



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SU ORTAMINDAN BOYAR MADDE GİDERİMİNDE ATIK BALIK PULLARININ
KULLANIMI :GÜNCEL ARAŞTIRMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Hale ELKEÇEL
ZOOTEKNİ**

**ŞANLIURFA
2026**



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SU ORTAMINDAN BOYAR MADDE GİDERİMİNDE ATIK BALIK PULLARININ
KULLANIMI :GÜNCEL ARAŞTIRMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Hale ELKEÇEL
ZOOTEKNİ**

DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi A. Yusuf YÜKSEL

**ŞANLIURFA
2026**

TEŐEKKÖR

Bu çalıőmanın yűrűtűlmesinde deęerli katkıları ve yűnlendirmeleri için danıőmanım **Dr. Öęr. Üyesi Arslan Yusuf Yűksel'e** teőekkűrlerimi sunarım.

Çalıőmam boyunca desteklerini esirgemeyen **aileme** őűkranlarımı bildiririm.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	3
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
KISALTMALAR	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. Su Kirliliği ve Boyar Maddeler	4
2.2. Boya Giderim Yöntemleri	4
2.3. Adsorpsiyon ve Biyosorpsiyon Teorisi.....	5
2.4. Biyosorbent Olarak Atık Balık Pulları	7
3. GEREÇ ve YÖNTEM	8
3.1. Balık Pullarının Hazırlanması	8
3.2. Balık Pullarının Karakterizasyonu	8
3.3. Balık Pullarının Modifikasyonu	9
4. BULGULAR	10
4.1. Karakterizasyon Bulguları.....	11
4.2. Biosorpsiyon Parametrelerinin Etkisi.....	12
4.3. Biyosorpsiyon Kinetikleri	13
4.4. Adsorpsiyon İzotermi.....	13
4.5. Endüstriyel Atık Su Uygulamaları ve Regenerasyon	14
5. TARTIŞMA.....	15
5.1. Biyosorpsiyon Mekanizmalarının Yorumlanması	15
5.2. Farklı Balık Türlerinin Karşılaştırılması	16
5.3. Ticari Adsorbentlerle Karşılaştırma	17
5.4. Araştırma Boşlukları ve Sınırlamalar	18
6. SONUÇLAR	19
7. ÖNERİLER	20
KAYNAKLAR.....	22
ÖZ GEÇMİŞ	27

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Su Ortamından Boyar Madde Gideriminde Atık Balık Pullarının Kullanımı: Güncel Araştırmaların Değerlendirilmesi

Hale ELKEÇEL

**HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ZOOTEKNİ**

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi A. Yusuf YÜKSEL

Yıl: 2026, Sayfa: 27

Su kirliliği, özellikle endüstriyel atık sulardan kaynaklanan sentetik boyaların bulunması, günümüzün en önemli çevre sorunlarından biridir. Tekstil, deri ve kağıt endüstrilerinin atık sularında bulunan boyar maddeler, sucul ekosistemler ve insan sağlığı üzerinde ciddi toksik etkiler oluşturmaktadır. Geleneksel arıtım yöntemlerinin yüksek maliyet ve sınırlı verimlilik nedeniyle yetersiz kaldığı durumlarda, alternatif, çevre dostu ve ekonomik çözümler aranmaktadır. Bu bağlamda, atık balık pulları, su ürünleri işleme endüstrisinden kaynaklanan önemli bir atık kaynağı olarak, boya gideriminde umut verici bir biyosorbent materyali olarak ortaya çıkmıştır. Balık pullarının doğal poroz yapısı, zengin yüzey fonksiyonel grupları ve yüksek biyosorpsiyon kapasitesi, bu materyali boyar madde gideriminde etkili bir çözüm haline getirmektedir. Bu derleme çalışması, atık balık pullarının biyosorbsiyon yöntemleriyle sentetik boyaların giderilmesinde kullanımını, güncel araştırmaları, mekanizmaları ve endüstriyel uygulanabilirliğini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Çalışmada, balık pullarının karakterizasyonu, modifikasyon yöntemleri, biyosorpsiyon performansı, kinetik ve termodinamik parametreler ile gelecekteki araştırma yönleri ele alınmaktadır. Yapılan araştırmalar, balık pulu biyosorbentlerinin tekstil, deri ve kağıt endüstrileri atık sularından %70-90 arasında boya giderim verimi sağladığını göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Atık balık pulları, Biyosorbent, Boyar madde giderimi, Biyosorbsiyon, Su arıtımı

ABSTRACT

MASTER’S THESIS

Utilization of Waste Fish Scales for Dye Removal from Aqueous Media: A Review of Current Research

Hale ELKEÇEL

**HARRAN UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL
ZOOTECHNICS**

Thesis Advisor: Asst. Prof. A. Yusuf YÜKSEL

Year: 2026, Page: 27

Water pollution, particularly the presence of synthetic dyes originating from industrial effluents, represents one of the most pressing environmental challenges of our time. Dye-containing wastewater generated by the textile, leather, and paper industries poses significant toxic effects on aquatic ecosystems and human health. In cases where conventional treatment methods remain insufficient due to high operational costs and limited efficiency, there is an increasing demand for alternative, environmentally friendly, and cost-effective solutions. In this context, waste fish scales, an abundant by-product of the seafood processing industry, have emerged as a promising biosorbent material for dye removal. The inherent porous structure of fish scales, along with their rich surface functional groups and high biosorption capacity, makes them an effective medium for the removal of dye pollutants. This review study provides a comprehensive evaluation of the use of waste fish scales in the removal of synthetic dyes through biosorption processes, with a focus on recent research developments, underlying mechanisms, and industrial applicability. The study further addresses the characterization of fish scales; modification techniques; biosorption performance; and kinetic and thermodynamic parameters and outlines future research directions. Recent findings indicate that fish scale-based biosorbents can achieve dye removal efficiencies ranging from 70% to 90% in wastewater from textile, leather, and paper industries.

KEYWORDS: Waste fish scales, Biosorbent, Dye removal, Biosorption, Water treatment

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Balık Pulu Biyosorbenti Hazırlama Prosesi Akış Diyagramı . . .	8
Şekil 4.1.	pH'nin Boya Giderim Verimine Etkisi (Balık Pulu Biyosorbenti).	10
Şekil 4.2.	Temas Süresinin Biyosorpsiyon Kapasitesine Etkisi (Balık Pulu Biyosorbenti).	11
Şekil 4.3.	pH'nin Boya Giderim Verimine Etkisi (Balık Pulu Biyosorbenti)	12
Şekil 4.4.	Temas Süresinin Adsorpsiyon Kapasitesine Etkisi (Balık Pulu Biyosorbenti).	13
Şekil 4.5.	. Langmuir ve Freundlich İzoterm Modelleri (Metilen Mavisi - Balık Pulu Biyosorbenti).	14
Şekil 5.1.	Boya Moleküllerinin Balık Pulu Yüzeyine Adsorpsiyon Mekanizması	15
Şekil 5.2.	Farklı Balık Türlerinden Hazırlanan Adsorbentlerin Maksimum Adsorpsiyon Kapasiteleri	17

KISALTMALAR

FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
BET	Brunauer-Emmett-Teller Yüzey Alanı Analizi
MB	Metilen Mavisi
XRD	X-Işını Kırınımı

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Boya Giderim Yöntemlerinin Karşılaştırılması	5
Çizelge 4.1.	Adsorpsiyon Kinetik Modelleri ve Parametreleri	13
Çizelge 5.1.	Farklı Balık Türlerinden Hazırlanan Adsorbentlerin Performansı	17

1. GİRİŞ

Su, yaşamın temel kaynağı olmasına rağmen, endüstriyel faaliyetlerin hızlı gelişimi ve nüfus artışı nedeniyle ciddi bir kirlilik tehdidi altındadır. Özellikle tekstil, deri işleme, kağıt ve gıda işleme endüstrileri, büyük miktarlarda atık su üretmektedir. Bu atık sularda bulunan sentetik boyaların, sucul ortamda biyolojik ve kimyasal bozunmaya dirençli olması, onları tehlikeli bir kirletici haline getirmektedir (Yildiz & Yüksel, 2025) Dünya genelinde her yıl yaklaşık 700.000 ton sentetik boyar madde üretilmekte ve bu miktarın %10-15'inin endüstriyel atık sulara karıştığı tahmin edilmektedir (Yildiz vd., 2024) Söz konusu boyar maddeler, yalnızca görsel kirlilik oluşturmakla kalmayıp, sucul ekosistemler ve insan sağlığı üzerinde ciddi ve uzun vadeli olumsuz etkiler meydana getirmektedir. Boyar maddeler, su ortamında ışık penetrasyonunu engellediği için fotosentezi bozar, aynı zamanda toksik ve mutagenik etkileri nedeniyle su canlılarına ve insan sağlığına zarar verir. Özellikle azo boyaların metabolik parçalanması sırasında açığa çıkan aromatik aminler, kanserojen ve mutajen özellikler taşımakta; bu durum boyar madde kirliliğini yalnızca çevresel değil, aynı zamanda halk sağlığı açısından da kritik bir sorun haline getirmektedir (Dutta vd., 2021)

