



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BİYOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

BİYOTEKNOLOJİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**REAKTİF RED 195 BOYARMADDESİNİN ÇEVRE-DOSTU BİYOSORBENTLE
GİDERİMİ: KARAKTERİZASYONU, BİYOSORPSİYON PERFORMANSI VE
MEKANİZMALARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖZNUR ŞİMŞEK

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. ZERRİN PAT

BİLECİK, 2026

10836256

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİYOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI
BİYOTEKNOLOJİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**REAKTİF RED 195 BOYARMADDESİNİN ÇEVRE-DOSTU BİYOSORBENTLE
GİDERİMİ: KARAKTERİZASYONU, BİYOSORPSİYON PERFORMANSI VE
MEKANİZMALARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖZNUR ŞİMŞEK

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. ZERRİN PAT

BİLECİK, 2026
10836256

BEYAN

Reaktif Red 195 Boyarmaddesinin Çevre-Dostu Biyosorbentle Giderimi: Karakterizasyonu, Biyosorpsiyon Performansı ve Mekanizmalarının İncelenmesi başlıklı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine uygun olarak tez çalışmamı hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öznur ŞİMŞEK

.../.../2026

İmza:

	YAPAY ZEKÂ KULLANIMINA İLİŞKİN ÖĞRENCİ BEYAN FORMU	BŞEÜ-KAYSİS Belge	DFR-516
		İlk Yayın Tarihi/Sayısı	30.04.2026/16
		Revizyon Tarihi	00
		Revizyon No.su	00
		Toplam Sayfa	1

Bölüm I. Yapay Zekâ Kullanım Durumu
☒ Bu tezin/projenin yazım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı araçlardan faýdalandım .
☐ Bu tezin/projenin yazım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı herhangi bir araçtan faýdalanmadım .

Bölüm II. Yapay Zekâ Kullanım Detayları
<i>*Bu bölüm yalnızca yapay zekâ kullanımı beyan edilmiş ise doldurulacaktır. Aksi durumda boş bırakılmalıdır.</i>
Tezinizde/projenizde kullandığınız <u>yapay zekâ araçlarını</u> ve <u>sürümünü</u> listeleyiniz:
Gemini (Google) 3.0 Pro modeli ve ChatGPT (OpenAI) GPT-5.5 modeli kullanılmıştır.
Yapay zekâ araçlarını tezin/projemin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir):
☐ Cümle oluşturma ☐ Literatür tarama ☒ Çeviri ☒ Düzenleme/dil kontrolü ☐ Veri işleme ve analizi ☐ Veri görselleştirme ☒ Görüntü üretme ☐ Kaynakça düzenleme ☐ Diğer (Belirtiniz):.....
Bu çalışmada yapay zekâ kullanımı Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup yapay zekâ araçlarından alınan destek, etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir. Yapay zekâ kullanımı, çalışmanın özgünlüğüne, bilimsel etik kurallarına ve ilgili mevzuata aykırı olmayacak biçimde gerçekleştirilmiştir. Usulsüz yapay zekâ kullanımı (örneğin: kaynak göstermeksizin metin üretimi, otomatik içerik üretiminin özgün eser gibi sunulması, yanıltıcı kaynak gösterimi vb.) tarafımdan kesinlikle yapılmamıştır. Yapay zekâ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

Öznur ŞİMŞEK

.../.../2026

İmza:

ÖN SÖZ

Bu uzun ve yoğun akademik süreç boyunca karşılaşılan tüm zorluklara rağmen hedeflerimden vazgeçmeden, sabır, azim ve kararlılıkla çalışmayı sürdürdüğüm için öncelikle kendime teşekkür etmek isterim. Eğitim hayatım boyunca kendime duyduğum güven, anlayış ve destek, karşılaştığım güçlükleri aşmamda en büyük motivasyon kaynağım olmuştur. Zaman zaman yorucu ve zorlayıcı geçen bu süreçte pes etmeden ilerleyebilmek; disiplin, emek ve sorumluluk bilinciyle çalışmayı sürdürebilmek benim için önemli bir kişisel kazanım olmuştur. Bu tez çalışmasının tamamlanması, yalnızca akademik bir başarı değil; aynı zamanda kararlılığın ve emeğin somut bir sonucu niteliğindedir.

Lisansüstü eğitim sürecim boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, akademik bakış açımı geliştirmeme katkı sağlayan ve bu tez çalışmasının her aşamasında desteklerini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Zerrin PAT' a en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam süresince göstermiş olduğu sabır, anlayış ve bilimsel rehberlik, bu tezin şekillenmesinde büyük önem taşımıştır.

Bu yoğun ve uzun süreç boyunca desteğini, anlayışını ve sabrını her zaman yanımda hissettiğim eşim Prof. Dr. Veli ŞİMŞEK' e ayrıca teşekkür etmek isterim. Motivasyonu, güveni ve manevi desteği, karşılaştığım zorlukları aşmamda benim için büyük bir güç kaynağı olmuştur. Paylaşılan bilgi, dayanışma ve karşılıklı destek, bu sürecin daha verimli ve anlamlı ilerlemesine katkı sağlamıştır. Aileme de teşekkür ederim.

Tez çalışmamın değerlendirilmesinde katkı sunan değerli jüri üyelerine; görüş, öneri ve eleştirileriyle çalışmama katkıda bulunan tüm akademisyenlere teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca bilgi birikimlerinden faydalandığım, akademik gelişimime katkı sağlayan tüm hocalarıma üzerimdeki emeği benim için son derece kıymetlidir.

Ayrıca bu uzun ve yoğun süreç boyunca sabır, emek ve kararlılıkla çalışarak akademik hedeflerime ulaşma yolunda gösterdiğim çabanın, kişisel ve bilimsel gelişimime önemli katkılar sağladığını ifade etmek isterim. Bu tez çalışması, yalnızca akademik bir araştırma süreci değil; aynı zamanda disiplin, azim ve sorumluluk bilincinin geliştiği değerli bir deneyim olmuştur.

Modern ve çağdaş Türk toplumunun oluşmasında en büyük paya sahip olan ve bu çağdaş yaşama katkı sağlayacak bir birey olarak yetişmem için zemin hazırlayan, sonsuz gurur duyduğum Ulu Önder Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK'e ve atalarımın şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında doğrudan ya da dolaylı katkısı bulunan herkese teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Gerçekleştirilen bu tezin temel hedefi, tekstil üretiminde ticari olarak kullanılan Reaktif Red 195 (RR195) boyar maddesinin su ekosistemine deşarj edilmeden, atık su içerisindeki değeri uygun düzeyde tutulması, doğal yaşamın sürdürülebilirliğini korumak için biyosorpsiyon yöntemiyle giderilmesidir.

Bu çalışma kapsamında ilk olarak farklı biyosorbentler (alıç, hindistan cevizi, greyfurt ve şeftali) ve yapay silika kaynaklı adsorbent SBA-15, RR195 boyar maddesinin sulu çözeltilerden giderimi için test edilmiştir (biyosorbent-adsorban olarak kullanılabilirlikleri). Elde edilen sonuçlara göre *Crataegus* (*Crataegus species* (hawthorn; alıç, meyve ve çekirdek karışımı)) biyosorbentinin sulu çözeltilerden RR195 boyarmaddesini etkili bir şekilde giderdiği gözlenmiştir. En iyi verim elde edilen biyosorbent örneği belirledikten sonra belirtilen biyosorbente ait optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla biyosorpsiyona etki eden en önemli parametreler olan pH, biyokütle miktarı, tanecik boyutu, temas süresi ve başlangıç boyarmadde konsantrasyonunun etkileri araştırılmıştır. Temas süresi ve başlangıç boyarmadde konsantrasyonu etkileri sıcaklığa bağlı olarak test edilmiştir (25, 35 ve 45°C'lerde). Optimizasyon işleminin ardından biyosorbent ve boyar madde arasındaki biyosorpsiyon etkileşiminin (mekanizmasının) daha iyi anlaşılması için elde edilen verilerin bazı izoterm (Langmuir, Freundlich, Temkin ve Dubinin-Radushkevich (D-R) ve kinetik modellere (yalancı birinci derece, yalancı ikinci derece ve partikül içi difüzyon) uygunlukları araştırılarak biyosorpsiyona ait termodinamik (Serbest enerji (ΔG°), Entalpi (ΔH°) ve Entropi (ΔS°)) hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen deneysel verilerin oda sıcaklığında Langmuir izoterm modeline uygun olduğu görülmüştür. Adsorpsiyonun, kinetik ve termodinamik hesaplamaları incelendiğinde ise biyosorpsiyonun yalancı ikinci dereceden kinetik modeli uygun olmasının yanında reaksiyonun istemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Biyosorbentin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için kullanılan biyosorbentin biyosorpsiyon öncesi XRD (faz yapılarının belirlenmesi), FT-IR (fonksiyonel grupların belirlenmesi), SEM/EDX (yüzey morfolojisi), zeta potansiyeli (yüzey yükü) ve sonrası SEM/EDX, MAPPING (haritalanma) ve FT-IR analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak kullanılan *Crataegus* biyosorbentinin herhangi bir kimyasal işleme ihtiyaç duymadan sadece doğal koşullarda kurutma ve öğütme yöntemleri ile kolaylıkla hazırlanabilmesi, 20 dakika gibi kısa sürede %90'ının üzerinde giderim sağlaması (boyar madde ve simüle edilmiş sentetik atık su örneklerinde) açısından RR195 boyar maddesinin gideriminde ekonomik ve çevre dostu bir biyosorbent olarak kullanılabilir olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Reaktif Red 195, *Crataegus*, Biyosorpsiyon, Boyar madde, Atık su

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to remove Reactive Red 195 (RR195) dye, commercially used in textile production, from wastewater using biosorption methods, without discharging it into the aquatic ecosystem, thus maintaining its value at an appropriate level and protecting the sustainability of natural life.

In this study, different biosorbents (hawthorn, coconut, grapefruit and peach) and the artificial silica-based adsorbent SBA-15 were first tested for the removal of RR195 dye from aqueous solutions (their usability as biosorbent-adsorbent). According to the results obtained, the *Crataegus* biosorbent (*Crataegus* species (hawthorn; a mixture of hawthorn, fruit, and seeds)) effectively removed RR195 dye from aqueous solutions. After determining the biosorbent sample that yielded the best results, optimization studies were carried out for this biosorbent. For this purpose, the effects of pH, biomass amount, particle size, contact time, and initial dyestuff concentration, which are the most important parameters affecting biosorption, were investigated. The effects of contact time and initial dye concentration were tested as a function of temperature (at 25, 35, and 45°C).

Following the optimization process, the suitability of the obtained data to some isotherm (Langmuir, Freundlich, Temkin, and Dubinin-Radushkevich (D-R)) and kinetic models (pseudo-first-order, pseudo-second order, and intraparticle diffusion) was investigated to better understand the biosorption interaction (mechanism) between the biosorbent and the dyestuff. Thermodynamic calculations (Free energy (ΔG°), Enthalpy (ΔH°), and Entropy (ΔS°)) of biosorption were then performed. The experimental data were found to conform to the Langmuir isotherm model at room temperature. When the kinetic and thermodynamic calculations of adsorption were examined, it was concluded that the pseudo-second-order kinetic model of biosorption was suitable and that the reaction was spontaneous.

To better understand the physical and chemical properties of the biosorbent, pre-biosorption XRD (phase structure determination), FT-IR (functional group determination), zeta potential (surface charge), SEM/EDX (surface morphology), and after-biosorption SEM/EDX, MAPPING, and FT-IR analyses were performed. As a result, it is thought that the *Crataegus* biosorbent used can be used as an economical and environmentally friendly biosorbent in the removal of RR195 dye, considering that it can be easily prepared by drying and grinding methods under natural conditions without the need for any chemical processing, and that it provides over 90% removal in a short time such as 20 minutes (in dye and simulated synthetic wastewater samples).

Keywords: Reactive Red 195, *Crataegus*, Biosorption, Dyestuff, Wastewater

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	5
3. KAVRAMSAL BİLGİLER.....	12
3.1. Sürdürülebilirlik.....	12
3.2. Ekosistem.....	13
3.2.1. Su Ekosistemi.....	13
3.2.2. Atık Su.....	14
3.2.3. Atık Su Giderim Yöntemleri.....	15
3.2.3.1. Biyosorpsiyon ve Biyosorbent.....	17
3.2.3.2. Adsorpsiyon.....	19
3.3. Boyar Madde.....	23
3.3.1. Tekstil Boyar Maddeleri.....	24
3.3.1.1. Reaktif Boyar Maddeler.....	26
3.3.2. Tekstil Endüstrisi Atık Suları.....	28
3.3.3. Adsorban Maddeler.....	29
3.4. Adsorpsiyon İzoterm, Kinetiği ve Termodinamik Çalışmaları.....	30
3.4.1. Adsorpsiyon İzotermi.....	30
3.4.2. Adsorpsiyon Kinetiği.....	33
3.4.3. Adsorpsiyon Termodinamiği.....	34
3.5. Karakterizasyon Çalışmaları.....	34
3.5.1. Taramalı Elektron Mikroskobu/Enerji Dağılım Spektroskopisi Analizi (SEM/EDX).....	35
3.5.2. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi Analizi (FT-IR).....	35
3.5.3. X Işını Difraktometre Analizi (XRD).....	36
3.5.4. Zeta Potansiyometre.....	36
3.5.5. Ultraviyole Görünür Bölge Spektroskopisi (UV/VIS Spektroskopisi).....	37
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
4.1. Biyokütle ve Biyosorbentlerin Hazırlanması.....	39
4.2. RR195 Boyar Madde Kimyasalına Ait Stok Çözeltilisinin Hazırlanması.....	39

4.3. Farklı Boyutlarda <i>Crataegus</i> Biyokütle Örneklerinin Hazırlanması.....	39
4.4. Bisorpsiyeon Çalışmaları (Deneyleri).....	40
4.5. Karakterizasyon Çalışmaları.....	41
4.6. Simüle Edilmiş Atık Suda Biyosorbentin Test Edilmesi.....	43
5. ANALİZ VE SONUÇLAR.....	44
5.1. Karakterizasyon Çalışmaları.....	44
5.1.1. Zeta Potansiyometre Analizleri.....	44
5.1.2. XRD Analizleri.....	44
5.1.3. FT-IR Analizler.....	45
5.1.4. SEM/EDX Analizleri.....	47
5.2. Adsorpsiyeon Deneyleri.....	51
5.2.1. Optimizasyon.....	51
5.2.2. pH Deneyleri.....	52
5.2.3. Biyosorbent Tanecik Boyutunun (Mesh) Boyar Madde (Reaktif Red 195) Giderimine Etkisi.....	54
5.2.4. Biyosorbent Miktarı Deneyleri.....	56
5.2.5. Temas Süresinin Etkisi.....	57
5.2.6. Derişim Deneyleri.....	59
5.2.7. Biyosorbentin Ticari Bir Aktif Karbon Örneği ile Karşılaştırılması.....	61
5.2.8. Simüle Edilmiş Atık Su Analizleri.....	61
5.3. Adsorpsiyeon İzoterm, Kinetiği ve Termodinamik Hesaplamaları.....	62
5.3.1. Adsorpsiyeon İzotermlieri ve Hesaplamaları.....	62
5.3.2. Adsorpsiyeon Kinetiği ve Hesaplamaları.....	69
5.3.3. Adsorpsiyeon Termodinamiği ve Hesaplamaları.....	74
TARTIşMA VE ÖNERİLER.....	76
KAYNAKÇA.....	77
EKLER.....	88

