimindeki etkinliğini literatür araştırması şeklinde incelemişlerdir. Araştırma sonucunda, nötürden ziyade düşük ve yüksek pH'larda ve yüksek mekanik hareket altında ozonlama hızının arttığını, boyamada kullanılan yardımcı kimyasalların ozonlama verimini düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Gharbani ve ark. (2008), ozonlama prosesi ile tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan, karmaşık moleküler yapıya sahip ve çeşitli diazo aromatik gruplar içeren Congo Red boyar maddesininin tekstil boyahanelerinin yıkama suyu kimyasal özelliklerini içeren sulu çözeltilerdeki ve Congo Red içeren atıksulardaki parçalanabilirliğini incelemişlerdir. Bunun yanında pH, toplam organik karbon, toplam kjeldahl azotu ve kimyasal oksijen talebinin giderilmesinde etkili olan zaman gibi parametrelerin optimum değerlerini araştırmışlardır. Congo Red boyar maddesinin ozonlamasını, yarı kesikli reaktörde, 23 mL/s sabit ozon akış hızıyla, 13,6 mg/L konsantrasyonda gerçekleştirmişlerdir. Renk giderimi kromofor grupların parçalanması nedeniyle birkaç dakika içinde tamamlanmıştır. Yapısal

yıkımın yüksek pH değerlerinde meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Kimyasal oksijen ihtiyacı %60 azalmış ve boyar maddenin %42'si parçalanmıştır. Sonuçları şu şekilde sıralamışlardır: mineralizasyon zayıftır; reaksiyon dolaylı mekanizmalarla gerçekleşmiştir; nitrifikasyon oldukça baskındır; biyolojik oksijen ihtiyacı simüle edilmiş alkali ve nötr numunelerde sırasıyla gerilemiştir. 13,6 mgO₃/L'de, biyolojik oksijen talep seviyeleri önemli ölçüde artırılmıştır. Bu da alkalın pH'lardaki biyolojik bozunumun artmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Wijannarong ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada, tekstil endüstrisinde kullanılan reaktif boyaların neden olduğu rengin gideriminde ozonlama prosesinin zamana bağlı etkisini incelemişlerdir. Bu çalışma için tekstil boyama fabrikasından alınan iki farklı numuneyi kullanmışlardır. Alınan numunelerin biri Nova Cron Super Black G; diğeri Terasil Red WW 3BS boyar maddelerini içermekte olup her iki numunenin boyar madde konsantrasyonları eşittir. 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300 ve 360. dakikalarda alınan numuneler spektrofotometrede analiz edilerek renk giderim verimleri hesaplanmıştır. 60, 240 ve 360. dakikalarda sırasıyla %48,51, %78,29 ve %92,20 renk giderimlerinin elde edildiğini belirtmişlerdir.

Wu ve ark. (2008), yaptıkları çalışmada; tekstil reaktif boyar maddesi (C.I. Reactive Blue 15) içeren sentetik renkli suyu, yarı kesikli reaktörde ozonlayarak renk giderimini ve reaksiyon kinetiğini araştırmışlardır. Reaksiyonun yalancı birinci dereceden gerçekleştiği; görünür hız sabitinin uygulanan ozon dozu ve sıcaklık ile sabit bir şekilde arttığı, ancak başlangıçtaki boya konsantrasyonu ile logaritmik olarak azaldığı görülmüştür. Ayrıca deney sonuçları; ozonun hacimsel transfer katsayısının başlangıç boya konsantrasyonu, uygulanan ozon dozu ve sıcaklık ile lineer olarak arttığını; ozonlama işleminin, kimyasal oksijen talebini (KOİ) etkili bir şekilde azalttığını ve boyalı suyun biyolojik bozunabilirliğini arttırdığını göstermiştir.

Turhan ve Turgut (2009), tekstil atıksularının neden olduğu kirliliği azaltmak için, Sirius Blue SBRR boyar maddesi bulunan tekstil atıksuyunun ozon

prosesi ile renk giderimini araştırmışlardır. Bunun için ozonun alttan dozajlandığı kolon reaktör kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada boyar madde konsantrasyonunun, ozon dozunun, ozon-hava oranının ve pH'nın renk giderimine olan etkilerini araştırmışlar. Ozon-hava karışımının içindeki ozon konsantrasyonu, ozon akış hızı ve pH arttıka (pH 12'nin altında kalmak koşuluyla) boyar maddenin oksidasyon hızının arttığını, boyar madde konsantrasyonu arttıında ise oksidasyon hızının azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca yüksek ozon akış hızlarında geniş/büyük kabarcıkların oluştuğunu ve renk gideriminin 26 dakikada sonlandığını bildirmişlerdir.

Tehrani-Bagha ve ark. (2010), antrakinon boyar maddesi (C.I. Reaktif Blue 19) içeren tekstil atıksularının renk gideriminde, ozon dozajı, pH, boyar madde konsantrasyonu gibi parametrelerin etkilerini kesikli silindirik reaktör kullanarak araştırmışlardır. Çalışma sonucunda ozonun renk gideriminde çok etkili olduğunu; reaksiyonlar sırasında pH'nın hızlı bir şekilde düştüğünü, bunun da ozonlama prosesi sırasında asidik ürünlerin oluştuğunu belirtmişlerdir. İyon kromatografi cihazı kullanarak temel oksidasyon ürünlerinin sülfat, nitrat, format ve asetat olduğunu bildirmişlerdir. Kimyasal oksijen ihtiyacının (KOİ) ve toplam organik karbonun (TOK) azalmasını bu boyanın kısmi bozunmasının ve mineralizasyonunun göstergesi olarak kabul etmişlerdir.

Mahmoodi (2016), Remazol Red RB (RRRB) ve Direct Green B (DGB) gibi tekstil boyalarını model bileşikler olarak kullanarak nikel ferrit nanopartikül (NFN) katalizörlüğünde boyaların fotokatalitik ozonlamasını araştırmıştır. Reaksiyon parametreleri, boyar maddenin NFN nanopartikül ile bozunduğunu ve rengini kaybettiğini göstermiştir. Alifatik karboksilik asitler, baskın alifatik ara ürünler olarak saptanırken; bunlar yavaş yavaş CO₂'ye oksitlenmiştir. Sonuclar, NFN nanokatalizörünün tekstil boyasının bozulmasında etkili olduğunu ve bu tekniğin, büyük hacimlerde renkli boya içeren sulu çözeltilerin arıtımında uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Çalışmasının sonunda, nikel ferrit nanopartikülünün, renkli atıksuyun içindeki boyaların fotokatalitik ozonlanması için etkili bir katalizör

olarak kullanılabilceğini ve NFN nanokatalizörünü kullanan fotokatalitik ozonlamanın, renkli tekstil atıksularında yüksek oksijen basıncı veya ısıtma olmadan renksizleşme sağlayacağını belirtmiştir.

Sun ve ark. (2007), su ortamındaki Azo Amido Black 10B boyar maddesinin fenton prosesi ile bozunumunu araştırmışlardır. pH, hidrojenperoksit konsantrasyonu ($[H_2O_2]$), demir konsantrasyonu ($[Fe_2]$), Amido Black 10B konsantrasyonu ($[AB10B]$) ve sıcaklık (T) gibi farklı reaksiyon parametrelerinin bozunumdaki etkilerini değerlendirmişlerdir. Deneysel olarak optimum reaksiyon şartları belirlenmiştir : $[AB10B]$: 50 mg/L için; pH : 3,50, $[H_2O_2]$: 0,50 mM, $[Fe_2]$: 0,025 mM ve T: 25 °C'dir. Optimum şartlarda ve 60 dakika sonunda sulu ortamdaki boya bozunma verimi %99,25 olarak gerçekleşmiştir. Fenton oksidasyonu işlemi sırasında sulu solüsyonda Amido Black 10B'nin UV spektrum değişimleri incelenmiştir. Fenton oksidasyonu ile azo bağının kırılmasının (-N=N-) Amido Black 10B aromatik halkanın kırılmasından daha kolay olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel veriler fenton oksidasyonun düşük H_2O_2 ve Fe_2 konsantrasyonlarda Azo Amido Black 10B boyar maddesinin bozunumunda etkili olduğunu göstermiştir.

Zheng ve ark. (2016), C.I. Reactive Black 5 boyar maddesi içeren sentetik atık suyun ozonlama prosesi kullanılarak giderilmesinde etkili olan pH, ozon konsantrasyonu, başlangıç boyar madde konsantrasyonu gibi faktörleri inceleyerek bozunma mekanizmasını araştırmışlardır. Aynı şartlar altında ozon dozunun artmasıyla renk giderim veriminin arttığı, boya konsantrasyonun artmasıyla renk giderim veriminin azaldığı ve nötral pH değerlerinde en iyi renk gideriminin elde edildiğini ve 4 saatlik ozonlama süresi sonunda %54 TOK giderimi elde edildiğini bildirmişlerdir.

Sun ve ark. (2009), Orange G azo boyasını içeren atık suyun renk gideriminde kullanılacak bir yöntem olan fenton oksidasyon prosesinin uygun maliyetli çalışma koşullarını belirlemek için; atıksuyun pH değeri, H_2O_2 ve Fe^{2+} dozajları, sıcaklığı, klorür iyonunun varlığı (konsantrasyonu)/yokluğu, boyar

madde konsantrasyonu gibi bazı önemli işletim parametrelerinin potansiyel etkileri sistematik olarak araştırılmıştır. Ayrıca elde edilen verilere bağlı olarak Orange G'nin renk giderim kinetiği açık bir şekilde anlatılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre renk giderimi için optimum şartlar: pH 4, H₂O₂ dozajı 10⁻² M, [H₂O₂]/ [Fe²⁺] oranı 286:1 olarak bulunmuştur. Sıcaklık artışıyla renk gideriminin arttığı, klorür varlığında renk gideriminin azaldığı belirtilmiştir.

Saatçi ve Hanay (2013), ileri oksidasyon yöntemlerinden olan Elektro-Fenton yöntemini kullanarak biyolojik arıtıma dirençli indigo boyası ihtiva eden tekstil endüstrisi atıksuyunda renk giderimini araştırmışlardır. Bu atıksuda en iyi renk giderimini sağlamak amacıyla sistemde elektriksel akım uygulaması ile farklı pH seviyelerinde, değişen Fe²⁺ konsantrasyonlarında ve farklı H₂O₂ dozajlarında deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda optimum pH 4'de elde edilen renk giderimini %100 olarak bulmuşlardır. Ayrıca ortama ilave edilen H₂O₂ dozajı optimize edilerek pH 4'de çözünen Fe²⁺ konsantrasyonuna göre Fe²⁺: H₂O₂ molar oranı 1:73 olarak belirlenmiştir.

Hanay ve Hasar (2007), Malatya ilinde bulunan bir tekstil fabrikası atıksuyunu kullanarak fenton prosesi ile renk giderim verimini arttırmak amacıyla; reaksiyon süresi, sıcaklık, Fe²⁺ ve H₂O₂ konsantrasyonu, pH gibi bazı parametrelerin optimum değerlerini araştırmışlardır. Sonuç olarak [Fe²⁺]/[H₂O₂] M değeri 1:100 olarak tutulduğunda pH 2'de, 4 saatlik reaksiyon süresi ve 10 °C sıcaklığında, 60 mg/L Fe²⁺ ve uygulanan en yüksek H₂O₂ konsantrasyonu olan 8,53 mM ile en iyi renk giderimi sağlamışlardır.