Tekstil endüstrisi, dünya genelinde en fazla su tüketen ve en fazla atık su üreten sektörler arasında yer almaktadır. Bir kilogram tekstil ürününün boyanması için ortalama 100-150 litre su kullanılmakta ve bu suyun önemli bir bölümü, yüksek konsantrasyonlarda boyar madde içeren atık su olarak deşarj edilmektedir (Quansah vd., 2020) Benzer biçimde, deri işleme endüstrisinde kullanılan sentetik boyalar ve krom bileşikler, arıtılmadan deşarj edildiğinde ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Kağıt ve selüloz endüstrisi de boyama ve kaplama süreçlerinde yüksek miktarda boyar madde kullanmakta; bu endüstrilerin atık suları, biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) değerleri açısından oldukça yüksek seviyelere ulaşmaktadır (Mia vd., 2019)

Geleneksel boya giderim yöntemleri arasında kimyasal koagülasyon, kimyasal oksidasyon, elektrokimyasal yöntemler ve membran filtrasyon yer almaktadır. Ancak bu yöntemlerin yüksek işletme maliyeti, ikincil kirleticilerin oluşması ve sınırlı verimlilik gibi dezavantajları bulunmaktadır. Kimyasal koagülasyon ve flokülasyon yöntemleri, büyük miktarda kimyasal çamur üretmekte ve bu çamurun bertarafı ayrı bir çevre sorunu

oluşturmaktadır. Membran filtrasyon yöntemleri ise yüksek enerji tüketimi ve membran tıkanması sorunları nedeniyle uzun vadeli işletme maliyetlerini artırmaktadır (Lopes vd., 2015)

Ozonlama ve Fenton prosesi gibi ileri oksidasyon yöntemleri, boyar maddeleri etkili biçimde parçalamakla birlikte, yüksek kimyasal tüketimi ve işletme maliyetleri nedeniyle küçük ölçekli tesislerde uygulanabilirliği kısıtlı kalmaktadır. Bu koşullar altında, adsorpsiyon, özellikle biyosorbsiyon, söz konusu sorunları çözmek için umut verici bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Yildiz & Yüksel, 2025). Adsorpsiyon prosesi, düşük maliyet, yüksek verimlilik, adsorbentin yeniden kullanılabilirliği ve çevre dostu olması nedeniyle tercih edilmektedir (Tural vd., 2017)

Atık balık pulları, su ürünleri işleme endüstrisinden kaynaklanan önemli bir atık kaynağıdır. Küresel ölçekte her yıl yaklaşık 80-90 milyon ton balık avlanmakta ve bu miktarın işlenmesi sırasında toplam balık ağırlığının %1-2'sini oluşturan pul atığı meydana gelmektedir (Yildiz & Yüksel, 2025) Bu atıklar, geleneksel olarak çöplüklere gönderilmekte veya yakılmakta, çevre kirliliğine neden olmaktadır. Ancak son yıllarda yapılan araştırmalar, balık pullarının hidroksiapatit [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$] ve kollajen içeriği nedeniyle biyosorbent materyali olarak kullanılabilirliğini göstermiştir (Qin vd., 2022) Balık pullarının doğal poroz yapısı, yüksek yüzey alanı ve zengin yüzey fonksiyonel grupları (karboksil $-\text{COOH}$, amino $-\text{NH}_2$, fosfat $-\text{PO}_4$, sulfonat $-\text{SO}_3\text{H}$), boyar maddelerin adsorpsiyonu için ideal koşullar oluşturmaktadır (Hashem vd., 2025) Literatürde bazı balık pullarından hazırlanan biyosorbentin Metilen Mavisi için 145.2 mg/g'a ulaşan adsorpsiyon kapasitesi gösterdiğini bildirmiştir (Onwordi vd., 2019).

Balık pullarının biyosorbent olarak değerlendirilmesi, yalnızca su arıtımı açısından değil, atık yönetimi ve döngüsel ekonomi perspektifinden de büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'nin (SDG) birden fazlasıyla uyumludur; başta SDG 6 (Temiz Su ve Sanitasyon), SDG 12 (Sorumlu Tüketim ve Üretim) ve SDG 14 (Su Altındaki Yaşam) olmak üzere sürdürülebilirlik gündemine doğrudan katkı sağlamaktadır.

Bu derleme çalışması, atık balık pullarının boyar madde gideriminde kullanımı

konusundaki güncel araştırmaları, mekanizmaları ve endüstriyel uygulanabilirliğini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Çalışmanın temel amacı; balık pullarının biyosorbent olarak potansiyelini ortaya koymak, farklı balık türleri ve modifikasyon yöntemlerinin adsorpsiyon performansına etkisini değerlendirmek, kinetik ve termodinamik parametreleri sistematik biçimde irdelemek ve gelecekteki araştırma yönleri ile endüstriyel uygulama olanaklarını belirlemektir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Su Kirliliği ve Boyar Maddeler

Su kirliliği, dünya çapında milyonlarca insanın temiz suya erişimini engellemektedir. Endüstriyel atık sularının önemli bileşenlerinden biri boyar maddelerdir. Boyar maddeler, tekstil endüstrisinde renk vermek amacıyla kullanılan kimyasal bileşiklerdir ve yapılarına göre sınıflandırılmaktadır (Yildiz & Yüksel, 2025). Dünya genelinde yılda yaklaşık 700.000 ton sentetik boyar madde üretilmekte ve bu miktarın önemli bir kısmı endüstriyel atık sulara karışmaktadır.

Boyar maddeler, kimyasal yapılarına göre anyonik (asit boyalar, reaktif boyalar, doğrudan boyalar), katyonik (bazik boyalar) ve noniyonik boyalara ayrılmaktadır. Metilen Mavisi (Methylene Blue, MB), katyonik bir boyar maddedir ve tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Al-Asadi vd., 2025) Kristal Viyole (Crystal Violet, CV) de katyonik bir boyar madde olup, toksisitesi nedeniyle çevre kirliliğinin göstergesi olarak kullanılmaktadır (Quansah vd., 2020) Kongo Kırmızısı (Congo Red, CR) ise anyonik bir boyar maddedir ve dermatit ile alerjik reaksiyonlara neden olabilmektedir (Qin vd., 2022)

Boyar maddelerin sucul ortamda bulunması, ışık penetrasyonunu azaltarak fotosentezi bozar, su canlılarının yaşam alanını daraltır ve besin zinciri aracılığıyla biyoakümülyasyon yaparak insan sağlığını tehdit eder. Ayrıca, bazı boyar maddeler karsinojenik ve mutagenik özelliklere sahiptir. Bu nedenle, boyar maddelerin atık sulardan etkili bir şekilde giderilmesi, su kalitesinin iyileştirilmesi ve insan sağlığının korunması açısından kritik öneme sahiptir (Bonyadi vd., 2022)

2.2. Boya Giderim Yöntemleri

Endüstriyel atık sulardan boya gideriminde çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler, genel olarak fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır.

Fiziksel Yöntemler: Membran filtrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters ozmoz gibi yöntemler, boyar maddelerin mekanik olarak ayrılmasını sağlamaktadır. Ancak bu yöntemler yüksek enerji tüketimi ve membran tıkanması sorunları nedeniyle sınırlı uygulanabilirliğe sahiptir.

Kimyasal Yöntemler: Koagülasyon, flokülasyon, kimyasal oksidasyon (ozonlama, Fenton prosesi, fotokatalitik oksidasyon) ve elektrokimyasal yöntemler, boyar maddelerin kimyasal olarak bozunmasını sağlamaktadır. Bu yöntemler etkili olmakla birlikte, yüksek maliyet ve ikincil kirleticilerin oluşması gibi dezavantajlara sahiptir (Yıldız, 2024).

Biyolojik Yöntemler: Aerobik ve anaerobik biyolojik arıtım, mikroorganizmalar tarafından boyar maddelerin bozunmasını sağlamaktadır. Ancak bu yöntemler uzun işletme süresi ve sınırlı verimlilik nedeniyle endüstriyel uygulamada tercih edilmemektedir.

Adsorpsiyon: Adsorpsiyon, düşük maliyet, yüksek verimlilik, kolay uygulanabilirlik ve adsorbentin yeniden kullanılabilirliği nedeniyle boyar madde gideriminde en yaygın yöntemdir. Adsorpsiyon, fiziksel adsorpsiyon (fizisorpsiyon) ve kimyasal adsorpsiyon (kemisorpsiyon) olarak ikiye ayrılmaktadır (Yıldız vd., 2024). Çizelge 2.1’de farklı boya giderim yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi sunulmaktadır.

Çizelge 2.1. Boya Giderim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Yöntem	Verimlilik	Maliyet	Avantajlar	Dezavantajlar
Adsorpsiyon	Yüksek (%70-99)	Düşük-Orta	Kolay uygulama, yeniden kullanım	Adsorbent rejenerasyonu
Membran Filtrasyon	Çok Yüksek (%95-99)	Yüksek	Yüksek verimlilik	Membran tıkanması, enerji
Kimyasal Oksidasyon	Yüksek (%80-95)	Orta-Yüksek	Hızlı proses	İkincil kirleticiler
Koagülasyon/Flokülasyon	Orta (%50-80)	Orta	Basit uygulama	Çamur oluşumu
Biyolojik Arıtım	Orta (%40-70)	Düşük	Çevre dostu	Uzun süre, sınırlı verim
Elektrokimyasal	Yüksek (%80-95)	Yüksek	Seçici giderim	Yüksek enerji tüketimi

2.3. Adsorpsiyon ve Biyosorpsiyon Teorisi

Adsorpsiyon, bir sıvı veya gaz fazındaki bir maddenin (adsorbat), katı bir maddenin (adsorbent) yüzeyinde biriktiği bir prosestir. Adsorpsiyon, fiziksel kuvvetler (Van der Waals kuvvetleri) veya kimyasal kuvvetler (kovalent bağlar) tarafından gerçekleşebilir. Fiziksel adsorpsiyon (fizisorpsiyon), zayıf etkileşimler nedeniyle tersine çevrilebilir ve düşük

sıcaklıklarda oluşur. Kimyasal adsorpsiyon (kemisorbsiyon), güçlü etkileşimler nedeniyle tersine çevrilmez ve yüksek sıcaklıklarda oluşur.