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Renk giderim yöntemlerinin karşılaştırılması.....	16
Tablo 3.2. RR195 boyar maddesinin özellikleri.....	27
Tablo 3.3. Biyosorbentler üzerinde gerçekleştirilen karakterizasyon yöntemleri.....	35
Tablo 4.1. Endüstriyel simüle atık su reçetesinde kullanılan kimyasallar ve miktarları.....	43
Tablo 5.1. Biyosorbentin yüzeyine adsorbe edilmiş RR195 boyar maddesine ait adsorpsiyon için Langmuir izoterm parametreleri.....	64
Tablo 5.2. Biyosorbentin yüzeyine adsorbe edilmiş RR195 boyar maddesine ait adsorpsiyon için Freundlich parametreleri.....	66
Tablo 5.3. Biyosorbentin yüzeyine adsorbe edilmiş RR195 boyar maddesine ait adsorpsiyon için Temkin parametreleri.....	67
Tablo 5.4. Biyosorbentin yüzeyine adsorbe edilmiş RR195 boyar maddesine ait adsorpsiyon için Dubinin- Radushkevich parametreleri.....	69
Tablo 5.5. Biyosorbent yüzeyine adsorbe edilmiş RR195 boyar maddesine ait adsorpsiyon için yalancı birinci mertebe verileri.....	70
Tablo 5.6. Biyosorbent yüzeyine adsorbe edilmiş RR195 boyar maddesine ait adsorpsiyon için yalancı ikinci mertebe verileri.....	72
Tablo 5.7. Biyosorbent yüzeyine adsorbe edilmiş RR195 boyar maddesine ait adsorpsiyon için partikül içi difüzyon verileri.....	73
Tablo 5.8. Biyosorpsiyona ait termodinamik veriler.....	75

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Sürdürülebilir kalkınma için küresel hedefler.....	12
Şekil 3.2. 2015-2027 yılları arasında yukarıda verilen anahtar kelimeleri içeren yayınlanmış makale verileri.....	18
Şekil 3.3. Olası adsorpsiyon mekanizmaları.....	19
Şekil 3.4. Işığın dalga boyu spektrumları.....	20
Şekil 3.5. Katı-sıvı ara yüzeyinde adsorpsiyonun şematik gösterimi.....	22
Şekil 3.6. Tekstil boyar maddesinin tekstil endüstrisinde kullanımı, tekstil atık sularının deşarj edilmeden giderimsiz/giderimli süreçlerin olumlu ve olumsuz etkileri.....	25
Şekil 3.7. Ekosisteme boyar madde salınımı yapan major endüstrileri (TE; tekstil endüstrisi, BE; boya endüstrisi, KHE; kağıt ve hamur endüstrisi, TBE; tabakhane ve boya endüstrisi, BİE; boya imalatı endüstrisi).....	25
Şekil 3.8. RR195'in moleküler yapısı.....	28
Şekil 3.9. Olası biyosorbent ve RR195 boyar maddesinin etkileşim mekanizması.....	28
Şekil 3.10. Suda çözünen/çözünmeyen sentetik boyaların sınıflandırılması.....	29
Şekil 3.11. Adsorpsiyon spektrumu.....	38
Şekil 4.1. a) Alıç meyve ve çekirdeği, b) Alıç Biyokütlesi, c) Alıç Biyokütlesi (100mesh)....	39
Şekil 4.2. Farklı mesh (boyutlar) biyosorbent örnekleri.....	39
Şekil 4.3. Gerçekleştirilen deneylerin şematik gösterimi.....	42
Şekil 5.1. Biyosorbentin zeta potansiyel analiz sonucu.....	44
Şekil 5.2. Giderim öncesi ve sonrası biyosorbente ait XRD analiz sonuçları.....	45
Şekil 5.3. RR195 boyar maddesi, giderim öncesi ve sonrası biyosorbentlere ait FT-IR analiz sonuçları.....	46
Şekil 5.4. a) Boya öncesi tüm meyve, b) Boya sonrası tüm meyve, c) Boya öncesi siyah- beyaz alıç çekirdeği (100mesh), d) Boya sonrası siyah-beyaz alıç çekirdeği (100mesh), e) Boya öncesi siyah alıç çekirdeği (100mesh) f) Boya sonrası siyah alıç çekirdeği (100 mesh).....	48
Şekil 5.5. a) Boya sonrası beyaz alıç çekirdeği (100mesh), b) Boya sonrası beyaz alıç çekirdeği (80 mesh).....	49
Şekil 5.6. SEM/EDX ve MAPPING analiz sonuçları boya sonrası beyaz alıç çekirdeği (80 mesh).....	50
Şekil 5.7. SEM/EDX ve MAPPING analiz sonuçları boya sonrası beyaz alıç çekirdeği (100 mesh).....	50

Şekil 5.8. Kalibrasyon eğrisi verisi.....	51
Şekil 5.9. RR195 boyar maddesinin farklı biyosorbentlerle oda koşullarında, a) çözelti pH'ı (Cr, Ci, SBA-15, Cn, Cr* ve P) ve b) pH=1'de (Cr_1, C_1, SBA-15_1, Cn_1 ve P ve Cr*_1 (meyve + çekirdek)) % giderim ve adsorpsiyon (biosorpsiyon) kapasitesi sonuçları (Biyosorbent dozajı: 0.1 g, Temas süresi: 1 saat).....	52
Şekil 5.10. RR195 boyar maddesinin farklı pH'larda % giderim ve qe sonuçları.....	53
Şekil 5.11. RR195 boyar maddesinin biyosorbentlerle (1: beyaz ve 2: siyah alıç çekirdeği karışımı) farklı pH'larda % giderim ve qe sonuçları (partikül boyutu 100 mesh).....	53
Şekil 5.12. RR195 boyar maddesinin biyosorbentlerin (beyaz ve siyah alıç çekirdeği karışımı) farklı pH'larda % giderim ve qe sonuçları.....	54
Şekil 5.13. RR 195 boyar maddesinin farklı boyutlardaki beyaz alıç çekirdeğinden elde edilen biyosorbentlere ait % giderim ve qe sonuçları (pH=1).....	55
Şekil 5.14. Biyosorbent karışımında kullanılan tanecik boyut bağıl oranı ve ağırlık değerleri.....	55
Şekil 5.15. RR 195 boyar maddesinin farklı alıç çekirdekleri (1: beyaz ve 2: siyah) kullanılarak elde edilen % giderim ve qe sonuçları (pH=1 ve 100 mesh).....	56
Şekil 5.16. RR195 boyar maddesinin biyosorbent miktarına bağlı % giderim ve qe sonuçları (pH=1, 100 pmm RR195, 50mL, 1 saat).....	57
Şekil 5.17. RR195 boyar maddesinin farklı süre ve sıcaklıklardaki % giderim sonuçları (pH=1; ve süre, 1, 3, 5, 10, 20, 40, 60, 75 ve 90dk., çözelti, 100 ppm).....	58
Şekil 5.18. RR195 boyar maddesinin farklı süre ve sıcaklıklardaki % giderim ve qe sonuçları (pH=1; ve süre, 1, 3, 5, 10, 20, 40, 60, 75 ve 90dk., çözelti, 100 ppm).....	58
Şekil 5.19. Farklı konsantrasyonlarda RR195 boyar madde % giderimi ve qe sonuçları (pH=1, sıcaklık 25°C).....	59
Şekil 5.20. Farklı konsantrasyonlarda RR195 boyar madde % giderimi ve qe sonuçları (pH=1, sıcaklık 35°C).....	60
Şekil 5.21. Farklı konsantrasyonlarda RR195 boyar madde % giderimi ve qe sonuçları (pH=1, sıcaklık 45°C).....	60
Şekil 5.22. Biyosorbent ve ticari aktif karbonun farklı derişim ve sürelerde RR195 boyar maddesinin % giderim ve qe sonuçları (pH=1, oda sıcaklığında).....	61

Şekil 5.23. Simüle atık su % giderim ve qe sonuçları (20 dk, oda sıcaklığı, 0,18g, pH=1).	62
Şekil 5.24. RR195 boyar maddesinin biyosorbent ile sulu çözelti ortamında farklı sıcaklık ve konsantrasyonlarda (100, 150, 200, 300, 500 ve 750 ppm) adsorpsiyonunun Langmuir izoterm eşitliğinin uygulanması.....	63
Şekil 5.25. RR195 boyar maddesinin biyosorbent ile sulu çözelti ortamında farklı sıcaklık ve konsantrasyonlarda (100, 150, 200, 300, 500 ve 750 ppm) adsorpsiyonunun Freundlich eşitliğinin uygulanması.....	65
Şekil 5.26. RR195 boyarmaddesinin biyosorbent ile sulu çözelti ortamında farklı sıcaklık ve konsantrasyonlarda (100, 150, 200, 300, 500 ve 750 ppm) adsorpsiyonunun Temkin eşitliğinin uygulanması.....	67
Şekil 5.27. RR195 boyar maddesinin biyosorbent ile sulu çözelti ortamında farklı sıcaklık ((a) 25°C, (b) 3 °C 5, (c) 45 °C) ve konsantrasyonlarda (100, 150, 200, 300, 500 ve 750 ppm) adsorpsiyonunun Dubinin-Radushkevich eşitliğinin uygulanması.....	68
Şekil 5.28. RR195 boyar maddesinin biyosorbent ile gideriminde Yalancı birinci derece kinetik model sonuçları (25, 35 ve 45°C de).....	70
Şekil 5.29. RR195 boyar maddesinin biyosorbent ile gideriminde Yalancı ikinci derece kinetik model sonuçları (25, 35 ve 45°C de).....	71
Şekil 5.30. RR195 boyar maddesinin biyosorbent ile gideriminde Partikül İçi Difüzyon modeli sonuçları (25, 35 ve 45°C de).....	73
Şekil 5.31. lnKd'ye karşılık 1/T grafiği.....	74

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

- b** : Temkin izoterm sabiti
- C_e** : Denge anında adsorplanmadan kalan madde miktarı (mg/L)
- C** : Adsorbat-adsorban arasındaki sınır tabakası hakkında bilgi veren ifade
- C₀** : Başlangıç konsantrasyonu (mg/L)
- C_t** : t zaman konsantrasyonu (mg/L)
- E** : Enerji (kJ/mol)
- EDX** : Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
- FT-IR** : Fourier dönüşümlü infrared spektrometresi
- h** : Başlangıç adsorpsiyon hızını (mg.g/dk)
- K_F** : Adsorbsiyon kapasitesiyle ilgili izoterm sabiti (mg/g)
- K_L** : Langmuir izoterm sabitini (L/mg)
- K_T** : Denge bağlanma sabiti (L/g)
- K₁** : Birinci dereceden hız sabiti (dk⁻¹)
- K₂** : İkinci dereceden hız sabiti (g/mg.dk)
- K_{in}** : Partikül içi difüzyon hızı sabiti (mg/g.dk^{1/2})
- g** : Gram
- q_e** : Denge anında adsorplanan madde miktarı (mg/g)
- q_t** : t anında adsorplanan madde miktarı (mg/g)
- q_m** : Maksimum adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)
- m** : Adsorban miktarı (g)
- mL** : Mililitre
- n** : Adsorpsiyon yoğunluğu ile ilgili Freundlich izoterm sabiti
- ppm** : Milyonda bir birim RR195
- RR195** : Reaktif Red 195
- R** : İdeal gaz sabiti (8,314 J/molK)
- R_L** : Ayırma faktörü
- SEM** : Taramalı elektron mikroskop
- T** : Mutlak sıcaklık (°C, K)
- t** : Zaman (s, dk.)
- UV** : Ultra viyole
- vb** : ve benzeri
- vd** : ve diğerleri
- V** : Çözelti hacmi (L)

β : Adsorpsiyon enerjisine bağlı aktivite katsayısı ($\text{mol}^2 / \text{J}^2$)

$\mathcal{E}$: Polanyi potansiyeli

ΔG° : Gibbs serbest enerji değişimi (kJ/mol)

ΔH° : Standart entalpi değişimi (kJ/mol)

ΔS° : Standart entropi değişimi (kJ/molK)

% RR195 : Yüzde giderim

XRD : X-Işını Difraktometresi

1. GİRİŞ

Günümüzde küresel düzeyde sürdürülebilir bir çevre, sağlıklı sosyal hayatın ve ekonomik kalkınma devamlılığı insanoğlunun eylemleri ve eylemsizliği sonucu oluşan (antropojenik) etkilere bağlıdır (Şimşek ve Atılğan Türkmen, 2024). Sürdürülebilirliğin tarihçesini Hans Carl von Carlowitz tarafından 1713 yılında "Ormanların sürekli, esnek ve sürdürülebilir kullanımını amaçlamalıyız." cümlesiyle başlatmıştır (Kuhlman ve Farrington, 2010). Sürdürülebilirlik kavramı günümüzde ise, aşırı endüstriyel ölçekte üretim/tüketim çılgınlığı ve dünya nüfусundaki artışa bağlı olarak dünya ekolojisinde meydana gelen olumsuz etkilerin çoğalmasından dolayı Birleşmiş Milletler (BM) Kalkınma Komisyonu tarafından, global ölçekte toplulukların dikkatini çekmek için, 1987 yılında hazırlanan "Brundtland Raporunda" yaygın bir şekilde kullanılmıştır (Keeble, 1988). Sürdürülebilirlik, "gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama becerilerinden ödün vermeden bugünün ihtiyaçlarını karşılamak" ilkesine dayanmaktadır (Perdan, 2011). Bu yaklaşımın temel hedeflerinden biri, insanların dünya üzerinde uzun vadeli ve barış içinde yaşayabilmesidir. Sürdürülebilirlik düşüncesi uluslararası, ulusal ve bireysel düzeylerde alınacak kararlara rehberlik edebilir (Perdan, 2011). Yapılacak yerel ve küresel değişimlerin uyum içerisinde olması dünya ekosistemindeki temiz su, toprak ve hava döngülerinin sürdürülebilir olmasını sağlar. Su, dünyamızın 3/4'ünü oluşturur, ancak yalnızca %0,3'ü insanlar ve hayvanlar tarafından kullanılabilir. Geriye kalan %99,7'yi devasa okyanuslar, buzullar ve diğer içilemez su kaynaklarından oluşur (Periyasamy, 2024). Dünya nüfусundaki artışı, sanayi, plansız kentleşme ve kötü su yönetimi nedeniyle su kalitesi son yıllarda gittikçe düşmektedir.

Dünya nüfусunun 2100'e kadar 12 milyara çıkacağı öngörülmektedir (Gerland vd., 2014). Ayrıca dünya nüfусunun artışına paralel olarak artan küresel ekonomik aktiviteler (Price Waterhouse Cooper, 2010), küresel tarım sistemini daha az kaynakla daha fazla gıda üretimine ve aynı zamanda çevresel etkileri en aza indirmeye zorlayacaktır. Son eğilimler bu hedeflerle uyumsuz olup, bir dizi ülkede birim üretim faktörü (arazi, gübre vb.) başına verimde azalma ve 1985-2005 yılları arasında brüt, yenilenemeyen kaynak tüketiminde artış olduğunu göstermektedir (Foley vd., 2011; Tilman ve Clark, 2014). Küresel gıda tüketiminin iklim değişikliği, su stresi, toksik kimyasal salınımı, hava kalitesinin bozulması, su kütlelerinin ötrofikasyonu, toprak erozyonu ve biyolojik çeşitlilik kayıpları dahil olmak üzere çeşitli çevresel sorunlara katkıda bulunarak ekosistemlerin performansını olumsuz yönde (yerel ve küresel olarak) etkilediği açıktır (Cribb, 2010; Foley vd., 2011). Ekosistem hasarlarını bir kenara bırakırsak, mevcut yoğun tarım sistemleri tükenen ve verimsiz kullanılan

yenilenemeyen kaynaklara (fosil yakıtlar, arazi ve mineraller) dayanmaktadır. İnsanların alışkanlıkları (tercihleri) dünyadaki ekolojik yaşama olumlu ve olumsuz etkilere sahiptir. Bu nedenle toplumların ve ülkelerin sürdürülebilir tarım, sağlıklı toplum ve sürdürülebilir ekoloji için toksik çıktıları minimum düzeyde tutmaya gayret göstermeleri gerekmektedir. Özellikle sanayileşmeye ve dünya nüfusunda artışa paralel olarak kullanılan toksik kimyasallarda artış gözlenmektedir. Bu toksik kimyasallardan birisi de tekstil boyalarıdır. Tekstil endüstrisi, su tükenmesine ve ekotoksositeye yol açan atık su oluşumuna büyük katkıda bulunmasına rağmen, küresel olarak önemli bir öneme sahiptir. Bu sorun, özellikle boyar maddeler olmak üzere zararlı kimyasalların yaygın kullanımından kaynaklanmaktadır. Tekstil endüstrisinde kullanılan boyar maddeler endüstriyel atık sularda bulunan en tehlikeli kimyasal bileşik sınıflarından biridir (Paul vd., 2011). Bu boyar maddelerin atık su içerisindeki durumları, sulu floranın fotosentezini engelleyerek, ışık penetrasyonunu azalttığından dolayı bertaraf edilmesi zorunludur (Royer vd., 2009; Lima vd., 2008). Ayrıca estetik açıdan, içme ve diğer amaçlar için kullanım açısından da sakıncalıdır (Royer vd., 2010). Alerji, dermatit, cilt tahrişine neden olabilmelerinin yanı sıra, (Brookstein vd., 2009) kanserojenik (Alves vd., 2007) ve mutajeniktirler (Carneiro vd., 2010).