2.5. Boyar Madde Gideriminin Tahmin Modeli İle İlgili Çalışmalar

Tanyıldızı ve Uygut (2016), yaptıkları çalışmada çam kozalaklarında Basic Blue 3 boyar maddesinin adsorpsiyonunu tahmin etmek için başlangıç pH'sı, boyar madde konsantrasyonu ve temas süresi değişkenlerini kullanmışlardır. Adsorpsiyon prosesinin tahmininde üç değişkenli karesel polinomial regresyon modelinden yararlanmışlardır. Modelin uygunluğunun ölçütlerinden biri olan R² değerini 0,975 bulmuşlardır. Elde edilen modeli kullanarak başlangıç boya konsantrasyonunun

150 ppm ve temas süresinin 600 dk seçilmesiyle en uygun pH'nın 9 olduğu hesaplanmıştır. Bulunan matematiksel model ile farklı başlangıç pH, boyar madde konsantrasyonu ve temas süresiyle renk gideriminin hesaplanmasının mümkün olacağını bildirmişlerdir.

Tanyıldızı ve Altundoğan (2017), sitrik asitle modifiye edilmiş çam kozalakları kullanarak Basic Blue 3 boyar maddesinin adsorpsiyon tahmini için başlangıç pH'sı, temas süresi ve başlangıç boya konsantrasyonunu içeren matematiksel bir model tahmin etmişlerdir. Bu modelin R^2 değeri 0,93 bulunmuştur. Bazik boyanın sorpsiyon işleminde yalancı birinci mertebe, yalancı ikinci mertebe ve partikül içi difüzyon modelleri kinetiğın ve mekanizmanın belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Basic Blue 3'ün adsorpsiyonunda kinetik model regresyon katsayısı incelendiğinde, yalancı ikinci derece kinetik modelin daha uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca bu modelin adsorpsiyon kapasite değerleri deneysel olarak bulunan değerlerle uyumlu olduğunu bildirmişlerdir.



3. MATERYAL VE METOD

3.1. Reaktif Black 5 Boyar Maddesi ve Ölçümü

Deneyisel çalışmalarda kullanılan ve Çizelge 3.1’de özellikleri verilen RB5 boyar maddesi, Üniversitemizin Tekstil Mühendisliği Bölümü’nden temin edilmiştir. RB5 sulu çözeltilerinin konsantrasyon aralığı, tekstil sanayinde uygulanan boya karışım oranları ve konsantrasyonlarını simüle etmek için 100-500 mg/L olarak belirlenmiştir. Deiyonize su kullanılarak RB5’in 100-200-300-400-500 mg/L’lik sulu çözeltileri hazırlanmıştır. Hazırlanan çözeltilerin pH’sı 8,12 olarak ölçülmüştür.

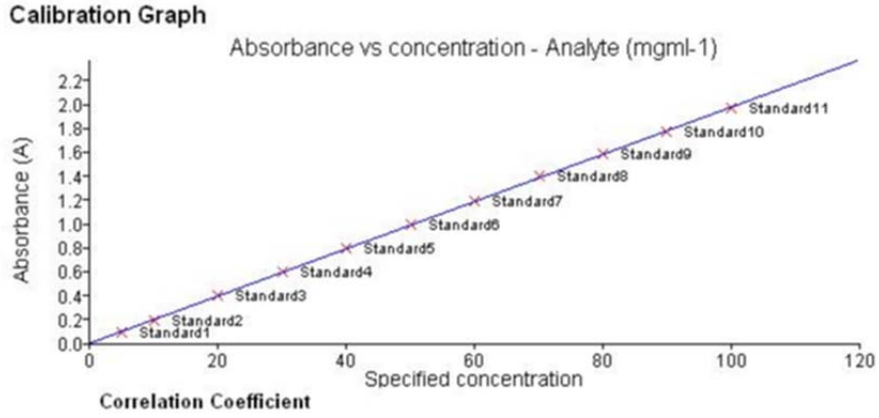
Çizelge 3.1. RB5’in Genel Özellikleri ve Kimyasal Yapısı (Meriç ve ark., 2004)

Kimyasal İsmi	Tetrasodium-4-amino-5-hydroxy-3,6-[[4-[[2-(sulphonatooxy)ethyl]sulphonyl]phenyl]azo]naphthalene-2,7-disulphonate
Kimyasal Sınıfı	Diazo
CAS-No	17095-24-8
Eş Anlamlılar	Reactive Black 5, Remazol Black B.
Molekül Formülü	C ₂₆ H ₂₁ N ₅ Na ₄ O ₁₉ S ₆
Molekül Ağırlığı	991,816 g/mol
λ _{maks.}	597 nm
Kimyasal Yapısı	

Sulu çözeltide RB5 ölçümü için, UV VIS - HACH LANGE DR 6000 spektrofotometre kullanılarak dalga boyu taraması yapılmış ve en yüksek absorbans değeri 597 nm dalga boyunda elde edilmiştir. Bu nedenle çalışma

süresince, oksidasyon öncesi ve sonrasında RB5 ölçümleri 597 nm dalga boyunda gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, oksidasyon işlemleri öncesi ve sonrasında sulu çözeltilerdeki RB5 konsantrasyonları 597 nm dalga boyunda oluşturulan ve aşağıda Şekil 3.1’de verilen kalibrasyon eğrisi ile tespit edilmiştir. 5-100 mgRB5/L konsantrasyon aralığı için hazırlanan kalibrasyon eğrisine ait veriler Şekil 3.2’de verilmiştir. Aralığın üzerindeki RB5 konsantrasyonlarının belirlenmesinde seyreltme yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3.1. RB5 Ölçümünde Kullanılan Kalibrasyon Eğrisi

```

Settings (nm):          Position:597,00
Force through Zero:    No
Calibration Coefficients :
                        a0 = 0,008686
                        a1 = 0,019778
Specified Correlation Coefficient: 0,980000
Calculated Correlation Coefficient: 0,999944

```

Index	StandardID	Specified	Calculated	Residual
1	Standard1	5,0000	4,8378	0,1622
2	Standard2	10,0000	9,4305	0,5695
3	Standard3	20,0000	20,1390	-0,1390
4	Standard4	30,0000	30,0473	-0,0473
5	Standard5	40,0000	40,2789	-0,2789
6	Standard6	50,0000	50,2954	-0,2954
7	Standard7	60,0000	60,1558	-0,1558
8	Standard8	70,0000	70,5458	-0,5458
9	Standard9	80,0000	80,0398	-0,0398
10	Standard10	90,0000	89,7328	0,2672
11	Standard11	100,0000	99,4969	0,5031

Şekil 3.2. Kalibrasyon Eğrisi Verileri

Hem ozonlama (O_3) hem de fotokatalitik ozonlama (O_3+UV) sonucu sulu çözeltilerde gerçekleşen RB5 giderim oranı Eşitlik (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$RB5 \text{ giderim oranı } (\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} * 100 \quad (3.1)$$

Burada;

C_0 : Başlangıç RB5 konsantrasyonu (mg/L)

C_t : t anında RB5 konsantrasyonunu (mg/L) göstermektedir.

3.2. Asit-Baz Çözeltileri ve pH Ölçümü

Oksidasyon işlemleri sırasında RB5 sulu çözeltilerinde pH ayarlamaları için 0,1 N NaOH ve 0,1 N HCl kullanılmıştır. pH ölçümleri OHAUS ST 300 model cihazla gerçekleştirilmiştir. Ozonlama ve ozonlama+UV proseslerinde etkin RB5 giderimi için optimum pH'nın belirlenmesi amacıyla beş farklı pH'da (2, 5, 8, 10, 12) çalışmalar yürütülmüştür.

3.3. Ozon Üretimi ve Ozonlama Prosesi

Deneyisel çalışma sırasında ozon, 0-10 g/saat kapasiteli OZOMAX ozon jeneratörü (Kanada) kullanılarak kuru ve saf oksijenden (%99,99) üretilmiştir. Jeneratör çıkış gazındaki ozon dozu aynı üreticiye ait, cihaza bağlı ozon monitörü ile ölçülmüştür. RB5 ile hazırlanan sulu çözeltilere, jeneratör üzerindeki kademe ayarları kullanılarak 0,1-0,2-0,3-0,4-0,5 gO₃/saat olarak seçilmiş ozon dozları uygulanmıştır.

Ozonlama işlemi için camdan imal edilmiş, 10 cm çapında 100 cm uzunluğunda ve 7,85 L hacime sahip silindirik yarı kesikli bir reaktör kullanılmıştır (Şekil 3.3). Reaktörün yarı kesikli olarak adlandırılması ozon akışının sürekli, su akışının kesikli olması sebebiyledir.



Şekil 3.3. Yarı Kesikli İşletilen Reaktör

Jeneratörde üretilen ozon, ince kabarcıklar üreten gözenekli küresel difüzör kullanılarak reaktöre tabandan verilmiştir. Ozonlama işleminde temas süresi renk

giderim oranı kararlı hale gelene kadar uzatılmıştır. Tüm çalışma oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Ozonlama işlemi sırasında reaktörden kaçan fazla ozon, reaktör tepesinden toplanarak alınmış ve %20 KI (potasyum iyodür) çözeltisinden geçirilerek bertaraf edilmiştir.

3.4. Ozonlama + UV Prosesi

Sulu çözeltilerdeki RB5'in ozonlama+UV prosesi ile giderilmesi için monokromatik, 365 nm dalga boyunda ışık üreten, Philips TUV-11,5 W UV-A LED foto-sistem kullanılmıştır. UV-A LED foto-sistem, hem UV-C'ye göre düşük maliyeti hem de yüksek güç verimliliği sebebiyle tercih edilmiştir.

Şekil 3.3.'de görüldüğü gibi UV foto-sistemler yarı kesikli ozonlama reaktörünün her iki yanına 5 cm mesafede olacak şekilde ahşap bir destek yapısına sabitlenmiştir. Deneysel çalışma sırasında ahşap destek yapısı alüminyum folyo ile sarılarak, ışık şiddetinin reaktör içerisinde ve çevresinde yoğunlaşması temin edilmeye çalışılmıştır.

Ozonlama ile RB5 giderim çalışmalarında tespit edilen ve yüksek RB5 gideriminin elde edildiği şartlar (RB5 konsantrasyonu, pH, ozon dozu, temas süresi) sabit tutularak, ilave UV uygulanmış ve etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Tüm çalışma boyunca deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve iki tekrarlı olarak yapılmıştır.

3.5. Regresyon Analizi

Ozonlama ve ozonlama+UV ile RB5 giderimi deneysel çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak, optimum RB5 giderim oranını elde etmek için prosesi etkileyen değişkenlerin belirlenmesi amacıyla regresyon analizi yapılmıştır.

Öncelikle deneysel çalışmada elde edilen verilerin doğrusal ve doğrusal olmayan regresyona (Efe ve ark., 2000; Orhunbilge, 2002) uyumluluğu araştırılmıştır. Verilere ait dağılım grafiği çizdirildiğinde, verilerin eğilim çizgisinin üzerinde olmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle doğrusal olmayan

regresyon modeline karar verilmiştir. Doğrusal olmayan regresyon modellerinden iki değişkenli ikinci dereceden (karesel) polinomiyal regresyon modeli (Neter ve ark., 1996; Tezcan, 2011) kullanılarak RB5 giderimi ile değişkenler arasındaki ilişki tahmin edilmeye çalışılmıştır. İki değişkenli ikinci dereceden (karesel) polinomiyal regresyon modeli Eşitlik (3.2)' de verilmiştir (Montgomery ve ark., 2012).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \quad (3.2)$$

Burada;

- Y : Bağımlı değişkeni,
X₁ ve X₂ : Bağımsız değişkenleri,
β₀, β₁ ve β₂ : Regresyon katsayılarını,
ε : Hata terimini göstermektedir.