Biyosorbsiyon, yaşayan veya ölü biyolojik materyallerin (biyokütle) kirletici maddeleri adsorbe etme yeteneğidir. Biyosorbsiyon, adsorpsiyon, iyon değişimi, kompleks oluşumu ve çökelme gibi mekanizmalar aracılığıyla gerçekleşebilir. Atık balık pulları, ölü biyolojik materyali temsil ettiğinden, bu materyalden hazırlanan adsorbent ile yapılan adsorpsiyon prosesi, biyosorbsiyon olarak tanımlanmaktadır (Yildiz & Yüksel, 2025)

Adsorpsiyon Kinetikleri: Adsorpsiyon prosesinin hızını ve mekanizmasını anlamak için kinetik modeller kullanılmaktadır. En yaygın kinetik modeller, Adsorpsiyon sisteminin dinamik hareket tarzının belirlenmesi ve modellenmesi için yalancı birinci derece, yalancı ikinci derece ve parçacık içi difüzyon kinetik modelleri kullanılmıştır. Bu modellere ait matematiksel formüller sırasıyla şöyledir:

$$q_t = q_e(1 - e^{-(k_1 t)}) \quad (1)$$

$$q_t = (k_2 q_e^2 t) / (1 + k_2 q_e t) \quad (2)$$

$$q_t = k_{id} t^{1/2} + C \quad (3)$$

Burada, q_e (mg/g) ve q_t (mg/g) sırasıyla dengede ve t (dakika) zamanında adsorpsiyon kapasiteleridir. k_1 (1/dakika), k_2 (g/mg.dakika) ve k_{id} (mg/g.dakika^{-1/2}) yalancı birinci derece, yalancı ikinci derece ve parçacık içi difüzyon modellerinin adsorpsiyon hız sabitlerini ve C (mg/g) sınır tabaka kalınlığı ile alakalı bir sabiti ifade etmektedir.

Adsorpsiyon İzotermi: Adsorpsiyon izotermi, sabit sıcaklıkta adsorbat konsantrasyonu ile adsorpsiyon kapasitesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. En yaygın izoterm modelleri Langmuir, Freundlich ve Temkin modelleridir.

$$q_e = q_m K L C_e / (1 + K L C_e) \quad (4)$$

$$q_e = K F C_e^{1/n} \quad (5)$$

$$qe = RT / \ln ACe \quad (6)$$

2.4. Biyosorbent Olarak Atık Balık Pulları

Balık pulları, balık iskeletinin dış yüzeyini kaplayan, keratin ve kolajen gibi proteinlerden oluşan yapılardır. Balık pullarının temel bileşenleri hidroksiapatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) ve kolajendir. Hidroksiapatit, balık pullarına sertlik ve rijitlik sağlarken, kollajen ise esneklik sağlamaktadır. Balık pullarının bu doğal bileşimi, onları biyosorbent materyali olarak ideal kılmaktadır (Hashem vd., 2025)

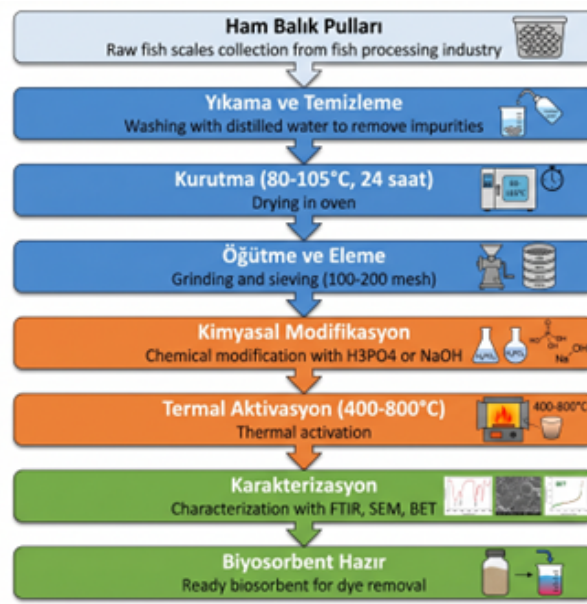
Balık pullarının yüzeyinde bulunan fonksiyonel gruplar (karboksil $-\text{COOH}$, amino $-\text{NH}_2$, fosfat $-\text{PO}_4$, sulfonat $-\text{SO}_3$), boyar maddelerin adsorpsiyonunda önemli rol oynamaktadır. Bu gruplar, elektrostatik etkileşimler, hidrojen bağlanması ve kompleks oluşumu aracılığıyla boyar maddeleri adsorblamaktadır (Hashem vd., 2025)

Balık pullarının doğal poroz yapısı, yüksek yüzey alanı ve düşük maliyeti, onları ticari adsorbentlere (aktivize karbon) kıyasla daha ekonomik bir alternatif haline getirmektedir. Ayrıca, balık pullarının biyodegradabilir olması, çevre dostu bir çözüm sunmaktadır. Literatürde, farklı balık türlerinden hazırlanan adsorbentlerin boya giderim performansı incelenmiştir. *Sardina pilchardus* (Sardunya), *Cyprinus carpio* (Sazan), *Labeo rohita* ve *Dicentrarchus labrax* (Levrek) gibi balık türlerinden hazırlanan adsorbentler, yüksek adsorpsiyon kapasitesi göstermiştir.

3. GEREÇ ve YÖNTEM

3.1. Balık Pullarının Hazırlanması

Atık balık pulları, balık işleme tesislerinden temin edilmektedir. Balık pulları, ilk olarak distile su ile yıkanarak yüzey kirletici maddelerinden arındırılmaktadır. Daha sonra, pullar 80-105°C’de 24 saat boyunca etüvde kurutulmaktadır. Kurutulan pullar, değirmende öğütülerek toz haline getirilmektedir. Öğütülen pullar, 100-200 mesh (150-75 µm) boyutunda elenmektedir. Şekil 3.1’de balık pulu biyosorbenti hazırlama prosesinin akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Balık Pulu Biyosorbenti Hazırlama Prosesi Akış Diyagramı

3.2. Balık Pullarının Karakterizasyonu

Hazırlanan balık pulu adsorbentinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek için çeşitli analiz yöntemleri kullanılmaktadır.

Fourier Transform Infrared (FTIR) Spektroskopisi: FTIR analizi, adsorbentin yüzeyindeki fonksiyonel grupları belirlemektedir. Balık pullarının FTIR spektrumunda, tipik olarak 3200-3600 cm⁻¹’de O-H ve N-H gerilme titreşimleri, 1600-1700 cm⁻¹’de C=O gerilme titreşimleri ve 1000-1200 cm⁻¹’de C-O gerilme titreşimleri gözlenmektedir (Sudarni

vd., 2021) FTIR analizi ile balık pulu biyosorbentinin yüzeyinde karboksil, amino ve fosfat gruplarının varlığını doğrulamıştır (Muthukumar vd., 2014).

Scanning Electron Microscopy (SEM): SEM analizi, adsorbentin yüzey morfolojisini belirlemektedir. Balık pullarının SEM görüntüleri, poroz bir yapı ve düzensiz yüzey göstermektedir. Modifikasyon işlemi sonrasında, yüzey morfolojisinde değişiklikler gözlenmektedir Cyprinus carpio balık pullarının SEM görüntülerinde, modifikasyon sonrasında yüzey alanının önemli ölçüde arttığını göstermiştir (Yildiz & Yüksel, 2025)

3.3. Balık Pullarının Modifikasyonu

Balık pullarının adsorpsiyon kapasitesini artırmak için çeşitli modifikasyon yöntemleri uygulanmaktadır.

Kimyasal Aktivasyon: Kimyasal aktivasyon, adsorbentin yüzey alanını ve gözenek yapısını artırmaktadır. Balık pulları, H_3PO_4 , H_2SO_4 veya NaOH gibi kimyasallarla muamele edilmektedir. H_3PO_4 ile muamele edilen *Sardina pilchardus* balık pullarının, modifikasyon sonrasında yüzey alanının önemli ölçüde arttığını ve boya giderim kapasitesinin yükseldiğini göstermiştir.