Endüstriyel boyalardan biri olan reaktif boyar maddeler, ticari sentetik boyaların önemli bir bölümünü temsil ederler, bunun başlıca sebebi, reaktif gruplarıyla tekstil ve selüloz liflerinin yüzey grupları arasında bir kovalent bağın oluşması sonucu başlatılan mükemmel bağlama yetenekleridir.

Reaktif boyalar, tekstil elyafındaki hidroksil ($-OH$), tiyol ($-SH$) ve amino ($-NH_2$) gruplarıyla ikame veya ekleme reaksiyonlarına girebilen ve boyanacak elyafla kovalent bağlar kurabilen spesifik fonksiyonel gruplara sahip en önemli tekstil boyası türlerinden biridir. Suda çözünürlüklerinin yüksek olması ve çözünmeyen duruma hidrolize olma verimlilikleri nedeniyle reaktif boyalar en yaygın kullanılan boyar madde türleri arasında yer almaktadır. Ancak, çevre ve sağlık sorunlarının da başlıca nedenleri arasında sayılan boyar madde gruplarından birisidir (Lazaridis vd., 2003; Klaus vd., 1997; Kamranifar vd., 2018; Sadaf vd., 2025). Ekosisteme direkt salınımları nedeniyle toksisiteleri, mutajenitesi ve biyolojik olarak bozunmamaları çevresel problemlerin artışına neden olur (Asouhidou vd., 2009; Rosa vd., 2008; Pearce vd., 2003). Bunun yanında, reaktif boyar maddeler yapılarındaki aromatik halkalar nedeniyle doğal biyodegradasyona karşı dirençlidirler (Karacakaya vd., 2009). Reaktif Red 195, kromofor grubu olarak işlev gören azo grubu ($N=N$) ve reaktif bir grup içeren bir oksokrom grubu olarak işlev gören $-SO_3H$ (sülfonat) ile ayırt edilen bir tekstil azo boyasıdır.

Bu boyar maddeler, tekstilde kullanılan tüm boyar maddelerin yaklaşık %65 ile %75'ini oluşturur. Su bazlı solüsyonlarda iyonize olan oksokrom (renk arttırıcı grup) grupları, renk ve elyaf sabitleme yetenekleri kazandırır (Raqba vd., 2022). Reaktif boyar maddeler tekstil endüstrilerinde sıklıkla kullanılan maddelerdir ve biyolojik bozunurluklarının düşük olması sebebiyle atık su ortamı için potansiyel bir tehdit oluşturmaktadırlar (Paul vd., 2011; Rashtbari vd., 2025). Bu nedenle, tekstil boyar maddeleri atık sudan uzaklaştırmak için adsorpsiyon (Tsoutsas vd., 2024; Rashtbari vd., 2025), koagülasyon (Zaharia vd., 2024), nanofiltrasyon (Jawaduddin vd., 2024), biosorpsiyon (Ozkan ve Uzun, 2010) ve oksidasyon, (Thambiliyagodage vd., 2022) dahil olmak üzere çok çeşitli metotlar kullanılmaktadır.

Endüstriyel atık sulardan ticari (sentetik) boyar maddelerin bertaraf edilmesi için kullanılan yaygın ve geleneksel yöntem, adsorpsiyon yöntemidir. Bu yöntemle, atık su içerisindeki boyar maddeler, sıvı fazdan katı faza dönüştürülerek atık hacmi en aza indirilir (Lima vd., 2008). Tercih edilmesinin sebebi, düşük yatırım maliyeti, tasarım kolaylığı, kullanım kolaylığı ve toksik maddelerle etkileşime girmemesidir. Ancak adsorbanların yüksek birim maliyeti, büyük miktarlarda kullanılması ve ikincil atıkların oluşması nedeniyle uygulaması sınırlıdır ve atık devamlılığına neden olmaktadır.

Gerçekleştirilen bu tezin temel hedefi, tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan Reaktif Red 195 boyar maddesinin biyosorpsiyon yöntemi kullanılarak su ekosistemine deşarj edilmeden, atık su içerisindeki değerinin uygun düzeyde tutulabilmesi için optimum giderim koşullarının araştırılmasıdır. Reaktif Red 195 boyar maddesinin atık sulardan giderimi için biyosorbent olarak alıç, hindistan cevizi, greyfurt ve şeftali ile ön denemeler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca adsorban olarak silika kaynağı olan SBA-15'in de RR195 boyar maddesinin giderilmesindeki etkisine bakılmıştır. İlk olarak seçilen biyosorbent kaynakları doğal ortamda kurutulduktan sonra bilyeli değirmenle 100-200 mesh boyutlarına kadar öğütülmüştür.

Daha sonra elde edilen biyosorbentlerle ve SBA-15 malzemesinin seçilen Reaktif Red 195 tekstil boyar maddesinin giderimleri (adsorpsiyonları), çözelti pH'ı ve pH=1 değerlerinde, oda sıcaklığında, 1 saat temas süresince ve 0,1 gram madde dozajı varlığında araştırılmıştır. Çözelti örnekleri ve biyosorbent ve/veya adsorban, santrifüj yöntemiyle (4000 rpm'de 5 dakika süreyle) birbirlerinden ayrılmıştır.

Ayırma işlemi sonrasında adsorplanmadan kalan boyar madde derişimleri UV-Vis spektrofotometre (T80 UV/VIS Spectrometer PG Instruments Ltd) kullanılarak RR195'e ait

dalga boyunda (541nm) tayin edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en iyi giderim değerinin pH=1’de alıç *Crataegus* (*Crataegus species* (hawthorn; alıç meyvesi-çekirdeği ve yalnız çekirdeğini)) biyosorbetine ait olduğu saptanmıştır (Şimşek ve Pat, 2026). Uygun biyosorbent belirlendikten sonra, optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla biyosorpsiyona etki eden parametrelerden bazıları (pH (1-10), biyokütle miktarı (0,03-0,25g), başlangıç boyar madde derişimi (10-750 ppm), temas süresi (10-90 dakika), sıcaklık (25°C, 35°C ve 45°C), ayrı ayrı optimize edilmiştir.

Son olarak hazırlanan biyosorbent ve RR195 arasındaki biyosorpsiyon mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için, biyosorpsiyon verilerinin bazı izoterm (Langmuir, Freundlich, Temkin ve Dubinin-Radushkevich) ve kinetik modellere (Yalancı birinci derece, Yalancı ikinci derece ve Partikül içi difüzyon) uygunlukları araştırılmıştır. Ayrıca biyosorpsiyona ait termodinamik veriler hesaplanarak, Zeta Potansiyeli, XRD, SEM/EDX, MAPPING ve FT-IR ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Dünya ekosistemlerindeki yaşayan insanların ihtiyaçlarından daha fazlasını istemeleri sebebiyle üretim ve tüketim arasındaki dengenin bozunması sonucu, doğal ekosistemlere (su, kara ve hava) verilen toksik ve toksik olmayan atıkların miktarında günden güne artışlar gözlenmektedir. Oluşan atıkların özellikle su madde döngüsündeki dengeyi olumsuz etkilemesi nedeniyle su ekolojisinin dengesini bozmaktadır. Ayrıca, bu negatif toksik etkiler global ölçekte ekosistemleri ve sosyal sürdürülebilirliği olumsuz etkilemektedir.

Günümüzde ekosistemler, öncelikle doğal kaynakların tükenmesi ve endüstriyel genişleme ve çevresel acil durumlardan kaynaklanan çevrenin bozulması nedeniyle zarar görmektedir (Rayhan Sarker vd., 2021; Szilagyi vd., 2018). Su kirliliği ve derecesi, Dünya'daki yaşamı sürdüren birincil unsur olan temiz su kaynakları için önemli riskler oluşturan bir çevre sorunu olmasının yanında sürdürülebilir yaşamı desteklemedeki düzeyini vurgulamaktadır (Ajmal vd., 2015; Periyasamy, 2024). Su kirliliği büyük ölçüde iki ana sorunla tanımlanır: güvenli içme suyunun olmaması, kirli sudaki ve besin zincirinde bulunan çeşitli kimyasallar ve patojenlere tehlikeli şekilde maruz kalma (Schwarzenbach vd., 2010; Gahlot vd., 2020). Ayrıca, su kirliliği hem doğal hem de insan faaliyetlerinden kaynaklanan su kütlelerindeki zararlı maddelerin aşırı bolluğu ile karakterize edilir (Ahmad vd., 2015). Günümüzde sosyal hayatının gelişiminden kaynaklanan tekstil endüstrisi su kirliliğine önemli katkıda bulunmaktadır (Ahmed ve Dhedan, 2012). Küresel ölçekte su kirliliğinden petrol endüstrisi ikinci en büyük sorumludur (%20'sinden) (Mohamed ve Ahmed 2017). Ancak, tekstil endüstrisinin diğer endüstriyel sektörlerle karşılaştırıldığında, 8000'den fazla türün kullanıldığı en yüksek su ve kimyasal tüketimine sahip olduğu bilinmektedir (Ahmad vd., 2007). Bu endüstri tarafından üretilen atık su genellikle önemli miktarda sabitlenmemiş renk ve boyama yardımcı maddeleri ile karakterize edilir (Shukla, 2007). Yılda yaklaşık 800.000 ton boyar madde üretilmekte ve bu miktarın %10-15'i çevreye deşarj edilmektedir (Klepacz-Smółka vd., 2010). %70'i azo tipine ait olmak üzere 10.000'den fazla farklı sentetik boyar madde çeşidi tanıtılmıştır. Genel olarak, boyar maddeler direkt, reaktif, bazik, asidik, dispers, küp, kükürt, metal kompleks ve mordan boyar maddeleri gibi çeşitli tiplere ayrılır (Mohamed ve Ahmed, 2017).

Canlı ekosistemlerindeki yaşamın sağlıklı bir şekilde sürdürülmesinin ana nedeni, madde döngülerinin (H_2O , O_2 , N_2 , S, CO_2 vb. gibi) doğal ekolojik değişimler içerisinde sürdürülebilirliğinin sağlanmasıdır. Bu bağlamda, gelecekteki nesillere sürdürülebilir bir dünya bırakmak istiyorsak, toksik etkiye sahip maddelerin doğal ve ekonomik yollarla bertaraf

edilmesi için gerekli araştırmaların yapılması hem bilim insanlarının hem de ülkelerin temel hedefleri olmalıdır.

Günümüzde tekstil ürünlerinin üretimi sonucu meydana gelen atık sular içerisindeki kimyasal boyar maddeler deşarj edildikleri alıcı ortamdaki ekosistemi, insan sağlığını (Kumari vd., 2024; Kocaer ve Alkan, 2002) ve su içerisindeki yaşamı negatif olarak etkiler. Ayrıca daha yüksek kimyasal oksijen ihtiyacına (KOİ) neden olmaktadır (Kumari vd., 2024). Alıcı ekosistemdeki boyar maddelerin su içerisindeki organizmalarda birikmesi toksik ve kanserojenik ürünlerin meydana gelmesine sebep olur (Kocaer ve Alkan, 2002).

Tekstil endüstrileri, istenmeyen boya atıklarını serbest bıraktıkları için dünyadaki en büyük evre kirliliği sorunlarından birinden sorumludur (Yaseen ve Scholz, 2019). Dahası, yüksek su, enerji ve kimyasal kaynak tüketiminin çok sayıda tehlikeli atık saldığı en karmaşık üretim endüstrilerinden biri olarak bilinmektedir (Oke ve Mohan, 2022). Bu nedenle, ekosistemi korumak ve arıtılmış atıkların sulama amaçlı daha fazla geri dönüştürülmesini, tekstil üretim proseslerinde yeniden kullanılmasını veya temizlik faaliyetlerini sağlamak için tekstil atıklarının arıtılması esastır (Yaseen ve Scholz, 2019; Flores Alarcn, 2022).

Tekstil atık suları, çeşitli aralıklarda farklı kirleticilerle karıştırılmış boyar maddeler içerir. Bu sebeple, evre mevzuatı genellikle tekstil fabrikalarını bu atık suları alıcı su yollarına deşarj etmeden önce arıtmaya mecbur eder. Herhangi bir pilot ölçekli çalışmanın arıtma verimliliği, sisteme gerçek tekstil atık suları veya tipik tekstil fabrikası deşarjlarıyla eşleşen özelliklere sahip yapay atık su beslenerek incelenebilir (Yaseen ve Scholz, 2019).

Üretilen tekstil atık suları, büyük hacimleri nedeniyle önemli bir küresel ekolojik problemler oluşturmaktadır (Mittal vd., 2022). Sadece 1 kg tekstil boyar maddesi üretmek için 750.000L'den fazla temiz suya ihtiyaç duyulmaktadır (Hossain ve Khan, 2020). Küresel ölçekte, tekstil endüstrisi yılda 50 milyar m³ 'ten fazla atık su üretmektedir. Boyar maddeler, tuzlar, ağır metaller ve diğer kimyasallar gibi kirleticilerle birleşen büyük atık su hacimleri, bertaraf edilmeden önce uygun şekilde arıtılmazsa ciddi evre ve sağlık riskleri oluşturmaktadır (Etana vd., 2025).

Yaklaşık 10.000 farklı boya türü üretilmiştir ve bugün piyasada tahmini yıllık üretim 700.000 tondur (Al-Ghouti vd., 2010). Tekstil atık sularının çeşitli kimyasallar (rneğin azo boyalar, antrakinon boyalar, indigo türevleri, ksanten boyalar, ftalosiyanin boyalar, nitratlanmış ve nitrozolanmış boyalar, difenilmetan ve trifenilmetan boyalar ve siyaninler) ve metaller gibi inorganik bileşikler içerdiği bilinmektedir (Berradi vd., 2019).

Azo tipi boyaların yaklaşık %15-50'si boyama işlemi sırasında kumaşa bağlanmaz ve birçok gelişmekte olan ülkede tarımda sulama için kullanılan atık suya salınır. Bu aynı zamanda toprak mikrobiyal toplulukları, çimlenme ve bitki büyümesi için de çok zararlıdır (Lellis vd., 2019). Boyaların toksisitesi de kamuoyunda endişe yaratmıştır, çünkü bunların çoğu biyolojik olarak parçalanmaya dirençlidir ve neoplazmik hastalıklar geliştirme riskini artırabilir (Flores Alarcón vd., 2022). Yüksek renk yoğunluğu, dirençli organiklerin konsantrasyonu, bulanıklık, tuzluluk, pH seviyesi ve metal içeriği, tekstil atık suyunu düşük biyolojik olarak parçalanabilirliğe sahip, ağır kirli bir atık haline getirir ve arıtılması gerekir (Deng vd., 2020).

Tekstil atık suları kirleticilerini gidermek için yeni etkili yöntemlerin geliştirilmesini gerektiren karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu durum güncel bir zorluk teşkil etmektedir. Bu konunun önemi ise, SCOPUS veri tabanında "boya ve giderim ve endüstri" terimlerini ararken 2021'den günümüze %63 oranında artan yayın sayısına (akademik çalışmalara) yansımakta olduğu görülmektedir (Flores Alarcón vd., 2022).