Yapılan analizde, ilk olarak regresyon denklemi tahmin edilmektedir, ardından katsayıların önem testi yapılmaktadır. Tahmin edilen modelin uygunluğunu belirlerken, belirtme katsayısı (R²) hesaplanmaktadır. Belirtme katsayısı, bağımlı değişkendeki toplam değişimin ne kadarının bağımsız değişkenler tarafından açıklandığını göstermektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada, ileri oksidasyon proseslerinden ozonlama ve ozonlama+UV proseslerinin sulu çözeltilerdeki RB5 boyar maddesini giderme verimi araştırılmıştır. Çalışma iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir.

İlk aşamada, ozonlama prosesinin performansını etkileyen temas süresi, pH, ozon debisi ve başlangıç boyar madde konsantrasyonu gibi değişkenlerin proses üzerindeki etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca deneysel çalışmada elde edilen verilere regresyon analizi yöntemi kullanılarak, ozonlama ile RB5 giderimi tahmin modeli oluşturulmaya çalışılmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, ozonlama ile RB5 giderimi çalışmalarında elde edilen ve yüksek RB5 gideriminin elde edildiği koşullar sabit tutulmuş, ilave UV uygulamasının RB5 giderimi üzerindeki etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

4.1. Araştırma Bulguları

4.1.1. Ozonlama Prosesinde Temas Süresinin RB5 Giderimi Üzerine Etkisi

Çalışmada temas süresinin RB5 giderimi üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, ozonlama prosesini etkileyen pH, başlangıç RB5 konsantrasyonu ve ozon debisi gibi diğer değişkenler sabit tutulmuştur (pH 8, 100 mgRB5/L, 0,5 gO₃/saat). Yarı kesikli reaktör bu sabit koşullar altında 5-90 dakika aralığında değişen temas sürelerinde işletilerek, etkin RB5 giderim oranı ve bunun gerçekleştiği temas süresi belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada elde edilen bulgular Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Ozonlama Prosesinde Temas Süresinin RB5 Giderimi Üzerine Etkisi

Temas Süresi (dk)	RB5 (mg/L)
0	100
5	92
10	88
15	70
20	56
40	22
60	8
70	7,3
80	6,8
90	6,5

4.1.2. Ozonlama Prosesinde pH'nın RB5 Giderimi Üzerine Etkisi

Ozonlama ile RB5 gideriminde etkin pH değerinin belirlenmesi için, diğer değişkenler sabit tutularak (100 mgRB5/L, 0,5 gO₃/saat), 5 ile 60 dakika arasında değişen temas sürelerinde pH 2, 5, 8, 10 ve 12'de çalışmalar yürütülmüştür. Elde edilen veriler mg/L olarak Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Ozonlama Prosesinde pH'ın RB5 Giderimi Üzerine Etkisi

Temas Süresi (dk)	RB5 (mg/L)				
	pH 2	pH 5	pH 8	pH 10	pH 12
0	100	100	100	100	100
5	98	95	92	94	97
10	95	93	88	90	94
15	84	79	70	77	81
20	73	62	56	60	65
40	36	28	22	26	34
60	20	14	8	12	15

Seçilen pH değerlerinde en fazla boyar madde giderim yüzdesi %92 ile pH 8'de elde edilmiştir.

4.1.3. Ozonlama Prosesinde Ozon Debisinin RB5 Giderimi Üzerine Etkisi

Sulu çözeltideki RB5' in ozonlama ile gideriminde ozon debisinin etkisini belirlemek için, 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 ve 0,5 gO₃/saat'lik ozon debileri uygulanmıştır. Çalışmada yarı kesikli reaktör içerisindeki ortam pH'sı 8, başlangıç RB5 konsantrasyonu 100 mgRB5/L olarak sabit tutulmuş ve 5 ile 60 dakika aralığında değişen temas sürelerinde RB5 giderim oranları tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.3.'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Ozonlama Prosesinde Ozon Debisinin RB5 Giderimi Üzerine Etkisi

Temas Süresi (dk)	RB5 (mg/L)				
	0,1 O ₃ g/saat	0,2 O ₃ g/saat	0,3 O ₃ g/saat	0,4 O ₃ g/saat	0,5 O ₃ g/saat
0	100	100	100	100	100
5	99	97	96	93	92
10	96	93	92	89	88
15	93	90	85	76	70
20	89	87	80	63	56
40	82	76	59	38	22
60	73	65	44	15	8

4.1.4. Ozonlama Prosesinde RB5 Başlangıç Konsantrasyonunun RB5 Giderimi Üzerine Etkisi

Ozonlama prosesi ile sulu çözeltiden RB5 gideriminde RB5 başlangıç konsantrasyonunun etkisini belirlemek için, tekstil endüstrisindeki kullanım oranları da dikkate alınarak başlangıç RB5 konsantrasyonları 100-200-300-400-500 mgRB5/L olarak seçilmiştir. Seçilen bu konsantrasyonlar, ortam pH'sı 8, ozon debisi 0,5 gO₃/saat sabit tutularak, 5 ile 60 dakika arasında değişen temas sürelerinde ozonlama işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen bulgular Çizelge 4.4.'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Ozonlama Prosesinde RB5 Başlangıç Konsantrasyonunun RB5 Giderimi Üzerine Etkisi

Temas Süresi (dk)	RB5 (mg/L)				
	0	100	200	300	400
5	92	192	297	400	500
10	88	186	285	396	500
15	70	156	252	365	490
20	56	146	234	340	480
40	22	76	147	253	384
60	8	40	96	176	280

4.1.5. Ozonlama + UV

Çalışmanın bu aşamasında, ozonlama ile sulu çözülden RB5 gideriminde elde edilen verilere ilave UV uygulaması ile RB5 giderimindeki değişimler tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla ozonlama işleminde en yüksek RB5 giderimlerinin elde edildiği pH 8, 100 mgRB5/L başlangıç konsantrasyonu ve 0,5 gO₃/saat ozon debisi sabit tutulmuştur. Sabitlenen koşullarda ve 5 ile 60 dakika arasında değişen temas sürelerinde, RB5 sulu çözeltisine 365 nm dalga boyunda ışık üreten Philips TUV-11,5 W UV-A LED foto-sistemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5.'te verilmiştir.

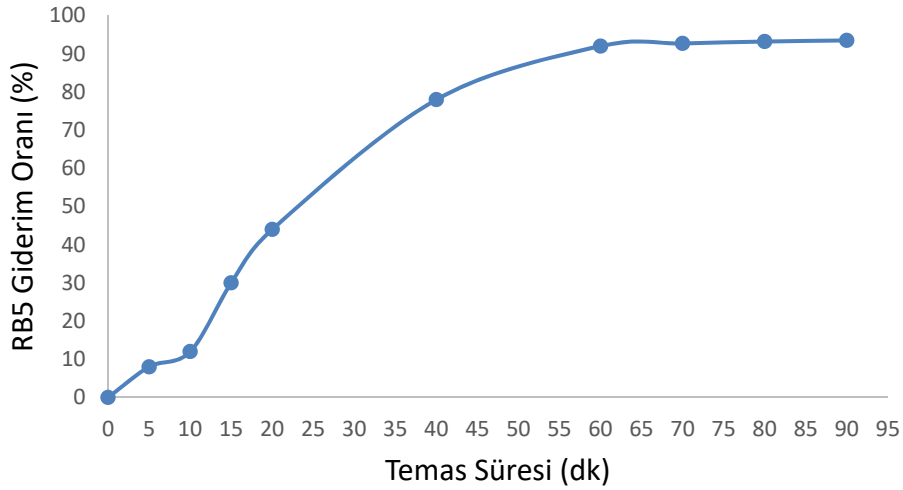
Çizelge 4.5. Ozonlama + UV Prosesinin RB5 Giderimi Üzerine Etkisi

Temas Süresi (dk)	RB5 (mg/L)	
	Ozonlama	Ozonlama + UV
0	100	100
5	92	89
10	88	84
15	70	63
20	56	48
40	22	20
60	8	7

4.2. Tartışma

4.2.1. Ozonlama Prosesinde Temas Süresinin RB5 Giderimine Etkisi

Çalışmanın bu aşamasında, temas süresinin RB5 giderimi üzerine etkisi araştırılarak, optimum temas süresi belirlenmeye çalışılmıştır. 5-90 dk aralığında değişen temas sürelerinin RB5 giderimine etkisi Şekil 4.1.'de görülmektedir. 90. dk sonunda boyar maddenin %93,5 oranında giderildiği tespit edilmiştir. Diğer taraftan 60. dakikanın sonunda boyar madde gideriminin %92 oranında gerçekleştiği, 90. dk kadar geçen 30 dk'lık süreçte, boyar madde giderim oranında anlamlı bir değişim olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Temas Süresinin RB5 Giderim Verimine Etkisi

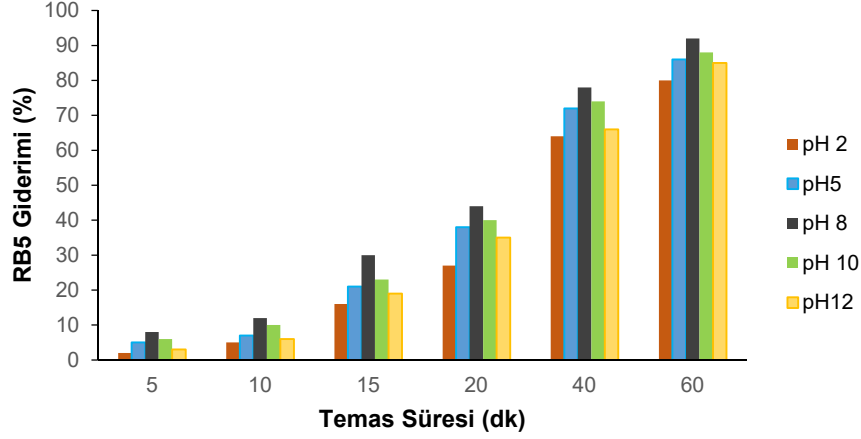
Yapılan çalışmalarda renk/boyar madde gideriminde temas süresinin önemli bir parametre olduğu kanıtlanmıştır. Castro ve ark., (2017) ozon ile Reactive Orange 16 renk giderimini araştırdıkları çalışmalarında farklı boyar madde konsantrasyonları için (25, 50, 75, 100 mg/L) 2,5 dk'da sırasıyla yaklaşık %97, %90, %75, %70 renk giderimi elde ederken, tüm konsantrasyonlarda 5. dk'dan sonra %97'nin üzerinde renk giderimi sağlamışlardır. 10 dk.'lık temas süresi

sonunda ise tüm konsantrasyonlarda %100 renk giderimini elde etmişlerdir. Benzer şekilde Venkatesh ve ark. (2015) ozon ile Acid Red 14, Direct Red 28 ve Reactive Black 5 azo boyar maddelerinin renk giderimlerini araştırdıkları çalışmalarında 5. dk'da sırasıyla yaklaşık %0, %33, %18 renk giderimi elde ederken, 15. dk'da sırasıyla yaklaşık %84, %80, %90 renk giderimi sağlamışlardır. Çalışmayı tamamladıkları 25. dk'da sırasıyla %93, %92, %94 renk giderimi elde etmişlerdir.

Ozonlama prosesi ile boyar madde/renk gideriminde temas süresinin önemli bir rol oynadığı hem bu çalışmada hem de önceki çalışmalarda ortaya konulmuştur. Ozon ile yapılan oksidasyon işlemlerinde belirli bir temas süresinden sonra renk/boyar madde giderim oranlarında anlamlı bir değişim olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla istenilen değerlere ulaşıldıktan sonra ozonlama işleminin sonlandırılması ekonomik açıdan önem arz edecektir.