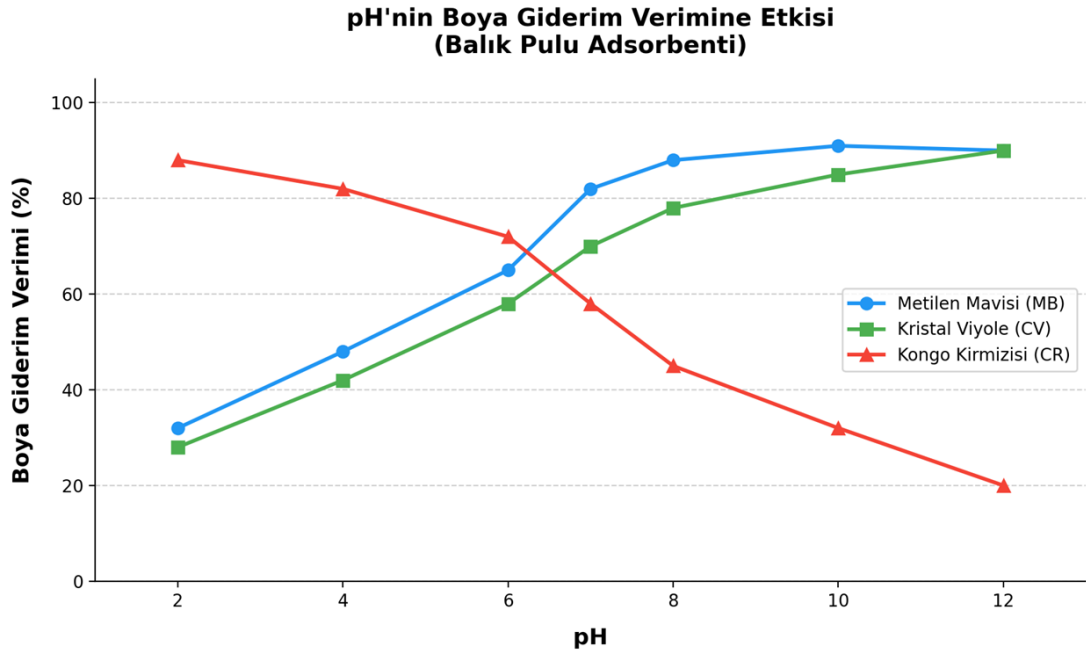
Fiziksel Aktivasyon: Fiziksel aktivasyon, adsorbentin termal işleme tabi tutulmasıdır. Balık pulları, 400-800°C arasında değişen sıcaklıklarda, azot ortamında 1-2 saat boyunca ısıtılmaktadır. Bu işlem, adsorbentin yüzey alanını ve gözenek yapısını artırmaktadır.

Biyolojik Modifikasyon: Biyolojik modifikasyon, adsorbentin biyokompatibilitesini artırmaktadır. Balık pulları, çeşitli biyopolimerler (kitosan, selüloz) ile kaplanmaktadır. Bu işlem, adsorbentin yüzey fonksiyonel gruplarını artırmaktadır.

Nanopartikül Kaplaması: Balık pulları, metal oksit nanopartiküllerle (Fe_3O_4 , TiO_2 , ZnO) kaplanmaktadır. Bu işlem, adsorbentin adsorpsiyon kapasitesini ve seçiciliğini artırmaktadır.

4. BULGULAR

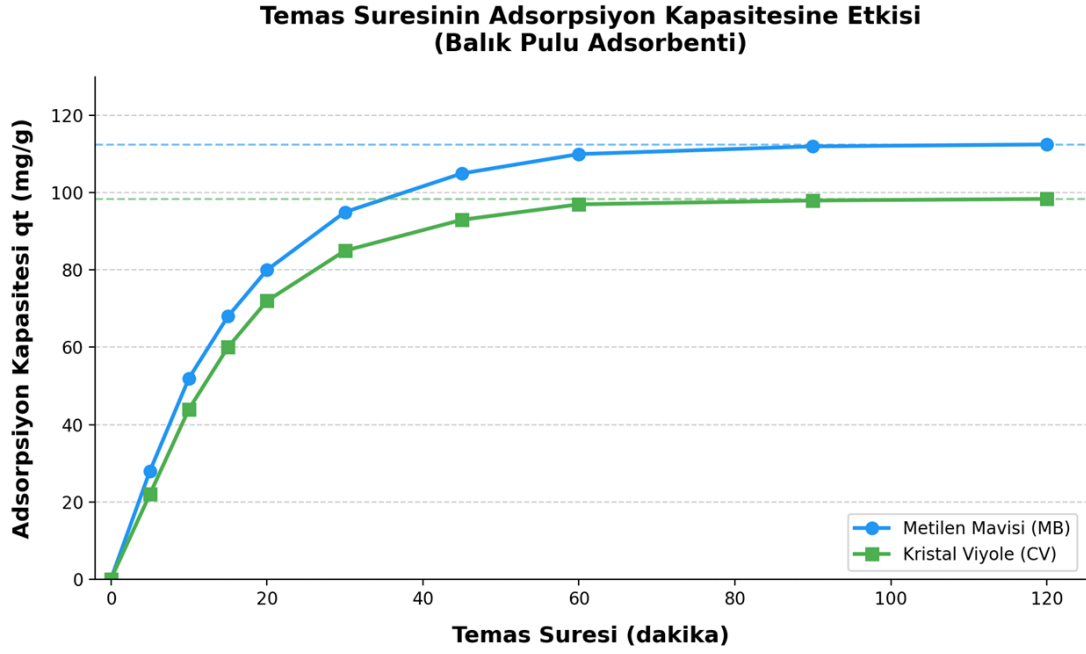
pH Etkisi: Katyonik boyalar (Metilen Mavisi, Kristal Viyole) için optimum pH değeri 7-12 arasında değişmektedir. Anyonik boyalar (Kongo Kırmızısı) için optimum pH değeri 2-6 arasında değişmektedir. Deri işleme atık sularından boya gideriminde optimum pH değerinin 4.8 olduğunu belirlemiştir. Şekil 4.1’de pH’nin boya giderim verimine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.1. pH’nin Boya Giderim Verimine Etkisi (Balık Pulu Biyosorbenti).

Adsorbent Dozu Etkisi: Adsorbent dozu arttıkça boya giderim verimi artmakta, ancak belirli bir dozdan sonra artış yavaşlamaktadır (Hashem vd., 2025) 2 g/50 mL dozun maksimum giderim verimi sağladığını belirlemiştir.

Temas Süresi Etkisi: *Sardina pilchardus* balık pullarından hazırlanan adsorbentin 30 dakika içinde denge adsorpsiyon kapasitesine ulaştığını göstermiştir. Şekil 3’te temas süresinin adsorpsiyon kapasitesine etkisi gösterilmektedir (Zayadi & Othman, 2013) .



Şekil 4.2. Temas Süresinin Biyosorpsiyon Kapasitesine Etkisi (Balık Pulu Biyosorbenti).

Sıcaklık Etkisi: Çoğu durumda, balık pulu adsorbentinin boya adsorpsiyonu ekzotermik bir prosestir ve sıcaklık arttıkça adsorpsiyon kapasitesi azalmaktadır (Yıldız & Yüksel, 2023)

4.1. Karakterizasyon Bulguları

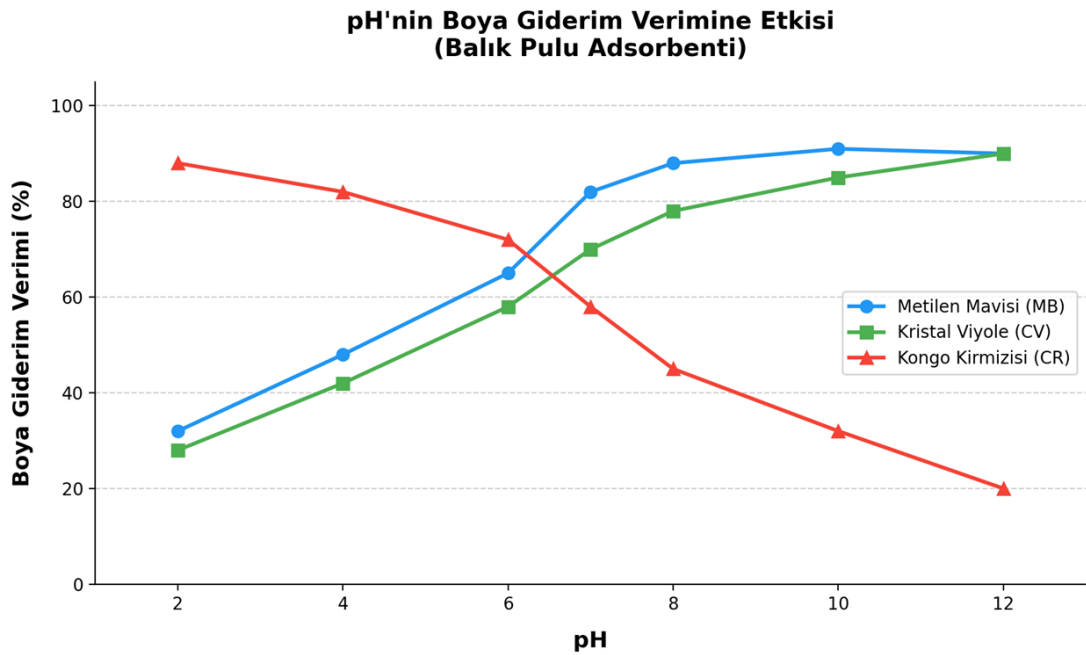
İncelenen çalışmalarda, FTIR analizleri balık pulu biyosorbentlerinin yüzeyinde karboksil (-COOH), amino (-NH₂), fosfat (-PO₄) ve hidroksil (-OH) gruplarının varlığını ortaya koymuştur. Bu fonksiyonel gruplar, boyar madde adsorpsiyonunda belirleyici rol oynamaktadır. FTIR analizi ile adsorpsiyon öncesi ve sonrasında bu grupların yoğunluğundaki değişimi gözlemleyerek adsorpsiyonun gerçekleştiğini doğrulamıştır (Yuvd., 2017)

SEM analizleri, balık pullarının poroz ve düzensiz bir yüzey morfolojisine sahip olduğunu göstermiştir. Modifikasyon işlemi sonrasında yüzey alanının ve gözenek sayısının arttığı gözlemlenmiştir. BET analizleri, ham balık pullarının spesifik yüzey alanının 5-15 m²/g arasında değiştiğini; kimyasal aktivasyon sonrasında bu değerin 20-50 m²/g'a yükseldiğini ortaya koymuştur. pH_{zpc} değerleri, incelenen balık türlerine göre 4,2-6,1

arasında değişmiştir; bu durum, $pH > pH_{pzc}$ koşullarında adsorbentin yüzeyinin negatif yüklü olduğunu ve katyonik boyaların adsorpsiyonuna elverişli hale geldiğini göstermektedir.