Endüstriyel atık su içerisindeki boyar maddelerin negatif (zararlı) etkilerini azaltmak için farklı yöntemler kullanılır. Adsorpsiyon bu yöntemlerden biridir. Adsorpsiyon yöntemiyle boyar maddelerin su ekosisteminden etkin bir şekilde uzaklaştırılabilmesi için uygun adsorpsiyon koşullarının sağlanması gerekmektedir. Adsorpsiyon verimi; kullanılan adsorbanın özellikleri, çözelti pH'ı ve ortam sıcaklığı, gibi fizikokimyasal parametrelerden önemli ölçüde etkilenmektedir (Hamutoğlu vd., 2012). Sulu çözelti içerisinde, adsorpsiyon, katı ve sıvı fazların birbiriyle temas ettiği bir yüzey olayıdır. Bu süreçte adsorban, çözelti içerisinde bulunan hem çözünen maddeleri hem de çözücüyü adsorplayabilmektedir. Yalnızca çözünen maddenin adsorplandığı süreçler pozitif adsorpsiyon olarak isimlendirilir. Diğer taraftan, adsorbanın çözücüyü tercihli olarak adsorplaması sonucunda çözeltideki çözünen madde derişimi yükselir ve bu durum negatif adsorpsiyon olarak ifade edilir (Kipling, 1965; Akkaya, 2012).

Özellikle kimya sanayisi sonrası elde edilen endüstriyel atık suların sulu ortamda bertaraf edilmesinde aktif karbon, zeolit (Demiral vd., 2016; Zubrik vd., 2017; Crini vd., 2019; Sukmana vd., 2021), biyosorbent (Şimşek vd., 2023), silika bazlı mezogözenekli malzemeler (Şimşek vd., 2019) ve polimer (Wasilewska ve Deryło-Marczewska, 2022) gibi birçok farklı gözenekli adsorbanlar kullanılmaktadır.

Flores Alarcón ve arkadaşları (2022) tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada tekstil atık sularının gideriminde biyo-adsorban (portakal çekirdeği tozu, hekzan ekstraksiyonu)

lipitlerin uzaklaştırıldığı portakal çekirdeğinden) ve membran teknolojisi kullanılmıştır. Optimize edilmiş koşullar altında ($\text{pH}=2,6$, OS tozundan $0,58 \text{ g/L}$ ve 26°C), boyar maddenin %95'inden fazlası gerçek tekstil atık suyundan uzaklaştırılmıştır. Ek olarak, tekstil atık suyunun hacmi $0,05 \text{ L}$ 'den 10 L 'ye çıkarıldığında boyar madde giderme yüzdesi yalnızca %4 oranında azaldığı gözlenmiştir. Daha sonra, $\text{pH}=11$ 'de $3 \text{ }\mu\text{m}$ 'lik boru şeklindeki seramik membran kullanılarak gerçekleştirilen deneyde %96'ya çıkarılmıştır.

Rashtbari ve arkadaşları (2025) aktif karbon/ Fe_3O_4 ve persülfat (PS/US/AC- Fe_3O_4) ile birleştirilmiş sono-katalitik işlemin, sulu çözeltilerden Reaktif Mavi 19 boyar maddesini (RB 19) uzaklaştırmadaki verimliliğini incelemişlerdir. Aktif karbonları (AK), aşınmış lastikler ve Fe_3O_4 eş çöktürme yöntemi kullanılarak sentezlemişlerdir. RB 19 giderimi için deneylerin optimizasyonu ve veri analizi için Box Behnken Tasarımı (BBD) yöntemi kullanılmıştır. pH , başlangıç konsantrasyonu, persülfat dozajı, kompozit dozaj ve reaksiyon süresi için optimum değerler sırasıyla $3,1 \text{ mg/L}$, $22,4 \text{ mg/L}$, $1,34 \text{ g/L}$, $1,75 \text{ g/L}$ ve 90 dakika olarak belirlemişlerdir. Çeşitli modeller için deneysel sonuçların varyans analizine dayanarak, yüksek korelasyon katsayısına ($R^2 = 0,9685$) ve ($\text{Rajd}^2 = 0,9432$) sahip ikinci dereceden kinetik model, PS/US/AC- Fe_3O_4 işlemi kullanılarak boyar madde giderimini optimize etmişlerdir. Optimum koşullar altında kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) gideriminin yüzdesinin %68 olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, bu yöntemin boyar madde kombinasyonları üreten endüstrilerden kaynaklanan atık suların arıtımında uygulanabileceği düşünülmektedir (Rashtbari vd., 2025).

Tanyıldız tarafından yapılan bir araştırmada sulu çözelti içerisindeki Reaktif Siyah 5 (RR5) boyar maddesinin yer fıstığı kabuğuyla adsorpsiyonu için Placket-Burman ve Central Composite Design yöntemleri kullanılmıştır. Araştırmada; başlangıç boyar madde konsantrasyonu, sıcaklık, adsorbent miktarı, başlangıç ortam pH 'sı, partikül boyutu, karıştırma hızı ve temas süresi parametrelerini incelenmiştir. Placket-Burman modelinde boyar madde adsorpsiyonunu yer fıstığı kabuğu dozu ve başlangıç boyar madde konsantrasyonu arasındaki etkileşimin adsorpsiyon prosesinde etkili olduğunu gözlenmiştir. RR5'in yer fıstığı kabuğu üzerinde denge adsorpsiyon verileri Langmuir ve Freundlich modelleriyle incelenmiştir. Tek tabaka adsorpsiyon kapasitesi (q_m) değerinde sıcaklığın rol oynadığı belirlenmiştir. 20°C 'de 50 mg/g olan adsorpsiyon kapasitesi 600°C sıcaklıkta $55,55 \text{ mg/g}$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca bu çalışmada kinetik veriler için yalancı birinci dereceden ve ikinci dereceden adsorpsiyon kinetik modelleri kullanılmıştır. Kullanılan bu modeller, hız sabitleri çeşitli başlangıç boyar

madde derişimleri için elde edilmiştir. Deneysel veriler yalancı ikinci dereceden kinetik modelle açıklanmıştır (Tanyıldız, 2011).

Aksakal ve Uçun (2010) tarafından gerçekleştirilen bir incelemede, *Pinus sylvestris* Linneo'nun (sarıçam) konik biyokütlesi kullanılarak sulu çözeltiden bir azo boyar maddesi olan RR195'in biyosorpsiyonu araştırılmıştır. Bu amaçla, araştırmada pH, başlangıç boyar madde konsantrasyonu, biyokütle dozajı ve temas süresinin biyosorpsiyona etkisi incelenmiştir. RR195 biyosorpsiyonu için maksimum pH'ın 1,0 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada biyosorpsiyon kapasitesini 200 mg/L boyar madde konsantrasyonu için 20°C'de 6,69 mg/g hesaplamışlardır. Deney sıcaklığı 50°C'ye çıkarıldığında bu değerin 7,38 mg/g'a yükseldiğini ifade etmişlerdir. Psödo-birinci derece ve psödo-ikinci derece kinetik, Elovich denklemi ve parçacık içi difüzyon kinetik modellerine uygunluklarını araştırmışlardır. Psödo-ikinci derece kinetik modelin, psödo-birinci derece kinetik model ve parçacık içi difüzyon mekanizması ile karşılaştırıldığında incelenen deneysel veriler için daha iyi bir korelasyon sağladığını belirtmişlerdir. Bunun yanında, Elovich denkleminin de deneysel verilere iyi bir uyum gösterdiğini ifade etmişler. Freundlich ve Langmuir adsorpsiyon izotermelerini biyosorpsiyon denge verilerinin matematiksel açıklaması için kullanmışlardır. Biyosorpsiyonun aktivasyon enerjisini (E_a), Arrhenius denklemi kullanılarak 8,904 kJ/mol olarak hesaplamışlardır. Farklı sıcaklıklarda elde edilen termodinamik denge katsayıları kullanılarak, çalışmada ayrıca biyosorpsiyonun termodinamik sabitleri (ΔG° , ΔH° ve ΔS°) değerlendirilmiştir. Sonuçta, konik biyokütlesinin sulu çözeltiden reaktif boyar maddeleri uzaklaştırmak için etkili ve düşük maliyetli bir biyosorbent olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir (Aksakala ve Uçun 2010).

Mahanna ve Samy (2020) tarafından yapılan incelemede, sulu çözeltilerden RR195 boyar maddesinin giderimi için yeni bir düşük maliyetli adsorban olarak tarımsal atık olan soya fasulyesi yapraklarını (SL) kullanmayı amaçlamışlardır. Kurutulmuş SL, adsorpsiyon kapasitesini artırmak için asetik asit (AA) ile kimyasal olarak modifiye edilmiştir. Kullanılan adsorban (AASL), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ile karakterize edilmiştir. Temas süresi, pH, adsorban dozu, başlangıç boyar madde derişimi ve sıcaklık gibi operasyonel faktörlerin etkileri toplu deneylerde araştırılmıştır. AA/SL'nin adsorpsiyon kinetiği, izotermi ve termodinamiği incelenmiştir. AA/SL yapısının düzensiz ve gözenekli olduğu gözlenmiştir. FT-IR analiz sonuçları, AA/SL yüzeyinin çeşitli fonksiyonel gruplar bakımından oldukça zengin olduklarını göstermiştir. Çözelti pH'ı, RR195 giderim verimliliğini güçlü bir şekilde etkilediğini belirlemişlerdir. En yüksek giderim değerini 50°C ve pH=1'de elde ettiklerini ifade etmişlerdir (verimliliği %97,8).

Giderim verimliliği çözelti sıcaklığı ile arttığını açıklamışlardır. RR195'in adsorpsiyonu, adsorban dozunun sırasıyla 0,25'ten 3 gL⁻¹'e artırılmasıyla 15,32'den 2,29 mgg⁻¹'e düşmüştür. Başlangıç boyar madde konsantrasyonunun 5'ten 40 mgL⁻¹'e artırılması ise adsorpsiyon kapasitesinin sırasıyla 2,2'den 9,2 mgg⁻¹'e artmasına ve giderim oranının sırasıyla %88'den %45,8'e düşmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. RR195'in AA/SL üzerine adsorpsiyonu, yaklaşık 12 mgg⁻¹'lik teorik maksimum adsorpsiyon kapasitesiyle Langmuir ($R^2 = 0,998$) ve D-R ($R^2 = 0,967$) modellerine uyduğunu ifade etmişlerdir. Deneysel verilerin ise, sözde ikinci dereceden kinetikle ($R^2 = 0,991$) çok iyi uyumlu olduğunu açıklamışlardır. Dahası, termodinamik çalışmalar, reaksiyonun geri döndürülemez ve endotermik adsorpsiyon olduğunu göstermiştir. Düşük maliyetli bir malzeme olan AA/SL, sulu çözeltilerden RR195 boyar maddesinin uzaklaştırılması için yeni bir alternatif adsorban olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğunu ifade etmişlerdir (Mahanna ve Samy, 2020).

Munagapati ve arkadaşları tarafından (2022) yapılan bir çalışmada, kimyasal olarak modifiye edilmiş liçi kabukları glisidil trimetil amonyum klorür (GTMAC) kullanılarak sentezlenmiş ve su ortamından RR195 uzaklaştırmak için kullanmışlardır. Liçi kabuğu tozu (LPP), GTMAC modifiyeli LPP (G-LPP) ve RR195/G-LPP, BET/BJH, FT-IR, pHPZC, XRD ve FE-SEM/EDX analizleriyle karakterize edilmiştir. Adsorpsiyon testlerini başlangıç boyar madde konsantrasyonu (25-250 mg/L), G-LPP kütlesi (10-80 mg/30 mL), karıştırma hızı (0-400 rpm), çözelti pH'ı (1,0-10,0), temas süresi (0-480 dk.) ve sıcaklık (298-328 K) gibi çeşitli operasyonel değişkenleri kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çözelti pH'ının, RR195'in uzaklaştırma verimliliğini güçlü bir şekilde etkilediğini göstermişlerdir. Maksimum boyar madde giderimi pH=4.0'da %94,5 olarak verilmiştir. İzoterm ve kinetiğin değerlendirmeler sonucunda adsorpsiyonun Langmuir modeli ($R^2 > 0,9899$) ve psödo-birinci dereceden kinetik modele ($R^2 > 0,9918$) uyduğunu göstermiştir. Langmuir tek tabaka sorpsiyon kapasiteleri, q_{max} , 298 K, 308 K, 318 K ve 328 K sıcaklıklarında sırasıyla 144.9, 137.7, 130.1 ve 124.2 mg/g'dır olarak verilmiştir. Bu da düşük sıcaklıklarda uygun adsorpsiyonu önermektedir. Aktivasyon enerjisi (E_a) 16,3 kJ/mol olarak hesaplanmış, bu da adsorpsiyon davranışının esas olarak fiziksel sorpsiyona atfedildiğini ifade etmişlerdir. Termodinamik değişkenler; ΔH° (-46,6 kJ/mol), ΔS° (-133 J/mol K) ve ΔG° (-6,8693 ~ -2,9777 kJ/mol), sorpsiyon işleminin ekzotermik, uygulanabilir ve kendiliğinden olduğunu ortaya koymuşlardır. RR195 boyar maddesinin G-LPP yüzeyine bağlanmasını hidrojen bağı ve elektrostatik etkileşimler yoluyla gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Desorpsiyon verimliliği ise yüksek verimden düşük verime doğru: NaOH (%91,2) > NaCl (%69,6) > HCl (%65,2) > metanol (%58,4) > H₂SO₄ (%48,1) >

aseton (%45,5) > etanol (%39,2) > HNO₃ (%31,6) olduğunu belirlemişlerdir. G-LPP adsorpsiyon performansının beş ardışık rejenerasyon ve yeniden kullanılabilirlik döngüsünden sonra, adsorpsiyon verimliliğinin %77,3'ten daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuçlar, G-LPP'nin sulu çözeltiden RR195 boyar maddesinin uzaklaştırmak için umut verici bir adsorban olduğunu belirtmişlerdir (Munagapati vd., 2022).

3. KAVRAMSAL BİLGİLER

3.1. Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirlik, doğal kaynakların, ekosistemlerin ve üretim süreçlerinin uzun vadede devamlılığını sağlayarak günümüz ihtiyaçlarını karşılarken gelecek kuşakların kendi gereksinimlerini karşılama olanaklarını tehlikeye atmayan bir yaklaşım olarak tanımlanabilir. Doğal kaynakların sınırlı olması nedeniyle, insan ile çevre arasındaki dengenin korunması sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesini gerektirmektedir. Bu kapsamda sürdürülebilirlik, yalnızca çevresel korumayı değil, aynı zamanda gelecek nesillerin gereksinimlerinin ve refahının güvence altına alınması temel amaçlarındandır (Keeble, 1988). Diğer bir tanım ise, sürdürülebilirlik, "gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama kabiliyetlerinden ödün vermeden günümüzün ihtiyaçlarını karşılama" temeline dayanmaktadır (Perdan, 2011). Sürdürülebilirliğin özünde "mevcut olanı korumak" felsefesi yer almaktadır. Herhangi bir şeyin sürdürülebilir olması demek, belirli bir yaşam döngüsünde devamlı olması anlamına gelmektedir (Keeble, 1988). Birleşmiş Milletler'in Küresel Kalkınma Hedefleri, "Sürdürülebilir kalkınma, Yoksulluk ve açlık, Sağlık ve Eğitim, Eşitsizlik ve Cinsiyet Eşitliği, Çevresel Sürdürülebilirlik (Temiz Su ve Sanitasyon)" vb. gibi hedefler için ortaklıklar (UN, 2015), daha sürdürülebilir bir dünya ekosistemleri için detaylı bir yol haritası göstermektedir. Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Sürdürülebilir kalkınma için küresel hedefler (Bu görselin üretilmesinde Gemini (Google) 3.0 Pro yapay zekâ programı kullanıldı, 2025).