4.2.2. Ozonlama Prosesinde pH'nın RB5 Giderimine Etkisi

Ozonlama prosesi ile RB5 gideriminde pH'nın etkisini belirlemek için, Bölüm 4.1.2.'de belirtilen koşullarda hem asidik, hem nötral ya da nötrale yakın hem de alkali şartlarda ozonun oksidasyon kapasitesi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle pH 2, 5, 8, 10 ve 12 değerlerinde ozon ile RB5 oksidasyonu gerçekleştirilmiştir. 60 dakikalık temas süresi sonrasında, yukarıda verilen pH değerlerinde sırasıyla %80, %86, %92, %88 ve %85 RB5 giderim oranları elde edilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Ozonlama Prosesinde pH'nın RB5 Giderimine Etkisi

Şekil 4.2.'de görüleceği üzere, pH 8'e kadar artan pH değerleri (pH 2-5-8) ile birlikte RB5 giderim oranı yükselmiştir. Bunun aksine, pH 8'in üzerindeki artan pH değerleri (pH 8-10-12) ile RB5 giderim oranı azalmaya başlamıştır. En yüksek RB5 giderim oranı yine Şekil 4.2.'de görüleceği üzere pH 8'de elde edilmiştir.

Ozonlama prosesi ile boyar madde/rengin gideriminde pH'nın önemli bir rol oynadığı hem bu çalışmada hem de önceki çalışmalarda ortaya konulmuştur. Ozon ile yapılan oksidasyon işlemlerinde, asidik şartlarda etkin oksitleyici tür moleküler ozon (O_3) iken alkali şartlarda radikal türlerdir (Hidroksi radikaller, $OH\cdot$) (EPA, 1999; Uzun, 2011). Hidroksi radikallerinin elektriksel potansiyeli moleküler ozona kıyasla daha yüksek olduğundan, pH'nın yükselmesiyle hidroksil radikalleri ortamda baskın duruma geçerek RB5 giderim oranında artışa neden olmaktadır. Ancak Şekil 4.2.'den de anlaşılacağı üzere bu artış, sürekli ve doğrusal bir artış değildir. pH 8'de elde edilen %92'lik RB5 giderimini takiben, pH 10 ve pH 12'de RB5 giderim oranları sırasıyla %88 ve %85'e düşmüştür.

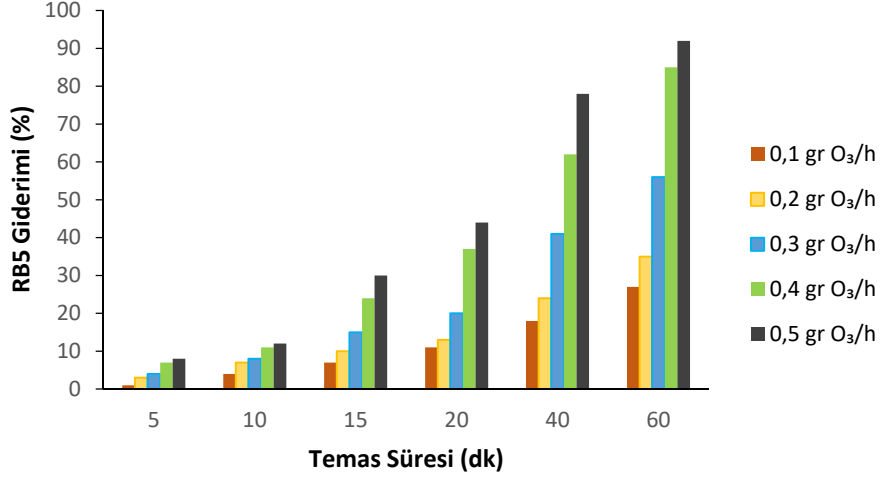
Benzer şekilde Turhan ve Turgut (2009) tarafından yapılan çalışmada, pH 12'nin altında kalmak koşuluyla pH'nın artmasıyla boyar madde/rengin gideriminin artacağı bildirilmiştir. Venkatesh ve ark. (2015) ise, RB5 azo boyar maddesinin

giderimi üzerine yaptıkları çalışmada pH 9,76, 10,13 ve 10,7' de sırasıyla %92, %94 ve %93 giderim verimleri elde etmişlerdir. Küni (2009), Reaktif Kırmızı 195 (RR195) monoazoik azo boyar maddesinin neden olduğu rengi gidermek için yaptığı çalışmada, pH 3, 7 ve 11'de yürütülen ozonlama prosesinde en yüksek RR195 giderim oranının pH 11'de %99,87 olarak gerçekleştiğini bildirmiştir.

Çalışmada elde edilen bulgular ve mevcut literatür ışığında, ozonlama prosesi ile RB5 gideriminin alkali şartlarda daha etkin bir şekilde gerçekleştiğini söylemek mümkündür. Ozonlama prosesi ile etkin RB5 gideriminin alkali pH aralığındaki hangi değerde gerçekleşeceği ise, prosesi etkileyen diğer değişkenlere (temas süresi, ozon dozu, RB5 başlangıç konsatrasyonu, sıcaklık, etkin karışım ve çözünürlük gibi) bağlı olarak farklılıklar gösterebileceği düşünülmektedir.

4.2.3. Ozonlama Prosesinde Ozon Dozunun RB5 Giderimine Etkisi

Çalışmanın bu aşamasında, Bölüm 4.1.3'de belirtilen koşullarda sulu çözeltilerden RB5 gideriminde ozonlama prosesinin performansı incelenmiştir. 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 ve 0,5 gO₃/saat ozon debileri uygulanarak, 60 dakika temas süresi sonunda sırasıyla %27, %35, %56, %85 ve %92 RB5 giderimi elde edilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Ozonlama Prosesinde Ozon Dozunun RB5 Giderimine Etkisi

Şekil 4.3.'de görüleceği üzere uygulanan ozon dozu ve bu dozun temas süresi arttıkça RB5 giderim oranında da önemli artışlar elde edilmiştir. Bu artış sürekli ve doğrusal bir artış olmakla beraber, 0,5 gO₃/saat ozon dozu ve 60 dakikalık temas süresinde elde edilen %92'lik RB5 giderim oranı hem renk deşarj kriteri hem de sahada ozonlama maliyeti dikkate alınarak yeterli görülmüş ve ozon dozu ve temas süresi daha fazla arttırılmamıştır.

Ozon dozu, boyar maddenin organik ve inorganik molekülleriyle seçici olmaksızın hızlı bir şekilde reaksiyona giren moleküler ozonun veya hidroksil radikalının miktarını belirleyen en önemli parametre olarak belirtilmiştir (Küni, 2009). Ozon dozu arttığında birim zamanda pH'a bağlı olarak oluşan moleküler ozonun ve/veya hidroksil radikalının miktarı da artacağından RB5 giderim oranının da artacağı öngörülmektedir.

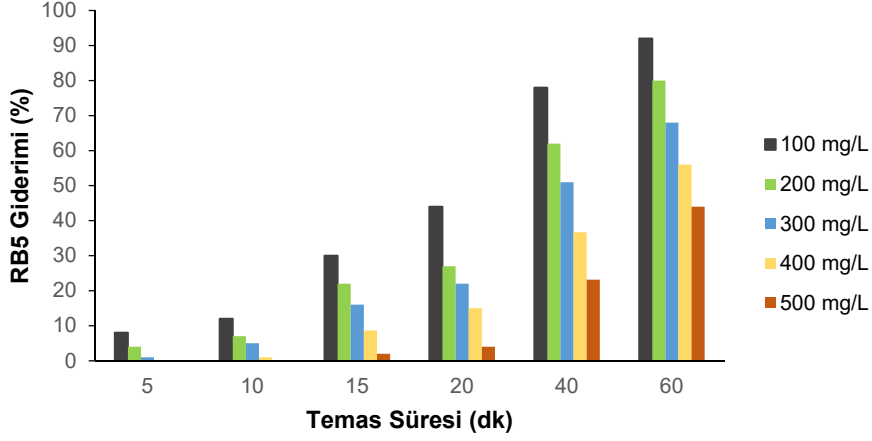
Zheng ve ark. (2016) tarafından yapılan benzer bir çalışmada, RB5 boyar maddesinden ileri gelen rengin giderilmesinde 0,8 - 1,6 - 2,4 ve 3,2 g/saat ozon dozları uygulanmıştır. Ozon dozunun artmasıyla birim zamanda elde edilen renk gideriminin arttığını ve 20 dakikalık temas süresi sonunda sırasıyla %57, %70, %90 ve %95 renk giderimi sağladığını bildirmişlerdir. Abidin ve ark. (2016) ise

yaptıkları çalışmada 0,61 g/saat ozon debisi ile pH 7'de ve 100 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip Reaktif Kırmızı 120 boyar maddesinden ileri gelen rengin, 10 dakika temas süresi sonunda %100 giderildiğini ifade etmişlerdir. Küni (2009) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, 8 g/saat ozon debisi ile pH 7'de ve 100 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip RR195 boyar maddesinden ileri gelen rengin gideriminde, 30 dakika temas süresi sonunda %99,85 başarı sağlanmıştır.

Çalışmada elde edilen bulgular literatürü destekler mahiyettedir. Bunun yanında boyar madde/rengin giderimi açısından uygulanacak ozon dozu, boyar madde ve sulu çözeltisinin özelliklerine ve ayrıca deşarj kriterlerindeki renk standardına göre değişiklik gösterebilmektedir.

4.2.4. RB5 Başlangıç Konsantrasyonunun Etkisi

Ozonlama prosesi ile RB5 gideriminde, RB5 başlangıç konsantrasyonunun etkisini belirlemek amacıyla 100, 200, 300, 400 ve 500 mgRB5/L olmak üzere 5 farklı RB5 başlangıç konsantrasyonu ile çalışma yapılmıştır. Bölüm 4.1.4.'de belirtilen deney koşullarında yürütülen çalışma sonucunda, uygulanan RB5 başlangıç konsantrasyonları için sırasıyla %92, %80, %68, %56 ve %44 giderim verimi elde edilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Reactive Black 5 Başlangıç Konsantrasyonunun RB5 Giderimine Etkisi

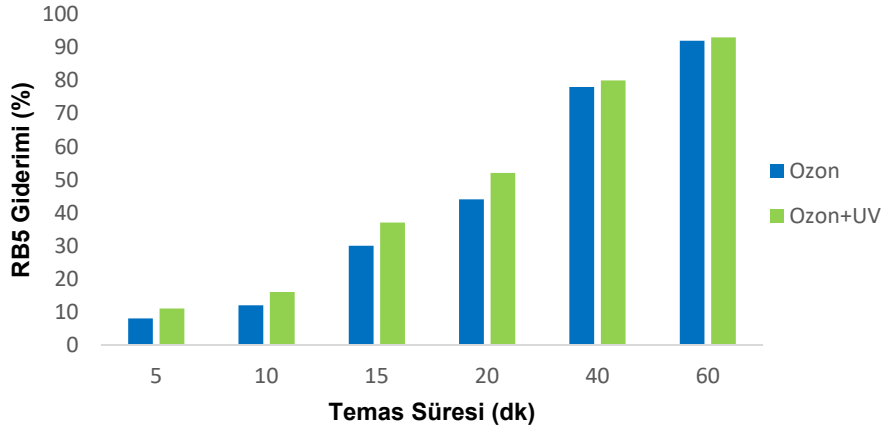
Şekil 4.4.'de görüldüğü gibi RB5 başlangıç konsantrasyonunun artmasıyla giderim oranlarında bir azalma tespit edilmiştir. Özellikle, 400 ve 500 mgRB5/L başlangıç konsantrasyonlarında ilk 10 dakikalık temas süresinde, ozonlama prosesinde RB5 giderimi gerçekleşmemiştir. Bu durum sabit ozon dozu uygulanan prosesler için, RB5 başlangıç konsantrasyonu arttığında, birim zamanda elde edilecek giderim oranının azaldığını göstermektedir. Bu nedenle, yüksek RB5 başlangıç konsantrasyonlarında, ozon dozunun artırılması ya da temas süresinin uzatılması ile etkin giderim sağlanabilmesi mümkün görülmektedir. Bunun yanında ozonlama prosesine ilave olarak UV, peroksit gibi diğer yöntemlerin birlikte uygulanması da bir çözüm önerisi olarak düşünülebilir.