4.2. Biosorpsiyon Parametrelerinin Etkisi

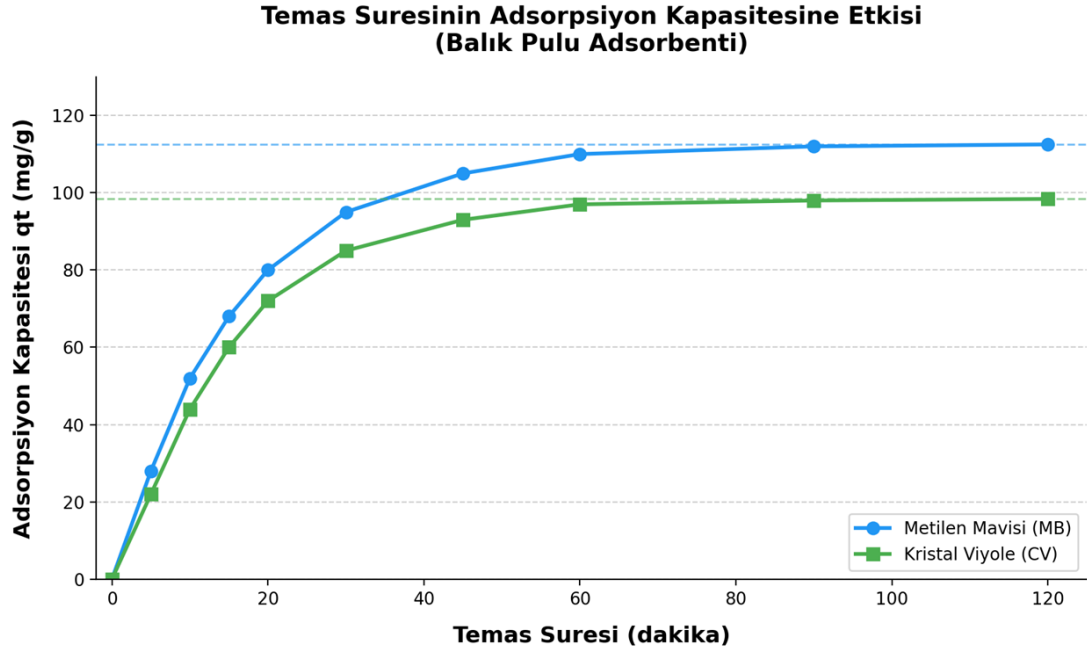
pH Etkisi: Katyonik boyalar (Metilen Mavisi, Kristal Viyole) için optimum pH değeri 7-12 arasında değişmektedir. Anyonik boyalar (Kongo Kırmızısı) için optimum pH değeri 2-6 arasında değişmektedir. Hashem ve vd. (2025), deri işleme atık sularından boya gideriminde optimum pH değerinin 4,8 olduğunu belirlemiştir. Şekil 4.3’de pH’nin boya giderim verimine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.3. pH’nin Boya Giderim Verimine Etkisi (Balık Pulu Biyosorbenti)

Adsorbent Dozu Etkisi: Adsorbent dozu arttıkça boya giderim verimi artmakta, ancak belirli bir dozdan sonra artış yavaşlamaktadır. Hashem ve ark. (2025), 2 g/50 mL dozun maksimum giderim verimi sağladığını belirlemiştir.

Temas Süresi Etkisi: Atmani ve ark. (2026), *Sardina pilchardus* balık pullarından hazırlanan adsorbentin 30 dakika içinde denge adsorpsiyon kapasitesine ulaştığını göstermiştir. Şekil 4.4’te temas süresinin adsorpsiyon kapasitesine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Temas Süresinin Adsorpsiyon Kapasitesine Etkisi (Balık Pulu Biyosorbenti).

4.3. Biyosorpsiyon Kinetikleri

İncelenen çalışmalarda, pseudo-ikinci derece (PSO) model deneysel verilere en iyi uyumu sağlamıştır (Ji, Li vd., 2021) . PSO modelinin $R^2 = 0.94$ değeri ile deneysel verilere iyi uyum gösterdiğini belirlemiştir. Bu bulgu, adsorpsiyonun kimyasal adsorpsiyon (kemisorbsiyon) mekanizması tarafından kontrol edildiğine işaret etmektedir. Çizelge 4.1’de adsorpsiyon kinetik modellerinin parametreleri özetlenmektedir.

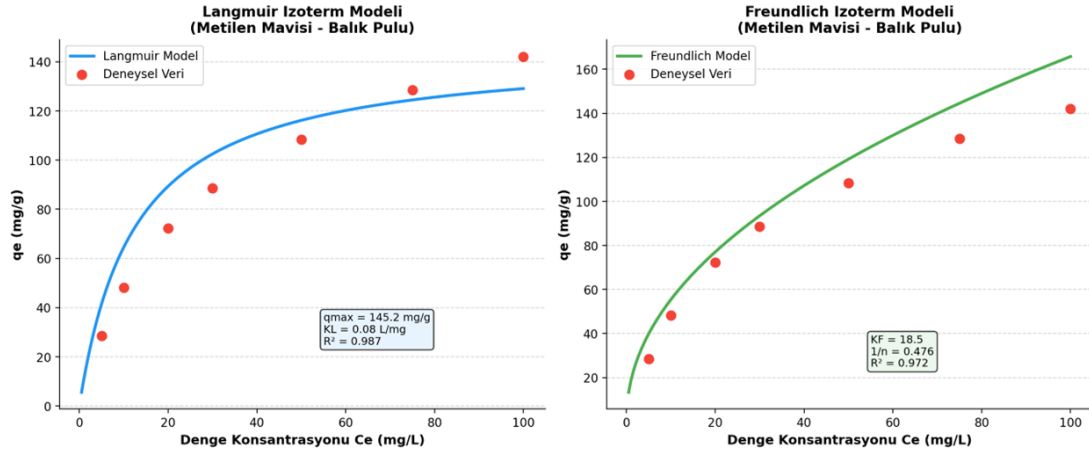
Çizelge 4.1. Adsorpsiyon Kinetik Modelleri ve Parametreleri

Model	Uygulanabilirlik
Pseudo-Birinci Derece (PFO)	Hızlı adsorpsiyon, difüzyon kontrol
Pseudo-İkinci Derece (PSO)	Kimyasal adsorpsiyon, yüzey reaksiyonu
İntrapartikül Difüzyon	Difüzyon kontrol, çok aşamalı adsorpsiyon

4.4. Adsorpsiyon İzotermi

Freundlich modeli, incelenen çalışmaların büyük çoğunluğunda deneysel verilere daha iyi uyum göstermiştir. Bu durum, adsorbentin yüzeyinin heterojenik olduğunu ve

multilayer adsorpsiyonun gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Şekil 4.5'te Langmuir ve Freundlich izoterm eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 4.5. . Langmuir ve Freundlich İzoterm Modelleri (Metilen Mavisi - Balık Pulu Biyosorbenti).

4.5. Endüstriyel Atık Su Uygulamaları ve Rejenerasyon

Tekstil Endüstrisi: Balık pulu adsorbentleri, tekstil atık sularından %70-90 arasında boya giderim verimi sağlamıştır (Chakraborty vd., 2012)

Deri İşleme Endüstrisi: balık pulu biyosorbentinin deri işleme atık sularından %81.8 boya giderim verimi sağladığını belirlemiştir. Adsorbent aynı zamanda BOD (%39.8), COD (%48.1) ve turbidite (%90.1) parametrelerinin azaltılmasında da etkili olmuştur (Onwordi vd., 2019)

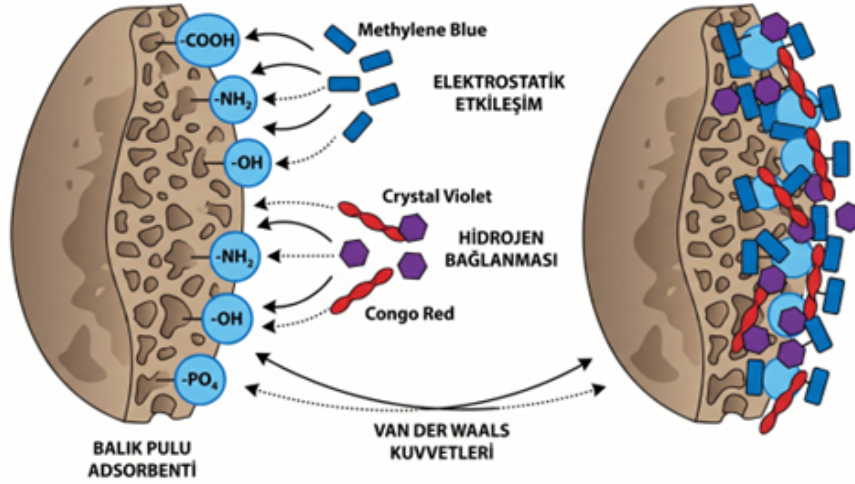
Rejenerasyon: Balık pulu adsorbentinin %72 rejenerasyon verimiyle yeniden kullanılabilir olduğunu göstermiştir (Zayadi & Othman, 2013)

5. TARTIŞMA

5.1. Biyosorpsiyon Mekanizmalarının Yorumlanması

Elde edilen bulgular, balık pulu biyosorbentlerinin boyar madde adsorpsiyonunun bir- den fazla mekanizma aracılığıyla gerçekleştiğine işaret etmektedir. Şekil 5.1’de adsorpsiyon mekanizmasının şematik diyagramı gösterilmektedir.