Sürdürülebilirlik bünyesinde sosyal, çevresel ve ekonomik olmak üzere üç farklı ana faktörü barındırır. Ekosistemlerin doğal yaşamlarının devamlılığı sürdürülebilirliğin ana bileşenlerinden çevresel sürdürülebilirliğinin doğal devamlılığına bağlıdır. Sonuç olarak insanoğlunun faaliyetleri sonucu ortaya çıkan toksik etkilerin ekosistemleri olumsuz etkilememesi için deşarj edilen kaynakların ve endüstriyel ya da evsel toksik çıktılarının belli bir düzeyde negatif etkileri azaltılarak doğal koşullarında kalmaları sağlanmalıdır. Endüstri ile doğal ekosistemler arasında karşılıklı faydanın birlikte olabileceği (simbiyotik ilişki) proseslerin (bertaraf olaylarının) geliştirilmesi çok önem arz etmektedir. Gerçekleştirilen bu tezin bu anlamda önemli (atık biyokütlelerden elde edilen çevre uyumlu biyosorbentlerin kullanılması ve maliyet açısından çok ucuz olmasının yanında yüksek giderim göstermesi) olduğu ifade edilebilir.

3.2. Ekosistem

Ekosistem, belirli bir alandaki canlı (biyotik) varlıklar (bitkiler, hayvanlar, mikroorganizmalar) ile bu canlıların yaşadığı cansız çevre (hava, su, toprak, güneş ışığı gibi) arasındaki karşılıklı etkileşimlerin tümü olarak ifade edilebilir. Ekosistemler, doğal ekosistemler (ormanlar, göller, okyanuslar, çayırlar vb. gibi) ve yapay ekosistemler (tarım alanları, akvaryumlar, şehir parkları vb. gibi) olarak ikiye ayrılır (Begon vd., 2006; Molles, 2019). Her bir canlı ve cansız (abiyotik) öge, ekosistemde belli bir görev üstlenir. Eğer bu denge bozulursa (örneğin, su kirliliği ya da orman tahribatı gibi), ekosistemdeki yaşam ciddi şekilde etkilenebilir.

3.2.1 Su Ekosistemi

Tatlı su (göller, nehirler, dereler) ve tuzlu su (denizler, okyanuslar) ortamlarında yaşayan canlılarla, bu canlıların etkileşimde bulunduğu cansız çevrenin (su, ışık, sıcaklık, mineraller vb.) bir bütün oluşturduğu doğal sistem su ekosistemi olarak tanımlanabilir.

Su kirliliği, su kaynaklarının (yer altı suları, nehirler, göller ve denizler vb. gibi) insan faaliyetleri veya doğal etkenler sonucu zararlı maddelerle kirlenmesi durumudur. Bu kirlilik, suyun doğal dengesini bozar ve hem çevreye hem de insan sağlığına ciddi zararlar verebilir. Su kirliliğinin başlıca sebepleri aşağıda sıralanmıştır.

1. Endüstriyel atıklar: Fabrikaların kimyasal, ağır metal ve toksik atıklarını arıtmadan suya boşaltması.
2. Tarım ilaçları ve gübreler: Pestisit ve nitrat gibi maddeler yer altı ve yüzey sularına karışabilir.

3. Evsel atıklar: Kanalizasyon sistemleri düzgün çalışmazsa evsel atıklar doğrudan suya karışır.
4. Petrol sızıntıları: Deniz taşımacılığı sırasında meydana gelen kazalar büyük alanlarda deniz kirliliğine neden olur.
5. Plastik atıklar: Su yollarına atılan plastikler uzun yıllar doğada çözünmeden kalır (Metcalf & Eddy vd., 2014; Bashir vd., 2020).

Su kaynaklarının yukarıdaki etkenlerden korunması için insanların faaliyetleri sonucu ortaya çıkan kirliliklerin su ekosistemine deşarj edilmeden önce belli bir standartta olmaları canlı hayatının devamlılığı için önem arz etmektedir. Eğer dikkat edilmezse aşağıda verilen istenmeyen durumların devamlılığına katkı sağlar.

- İçme suyu kaynaklarının azalması,
- Su canlılarının ölümü ve biyolojik çeşitliliğin yok olması,
- Tarım ve hayvancılık faaliyetlerinin zarar görmesi,
- İnsanlarda hastalıklara (kolera, tifo, hepatit vb.) neden olması,
- Ekosistem dengesinin bozulması (Metcalf & Eddy vd., 2014).

Sonuç olarak, su ekosistemlerinin sağlıklı kalabilmesi için bu kirlilik kaynaklarının azaltılması çok önemlidir.

3.2.2 Atık Su

Atık su, insan faaliyetleri sonucunda fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri değişen; kullanıldıktan sonra çevreye doğrudan verilemeyecek duruma gelen sudur. İçeriğinde çözünmüş veya askıda katı maddeler, mikroorganizmalar, toksik kimyasallar ve besin elementleri bulunur. Bu sular doğrudan alıcı ortama (dere, göl, deniz vb. gibi) deşarj edilirse ekolojik dengeyi bozar ve canlı sağlığını tehdit eder.

Atık suların kaynaklarına göre sınıflandırılması 4 başlık altında toplanabilir;

1. Evsel Atık Su (kaynağı, içeriği ve bileşenleri: Evler, ofisler, okullar, hastaneler vb. gibi, idrar, dışkı, sabun, deterjan, yağ, yemek artıkları, yüksek organik madde, azot, fosfor, patojen mikroorganizmalar),

2. Endüstriyel Atık Su (kaynağı, içeriği ve bileşenleri: Fabrikalar, üretim tesisleri, madencilik, enerji santralleri, ağır metaller (Pb, Hg, Cd), asit/baz, çözücüler, toksik organikler ve kirlilik yükü yüksektir; arıtılması daha karmaşıktır),

3. Tarım Kaynaklı Atık Su (kaynağı, içeriği ve risk: Tarımsal sulama, hayvancılık, pestisitler, gübre kalıntıları (azot, fosfor), organik madde ve yer altı suyu kirliliği, ötrofikasyon (alg patlaması)),

4. Yağmur ve Yüzey Akışı Suları (kaynağı ve içeriği: Şehir yüzeylerinden akan yağmur suyu, petrol ürünleri, ağır metaller, mikroplastikler, çöpler vb. gibi) (Metcalf & Eddy vd., 2014; Jarrar vd., 2024).

Atık sudan rengi gidermek için kullanılan arıtma prosesleri, atık suyun içeriğindeki boyar maddeleri (özellikle tekstil, kâğıt, gıda sanayilerinden kaynaklı) uzaklaştırmayı amaçlar. Renk giderimi hem estetik hem de çevresel açıdan önemlidir, çünkü bazı boyar maddeler toksik, kanserojen ve biyolojik olarak parçalanamaz yapıdadır. Atık suların arıtımında kullanılacak yöntemleri seçerken aşağıda verilen parametreler dikkate alınır;

- Atık suyun içeriği (boyar madde türü: anyonik, katyonik, azo vs.),
- Renk konsantrasyonu,
- pH, sıcaklık, iletkenlik gibi fiziksel ve kimyasal özellikler,
- Ekonomik ve çevresel faktörler,
- Hedeflenen arıtma verimi (Robinson vd., 2001; Metcalf & Eddy vd., 2014).

3.2.3. Atık Su Giderim Yöntemleri

Literatürde atık su arıtımı için çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Bu teknikler; fiziksel (adsorpsiyon, membran filtrasyon, flokülasyon ve koagülasyon), kimyasal (ileri oksidasyon ve ozonlama) ve biyolojik (enzim ve mikro organizmalar) süreçleri kapsar. Atık su arıtımı yöntemi seçiminde boyar madde konsantrasyonu, sürecin maliyeti veya atık suda bulunan ek safsızlıklar gibi çeşitli faktörler dikkate alınır (Wawrzkievicz vd., 2019; Rashid vd., 2021). Her arıtma yönteminin ayırt edici özellikleri bir şekilde faydalı olabilir olmasına rağmen başka bir nedenle de sınırlı olabilir. Yüksek kurulum ve işletme maliyetleri, artan işleme süresi, düşük çıktı gerektiren ve arıtmadan sonra toksik yan ürünler üreten arıtma teknikleri genellikle endüstriyel uygulamalar için daha az önemlidir (Wong vd., 2019). Bu nedenle, kirleticileri tamamen parçalayabilen veya bertaraf edebilen alternatif bir arıtma yöntemi (süreci) bulmak

sürdürülebilir ekoloji için hayati önem taşımaktadır (Yahya vd., 2018). Fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemlerine ait avantaj ve dezavantajlar Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Renk giderim yöntemlerinin karşılaştırılması (Yahya vd., 2018; Wawrzkievicz vd., 2019; Rashid vd., 2021; Wong vd., 2019).

Yöntem	Avantajları	Dezavantajları
Adsorpsiyon (Aktif karbon, biyokütle, biyosorbent)	- Yüksek renk giderim verimi - Kolay uygulanabilir - Geniş yelpazede kirletici tutar	- Adsorban yenilenmesi gerekebilir - Doygunluk sonrası verim düşer
Koagülasyon/Flokülasyon	- Ucuz kimyasallar - Basit ekipman - Orta-yüksek renk giderimi sağlar	- Çamur oluşumu fazladır - Kimyasal kullanımı çevresel risk yaratabilir
Membran Filtrasyonu (UF (ultrafiltrasyon), NF (nanofiltrasyon), RO (ters osmoz))	- Yüksek arıtım verimi - Renkle birlikte diğer kirleticileri de giderir	- Yüksek maliyet - Membran tıkanması - Enerji ihtiyacı fazla
Ozonlama	- Boyar maddeleri tamamen parçalayabilir - Kalıntı bırakmaz	- Yüksek maliyet - Tam mineralizasyon sağlamaz - Kısa ömürlü ve reaktif gaz
Fenton Reaksiyonu	- Güçlü oksidasyon sağlar - Etkili renk giderimi	- Demir çamuru oluşur - pH hassasiyeti vardır - İşletme maliyeti orta
İleri Oksidasyon Prosesleri (UV/H ₂ O ₂ , O ₃ /UV)	- Yüksek verim - Toksik olmayan son ürünler - Az atık üretimi	- Ekipman ve enerji maliyeti yüksek - Karmaşık işletim
Biyolojik Arıtma	- Ucuz ve çevre dostudur - Çamur oluşumu az	- Renkli boyar maddelerin çoğu biyolojik olarak parçalanamaz - Yavaş süreç
Biyosorpsiyon (Mikroorganizmalar, mantarlar)	- Düşük maliyetli adsorban kullanımı - Yenilenebilir kaynaklıdır	- Kararsız performans - Rejenerasyon zordur - Geniş çapta uygulanabilirliği sınırlı

3.2.3.1. Biyosorpsiyon ve Biyosorbent

Biyosorpsiyon, adsorptif ortam olarak biyolojik bir malzeme kullanarak atık sudan organik/inorganik kirleticileri (metaller, boyar maddeler, fenolik bileşikler, ilaçlar, pestisitler ve polisiklik aromatik hidrokarbonlar gibi) uzaklaştıran bir işlemdir. Mikroorganizmalar ve bileşenleri, yabani otlar, otlar, endüstriyel atıklar, tarımsal atıklar ve doğal atıklar gibi bu emici ortamlar “biyoadsorbanlar” ya da “biyosorbentler” olarak bilinir. Biyosorpsiyon tekniği, biyosorbentin yüzey alanı, biyosorbent miktarı, pH, sıcaklık, temas süresi gibi faktörlere bağlı olarak kullanılan verimli bir atık su arıtma teknolojisidir (Rana vd., 2025).

Biyolojik matrisin aktif bir bağlanma noktası olarak hareket ettiği biyosorbentler (Bhattacharjee vd., 2020; Osman vd., 2023; Raji vd., 2023), tipik olarak üç kaynaktan elde edilir: (i) Karides kabukları, balık pulları, krill, lignin ve kalamar, yapraklar, patates kabukları (El-Azazy vd., 2019), tohum kabukları (Maina vd., 2016), kahve kabukları (Thi Quyen vd., 2021), elma kabukları (Singh vd., 2019) turuncgil kabukları (Šabanović vd., 2020), gibi hayvansal ve bitkisel kaynaklı cansız biyokütleler; (ii) mikro ve makro algler (Khan vd., 2023) ve (iii) bakteri, mantar ve maya gibi canlı veya ölü mikrobiyal kökenli biyokütleler (Burakov vd., 2018; Kumar vd., 2021). Ayrıca, mısır koçanı, arpa samanı (Pilatin ve Kunduhoğlu, 2018), soya fasulyesi yaprakları (Mahanna ve Samy, 2020), sarıçam (Aksakala ve Uzun, 2010), yer fıstığı kabuğu (Tanyıldız, 2011) veya bitki kaynaklı tarımsal atıklar vb. ucuz, kolay elde edilmeleri, çevre dostu olmaları nedeniyle tekstil boyar maddelerinin sulu ortamdan uzaklaştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

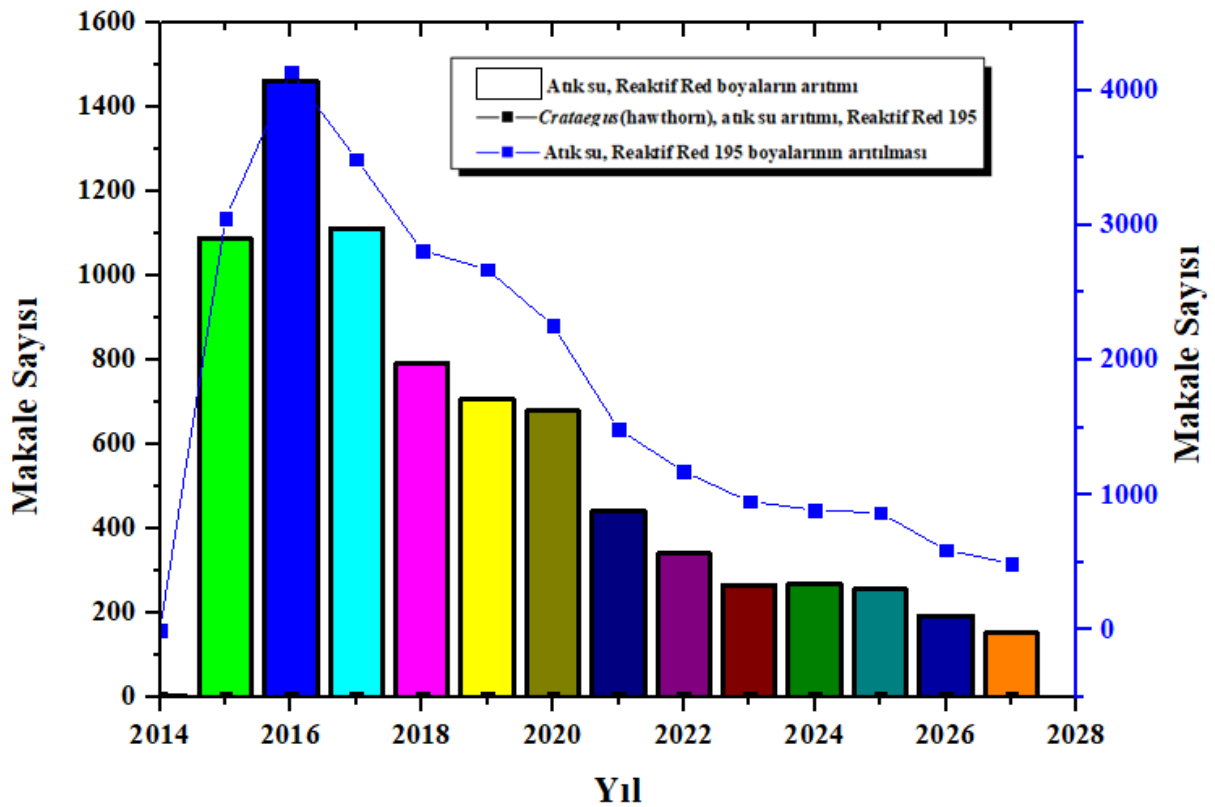
***Crataegus* (*Crataegus species* (hawthorn; alıç)) Adsorbenti**

Alıç (*Crataegus Spp.*), Rosaceae ailesine aittir (Yao vd., 2008). *Crataegus* türleri (alıç) Avrupa, Doğu Asya ve Doğu Kuzey Amerika, Kuzey Afrika gibi kuzeydeki ılıman bölgelerde yetişir (Yao vd., 2008; Chang vd., 2005; Kumar vd., 2012). *Crataegus*'un Türkiye'de 21 çeşit türünün olduğu kaydedilmiştir (Sözer vd., 2006). *Crataegus* bitkisinin yaprak, çiçek ve meyve kısımları eski çağlardan beri halk hekimliğinde kullanılmaktadır (Chang vd., 2005; Kumar vd., 2012). Genellikle yaprakları ve çiçekleri çay olarak tüketilmesine rağmen, *Crataegus* meyveleri daha çok yaş olarak tüketilmektedir (tercih edilmektedir) (Kostić vd., 2012; Zhang vd., 2020). Ayrıca meyvelerinden yapılan sirke ve reçeller ticari ürün olarak bir pazara sahiptir. *Crataegus* meyveleri polifenoller, flavonoidler, vitaminler, organik asitler, tanenler ve diğer fitokimyasalların zengin kaynaklarıdır (Alirezalu vd., 2020; Edwards vd., 2012). Alıç meyvesi özleri, anti-inflamatuar, kardiyoprotektif (Ljubuncic vd., 2005; Kumar vd., 2012),

gastroprotektif, antimikrobiyal, immünoestimulan, hipoglisemik ve sitotoksik özellikler dahil olmak üzere çeşitli farmakolojik aktiviteler sergiler (Kumar vd., 2012; Hatipoğlu vd., 2015).