Castro ve ark. (2017) tarafından boyar madde içeren sularda renk giderimi üzerine yapılan çalışmada, renge neden olan boyar madde konsantrasyonunun artmasıyla renk giderimi için uygulanması gereken proses/temas süresinin ve/veya renk giderimi için kullanılan etkin maddenin/dozajın artırılması gerektiği vurgulanmıştır. Yapılan çalışmada, 25, 50, 75, 100 mg/L Reactive Orange 16 (RO16) azo boyar maddesi başlangıç konsantrasyonlarında 2,5 dk sonunda sırasıyla %100, %98, %85 ve %80 giderim sağlamışlardır. 10 dakika temas süresi

sonunda ise tüm başlangıç konsantrasyonları için %100 giderimi gerçekleştirdiğini bildirmişlerdir. Castro ve ark. (2017) tarafından elde edilen bulgular ile bu çalışmada elde edilen bulgular, kullanılan boyar maddeler farklı olmasına rağmen giderim oranında başlangıç boyar madde konsantrasyonu etkisinin ortaya konulması açısından benzerlik göstermektedir.

4.2.5. Ozonlama + UV Prosesinin RB5 Giderimine Etkisi

Ozonlama işleminde en yüksek RB5 giderimlerinin elde edildiği pH 8, 100 mgRB5/L başlangıç konsantrasyonu ve 0,5 gO₃/saat ozon debisi sabit tutularak, 5 ile 60 dakika arasında değişen temas sürelerinde, RB5 sulu çözeltisine 365 nm dalga boyunda ışık üreten Philips TUV-11,5 W UV-A LED foto-sistemi uygulanmıştır. Ozonlama prosesine ilave olarak uygulanan UV işleminin RB5 giderimine etkisi Şekil 4.5.'te görülmektedir.



Şekil 4.5. Ozonlama + UV Prosesinin RB5 Giderimine Etkisi

Şekil 4.5.'de görüldüğü üzere ozonlama prosesine ilave olarak 5 ila 60 dakika arasında değişen temas sürelerinde UV uygulanması neticesinde, RB5 gideriminde %1 ila %10 arasında değişen artışlar gerçekleşmiştir. UV kullanımı

ile, ozon molekülleri UV fotonları tarafından aktive edilmekte ve bu sayede hidroksil radikallerinin oluşumu hızlanmakta ve aynı zamanda RB5 giderimi de artmaktadır (Zhou ve Smith, 2002; Yalılı Kılıç ve Kestioğlu, 2008; Hassaan ve El Nerm, 2017). Bununla birlikte Şekil 4.5. daha detaylı incelendiğinde, ilk 20 dakikalık temas süresine kadar UV'nin RB5 giderim oranına etkisi daha yüksek iken, 20. dakikadan sonra bu etkinin azaldığı gözlemlenmiştir. 20. dakikada UV nin ozonlama prosesine katkısı %8'lere ulaşmışken, 60. dakikada bu oran %1'lere düşmüştür. Benzer bir çalışma yapan Küni (2009), Reactive Red 195 renk/boyar maddesinin gideriminde ozonlama ve ozonlama+UV proseslerini karşılaştırmıştır. Üç farklı pH değerinde (3, 7, 11) yaptıkları çalışmada birim temas süresinde ozonlama + UV prosesinin, yalnızca ozonlama prosesine göre yaklaşık %1 daha fazla renk/boyar madde gideriminde etkili olduğunu bildirmiştir. Çalışma sonunda proseslerin verimleri arasındaki %1'lik fark da azalmıştır. Her iki çalışmadaki bu durumun prosesin kararlı hale yaklaşması ya da ulaşması ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

4.3. Regresyon Analizi

4.3.1. pH ve Temas Süresine Bağlı RB5 Giderimi

pH ve temas süresini kullanarak RB5 giderimini tahmin etmek için tanımlanan bağımlı ve bağımsız değişkenler aşağıdaki gibidir.

Y	: RB5 Giderimi
X ₁	: pH
X ₂	: Temas Süresi

Çizelge 4.6. Katsayılar İle İlgili Sonuçlar

Değişkenler	Katsayılar	Standart Hata	t	P
Sabit	127,79	4,23	30,15283	1,37E-20*
X ₁	-4,96	1,07	-4,62818	0,0001*
X ₂	-2,77	0,20	-13,8322	6,25E-13*
X ₁ ²	0,33	0,07	4,55157	0,0001*
X ₂ ²	0,018	0,002	6,904951	3,85E-07*
X ₁ X ₂	-0,004	0,01	-0,39668	0,695

*: p<0,05

Çizelge 4.6.'ya göre bulunan matematiksel model aşağıdaki gibidir.

$$\hat{Y} = 127,79 - 4,96X_1 - 2,77X_2 + 0,33X_1^2 + 0,018X_2^2 - 0,004X_1 X_2 \quad (4.1)$$

Regresyon denkleminin bir bütün olarak anlamlılığını test etmek için kullanılan varyans analizinin sonuçları Çizelge 4.7.'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Varyans Analiz Tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Regresyon	5	28460,37	5692,07	336,8909	2,1E-21*
Hata	24	405,50	16,89		
Toplam	29	28865,87			

*: p<0,05

Çizelge 4.7.'ye göre %5 önem seviyesinde değişkenler arasında ilişki vardır (p<0,05).

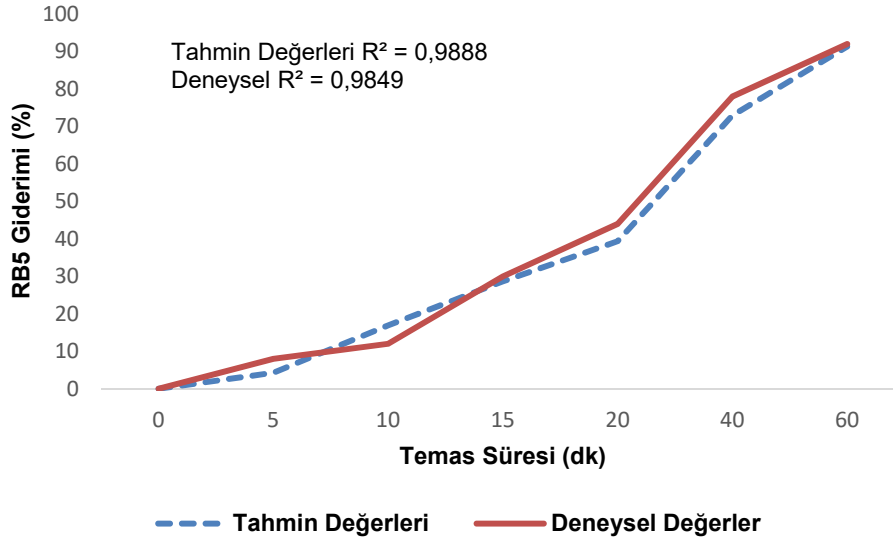
Çizelge 4.8. Modelin Uygunluğunun Test Edilmesinde Kullanılan İstatistikler

R	R ²	Düzeltilmiş R ²
0,992	0,988	0,983

pH ve temas süresini kullanarak renk giderimini tahmin etmek için bulunan matematiksel model $\hat{Y} = 127,79 - 4,96X_1 - 2,77X_2 + 0,33X_1^2 + 0,018X_2^2 -$

$0,004X_1X_2$ olarak elde edilmiştir. Bu denklemde, renk giderimindeki toplam değişimin %98,8'i pH ve temas süresi değişkenleri tarafından açıklanmaktadır ($R^2=0,988$). Denklemde belirtilen katsayıların önem testi yapıldığında hem temas süresindeki hem de pH'daki değişimin lineer ve üstel etkisi, renk gideriminde etkili olduğunu göstermektedir ($p < 0,05$) (Çizelge 4.6).

pH (pH 8) ve temas süresine bağlı RB5 gideriminde, Eşitlik (4.1)'de verilen modele göre elde edilen tahmin değerleri ile deneysel verilere ait değerlerin birlikte grafiği Şekil 4.6.'da verilmiştir.



Şekil 4.6. pH ve Temas Süresine Bağlı RB5 Giderimininde Tahmin Değerleri ile Deneysel Değerlerin Karşılaştırılması

Deneysel veriler kullanılarak oluşturulan matematiksel modelle elde edilen tahmin değerleri ile deneysel değerler benzer bir grafik oluşturmuştur. Her iki grafiğin R^2 değerlerinin yüksek olması da oluşturulan modelin doğruluğunu kanıtlar niteliktedir.

4.3.2. Ozon Dozu ve Temas Süresine Bağlı RB5 Giderimi

Ozon dozu ve temas süresini kullanarak renk/boyar madde giderimini tahmin ederken tanımlanan bağımlı ve bağımsız değişkenler aşağıdaki gibidir.

Y : RB5 Giderimi

X₁ : Ozon dozu

X₂ : Temas Süresi

Çizelge 4.9. Katsayılar İle İlgili Sonuçlar

Değişkenler	Katsayılar	Standart Hata	t	P
Sabit	99,44	3,88	25,59	1,88E-21*
X ₁	29,59	25,92	1,14	0,262901
X ₂	-0,41	0,15	-2,70	0,01138*
X ₁ ²	-59,18	41,48	-1,42	0,164398
X ₂ ²	0,006	0,002	2,82	0,008508*
X ₁ X ₂	-3,23	0,24	-13,01	1,24E-13*

*: p<0,05

Çizelge 4.9.'a göre bulunan matematiksel model aşağıdaki gibidir.

$$\hat{Y} = 99,44 + 29,59 X_1 - 0,41 X_2 - 59,18 X_1^2 + 0,006 X_2^2 - 3,23 X_1 X_2 \quad (4.2)$$

Regresyon denkleminin bir bütün olarak anlamlılığını test etmek için kullanılan varyans analizinin sonuçları Çizelge 4.10.'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Varyans Analiz Tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Regresyon	5	21164,35	4232,87	250,93	6,17E-23*
Hata	29	489,18	16,86		
Toplam	34	21653,54			

*: p<0,05

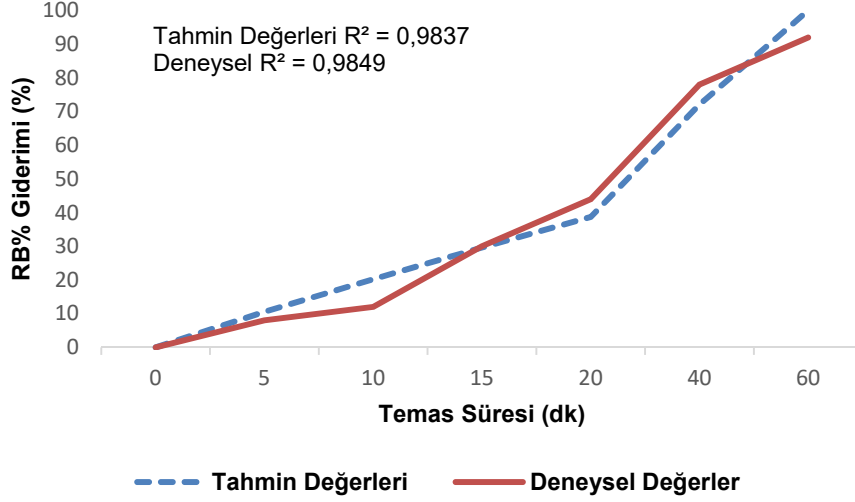
Çizelge 4.10.'a göre %5 önem seviyesinde değişkenler arasında ilişki vardır (p<0,05).