BOYA MOLEKÜLLERİNİN BALIK PULU YÜZEYİNE ADSORPSİYON MEKANİZMASI



Şekil 5.1. Boya Moleküllerinin Balık Pulu Yüzeyine Adsorpsiyon Mekanizması

PSO kinetik modelinin deneysel verilere daha iyi uyum sağlaması, adsorpsiyonun kimyasal adsorpsiyon mekanizması tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. Bu, adsorbent yüzeyindeki fonksiyonel gruplar ile boyar madde molekülleri arasında güçlü kimyasal etkileşimlerin (elektrostatik çekim, hidrojen bağlanması, kompleks oluşumu) gerçekleştiğine işaret etmektedir. Freundlich modelinin uygunluğu ise adsorbentin heterojen yüzey yapısını ve multilayer adsorpsiyonun varlığını doğrulamaktadır.

pH’nin adsorpsiyon performansı üzerindeki belirleyici etkisi, elektrostatik etkileşimlerin mekanizmadaki merkezi rolünü ortaya koymaktadır. Katyonik boyalar için yüksek pH’da artan giderim verimi, adsorbentin yüzeyinin $pH > pH_{pzc}$ koşullarında negatif yüklü hale gelmesiyle açıklanmaktadır. Bu durum, katyonik boyaların pozitif yüklü gruplarıyla elektrostatik çekim kuvvetlerini güçlendirmektedir. Anyonik boyalar için ise düşük pH’da

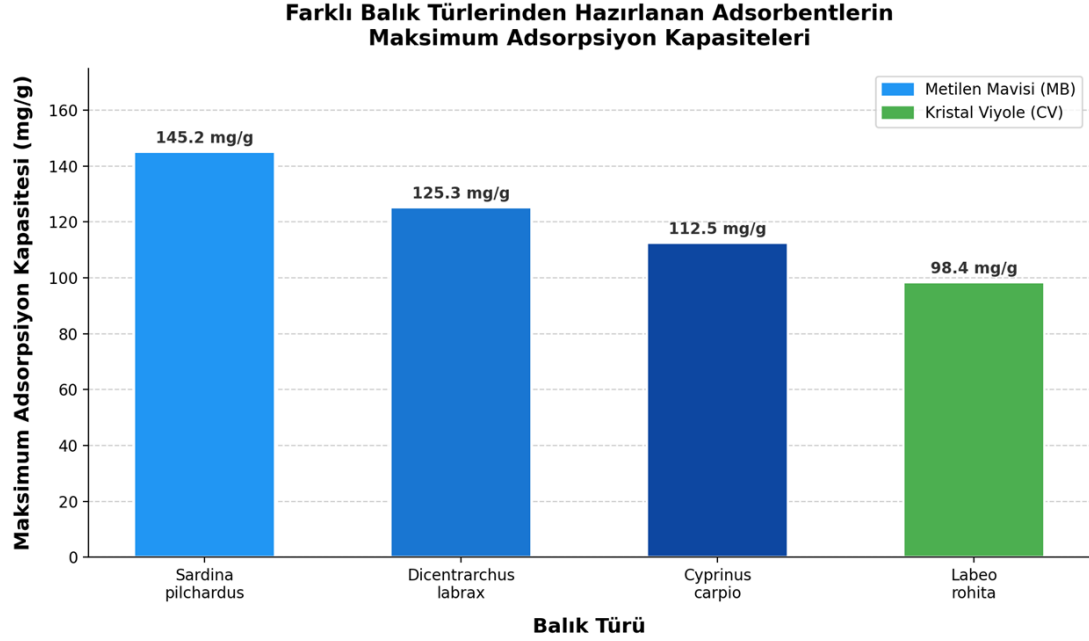
gözlenen yüksek giderim verimi, adsorbentin yüzeyinin pozitif yüklü olduğu koşullarda anyonik boyaların adsorpsiyonunun kolaylaştığını göstermektedir.

PSO kinetik modelinin deneysel verilere daha iyi uyum sağlaması, adsorpsiyonun kimyasal adsorpsiyon mekanizması tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. Bu, adsorbent yüzeyindeki fonksiyonel gruplar ile boyar madde molekülleri arasında güçlü kimyasal etkileşimlerin (elektrostatik çekim, hidrojen bağlanması, kompleks oluşumu) gerçekleştiğine işaret etmektedir. Freundlich modelinin uygunluğu ise adsorbentin heterojen yüzey yapısını ve multilayer adsorpsiyonun varlığını doğrulamaktadır.

pH'nin adsorpsiyon performansı üzerindeki belirleyici etkisi, elektrostatik etkileşimlerin mekanizmadaki merkezi rolünü ortaya koymaktadır. Katyonik boyalar için yüksek pH'da artan giderim verimi, adsorbentin yüzeyinin $pH > p_{Hpzc}$ koşullarında negatif yüklü hale gelmesiyle açıklanmaktadır. Bu durum, katyonik boyaların pozitif yüklü gruplarıyla elektrostatik çekim kuvvetlerini güçlendirmektedir. Anyonik boyalar için ise düşük pH'da gözlenen yüksek giderim verimi, adsorbentin yüzeyinin pozitif yüklü olduğu koşullarda anyonik boyaların adsorpsiyonunun kolaylaştığını göstermektedir.

5.2. Farklı Balık Türlerinin Karşılaştırılması

Şekil 5.2'de farklı balık türlerinden hazırlanan adsorbentlerin maksimum adsorpsiyon kapasiteleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Farklı Balık Türlerinden Hazırlanan Adsorbentlerin Maksimum Adsorpsiyon Kapasiteleri

Çizelge 5.1. Farklı Balık Türlerinden Hazırlanan Adsorbentlerin Performansı

Balık Türü	Boya	q _{max} (mg/g)	pH	T (°C)	Kinetik Model	İzoterm Model
Sardina pilchardus	MB/CR	145.2	7.0	25	PSO	Langmuir-Freundlich
Dicentrarchus labrax	MB	125.3	7.5	25	PSO	Freundlich
Cyprinus carpio	MB	112.5	8.0	25	PSO	Freundlich
Labeo rohita	CV	98.4	12.0	25	PSO	Langmuir

Çizelge 5.1'e göre, *Sardina pilchardus* balık türünden hazırlanan adsorbentin en yüksek adsorpsiyon kapasitesini göstermesi, bu türün yüzey alanı, gözenek yapısı ve yüzey fonksiyonel gruplarının diğer türlere kıyasla daha elverişli olmasıyla açıklanabilmektedir. Tüm türlerde PSO modelinin geçerliliği, kimyasal adsorpsiyon mekanizmasının evrensel niteliğini ortaya koymaktadır.

5.3. Ticari Adsorbentlerle Karşılaştırma

Balık pulu adsorbentleri, ticari adsorbentlerle benzer veya daha iyi adsorpsiyon performansı göstermektedir. Aktivize karbonun maliyeti yaklaşık 1.000-2.000 USD/ton iken, balık pulu adsorbentinin maliyeti 100-300 USD/ton civarındadır (Shaikhiev vd., 2020). Bu maliyet avantajı, özellikle büyük ölçekli uygulamalarda belirgin hale gelmektedir.

Biyodegradabilirlik ve yeniden kullanılabilirlik özellikleri göz önüne alındığında, balık pulu adsorbentleri endüstriyel atık su arıtımında sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır.

5.4. Araştırma Boşlukları ve Sınırlamalar

Literatür incelemesi, bazı önemli araştırma boşluklarının varlığına işaret etmektedir. Gerçek endüstriyel atık sularla yapılan çalışmalar, model çözeltilerle yapılan çalışmalara kıyasla oldukça sınırlı kalmaktadır. Pilot ölçek ve endüstriyel ölçek çalışmaları da yetersiz kalmakta; ölçek büyütme sürecindeki teknik ve ekonomik zorluklar yeterince ele alınmamaktadır. Balık türleri arasındaki sistematik karşılaştırma çalışmaları da yetersiz kalmaktadır; standart bir test protokolünün geliştirilmesi bu alandaki araştırmaların daha sistematik ilerlemesine katkı sağlayacaktır.

6. SONUÇLAR

Bu kapsamlı derleme çalışması, atık balık pullarının boyar madde gideriminde biyosorbent olarak kullanılmasının güncel durumunu, mekanizmalarını ve endüstriyel uygulanabilirliğini sistematik biçimde ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Balık pulu biyosorbentleri, tekstil, deri ve kağıt endüstrileri atık sularından %70-90 arasında boya giderim verimi sağlamaktadır. Bu performans, geleneksel yöntemlerle karşılaştırılabilir veya daha üstün düzeydedir.

Adsorpsiyon kinetikleri, pseudo-ikinci derece (PSO) model tarafından kontrol edilmektedir; bu durum kimyasal adsorpsiyonun baskın mekanizma olduğuna işaret etmektedir. Adsorpsiyon izotermi, Freundlich modeli tarafından iyi tanımlanmakta; bu da adsorbentin heterojen yüzey yapısını doğrulamaktadır.