2015-2027 yılları arasında üç farklı anahtar kelime (1. Atık su, Reaktif Red boyalarının arıtımı, 2. Atık su, RR 195 boyar maddelerinin arıtılması, 3. *Crataegus* (hawthorn), atık su arıtımı, RR 195) grubuyla yapılan literatür incelemesi sonucunda elde edilen araştırmaların (makalelerin) yıllara göre dağılımları Şekil 3.2’de verilmiştir. *Crataegus* (*Crataegus species* (hawthorn; alıç) biyokütlesi ile RR195 boyar maddesinin atık sulardan arıtılmasına yönelik bir çalışma ile karşılaşılmamıştır. Literatürdeki çalışmaların çoğunun *Crataegus* (*Crataegus species* (hawthorn)) biyokütlesinin sahip olduğu özellikler nedeniyle birçoğunun tıp alanında olduğu söylenebilmektedir.

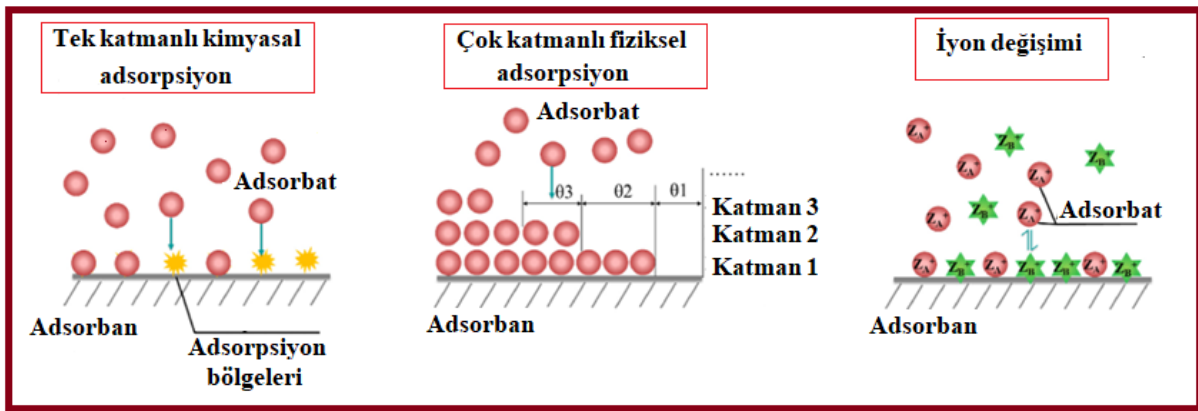
Gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında biyosorbent olarak ticari olarak temin edilebilen ve atık olarak da doğada da bulunabilen *Crataegus* (*Crataegus species* (hawthorn)) meyvesi kullanılmıştır.



Şekil 3.2. 2015-2027 yılları arasında yukarıda verilen anahtar kelimeleri içeren yayınlanmış makale verileri (Erişim tarihi: 11.06.2026).

3.2.3.2. Adsorpsiyon

Adsorpsiyonun temeli (mekanizması) taneciklerin bir yüzeye tutunması olarak ifade edilebilir. Adsorplanan maddeye adsorbat, absorbanтта destek olan alttaki katı kısma adsorban ya da substrat adı verilir. Diğer taraftan adsorpsiyon olayının tersi desorpsiyon olarak tanımlanır (Atkins, 2001). Diğer bir tanım ise akışkan fazda bulunan moleküllerin bir katı yüzeyine transferiyle oluşan ayırma sürecidir (yani moleküllerin, yüzeyine transfer olduğu maddeye adsorbent, yüzeye transfer olarak biriken maddeye adsorbat denir). Adsorpsiyon temelde üçe ayrılır. Bunlar; fiziksel, kimyasal ve iyoniktir (Cebeci, 2014; Wang ve Guo, 2020). Olası adsorpsiyon mekanizmaları Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Olası adsorpsiyon mekanizmaları (Wang ve Guo 2020).

Adsorplanan madde kapasitesi (miktarı), adsorpsiyon işlemi öncesinde ve sonrasında çözeltide bulunan adsorbat derişimleri arasındaki fark esas alınarak hesaplanmaktadır. Adsorbat derişiminin tayininde, adsorbatın özelliklerine bağlı olarak spektroskopik yöntemler, yüzey gerilimi ölçümleri, iletkenlik ölçümleri ve diğer uygun analitik yöntemlerden yararlanılmaktadır (Myers, 1999). Giderim (%) ve denge adsorpsiyon kapasitesi (q_e) değerlerinin hesaplanmasında kullanılan eşitlikler F.1 ve F.2'de verilmiştir (Myers, 1999).

$$Giderim(\%) = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} * 100 \quad (F.1)$$

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)}{M} * V \quad (F.2)$$

C_o : Başlangıç konsantrasyonu (mg/L)

C_e : Denge konsantrasyonu (mg/L)

M : Adsorban kütlesi (g)

V : Çözelti hacmi (L)

qe: Denge adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)

Moleküllerin UV (mor ötesi) veya görünür alandaki (Şekil 3.4) absorpsiyonlarının ölçülmesine dayanan spektrofotometrik metotta, konsantrasyonu hesaplamak için Lambert Beer Yasası (F.3) eşitliği kullanılır (Atkins, 2001).

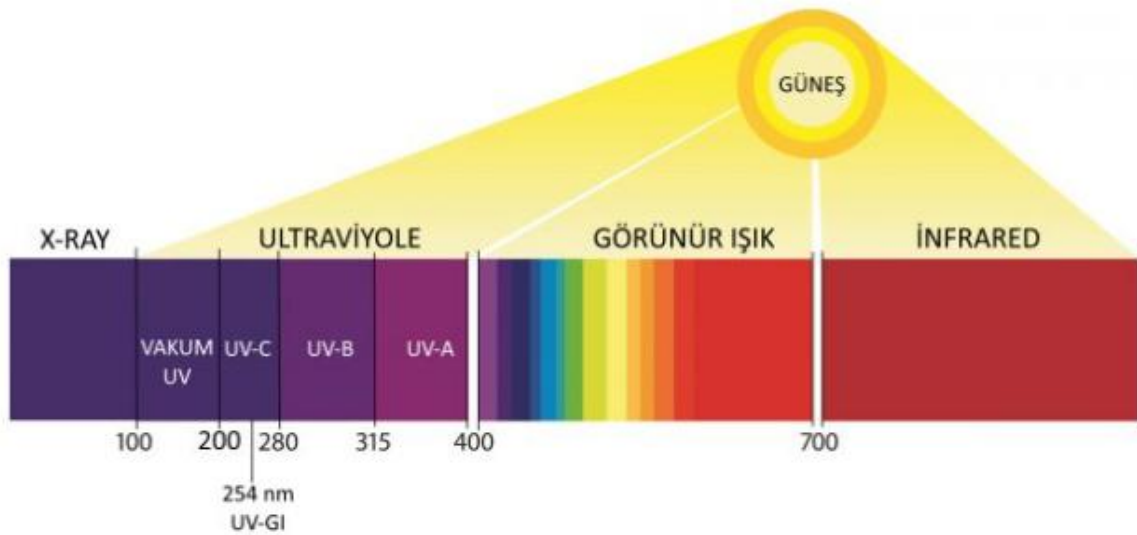
$$A = \varepsilon \cdot b \cdot c \quad (F.3)$$

A: Absorbans

ε : Absorptivite

b: İç hücre yoğunluğu

c: Absorplanan bileşenin konsantrasyonu olarak ifade edilir (Sarkar vd., 2010).



Şekil 3.4. Işığın dalga boyu spektrumları (Google [Erişim: 18.07.2026, <https://labakademi.com/ultraviyole-teknolojisi-ve-sterilizasyonda-kullanimi/>]).

Fiziksel Adsorpsiyon

Moleküller ve atomlar yüzeylere iki farklı yolla tutunabilirler (Şekil 3.2). Fiziksel adsorpsiyon (fizisorpsiyon), adsorplanan maddeyle adsorban yüzeyi arasında Van der Waals kuvvetleri (dispersiyon, dipol-dipol ve benzeri zayıf moleküller arası etkileşimler) aracılığıyla oluşan adsorpsiyon çeşididir. Bu etkileşimler nispeten uzun menzilli olmasına rağmen oldukça zayıftır. Fiziksel adsorpsiyon sırasında açığa çıkan enerji, sıvılaşma (yoğunlaşma) entalpisiyle aynı mertebede olup düşük düzeydedir. Açığa çıkan bu enerji, katı yapıda örgü titreşimleri şeklinde soğurulur ve termal hareket olarak çevreye dağıtılır.

Yüzeye çarparak hareket eden bir molekül, her çarpışmada kinetik enerjisinin bir kısmını kaybeder ve yeterli enerji kaybına ulaştığında "tutunma" olarak adlandırılan süreç sonucunda yüzeye bağlanır. Fiziksel adsorpsiyon sırasında açığa çıkan adsorpsiyon entalpisi, ısı sığası bilinen bir numunenin sıcaklığındaki değişim ölçülerek belirlenebilir ve bu değer genellikle yaklaşık 20 kJ/mol düzeyindedir. Fizisorpsiyonun düşük entalpi değerine sahip olması nedeniyle, oluşan enerji bağların kopmasına neden olacak kadar yüksek değildir. Bu nedenle, adsorplanan molekül yüzeyin etkisiyle kısmen şekil değişikliğine uğrasa bile fiziksel olarak adsorplanmış bir molekül kimliğini büyük ölçüde korumaktadır (Atkins, 2001).

Kemisorpsiyon

Kimyasal adsorpsiyon (kemisorpsiyon), adsorbat ile adsorban yüzeyi arasında çoğunlukla kovalent karakter taşıyan güçlü kimyasal bağların oluşmasıyla gerçekleşen bir adsorpsiyon çeşididir. Bu süreçte adsorplanan atom veya moleküller, yüzey üzerinde koordinasyon sayılarını en üst düzeye çıkarabilecek uygun aktif bölgelere bağlanma eğilimi gösterir. Kemisorpsiyon sırasında açığa çıkan adsorpsiyon entalpisi, fizisorpsiyona kıyasla oldukça yüksek olup genellikle yaklaşık 200 kJ/mol mertebesindedir. Ayrıca, adsorplanan türle yüzey arasındaki bağlanma mesafesi fiziksel adsorpsiyona göre daha kısadır. Kemisorpsiyon sürecinde adsorplanan moleküller, yüzey atomlarının doymamış değerliklerini gidermek amacıyla ayrışabilir ve yüzey üzerinde farklı kimyasal türler oluşturabilir. Yüzeyde meydana gelen bu kimyasal dönüşümler, katı yüzeylerin birçok kimyasal reaksiyonda katalitik özellik göstermesinin temel sebeplerinden biri olarak kabul edilmektedir (Atkins, 2001).

İyonik Adsorpsiyon

İyonik adsorpsiyonda, iyonlar elektrostatik çekim kuvvetlerinin etkisiyle yüzeyde bulunan yüklü bölgelere tutunmaktadır. Bu adsorpsiyon türünde, adsorplayan ve adsorplanan türlerin iyonik özellikleri önem taşımaktadır. İyonların eş yüklü olması durumunda, daha küçük olan iyon öncelikli olarak yüzeye tutunmaktadır. Çoğu adsorpsiyon olayında ise yukarıda belirtilen üç adsorpsiyon türü birlikte veya birbirini takip edecek şekilde gerçekleşmektedir (Bağcı, 2012). Adsorpsiyon sürecinde, adsorbatın moleküler yapısı ve çözünürlük özellikleri mekanizmayı belirleyen temel etkenler arasındadır. Örneğin, hidrofilik özellik gösteren ve suda kolaylıkla çözünebilen boyar maddelerin aktif karbon gibi karbon esaslı adsorbanlar tarafından düşük oranda tutulmasının temel nedeni, boyar maddelerin polar karakterde olmasına karşılık karbon yüzeyinin apolar özellik göstermesidir. Bunun yanı sıra, adsorpsiyonla gerçekleştirilen renk giderim verimi; boyar madde ile sorbent arasındaki etkileşimler, sorbentin özgül yüzey

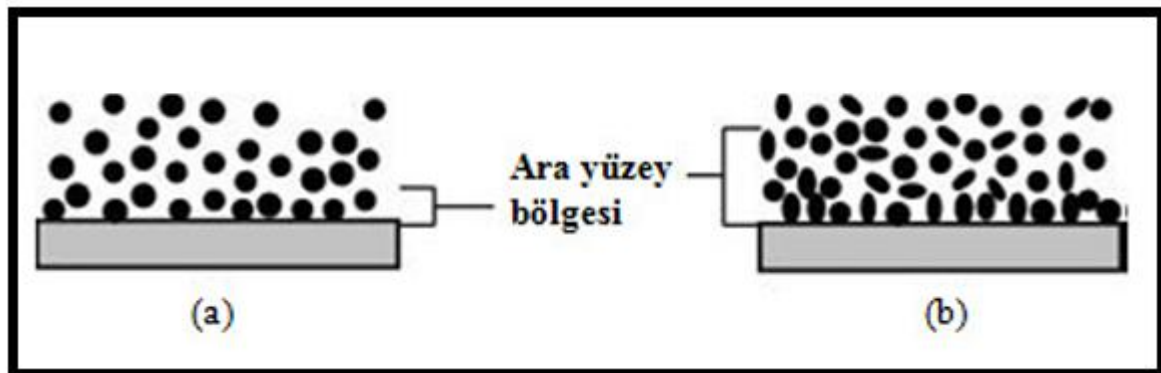
alanı, partikül boyutu, ortam sıcaklığı, çözelti pH'ı ve temas süresi gibi çeşitli fizikokimyasal parametrelerden etkilenmektedir. Yapılan çalışmalarda, düşük molekül ağırlığına sahip asidik ve reaktif boyar maddelerin adsorpsiyon eğilimlerinin düşük olduğu, buna karşın yüksek molekül ağırlıklı bazik ve direkt boyar maddelerin daha yüksek adsorpsiyon kapasitesi gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, hidrofobik karaktere sahip reaktif boyar maddelerin adsorpsiyon davranışının orta ile yüksek düzey arasında değiştiği bildirilmektedir (Cebeci, 2014).