Çizelge 4.11. Modelin Uygunluğunun Test Edilmesinde Kullanılan İstatistikler

R	R ²	Düzeltilmiş R ²
0,988	0,977	0,973

Ozon ve temas süresini kullanarak renk/boyar madde giderimini tahmin etmek için bulunan matematiksel model $\hat{Y} = 99,44 + 29,59 X_1 - 0,41 X_2 - 59,18 X_1^2 + 0,006 X_2^2 - 3,23 X_1 X_2$ olarak bulunmuştur. Bu denklemde, renk/boyar madde giderimindeki toplam değişimin %97,7'si ozon ve temas süresi değişkenleri tarafından açıklanmaktadır ($R^2=0.977$). Denklemde belirtilen katsayıların önem testi yapıldığında temas süresindeki değişimin lineer ve üstel etkisi, renk/boyar madde gideriminde etkili olduğu bulunmuştur. Ayrıca temas süresi ve ozonun etkileşiminin renk/boyar madde gideriminde etkili olduğu belirlenmiştir ($p<0,05$) (Çizelge 4.9).

Ozon dozu (0,5 mg/L) ve temas süresine bağlı RB5 gideriminde, Eşitlik (4.2)'de verilen modele göre elde edilen tahmin değerleri ile deneysel verilere ait değerlerin birlikte grafiği Şekil 4.7.'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Ozon Dozu ve Temas Süresine Bağlı RB5 Gideriminde Tahmin Değerleri ile Deneyel Değerlerin Karşılaştırılması

Deneyel veriler kullanılarak oluşturulan matematiksel modelle elde edilen tahmin değerleri ile deneyel değerler benzer bir grafik oluşturmuştur. Her iki grafiğin R^2 değerlerinin yüksek olması da oluşturulan modelin doğruluğunu kanıtlar niteliktedir.

4.3.3. RB5 Başlangıç Konsantrasyonu ve Temas Süresine Bağlı RB5 Giderimi

Başlangıç RB5 konsantrasyonu ve temas süresi kullanılarak renk/boyar madde giderimini tahmin ederken tanımlanan bağımlı ve bağımsız değişkenler aşağıdaki gibidir.

- Y : RB5 Giderimi
X₁ : RB5 Başlangıç Konsantrasyonu
X₂ : Temas süresi

Çizelge 4.12. Katsayılar İle İlgili Sonuçlar

Değişkenler	Katsayılar	Standart Hata	t	P
Sabit	26,74	14,21	1,88	0,06
X ₁	0,71	0,094	7,584	2,31E-08*
X ₂	-1,12	0,56	-2,005	0,04*
X ₁ ²	0,0006	0,0001	3,98	0,0004*
X ₂ ²	-0,006	0,007	-0,85	0,39
X ₁ X ₂	-0,005	0,0009	-6,17	9,89E-07*

*: p<0,05

Çizelge 4.12.'e göre bulunan matematiksel model aşağıdaki gibidir.

$$\hat{Y} = 26,74 + 0,71 X_1 - 1,12 X_2 + 0,0006X_1^2 - 0,006 X_2^2 - 0,005 X_1 X_2 \quad (4.3)$$

Regresyon denklemini bir bütün olarak anlamlılığını test etmek için kullanılan varyans analizinin sonuçları Çizelge 4.13.'de verilmiştir.

Çizelge 4.13. Varyans Analiz Tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Regresyon	5	800551,10	160110,20	709,66	2,22E-29*
Hata	29	6542,81	225,61		
Toplam	34	807093,90			

*: p<0,05

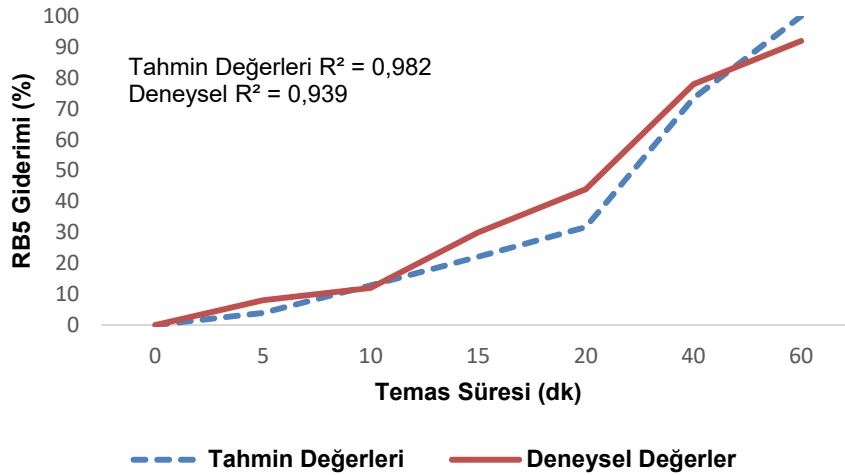
Çizelge 4.13.'ye göre %5 önem seviyesinde değişkenler arasında ilişki vardır (p<0,05).

Çizelge 4.14. Modelin Uygunluğunun Test Edilmesinde Kullanılan İstatistikler

R	R ²	Düzeltilmiş R ²
0,995	0,991	0,990

Boyar madde konsantrasyonu ve temas süresini kullanarak renk/boyar madde giderimini tahmin etmek için matematiksel model $\hat{Y} = 26,74 + 0,71 X_1 - 1,12 X_2 + 0,0006X_1^2 - 0,006 X_2^2 - 0,005 X_1 X_2$ olarak bulunmuştur. Bu denklemde, renk/boyar madde giderimindeki toplam değişimin %99,1'i boyar madde konsantrasyonu ve temas süresi değişkenleri tarafından açıklanmaktadır ($R^2=0.991$). Denklemde belirtilen katsayıların önem testi yapıldığında temas süresindeki değişimin lineer etkisi, boyar madde konsantrasyonundaki değişimin lineer ve üstel etkisi, renk/boyar madde gideriminde etkili olduğu bulunmuştur. Ayrıca boyar madde konsantrasyonu ve temas süresinin etkileşiminin renk/boyar madde gideriminde etkili olduğu belirlenmiştir ($p<0,05$) (Çizelge 4.12).

RB5 başlangıç konsantrasyonu (100 mg/L) ve temas süresine bağlı RB5 gideriminde, Eşitlik (4.3)'de verilen modele göre elde edilen tahmin değerleri ile deneysel verilere ait değerlerin birlikte grafiği Şekil 4.8.'de verilmiştir.



Şekil 4.8. RB5 Başlangıç Konsantrasyonu ve Temas Süresine Bağlı RB5 Gideriminde Tahmin Değerleri ile Deneysel Değerlerin Karşılaştırılması

Deneyisel veriler kullanılarak oluşturulan matematiksel modelle elde edilen tahmin değerleri ile deneysel değerler benzer bir grafik oluşturmuştur. Her iki grafiğin R^2 değerlerinin yüksek olması da oluşturulan modelin doğruluğunu kanıtlar niteliktedir.





5. SONUÇ ve ÖNERİLER

1. Su kirlenmesi kontrolü ve aynı zamanda tekstil sektörü için Dünya'nın gelişmiş ülkelerinde ve ülkemiz özelinde renk parametresi ve kaynağı olan boyar maddeler oldukça önem arz etmektedir. Bu önemden yola çıkılarak yapılan "Tekstil Endüstrilerinde Kullanılan Boyar Maddelerin İleri Oksidasyon Yöntemleriyle Atıksudan Giderimi" isimli Yüksek Lisans tez çalışmasında aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiş ve konu ile ilgili öneriler dile getirilmiştir.
2. Çalışmada, tekstil sanayi atıksularından boyar madde/renk giderimi için önerilen ileri oksidasyon yöntemlerinden ozonlama ve ozonlama+UV proseslerinin RB5 (Reactive Black 5/Bezactive Black S-NN) giderimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.
3. Ozonlama prosesi ile RB5 gideriminde temas süresinin etkisini belirlemek için yarı kesikli reaktör 5 ila 90 dakika aralığında değişen temas sürelerinde işletilmiş ve etkin sürenin 60 dakika olduğu tespit edilmiştir.
4. Sulu çözeltideki RB5'in giderilmesinde alkali pH ortamlarının daha etkili olduğu belirlenmiştir. En etkili RB5 giderimi pH 8'de %92 olarak gerçekleşmiştir.
5. Ozonlama prosesinde uygulanan ozon dozunun artması RB5 giderimini de artırmıştır. 0,1 ila 0,5 gO₃/L arasında uygulanan ozon dozlarında en yüksek RB5 giderimi %92 ile 0,5 gO₃/L ozon dozunda elde edilmiştir.
6. Boyar madde/renk gideriminde önemli faktörlerden birisi olan başlangıç boyar madde konsantrasyonu etkisini tespit etmek için, çalışmada 100 ila 500 mgRB5/L aralığında çalışılmıştır. RB5 başlangıç konsantrasyonu arttıkça birim zamandaki giderim oranında azalma tespit edilmiştir. RB5 başlangıç konsantrasyonunun 100'den 500'e çıkmasıyla giderim oranında %48'lik bir azalma gerçekleşmiştir.

7. Ozonlama prosesinin RB5 giderimindeki verimi ozonlama + UV prosesi ile kıyaslandığında, ilave UV uygulaması ile RB5 giderim oranında %1 ila %10 aralığında değişen artışlar elde edilmiştir.
8. Çalışmada elde edilen deneysel bulgular ve iki değişkenli ikinci dereceden polinomial regresyon modeli kullanılarak, RB5 giderimi ile değişkenler (temas süresi, ozon dozu, pH ve RB5 başlangıç konsantrasyonu) arasındaki ilişki ortaya konulmuştur. Buna göre, ozon-temas süresi, pH-temas süresi ve RB5 başlangıç konsantrasyonu-temas süresi değişkenlerine bağlı RB5 giderim oranı %95 güvenlilikle tahmin edilmiştir. RB5 giderimindeki toplam değişimin %98,8'i ($R^2=0.988$) pH ve temas süresi değişkenleri, %99,7'si ($R^2=0.997$) ozon ve temas süresi değişkenleri, %99,1'i ($R^2=0.991$) RB5 başlangıç konsantrasyonu ve temas süresi değişkenleri tarafından açıklanmıştır. Bulunan matematiksel modeller ile farklı pH, başlangıç boyar madde konsantrasyonu ve temas süresiyle renk gideriminin hesaplanması mümkündür.
9. Elde edilen sonuçlar ışığında, ülkemizde ve bölgemizde yaygın olan tekstil endüstrisi atıksularının arıtılması, renk giderimi ve deşarj standartlarını sağlamada yaşanan problemlerin aşılması açısından ozonlama ve ozonlama + UV prosesleri etkin bir çözüm olarak önerilebilir.