Termodinamik çalışmalar, adsorpsiyonun spontan ($\Delta G < 0$) ve ekzotermik ($\Delta H < 0$) bir proses olduğunu ortaya koymaktadır. *Sardina pilchardus* balık türünden hazırlanan adsorbent, 145,2 mg/g ile en yüksek adsorpsiyon kapasitesini sergilemiştir.

Balık pulu adsorbentleri, ticari adsorbentlere kıyasla önemli maliyet avantajı (100-300 USD/ton) sunmakta, biyodegradabilir olmakta ve yeniden kullanılabilir. Bu özellikler, balık pulu adsorbentlerini endüstriyel atık su arıtımında sürdürülebilir bir çözüm haline getirmektedir.

Atık balık pullarının biyosorbent olarak değerlendirilmesi, SDG 6, 12 ve 14 hedefleriyle uyumlu olup döngüsel ekonomi ilkelerine katkı sağlamaktadır.

7. ÖNERİLER

Elde edilen bulgular ve belirlenen araştırma boşlukları ışığında, gelecekteki çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

Modifikasyon Yöntemlerinin Geliştirilmesi: Nanopartikül kaplaması, manyetik modifikasyon ve biyopolimer kaplaması gibi ileri modifikasyon yöntemlerinin adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkileri sistematik biçimde araştırılmalıdır. Özellikle manyetik nanopartikül kaplaması, adsorbentin kolayca geri kazanılmasını sağlayarak endüstriyel uygulanabilirliği artırabilmektedir.

Çok Kirlenici Giderimi: Gerçek atık sular birden fazla kirlenici içerdiğinden, balık pulu adsorbentlerinin boyar maddeler, ağır metaller ve antibiyotikler gibi farklı kirlenicileri eş zamanlı giderme kapasitesi araştırılmalıdır.

Sürekli Kolon Sistemleri: Batch sistemlerin endüstriyel ölçeğe taşınabilmesi için sürekli kolon sistemleri tasarlanmalı ve pilot ölçekte test edilmelidir. Thomas ve Bohart-Adams gibi kolon modellerinin uygulanması, ölçek büyütme çalışmalarına önemli katkı sağlayacaktır.

Gerçek Endüstriyel Atık Sularla Çalışmalar: Laboratuvar koşullarında elde edilen optimum koşulların gerçek endüstriyel atık sulara uygulanması ve adsorbentin gerçek koşullardaki performansının değerlendirilmesi gerekmektedir.

Atık Adsorbentin Geri Kazanımı: Kullanılmış balık pulu adsorbentinin yakıt, gübre veya diğer ürünlere dönüştürülmesi araştırılmalıdır. Bu yaklaşım, atık yönetiminde döngüsel ekonomi ilkelerine uygun sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

Standart Test Protokolü: Farklı balık türlerinin adsorpsiyon performansının doğrudan karşılaştırılabilmesi için standart bir test protokolü geliştirilmeli; böylece alandaki araştırmalar daha sistematik bir zemine oturtulmalıdır.

Ekonomik ve Yaşam Döngüsü Analizi: Balık pulu adsorbentlerinin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini değerlendirmek için kapsamlı maliyet-fayda analizi ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) çalışmaları yürütülmelidir.

Elde edilen bulgular ve belirlenen araştırma boşlukları ışığında, gelecekteki çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

Modifikasyon Yöntemlerinin Geliştirilmesi: Nanopartikül kaplaması, manyetik modifikasyon ve biyopolimer kaplaması gibi ileri modifikasyon yöntemlerinin adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkileri sistematik biçimde araştırılmalıdır. Özellikle manyetik nanopartikül kaplaması, adsorbentin kolayca geri kazanılmasını sağlayarak endüstriyel uygulanabilirliği artırabilmektedir.

Çok Kirletici Giderimi: Gerçek atık sular birden fazla kirletici içerdiğinden, balık pulu adsorbentlerinin boyar maddeler, ağır metaller ve antibiyotikler gibi farklı kirleticileri eş zamanlı giderme kapasitesi araştırılmalıdır.

Sürekli Kolon Sistemleri: Batch sistemlerin endüstriyel ölçeğe taşınabilmesi için sürekli kolon sistemleri tasarlanmalı ve pilot ölçekte test edilmelidir. Thomas ve Bohart-Adams gibi kolon modellerinin uygulanması, ölçek büyütme çalışmalarına önemli katkı sağlayacaktır.

Gerçek Endüstriyel Atık Sularla Çalışmalar: Laboratuvar koşullarında elde edilen optimum koşulların gerçek endüstriyel atık sulara uygulanması ve adsorbentin gerçek koşullardaki performansının değerlendirilmesi gerekmektedir.

Atık Adsorbentin Geri Kazanımı: Kullanılmış balık pulu adsorbentinin yakıt, gübre veya diğer ürünlere dönüştürülmesi araştırılmalıdır. Bu yaklaşım, atık yönetiminde döngüsel ekonomi ilkelerine uygun sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

Standart Test Protokolü: Farklı balık türlerinin adsorpsiyon performansının doğrudan karşılaştırılabilmesi için standart bir test protokolü geliştirilmeli; böylece alandaki araştırmalar daha sistematik bir zemine oturtulmalıdır.

Ekonomik ve Yaşam Döngüsü Analizi: Balık pulu adsorbentlerinin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini değerlendirmek için kapsamlı maliyet-fayda analizi ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) çalışmaları yürütülmelidir.

KAYNAKLAR

- Al-Asadi, S. T., Mussa, Z. H., Al-Qaim, F. F., Kamyab, H., Al-Saedi, H. F. S., Deyab, I. F., & Kadhim, N. J. (2025). A comprehensive review of methylene blue dye adsorption on activated carbon from edible fruit seeds: A case study on kinetics and adsorption models. *Carbon Trends*, 20, 100507.
- Bahri, M. A., Calvo, L., Gilarranz, M. A., & Rodríguez, J. J. (2012). Activated carbon from grape seeds upon chemical activation with phosphoric acid: Application to the adsorption of diuron from water. *Chemical Engineering Journal*, 203, 348–356.
- Banerjee, S., Sharma, Y. C., vd. (2013). Equilibrium and kinetic studies for removal of malachite green from aqueous solution by a low cost activated carbon. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(4), 1099–1105.
- Bonyadi, Z., Nasoudari, E., Ameri, M., Ghavami, V., Shams, M., & Sillanpää, M. (2022). Biosorption of malachite green dye over *Spirulina platensis* mass: process modeling, factors optimization, kinetic, and isotherm studies. *Applied Water Science*, 12(7), 167.
- Chakraborty, S., Chowdhury, S., & Saha, P. D. (2012). Fish (*Labeo rohita*) scales as a new biosorbent for removal of textile dyes from aqueous solutions. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2(3), 175–184.
- Dutta, S., Gupta, B., Srivastava, S. K., & Gupta, A. K. (2021). Recent advances on the removal of dyes from wastewater using various adsorbents: A critical review. *Materials Advances*, 2(14), 4497–4531.
- Freundlich, H. M. F., vd. (1906). Over the adsorption in solution. *J. Phys. chem*, 57(385471), 1100–1107.
- Grema, H. A., Kwaga, J. K. P., Bello, M., & Umaru, O. H. (2020). Understanding fish production and marketing systems in North-western Nigeria and identification of potential food safety risks using value chain framework. *Preventive Veterinary Medicine*, 181, 105038.
- Gupta, S. A., Vishesh, Y., Sarvshrestha, N., Bhardwaj, A. S., Prince A Kumar, Topare, N. S., Raut-Jadhav, S., Bokil, S. A., & Khan, A. (2022). Adsorption isotherm studies of Methylene blue using activated carbon of waste fruit peel as an adsorbent. *Materials Today: Proceedings*, 57, 1500–1508.
- Han, B., Butterly, C., Zhang, W., He, J.-z., & Chen, D. (2021). Adsorbent materials for ammonium and ammonia removal: A review. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124611.
- Hashem, M. A., Ahammad, F., Das, B. C., Enan, E. T., Maoya, M., Khan, M. J. H., & Miem, M. M. (2025). Dye adsorption on fish scale biosorbent from tannery wastewater. *Next Sustainability*, 6, 100112.
- Hijab, M., Parthasarathy, P., Mackey, H. R., Al-Ansari, T., & McKay, G. (2021). Minimizing adsorbent requirements using multi-stage batch adsorption for malachite green