Katı-Sıvı Ara Yüzeyinde Adsorpsiyon

Katı yüzeylerle çözeltiler arasındaki etkileşimler, birçok bilimsel ve endüstriyel alanda önemli bir yere sahiptir. Bu etkileşimler biyolojik sistemlerde eklem sıvısının kayganlığı, eklem hareketleri ve implantların biyoyumluluğu gibi süreçlerde kritik rol oynarken; mekanik uygulamalarda yağlama ve yapışma olaylarını etkilemektedir. Tarım alanında toprakların nemlendirilmesi, havalandırılması ve pestisitlerin uygulanmasında, iletişim ve baskı teknolojilerinde mürekkeple pigment dispersiyonlarının hazırlanmasında, elektronik sektöründe mikro devre üretiminde ve enerji sektöründe ikincil ve üçüncül petrol geri kazanım yöntemlerinde de önemli işlevlere sahiptir. Ayrıca, gıda endüstrisinde nişasta-su etkileşimleri, boya sanayisinde lateks polimer ve pigment dispersiyonlarının kararlılığının sağlanması, deterjanların temizleme performansının artırılmasıyla içme ve atık suların arıtılması gibi birçok uygulamada bu etkileşimlerden yararlanılmaktadır (Myers, 1999; Rouquerol vd., 1999).

Katı-sıvı ara yüzeyinde meydana gelen adsorpsiyon modeli

Katı-sıvı ara yüzeyinde moleküllerin adsorpsiyonu, sistemin bileşiminin moleküler boyutlar derecesinde katıdan sıvıya doğru değiştiği bir geçiş bölgesi meydana getirir (Myers, 1999).



Şekil 3.5. Katı-sıvı ara yüzeyinde adsorpsiyonun şematik gösterimi (Myers, 1999).

Saf bir sıvıda (Şekil 3.5a), ara yüzey bölgesindeki sıvı moleküllerinin derişimi, sıvının hacim fazına kıyasla daha yüksektir. Bu durum, pozitif adsorpsiyon olarak adlandırılmakta ve katı yüzeyin çözücü molekülleri tarafından solvasyona uğradığını göstermektedir. Sıvı molekülleri ile katı yüzeyi arasında özgül etkileşimlerin meydana gelmesi durumunda ise adsorplanan moleküller belirli bir doğrultuda yönlenebilir. Bunun sonucunda, ara yüzeye yakın bölgede bulunan sıvının yoğunluğu, dielektrik sabiti ve diğer fiziksel, hatta bazı durumlarda kimyasal özelliklerinde değişiklikler gözlenebilir. Katalitik süreçler gibi özel uygulamalar dışında bu değişimlerin pratik önemi sınırlıdır. Buna karşılık, uygulamalarda daha fazla önem taşıyan durum, çözelti içerisinde bulunan çözünmüş maddelerin katı-çözelti ara yüzeyinde adsorplanmasıdır. Çözelti sistemlerinde (Şekil 3.5b), çözünmüş madde moleküllerinin ara yüzey yakınındaki derişiminin hacim fazına göre daha yüksek olması, söz konusu bileşenin pozitif adsorpsiyona uğradığını ifade etmektedir (Myers, 1999).

Katı-sıvı ara yüzeylerinde, miktarı oldukça düşük olsa bile belirli düzeyde adsorpsiyon meydana gelmektedir. Bazı istisnai durumlarda ise negatif adsorpsiyon gözlenebilmekte olup, bu durumda çözünmüş bileşenin ara yüzey yakınındaki derişimi, sıvının hacim fazındaki derişiminden daha düşük olmaktadır. Bununla birlikte, uygulamalar açısından daha fazla önem taşıyan sistemler, sıvı fazdaki bir veya birden fazla bileşenin ara yüzeyde güçlü ve pozitif adsorpsiyon gösterdiği durumlardır. Bu tür adsorpsiyon olayları, katı-sıvı ara yüzey özelliklerinin istenilen doğrultuda değiştirilmesine olanak sağlaması nedeniyle birçok bilimsel ve endüstriyel uygulamada önemli bir yere sahiptir (Myers, 1999).

Bir molekülün çözültiden katı yüzeyine adsorplanması incelendiğinde, nitel (kalitatif) ve nicel (kantitatif) açıdan değerlendirilmesi gereken çeşitli parametreler bulunmaktadır. Bunlar arasında; (1) katının birim kütlesi veya birim yüzey alanı başına adsorplanan madde miktarı, (2) belirli bir adsorpsiyon derecesi ya da yüzey kaplanma oranına ulaşılması için gerekli adsorbat derişimi, (3) yüzeyin doygunluğa ulaştığı adsorbat derişimi ile adsorplanan moleküllerin yüzeye ve çözelti fazına göre yönelme biçimi ve (4) adsorpsiyonun, katının özellikleri ile sistemin diğer bileşenleri üzerindeki etkileri yer almaktadır (Myers, 1999).

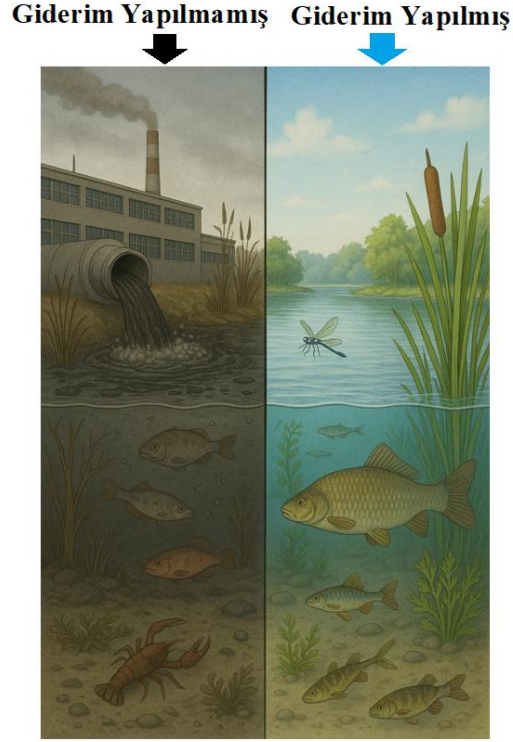
3.3. Boyar Madde

Boyar maddeler çoğunlukla iki ana bileşenden (kromofor ve oksokrom) meydana gelen küçük moleküllerdir: Yani rengi veren kromofor ve boyar maddeyi ipliğe bağlayan fonksiyonel gruptan oluşur. Literatürde kimyasal yapısına göre ya da uygulandığı ipliğin çeşidine göre sınıflandırılmış yüzlerce tür boyar madde bulunmaktadır. Boyar maddenin iplik üzerine adsorbe

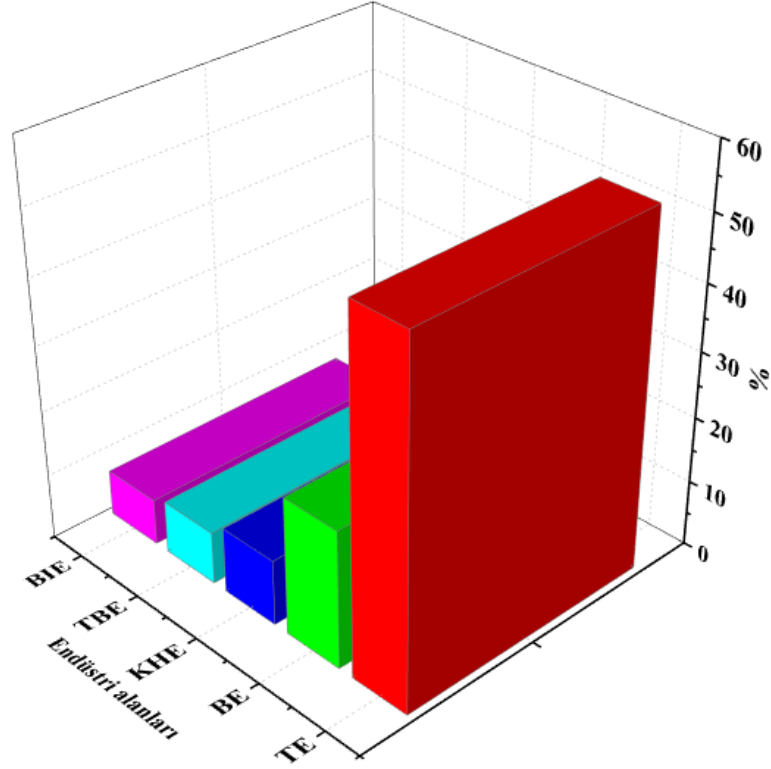
olması tekstil ipliğine ve boyar maddenin çeşidine bağlı olarak farklılık vardır. Adsorbsiyonun derecesi zaman, Ph, sıcaklık ve yardımcı kimyasallar gibi farklı parametrelerden etkilenir (Kocaer ve Alkan 2002). Renkten sorumlu olan gruplar yani moleküle renklilik veren karboksil, sülfonat, hidroksil, amin gibi yardımcı ve kinoid, nitro ($-N=O$), azo ($-N=N-$), karbonil ($-C=O$) gibi yapılardır (Waring ve Hallas, 2013). Antrakinon ve azo gruplar en önemli kromoforlardır. Tekstil atık sularındaki kirliliğin ana nedenidir (Holkar vd., 2016). Diğer taraftan oksokromlar, boya molekülünün afinitesi ve suda çözünürlük gibi özellikleri etkileyen ve kromoforlara destek olan yardımcı gruplardır (Pokhrel ve Viraraghavan, 2004; Adegoke ve Bello, 2015).

3.3.1. Tekstil Boyar Maddeleri

Tekstil fabrikalarından deşarj edilen atık sular, metaller ve diğer kirleticilerin bir karışımıdır. Renklendiriciler doğal ve sentetik boyalar olarak ikiye ayrılabilir. Sentetik boyalar kolayca üretilir, farklı renklere sahiptir ve doğal boyalardan daha yaygın olarak kullanılmalarını sağlayan özellikleriyle karakterize edilirler (Khehra vd., 2006; Yaseen ve Scholz, 2019). Sentetik boyalar kimyasal yapılarına (örn. azo, antrakinon, kükürt, ftalosiyenin ve triarilmetan) ve uygulama biçimlerine (örn. reaktif, doğrudan, dispers, bazik ve küvet boyama) göre farklı gruplara ayrılır (Popli ve Patel, 2015). Tekstil boyar maddesinin tekstil endüstrisinde kullanımı, tekstil atık sularının deşarj edilmeden giderimsiz/giderimli süreçlerin olumlu ve olumsuz etkileri Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Tekstil boyar maddesinin tekstil endüstrisinde kullanımı, tekstil atık sularının deşarj edilmeden giderimsiz/giderimli süreçlerin olumlu ve olumsuz etkileri (Bu görselin üretilmesinde Gemini (Google) 3.0 Pro yapay zekâ programı kullanıldı, 2025).



Şekil 3.7. Ekosisteme boyar madde salınımı yapan major endüstrileri (TE; tekstil endüstrisi, BE; boya endüstrisi, KHE; kâğıt ve hamur endüstrisi, TBE; tabakhane ve boya endüstrisi, BİE; boya imalatı endüstrisi).

Tekstil, deri, ilaç ve kâğıt endüstrilerinden salınan atık sular çeşitli tipte boyar maddeler içerir ve biyolojik dirençleri nedeniyle önemli bir biyo-çevresel endişe oluşturmaktadır (Mengelizadeh vd., 2019). Reaktif boyar maddeler ticari boya kullanımının %20-30'unu oluşturur ve çoğunluğu tekstil endüstrisinde kullanılır. Reaktif boyar maddeler sülfatlanmış gruplar içerir ve hidrofilik özelliklere sahiptir; yüksek moleküler ağırlığa sahiptir ve aromatik zincirler içerir (Song vd., 2007; Rashtbari vd., 2025). Reaktif boyar maddelerle ilgili önemli bir biyo-çevresel sorun, boyama işlemi sırasında renk kaybıdır. Kumaş boyama için kullanılan reaktif boyar maddelerin yaklaşık %20-50'si boyama ünitelerinin atık sularına sınırsız bir biçimde salınır. Dahası, reaktif boyar maddeler hidrofilik olduğundan yaygın biyolojik ayrışma yöntemlerinde biyokütleler tarafından emilme eğilimleri düşüktür (Belessi vd., 2009; Rashtbari vd., 2025). Epidemiyolojik çalışmalar, benzidin bazlı boyar maddelerin kullanımının mesane kanserine ve böbrekleri, üreme sistemini, karaciğeri ve beyni etkileyen ciddi rahatsızlıklara, ayrıca dermatit ve alerjilere neden olabileceğini göstermektedir (Golka vd., 2004; Jahani vd., 2023). Bu nedenle, boyar maddelerin atık sudan uzaklaştırmak sürdürülebilir ekoloji ve canlı yaşamı için çok önemlidir. Ekosistemlere major boyutta boyar madde salınımı yapan endüstri sektörlerine ait veriler Şekil 3.7'de verilmiştir. Ekosistemlere, %54 ile (Kumari vd., 2024) en yüksek salınım yapan endüstriyel sektör tekstil endüstrisidir. Diğer major endüstriler ise; boya endüstrisi (%21), kâğıt ve hamur endüstrisi (%10), tabakhane ve boya endüstrisi (%8) ve boya imalatı endüstrisi (%7) (Kumari vd., 2024).

3.3.1.1. Reaktif Boyar Maddeler

Reaktif boyar maddeler, ticari olarak ilk kez 1956 yılında 'Investment Company Institute' tarafından piyasaya sürülmüştür. Reaktif boyar maddeler yapısal olarak azo bazlı kromofor grupların, değişik reaktivlik değerleri barındıran, vinil sülfon, klorotriazin, trikloropirimidin ve diflorokloropirimidin gibi yapılarla birleştirilmesinden oluşur (Hunger, 2003; Won vd., 2008). Sahip olduğu elektrofilik yapılar yardımıyla, selülozik malzemenin yapısında yer alan nükleofilik özellikteki hidroksil gruplarıyla bağ yapabilme yeteneği kazandıran reaktif özelliğinden dolayı, reaktif boyar madde olarak adlandırılırlar (Burkinshaw ve Salihu, 2019).

En fazla kullanıma sahip grupların çoktan aza doğru sıralanmış hali:

- Trikloropirimidin,
- Aminokloro-s-triazin,
- Sülfosetilsülfon,
- Diklorokinoksalin,

- Aminofloro-s-triazin,
- Ddiflorokloropirimid,
- Diklorotriazin (Khatri vd., 2015).

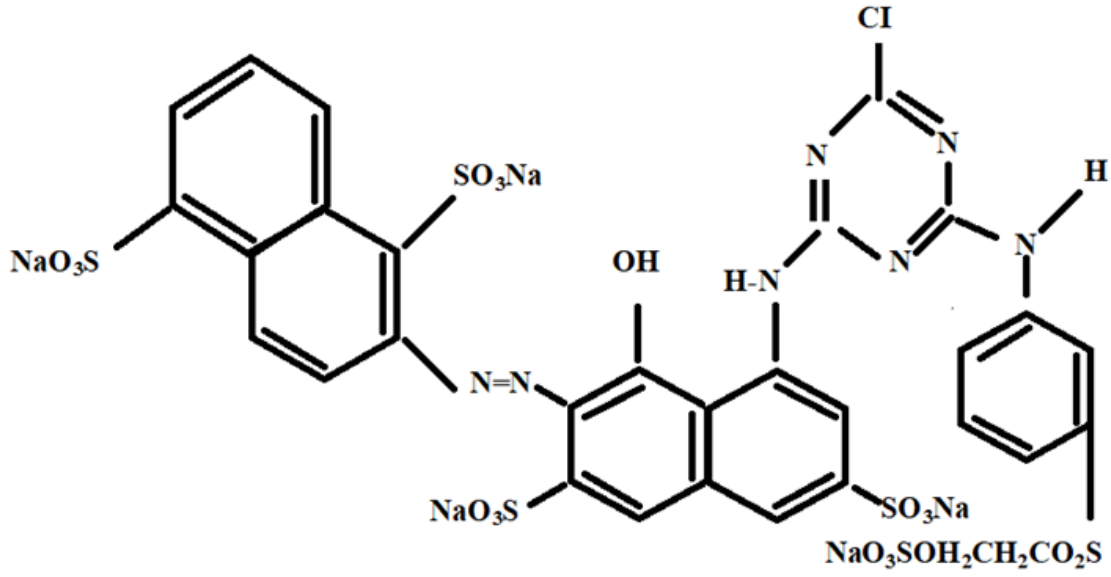
Reaktif boyar maddelerin en önemli özelliği, boyama işlemi sırasında selülozik maddeyle kovalent bağ yapabilen boyar madde sınıfında yer almasıdır. Ayrıca, farklı boyama yöntemleri ile kullanılabilme, alkali pH ortamında yüksek haslığı, çözünürlük oranına ve görünür bölgedeki tüm spektrumları verme özelliğine sahiptir. Reaktif boyar madde molekülünün sahip olduğu spesifik fonksiyonel yapıların, tekstil liflerinin içerisinde yer alan –OH, –SH ve –NH₂ yapılarıyla etkileşiminden dolayıdır (Hunger, 2003). Diğer taraftan, kolay nüfuz olma, boyama işlemlerinin daha parlak sonuçlanması, daha basit kimyasal özellik ve adsorpsiyon spektrumlarının dar bir bant aralıkta gözlenmesi vb. gibi önemli avantajlar barındırırlar (Hunger, 2003). Dahası Sahip oldukları bu avantajlar, reaktif boyar maddelerin gün geçtikçe artan öneme sahip olmalarına neden olmaktadır. Ticari olarak ilk üretimlerinden günümüze, dünya genelinde kullanımlarının devamlı yükselmesi nedeniyle, diğer beş boyar madde çeşidinin kullanımda düşüşler gözlenmiştir. Dünya genelinde ilk sırada %10-50 kullanım oranıyla reaktif boyar maddeler gelmektedir. Reaktif boyar maddeleri, %10-40 kullanım oranıyla sülfür, %5-30 kullanım oranıyla direk, %5-20 kullanım oranıyla asit, daha sonra %0-10 kullanım disperse boyar maddeler ve son olarak %0-5 kullanım oranıyla bazik boyar maddeler gelmektedir (Sharma vd., 2021).