KAYNAKLAR

- Abidin, C.Z.A., Ong, S.A., Makhtar, S.M., Rahmat, N.R., and Ahmad, R., 2016. Decolourization and Cod Reduction of Textile Wastewater by Ozonation in Combination with Biological Treatment. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 13:3141.
- Al-Kdasi, A., Idris, A., Saed, K. and Guan, C.T., 2004. Treatment of Textile Wastewater By Advanced Oxidation Processes—A Review. *Global nest: the Int. J.*, 6(3):222-230.
- Alüftekin, N., Yüksel, Ö., Taş, A., Çakar, G. ve Bayraktar, F., 2009. Küresel Krizden Çıkışta Kümelenme Modeli: Tekstil Ve Hazır Giyim Sektörü Örneği. *ZKÜ Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(10):1–19.
- Anonymous, 2019. UV IşığI İle Dezenfeksiyon <http://www.inolife.com/tr/uv-isigi-dezenfeksiyon> (Erişim Tarihi:25.06.2019).
- Arslan, I., 2000. Treatment of Reactive Dye-Bath Effluents by Heterogeneous and Homogeneous Advanced Oxidation Processes, Submitted to the Institute of Environmental Sciences in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Environmental Technology, Bogazici University.
- Aydın, G., 2011. Yeni Tetrakisazo Boyarmaddelerin Sentezi ve Elektronik Spektrumlarının İncelenmesi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale, s:106. (Yayınlanmamış)
- Azbar, N., Yonar, T. and Kestioglu, K., 2004. Comparison of Various Advanced Oxidation Processes And Chemical Treatment Methods for COD and Color Removal From A Polyester And Acetate Fiber Dyeing Effluent. *Chemosphere*, 55(1):35-43.
- Babu, B.R., Parande, A.K., Raghu, S. and Kumar, T.P., 2007. Textile Processing and Effluent Treatment. *The Journal of Cotton Science*, 11:141–153.

- Bahar, G., 2007. Reaktif Kırmızı 195 (Rr195) Azo Boyar Maddesinin Katalitik Ozonlanması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, s:72. (Yayınlanmamış).
- Baig, S. and Liechti, P. A., 2001. Ozone Treatment for Biorefractory COD Removal. *Water Science and Technology*, 43(2): 197-204.
- Başer, İ. ve İnanıcı, Y., 1990. Boyarmadde Kimyası. Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Tekstil Eğitimi Bölümü. Marmara Üniversitesi Yayın No:482, Teknik Eğitim Fakültesi Yayın No:2, İstanbul.
- Bayar, S., Boncukcuoğlu, R., Fil, B., A., Yılmaz, A., E., 2012. Elektrokoagülasyon Yöntemi Kullanılarak Direct Red 23 Boyar Maddesinin Gideriminin İncelenmesi. *Iğdır Üni. Fen Bilimleri Enst. Der.*, 2(2):21-28.
- Bayraktar, İ., 2012. Tekstil Boya Banyosu Atıksularının Ozon, Persülfat ve Peroksimonosülfat Oksidasyon Prosesleri ile Arıtımı. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ, s: 94. (Yayınlanmamış).
- Birgül, A. ve Solmaz, S.K.A., 2007. Tekstil Endüstrisi Atıksuları Üzerinde İleri Oksidasyon ve Kimyasal Arıtma Prosesleri Kullanılarak KOI ve Renk Gideriminin Araştırılması. *Ekoloji*, 15(62):72-80.
- Bisschops, I. and Spanjers, H., 2003. Literature Review On Textile Wastewater Characterisation. *Environmental Technology*, 24:1399-1411.
- Cardoso, J.C., Bessegato, G.G., and Zanoni, M.V.B., 2016. Efficiency Comparison of Ozonation, Photolysis, Photocatalysis And Photoelectrocatalysis Methods in Real Textile Wastewater Decolorization. *Water Research*, 98:39-46.
- Castro, F.D., Bassin, J.P., and Dezotti, M., 2017. Treatment of A Simulated Textile Wastewater Containing the Reactive Orange 16 Azo Dye by A Combination of Ozonation and Moving-Bed Biofilm Reactor: Evaluating the Performance, Toxicity, and Oxidation By-Products. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(7):6307-6316.

- Clarke, N. and Knowles, G., 1982. High Purity Water Using H₂O₂ and UV. Radiation. *Effluent and Water Treatment Journal*, 9:335-341.
- Crittenden, J.C., Hu, S., Hand, D.W. and Gren, S. A., 1999. A Kinetic Model for H₂O₂/UV Process in a Completely Mixed Batch Reactor. *Water Research*, 33: 2315-2328.
- Dehghani, M.H. and Mahdavi, P., 2015. Removal of Acid 4092 Dye From aqueous Solution by Zinc Oxide Nanoparticles and Ultraviolet Irradiation, *Desalination and Water Treatment*. 54 : 3464–3469.
- Dehghani, M.H., Karimi, B. and Rajaei, M.S., 2016. The Effect of Aeration on Advanced Coagulation, Flotation and Advanced Oxidation Processes for Color Removal from Wastewater. *Journal of Molecular Liquids*, 223:75–80.
- Efe, E., Y. Bek ve M. Şahin. 2000. SPSS’te Çözümleri ile İstatistik Yöntemler II. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Rektörlüğü Yayın No: 73, Ders Kitapları Yayın No: 9, K.S.Ü. Basımevi, Kahramanmaraş.
- Ekti, E., 2013. Tekstil Sektörü Raporu Sektörel Raporlar Serisi V. T.C. Doğu Marmara Kalkınma Ajansı Düzce Yatırım Destek Ofisi, Düzce.
- El Bouraie M., El Din W., S., 2016. Biodegradation of Reactive Black 5 by Aeromonas Hydrophila Strain Isolated From Dye-Contaminated Textile Wastewater. *Sustainable Environment Research* 26:209–216.
- EPA (Environmental Protection Agency), 1999. Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual, 3:1-52.
- Eren, H.A., ve Anış, P., 2006. Tekstil Boyama Atıksularının Ozonlama İle Renk Giderimi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11(1):83-91.
- Ertugay, N. ve Acar, F.N., 2013. Sonokatalitik Oksidasyon ile Direct Blue 71 Azo Boyasının Renk Giderimi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(1): 55-60.

- Gani, P., Dalgıç, S., İmre, C., ve Kartal, Ö.E., 2010. Direkt Mavi 53 Azo Boyarmaddesinin Fotokatalitik Olarak Giderimi Üzerine İyonların Etkisi. 9. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, 22-25 Haziran, Ankara, 625-622.
- Gharbani, P., Tabatabaai, S.M. and Mehrizad, A., 2008. Removal of Congo Red From Textile Wastewater By Ozonation. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 5(4):495-500.
- Gogate, P.R and Pandit, A.B., 2004a. A Review of Imperative Technologies for Wastewater Treatment I: Oxidation Technologies at Ambient Conditions. *Advances in Environmental Research*, 8:501-551.
- Gogate, P. R. and Pandit, A.B., 2004b. A Review of Imperative Technologies for Wastewater Treatment II: Hybrid Methods, *Advances in Environmental Research*, 8:553-597.
- Gonzalez, M. G., Oliveros, E., Worner, M. and Braun, A. M., 1994. Vacuum-Ultraviolet Photolysis of Aqueous Reaction Systems. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 5:225-246.
- Hai, F.I., Yamamoto, K. and Fukushi, K., 2007. Hybrid Treatment Systems for Dye Wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 37:315-377.
- Hanay, Ö. ve Hasar, H., 2007. Fenton Oksidasyon Prosesi İle Tekstil Endüstrisi Atıksuyunda Renk Giderimi. *Fırat Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimler Dergisi*, 19(4):505-509.
- Hassaan, M. A. and El Nemr, A., 2017. Advanced Oxidation Processes for Textile Wastewater Treatment. *Photochemistry and Photobiology*, 2(3):85-93.
- Huang, C.P., Dong, C.H. and Tang, Z., 1993. Advanced Chemical Oxidation: Its Present Role and Potential Future in Hazardous Waste Treatment. *Waste Management*, 13:361-377.
- İleri, S. ve Karaer, F., 2011. Tekstil İşletmesi Atıksularında Fenton Prosesi İle Akut Toksikite Giderimi. *Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 16(2):1-10.

- Joshi, M., Bansal, R. and Purwar, R., 2004. Colour Removal From Textile Effluents. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 29: 239 – 259.
- Kocaer, F.O. ve Alkan, U., 2002. Boyar Madde İçeren Tekstil Atıksularının Arıtım Alternatifleri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7(1):47-55.
- Küni G., 2009. Reaktif Kırmızı 195 Azo Boyarmaddesinin İleri Oksidasyon Yöntemleriyle Parçalanması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 75 s. (Yayınlanmamış).
- Lamarre, L., 1997. A Fresh Look at Ozone. *Epri Journal*, 22(4):6-10.
- Legrini, O., Oliveros, E. and Braun, A.M., 1993. Photochemical Processes for Water Treatment, *Chem. Rev.*, 93:671-698.
- Loraine, G.A. and Glaze, W.H., 1992. Destruction of Vapour Phase Halogenated Methanes by Means of Ultraviolet Photolysis, 47th Purdue Industrial Waste Conference Proceedings, Lewis Publishers, Inc.Chelsea, Michigan, 367-376, USA.
- Mahmoodi, N.M., 2016. Photocatalytic Degradation of Textile Dyes Using Ozonation and Magnetic Nickel Ferrite Nanoparticle. *Progress in Color, Colorants and Coatings*, 9: 163-171.
- Malik, S.N., Ghosh, P.C., Vaidya, A.N., Waindeskar, V., Das, S., and Mudliar, S.N., 2017. Comparison of Coagulation, Ozone And Ferrate Treatment Processes for Color, COD And Toxicity Removal From Complex Textile Wastewater. *Water Science & Technology*, 1-9.
- Mella, B., Carvalho Barcellos, B.S., Silva Costa, D.E., and Gutterres, M., 2017. Treatment of Leather Dyeing Wastewater with Associated Process of Coagulation-Flocculation/Adsorption/Ozonation. *Ozone: Science & Engineering*, 1-8.
- Meriç, S., Kaptan, D., Ölmez, T., 2004. Color and COD Removal from Wastewater Containing Reactive Black 5 Using Fenton's oxidation process. *Chemosphere* 54, 435–441.

- Montgomery, D.C., Peck, E.A. and Vining, G.G., 2012. Introduction to Linear Regression Analysis (Vol. 821). John Wiley & Sons.
- Mustapha, A., 2015. Colour Removal Technology Using Ozone In Textile Industrial Wastewater Effluent: An Overview. International Journal of Innovative Scientific & Engineering Technologies Research 3(2):45-51.
- Nakhjirgan, P., and Dehghani, M.H., 2015. The Evaluation Of The Toxicity Of Reactive Red 120 Dye by Daphina Magna Bioassay. J. Res. Environ. Health, (1):1-9.
- Neamtu, M., Yediler, A., Siminiceanu, I., Macoveanu, M., and Kettrup, A., 2004. Decolorization of Disperse Red 354 Azo Dye in Water by Several Oxidation Processes-A Comparative Study. Dyes and Pigments, 60(1):61-68.
- Neter, J., Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J. and Wasserman, W., 1996. Applied Linear Statistical Models (Vol. 4, p. 318). Chicago: Irwin.
- Orhunbilge, N., 2002. Uygulamalı Regresyon ve Korelasyon Analizi, İ.Ü. İşletme Fakültesi Yayınları, II. Baskı İstanbul.
- Ölmez, T., Kabdaşlı, I. ve Tünay, O., 2006. Reaktif Boya Banyolarında Kullanılan İyon Tutucuların Yüksek Ph'da Ozon Oksidasyonu İle Renk Giderimi Üzerine Etkisi. İTÜ Dergisi/e, 16(1-3):67-75.
- Özyonar, F., Karagözoğlu, B., 2012. Elektrokoagülasyon Prosesi ile Tekstil Sanayi Atıksuyunun Arıtımı. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28(1):29-37.
- Perincek, S., D., Duran, K., Körlü, A., E. ve Bahtiyari, M., İ, 2007. Ultraviyole Teknolojisi. Tekstil ve Konfeksiyon 4:219-223.
- Poyatos, J.M., Muño, M.M., Almecija, M.C., Torres, J.C., Hontoria, E., and Osorio, F., 2010. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: State of the Art. Water Air Soil Pollut, 205:187-204.
- Rubin, M.B., 2001. The History of Ozone. The Schönbein Period, 1839-1868. Bull. Hist. Chem., 26(1):40-56.