- removal using microwave date-stone activated carbons. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 167, 108318.
- Huang, Z., Shao, H., Huang, B., Li, C., Huang, Y., & Chen, X. (2014). High-performance fish-scale-based porous carbon for the removal of methylene blue from aqueous solution. *RSC advances*, 4(36), 18737–18743.
- Jaafar, A., Darchen, A., Hamzi, S. E., Lakbaibi, Z., Driouich, A., Boussaoud, A., Yaacoubi, A., Makhfouk, M. E., & Hachkar, M. (2021). Optimization of cadmium ions biosorption by fish scale from aqueous solutions using factorial design analysis and Monte Carlo simulation studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104727.
- Ji, Q., Li, H., vd. (2021). Preparation and characterization of bio-based activated carbon from fish scales. *BioResources*, 16(1), 614.
- Jia, Z., Zeng, W., Xu, H., Li, S., & Peng, Y. (2020). Adsorption removal and reuse of phosphate from wastewater using a novel adsorbent of lanthanum-modified platanus biochar. *Process Safety and Environmental Protection*, 140, 221–232.
- Kumaravel, S., Geetha, M., Niyitanga, T., Kumar, D. S., Al-Ansari, M. M., Mythili, R., Suganthi, S., Gunganathan, L., Murugan, A., & Ragupathy, S. (2024). Preparation and characterization of activated carbon from corn cob by chemical activation and their adsorption of brilliant green dye from wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, 188, 1338–1345.
- Lopes, C., Antelo, L. T., Franco-Uría, A., Alonso, A. A., & Pérez-Martín, R. (2015). Valorisation of fish by-products against waste management treatments—Comparison of environmental impacts. *Waste management*, 46, 103–112.
- Luna, M. D. G. D., Flores, E. D., Genuino, D. A. D., Futralan, C. M., & Wan, M.-W. (2013). Adsorption of Eriochrome Black T (EBT) dye using activated carbon prepared from waste rice hulls—Optimization, isotherm and kinetic studies. *Journal of the Taiwan institute of chemical engineers*, 44(4), 646–653.
- Madela, M., & Skuza, M. (2021). Towards a circular economy: Analysis of the use of biowaste as biosorbent for the removal of heavy metals. *Energies*, 14(17), 5427.
- Manjudevi, M., Kamaraj, M., Aravind, J., & Wong, L. S. (2024). Application of the circular economy to fish scale waste. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 8, 100170.
- Marrakchi, F., Auta, M., Khanday, W., & Hameed, B. (2017). High-surface-area and nitrogen-rich mesoporous carbon material from fishery waste for effective adsorption of methylene blue. *Powder Technology*, 321, 428–434.
- Mia, R., Selim, M., Shamim, A., Chowdhury, M., Sultana, S., Armin, M., Hossain, M., Akter, R., Dey, S., Naznin, H., vd. (2019). Review on various types of pollution problem in textile dyeing & printing industries of Bangladesh and recommendation for mitigation. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 5(4), 220–226.

- Misran, E., Bani, O., Situmeang, E. M., & Purba, A. S. (2022). Banana stem based activated carbon as a low-cost adsorbent for methylene blue removal: Isotherm, kinetics, and reusability. *Alexandria Engineering Journal*, 61(3), 1946–1955.
- Mussa, Z. H., Imran, A. F., Al-Ameer, L. R., Al-Saedi, H. F. S., Deyab, I. F., A-Qaim, F. F., & Kamyab, H. (2025). Utilizing pomegranate peel biochar for effective malachite green adsorption. *Results in Surfaces and Interfaces*, 100618.
- Muthukumar, T., Prabu, P., Ghosh, K., & Sastry, T. P. (2014). Fish scale collagen sponge incorporated with *Macrotyloma uniflorum* plant extract as a possible wound/burn dressing material. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 113, 207–212.
- Neves, C., Scheufele, F., Nardino, A., Vieira, M., Silva, M. D., Módenes, A., & Borba, C. (2018). Phenomenological modeling of reactive dye adsorption onto fish scales surface in the presence of electrolyte and surfactant mixtures. *Environmental technology*, 39(19), 2467–2483.
- Onwordi, C. T., Uche, C. C., Ameh, A. E., & Petrik, L. F. (2019). Comparative study of the adsorption capacity of lead (II) ions onto bean husk and fish scale from aqueous solution. *Journal of water reuse and desalination*, 9(3), 249–262.
- Padrão, J., Machado, R., Casal, M., Lanceros-Méndez, S., Rodrigues, L. R., Dourado, F., & Sencadas, V. (2015). Antibacterial performance of bovine lactoferrin-fish gelatine electrospun membranes. *International journal of biological macromolecules*, 81, 608–614.
- Parate, V. R., & Talib, M. I. (2014). Study of metal adsorbent prepared from tur dal (Cajanuscajan) husk: A value addition to agrowaste. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(9), 43–54.
- Qin, D., Bi, S., You, X., Wang, M., Cong, X., Yuan, C., Yu, M., Cheng, X., & Chen, X.-G. (2022). Development and application of fish scale wastes as versatile natural biomaterials. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131102.
- Quansah, J. O., Hlaing, T., Lyonga, F. N., Kyi, P. P., Hong, S.-H., Lee, C.-G., & Park, S.-J. (2020). Nascent rice husk as an adsorbent for removing cationic dyes from textile wastewater. *Applied Sciences*, 10(10), 3437.
- Raninga, M., Mudgal, A., Patel, V. K., Patel, J., & Sinha, M. K. (2023). Modification of activated carbon-based adsorbent for removal of industrial dyes and heavy metals: A review. *Materials Today: Proceedings*, 77, 286–294.
- Ribeiro, C., Scheufele, F. B., Espinoza-Quinones, F. R., Módenes, A. N., Silva, M. G. C. d., Vieira, M. G. A., & Borba, C. E. (2015). Characterization of *Oreochromis niloticus* fish scales and assessment of their potential on the adsorption of reactive blue 5G dye. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 482, 693–701.

- Shetty, D. N., Lobo, V. A., Rani, S., & Raghavendra, N. (2024). Tectona Grandis seed powder and Mangifera Indica leaf powder as bio adsorbents for removal of methylene blue from aqueous solution. *Hybrid Advances*, 7, 100316.
- Shourije, S. M. J. S., Dehghan, P., Bahrololoom, M. E., Cobley, A. J., Vitry, V., Azar, G. T. P., Kamyab, H., & Mesbah, M. (2023). Using fish scales as a new biosorbent for adsorption of nickel and copper ions from wastewater and investigating the effects of electric and magnetic fields on the adsorption process. *Chemosphere*, 317, 137829.
- Sudarni, D. H. A., Aigbe, U. O., Ukhurebor, K. E., Onyancha, R. B., Kusuma, H. S., Darmokoesoemo, H., Osibote, O. A., Vincent Aizebeoje Balogun & Widyaningrum, B. A. (2021). Malachite green removal by activated potassium hydroxide clove leaf agrowaste biosorbent: characterization, kinetic, isotherm, and thermodynamic studies. *Adsorption Science & Technology*, 2021, 1145312.
- Suthakaran, V., Thomas, R., Guirard, M., Meeroff, D., & Lashaki, M. J. (2025). Developing activated carbon adsorbent materials using cyanobacterial biomass as precursor to remove phosphate from surface waters. *Algal Research*, 86, 103901.
- Temkin, M. J., Pyzhev, V., vd. (1940). Recent modifications to Langmuir isotherms.
- Tural, B., Ertaş, E., Enez, B., Sema Ağüloğlu Fincan & Tural, S. (2017). Preparation and characterization of a novel magnetic biosorbent functionalized with biomass of Bacillus Subtilis: Kinetic and isotherm studies of biosorption processes in the removal of Methylene Blue. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 4795–4802.
- Uzunoglu, D., & Özer, A. (2016). Adsorption of Acid Blue 121 dye on fish (Dicentrarchus labrax) scales, the extracted from fish scales and commercial hydroxyapatite: equilibrium, kinetic, thermodynamic, and characterization studies. *Desalination and Water Treatment*, 57(30), 14109–14131.
- Valencia, A., Muñoz-Valencia, R., Ceballos-Magaña, S. G., Rojas-Mayorga, C. K., Bonilla-Petriciolet, A., González, J., & Aguayo-Villarreal, I. A. (2022). Cyclohexane and benzene separation by fixed-bed adsorption on activated carbons prepared from coconut shell. *Environmental Technology & Innovation*, 25, 102076.
- Yağmur, H. K., & Kaya, İ. (2021). Synthesis and characterization of magnetic ZnCl₂-activated carbon produced from coconut shell for the adsorption of methylene blue. *Journal of molecular structure*, 1232, 130071.
- Yıldız, H., & Yüksel, A. Y. (2023). NOVEL ADSORBENT FOR METHYLENE BLUE FROM WASTE FISH SCALES (Cyprinus carpio): KINETICS AND EQUILIBRIUM STUDIES. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 22(6).

- Yildiz, H. (2024). The production of a novel adsorbent from forest waste (*Platanus orientalis* L.) for dye adsorption: Adsorption process optimization and experimental design. *Materials Science and Engineering: B*, 304, 117366.
- Yildiz, H., Gülşen, H., Şahin, Ö., Baytar, O., & Kutluay, S. (2024). Novel adsorbent for malachite green from okra stalks waste: synthesis, kinetics and equilibrium studies. *International Journal of Phytoremediation*, 26(3), 369–381.
- Yildiz, H., & Yüksel, A. Y. (2025). A novel biosorbent material from waste fish scales (*Cyprinus carpio*) for biosorption of toxic dyes in aquatic environments. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(1), 1535–1548.
- Yu, F., Wang, M., Huang, B., Peng, Q., & Huang, Y. (2017). Acid-treatment effect on the N-doped porous carbon obtained from fish scales for Cr (VI) removal. *Chemical Papers*, 71(11), 2261–2269.
- Zayadi, N., & Othman, N. (2013). Characterization and optimization of heavy metals biosorption by fish scales. *Advanced Materials Research*, 795, 260–265.
- Zhang, J., Akyol, Ç., & Meers, E. (2023). Nutrient recovery and recycling from fishery waste and by-products. *Journal of Environmental Management*, 348, 119266.
- Zhou, Y., Lu, J., Zhou, Y., & Liu, Y. (2019). Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: a review. *Environmental pollution*, 252, 352–365.