- Saatçi, Y., ve Hanay, Ö., 2013. İndigo Boyar Maddesi İçeren Atıksu Renginin Elektro-Fenton Prosesi ile Giderimi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 29(2):129-134.
- Sevim, Ü., ve Kuyumcu, O., 2008. Hazır Giyim. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı İhracatı Geliştirme Etüd Merkezi Araştırma Raporu.
- Sevimli, M.F., and Sarıkaya, H.Z. 2002. Ozone Treatment of Textile Effluents and Dyes: Effect of Applied Ozone Dose, pH and Dye Concentration. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 77(7):842-850.
- Shore, J., 1996. Advances in Direct Dyes. Indian Journal of Fibre & Textile Research, 21: 1-29.
- SKKY, 2014. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. <http://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Asp?MevzuatKod=7.5.7221&sourceXmlSearch=&MevzuatIliski=0> (Erişim Tarihi: 18.03.2019).
- Sliney, D., H., 2016. What is light? The visible spectrum and beyond. Eye, (30) : 222-229.
- Socha, K., 1991. Treatment of Textile Effluents. Textile Month, 12: 52-56.
- Sun, J.H., Sun, S.P., Wang, G.L., and Qiao, L.P., 2007. Degradation of Azo Dye Amido Black 10B in Aqueous Solution by Fenton Oxidation Process. Dyes and Pigments, 74(3): 647-652.
- Sun, S.P., Li, C.J., Sun, J.H., Shi, S.H., Fan, M.H. and Zhou, Q., 2009. Decolorization of an Azo Dye Orange G in Aqueous Solution by Fenton Oxidation Process: Effect of System Parameters and Kinetic Study. Journal of Hazardous Materials, 161(2):1052-1057.
- Tanyıldızı, M.Ş. ve Uygut, M.A., 2016. Çam Kozalağıyla Bazik Mavi 3 Adsorpsiyonu. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2):169-174.
- Tanyıldızı, M.Ş. ve Altundoğan, H.S., 2017. Sitrik Asitle Modifiye Edilmiş Çam Kozalağıyla Katyonik Boya Giderimi. Fırat University Journal of Science, 29(1): 1-8.

- Tehrani-Bagha, A.R., Mahmoodi, N.M. and Menger, F.M., 2010. Degradation of a Persistent Organic Dye from Colored Textile Wastewater by Ozonation. *Desalination*, 260(1):34-38.
- Tezcan, N., 2011. Parametrik Olmayan Regresyon Analizi. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 10. Ekonometri ve İstatistik Sempozyumu Özel Sayısı, 25: 341-351.
- Turhan, K. and Turgut, Z., 2009. Decolorization of Direct Dye in Textile Wastewater By Ozonation in A Semi-Batch Bubble Column Reactor. *Desalination*, 242(1-3):256-263.
- Tübitak, 2013. Kamag Projesi El Kitabı. Proje No: 109G083.
- Uzun, S., 2011. Su Kalitesinin İyileştirilmesinde Ozon Kullanımı ve Kimyasal Etkileri. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 68(2):105–113.
- Venkatesh, S., Quaff, A.R., Pandey, N.D. and Venkatesh, K., 2015. Impact of Ozonation on Decolorization and Mineralization of Azo Dyes: Biodegradability Enhancement, By-Products Formation, Required Energy and Cost. *Ozone: Science & Engineering*, 37(5):420–430.
- Wijannarong, S., Aroonsrimorakot, S., Thavipoke, P., Kumsopa, A., and Sangjan, S., 2013. Removal of Reactive Dyes from Textile Dyeing Industrial Effluent by Ozonation Process. *APCBEE Procedia* 5:279-282.
- Wu, J., Doan, H. and Upreti, S., 2008. Decolorization of Aqueous Textile Reactive Dye by Ozone. *Chemical Engineering Journal*, 142:156–160.
- Yalılı Kılıç, M. ve Kestioğlu, K., 2008. Endüstriyel Atıksuların Arıtımında İleri Oksidasyon Proseslerinin Uygulanabilirliğinin Araştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 13(1):67-80.
- Yonar, T., 2005. Fotokimyasal Oksidasyon Yöntemiyle Organik Kirliliklerin Giderilmesi ve Bu Yöntemin Küçük Yerleşim Bölgelerinden Kaynaklanan Atıksulara Uygulanması, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, Bursa, 194 s. (Yayınlanmamış).

- Yoon, Y., Hwang, Y., Kwon, M., Jung, Y., Hwang, T. M. and Kang, J. W., 2014. Application of O₃ and O₃/H₂O₂ as Post-treatment Processes for Color Removal in Swine Wastewater from a Membrane Filtration System. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(5):2801-2805.
- Zayas, P. T., Geissler, G. and Hernandez, F., 2007. Chemical Oxygen Demand Reduction in Coffee Wastewater Through Chemical Flocculation and Advanced Oxidation Processes. *Journal of Environmental Sciences*, 19:300-305.
- Zheng, Q., Dai, Y., Han, X., 2016. Decolorization of Azo Dye C.I. Reactive Black 5 by Ozonation in Aqueous Solution: Influencing Factors, Degradation Products, Reaction Pathway And Toxicity Assessment. *Water Science & Technology*, 73(7):1500-1510.
- Zhou, H. and Smith, D. W., 2002. Advanced Technologies in Water and Wastewater Treatment. *J. Environ. Eng. Sci.*, 1:247-264.



ÖZGEÇMİŞ

18/03/1989 yılında Adana'da doğdu. İlköğretimini 2000 yılında Ticaret Borsası İlköğretim Okulu'nda tamamladı. 2003 yılında Yavuzlar Ortaokulu'ndan mezun oldu. İlk yılı hazırlık olmak üzere 2003-2007 yılları arasında Hacı Ahmet Atıl Lisesi'nde (Yabancı dil ağırlıklı) okudu. 2010 yılında Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümüne başladı. Buradaki öğrenimi devam ederken Anadolu Üniversitesi'nin Açık öğretim programında yer alan Elektrik Enerjisi Üretim, İletim, Dağıtım Ön lisans Bölümü'ne kayıt yaptırdı. 2013 yılında Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü'nden ve Anadolu Üniversitesi, Elektrik Enerjisi Üretim, İletim, Dağıtım Ön lisans Bölümü'nden mezun oldu. 2014 yılında Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başladı. 2017 yılında Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Güvenliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başladı ve 2018 yılında mezun oldu. B sınıfı İş Güvenliği uzmanı olarak çalışmaktadır. Evlidir ve bir çocuk babasıdır.



EKLER

EK 1. Boyar Maddelerin Sınıflandırılması (Başer ve İnancı, 1990; Aydın 2011)

Boyar Maddelerin Sınıflandırılması		
Çözünürlüklerine Göre Sınıflandırma	1-Suda Çözünen Boyar Maddeler	A) Anyonik B) Katyonik C) Zwitter İyon Karakterli
	2-Suda Çözünmeyen Boyar Maddeler	A) Substratta Çözünen B) Organik Çözücülerde Çözünen C) Geçici Çözünürlüğü Olan D) Polikondensasyon E) Elyaf İçinde Oluşturulan F) Pigmentler
Boyama Özelliklerine Göre Sınıflandırma	1-Bazik (Katyonik) Boyar Maddeler 2-Asit Boyar Maddeler 3-Direkt (Substantif) Boyar Maddeler 4-Mordan Boyar Maddeler 5-Reaktif Boyar Maddeler 6-Küpe Boyar Maddeleri 7-Inkişaf Boyar Maddeleri 8-Metal-Kompleks Boyar Maddeleri 9-Dispersiyon Boyar Maddeleri 10- Pigment Boyar Maddeleri	
Kimyasal Yapısına Göre Sınıflandırma	1- Azo Boyar Maddeleri 2-Nitro Ve Nitrozo Boyar Maddeleri 3-Polimetin Boyar Maddeleri 4-Arilmetin Boyar Maddeleri 5-Aza [18] Annulen Boyar Maddeleri 6-Karbonil Boyar Maddeleri 7-Kükürt Boyar Maddeleri	

EK 2. Tekstil Endüstrisinin Farklı Süreçlerinde Oluşan Atık Su Karakterizasyonları
(Bisschops ve Spanjers, 2003; Tübitak, 2013)

Parametre	Elyaf Türü	Haşıl Sökme	Yıkama	Ağartma	Boyama	Baskı
KOl (mg/L)	Yün	-	5000-90000	-	7920	-
	Pamuk	950-20000	8000	288-13500	1115-4585	-
	Sentetik	-	-	-	620	1515
BOI5(mg/L)	Yün	-	2270-60000	400	400-2000	-
	Pamuk	-	100-2900	90-1700	970-1460	-
	Sentetik	-	500-2800	-	530	590
Renk (ADMI)	Yün	-	2000	-	2225	-
	Pamuk	64-1900	694	153	1450-4750	-
	Sentetik	-	-	-	1750	-
Toplam Katı (mg/L)	Yün	-	28900-49300	910	-	-
	Pamuk	-	-	2300-14400	-	-
	Sentetik	-	-	-	-	150-250
Toplam Askıdaki Katı (mg/L)	Yün	-	1000-26200	900	-	-
	Pamuk	18-800	184-17400	130-25000	120-190	-
	Sentetik	-	600-3300	-	140	-
Toplam Çözünmüş Katı (mg/L)	Pamuk	530-6900	-	4760-19500	-	-
Çözünmüş Organik Karbon (mg/L)	Yün	-	5800	-	-	-
	Pamuk	250-2750	-	320	-	-
Toplam Kjeldahl Azotu (mg/L)	Pamuk	70	-	40	-	-
	Sentetik	-	-	-	-	164
Toplam Fosfor (mg/L)	Pamuk	4-10	-	6-60	-	-
	Sentetik	-	-	-	-	21
Fosfat (mg/L)	Yün	-	89	-	-	-
Sülfür (mg/L)	Yün	-	0-2	-	-	-
	Pamuk	-	-	-	325-900	-
Sülfat (mg/L)	Pamuk	-	-	-	1750-2690	-
Klorür (mg/L)	Genel Elyaf	-	-	90-100	26000	-
Yağ-Gres (mg/L)	Yün	-	580-55000	-	-	-
Cr-2 (mg/L)	Yün	-	50	-	-	-
pH	Yün	-	7.6-10.4	6	4.6-8	-
	Pamuk	8.8-9.2	7.2-13	6.5-13.5	9.2-10.1	-
	Sentetik	-	8-10	-	11.7	-
Su Tüketimi (L .kg-1 elyaf)	Yün	-	4-77.5	-	40-150	280-520
	Pamuk	-	2.5-43	30-50	38-143	-
	Sentetik	-	17-67	-	38-143	-

ADMI: Amerikan Boya İmalatçıları Enstitüsü Renk Birimi