Reaktif Red 195

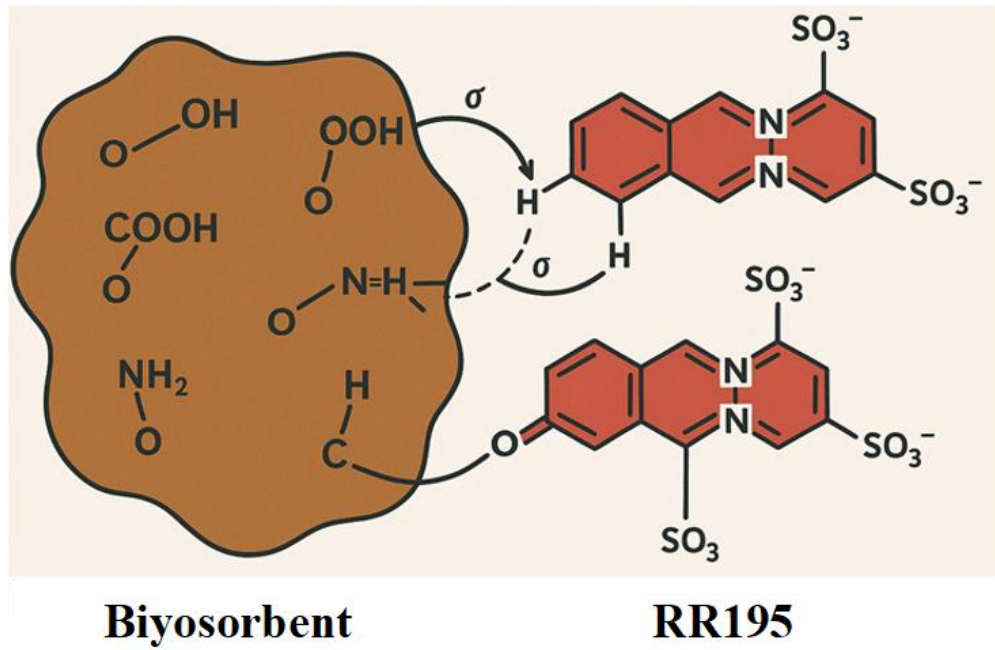
RR195, monoazo, monoklorin, triazen, çoklu sülfonlanmış, bi-naftil yüksek molekül ağırlıklı bir azo boyasıdır (Khan vd., 2014). RR195'in moleküler yapısı (Şekil 3.8), aromatik halkaları birleştiren karakteristik azo grubunu (–N=N–) içerir. Bu grup, kırmızı renginden sorumlu kromofordur (Hosseini vd., 2026). Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tezi kapsamında kullanılan RR195 boyar maddesine ait özellikler Tablo 3.2'de verilmiştir. Ayrıca, Olası biyosorbent ve RR195 boyar maddesinin etkileşim mekanizması Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

Tablo 3.2. RR195 boyar maddesinin özellikleri (Google [Erişim: 18.07.2026, <https://www.scribd.com/document/318117087/Reactive-Red-195>]).

Sınıfı	Reaktif
Ticari ve genel ismi	Synozol Red HF-6BN 150% C.I. Reactive Red 195
Molekül formülü	C ₃₁ H ₁₉ ClN ₇ Na ₅ O ₁₉ S ₆
Molekül ağırlık	1136,3 (g/mol)
λ _{max} (nm)	520-542



Şekil 3.8. RR195'in moleküler yapısı.

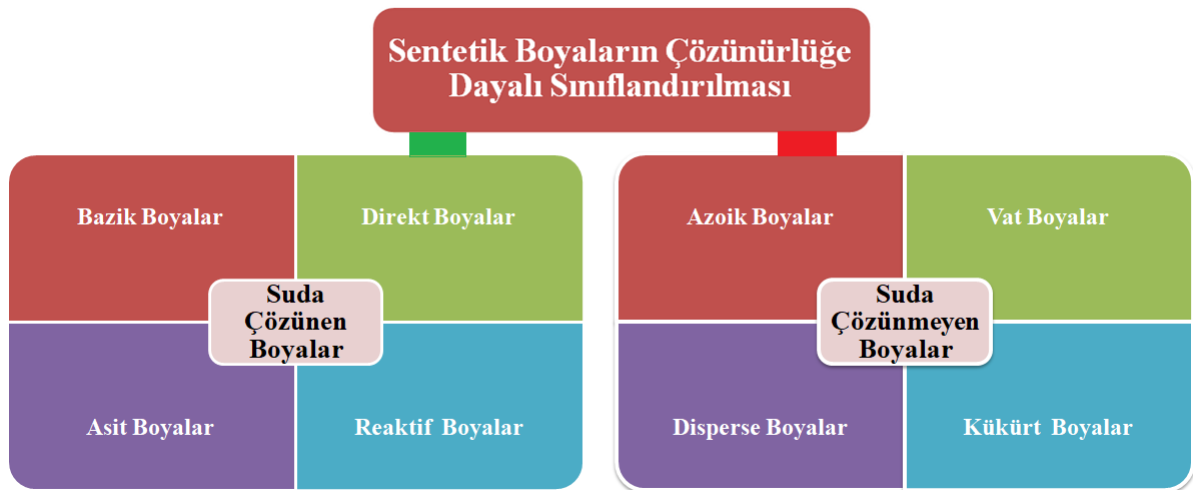


Şekil 3.9. Olası biyosorbent ve RR195 boyar maddesinin etkileşim mekanizması (Bu görselin üretilmesinde Gemini (Google) 3.0 Pro yapay zekâ programı kullanıldı, 2025).

3.3.2. Tekstil Endüstrisi Atık Suları

Tekstil, deri ve boya sanayisi başta olmak üzere birçok endüstriyel faaliyetten kaynaklanan atık sular, potansiyel kanserojen özellik taşıyan tehlikeli ve toksik bileşenler içermektedir. Özellikle oluşan atık su miktarı ve içerdiği kirleticilerin çeşitliliği dikkate alındığında, tekstil endüstrisi kaynaklı atık suların diğer birçok endüstriyel sektöre kıyasla çevre

üzerinde daha yüksek kirletici etkiye sahip olduğu bilinmektedir (Vandervivere vd., 1998). Tekstil atık suları çoğunlukla yüksek pH ve renk içeriği, düşük biyolojik parçalanabilirlik gibi özellikleriyle kirli atık sular arasında yer alır (Lin ve Chen, 1997). Tekstil ürün yelpazesinin sürekli genişlemesi ve buna bağlı olarak farklı kimyasal özelliklere sahip çok sayıda boyar maddenin üretim süreçlerinde kullanılması, tekstil endüstrisinden kaynaklanan atık suların arıtımını daha karmaşık ve güç bir hâle getirmektedir (O'Neill vd., 1999). Tekstil endüstrisi atık suları, geniş bir pH aralığına sahip olmaları nedeniyle pH değişimlerine karşı duyarlılığı yüksek olan geleneksel biyolojik ve kimyasal arıtma sistemlerinde çeşitli işletme güçlüklerine yol açabilmektedir. Bunun yanı sıra, yüksek renk yoğunluğu ile çözünmüş maddelerin birlikte bulunması, suyun bulanıklığının artmasına neden olmakta ve arıtma performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Vandervivere vd., 1998). Tekstil endüstrisinden kaynaklanan atık sular; yüksek renk yoğunluğu, çözünmüş katı madde içeriği, yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve geniş pH aralığı gibi özellikleriyle karakterize edilmektedir. Üretim sürecinde gerçekleştirilen haşıl sökme, pişirme, ağartma, nötralizasyon, boyama, baskı ve yıkama gibi işlemlerde önemli miktarda su tüketilmesi, oluşan atık su hacminin oldukça yüksek olmasına neden olmaktadır (Bağcı, 2012). Suda çözünen/çözünmeyen sentetik boyaların sınıflandırılması Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Suda çözünen/çözünmeyen sentetik boyaların sınıflandırılması.

3.3.3. Adsorban Maddeler

Gaz veya sıvı haldeki maddeleri yüzeylerine tutarak (adsorpsiyon yaparak) ayıran veya temizleyen maddelerdir. Bu maddeler, genellikle gözenekli yapıya sahiptir ve geniş yüzey alanları sayesinde kirleticileri fiziksel ya da kimyasal olarak tutarlar. Ayrıca kimyasal kararlılıkları ve yeniden kullanılabilir (bazıları yıkanarak veya ısıtılarak yeniden aktive

edilebilir) olmaları nedeniyle yaygın kullanım alanlarına sahiptirler. Bu alanlar şu şekilde sıralanabilir;

- Su arıtımı (ağır metallerin ve boyar maddelerin giderimi),
- Hava filtreleme (zehirli gazların tutulması),
- İlaç ve gıda endüstrisi,
- Endüstriyel atık geri kazanımı,
- Koku ve nem giderimi (Dąbrowski, 2001; Chen vd., 2016; Ahmed Alsharif, 2025)

Biyokütleler; tarım, gıda ve orman ürünlerinden elde edilen bitkisel veya hayvansal atıklardır. Biyokütlelerin adsorban olarak kullanımı, son yıllarda çevre dostu, ucuz ve etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu maddeler uygun şekilde işlenerek doğal adsorbanlara dönüştürülebilir.

3.4. Adsorpsiyon İzoterm, Kinetiği ve Termodinamik Çalışmaları

Adsorpsiyonun mekanizmasının üç basamakta gerçekleştiği kabul edilir. Bunlar: a) ilk aşamada adsorbat, çözeltiden adsorbanın dış yüzeyine taşınmakta olup bu basamak film difüzyonu veya dış kütle transferi olarak adlandırılmaktadır, b) ikinci aşamada adsorbat molekülleri, adsorbanın gözenek yapısı içerisinde ilerleyerek tanecik içi difüzyon (intrapartikül difüzyon) sürecini gerçekleştirmektedir, c) son aşamada ise adsorbat molekülleri, adsorbanın dış veya iç yüzeyindeki aktif bölgelere bağlanarak adsorpsiyon gerçekleşmektedir. Bu üç basamaktan herhangi biri tek başına veya birkaçı birlikte hız belirleyici basamak olarak görev yapabilmektedir. Bununla birlikte, çoğu adsorpsiyon sisteminde üçüncü basamak oldukça hızlı gerçekleşmekte olup, adsorban ile adsorbat arasındaki etkileşimlerin karmaşıklığına bağlı olarak kendi içinde farklı alt süreçleri de içerebilmektedir (Street, 1994).

3.4.1. Adsorpsiyon İzotermi

Adsorpsiyon izotermi grafikleri, sabit sıcaklık, pH ve adsorbent üzerine adsorplanan madde miktarıyla (q_e , mg g^{-1}) çözelti içerisinde adsorplanmadan kalan madde derişimi (C_e , mg L^{-1}) arasındaki denge durumunu olarak açıklanır. Adsorpsiyon izotermi, belirli miktarda adsorban ile farklı başlangıç derişimlerine sahip çözeltilerin dengeye ulaşması sağlanarak elde edilmektedir. Adsorpsiyon davranışının tanımlanmasında literatürde en yaygın olarak kullanılan izoterm modelleri Langmuir, Freundlich, Temkin ve Dubinin-Radushkevich (D-R) izotermidir. Bu modeller, adsorbanın yüzey özellikleriyle adsorban ve adsorbat arasındaki

etkileşimlerin açıklanmasına imkân vermektedir. Ayrıca, maksimum adsorpsiyon kapasitesi, adsorpsiyon şiddeti ve adsorpsiyon enerjisi gibi önemli parametrelerin belirlenmesinde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Elmorsi vd., 2014). Langmuir izoterm modeli, adsorpsiyon sürecinin homojen bir yüzey üzerinde ve tek tabakalı olarak meydana geldiğini kabul eder. Diğer taraftan Langmuir izotermi, bütün aktif noktaların adsorplanacak moleküllere karşı aynı enerji ve eşit ilgiye (afinite) sahip olduğu varsayımına dayanmaktadır (Langmuir, 1918). Konsantrasyon ve sıcaklığa bağlı Langmuir izoterm eğrileri için F.4 kullanılır.

$$\frac{ce}{qe} = \frac{1}{qmaxK_L} + \frac{Ce}{qmax} \quad (F.4)$$

Burada,

Ce: Denge konsantrasyonu (mgL⁻¹)

qe: Dengedeki adsorpsiyon kapasitesi (mgg⁻¹)

K_L: Langmuir sabiti (Lmg⁻¹)

qm: Maksimum adsorpsiyon kapasitesini (mgg⁻¹)

ifade eder.

Langmuir izoterminin önemli özelliklerini tanımlamak için, R_L faktörü (Eşitlik 2) kullanılabilir.

Eğer,

R_L > 1 ise adsorpsiyon uygun değildir(istemsiz),

R_L = 1 ise doğrusal,

0 < R_L < 1 ise adsorpsiyon uygundur(istemli) ya da R_L=0 ise proses tersinmezdir.

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_o} \quad (F.5)$$

İkinci izoterm modeli olan Freundlich izotermi ise gerçekleşen adsorpsiyonun çok tabakalı olduğunu kabul eder. Dahası adsorbent olarak kullanılan maddenin yüzey alanları ve enerjisinin heterojen olduğunu varsayar. Freundlich izotermini hesaplamak için F.6 kullanılır.

$$\ln qe = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln Ce \quad (F.6)$$

Burada,

K_F: Adsorpsiyon kapasitesi ((mg/g) (L/mg)^{1/n})

n: Adsorpsiyon yoğunluğu ile ilgili Freundlich izoterm denkleminde ait sabit(g/L).

Prosesin tipi n parametresiyle ifade edilir.

n = 1 ise, proses doğrusaldır,

n > 1 olduğunda kimyasal,

n < 1 olduğunda ise fizikseldir (Gündüz ve Bayrak 2017).

Üçüncü Adsorpsiyon izoterm modeli "Temkin İzotermi", tüm moleküllerin adsorpsiyon ısısındaki azalışla, doğrusal bir düzende oluştuğunu ifade eder. Yani bu durum bağlanma enerjisinin homojen olduğunu ifade eder (Temkin ve Pyzhev, 1940). Bu izotermi modelini ifade eden formüller (F.7 ve F.8) aşağıda verilmiştir.

$$qe = \frac{RT}{b} \ln K_T Ce \quad (F.7)$$

$$qe = B_T \ln K_T + B_T \ln Ce \quad (F.8)$$

Burada, $B_T = RT/b$ ' dir.

b: Temkin izoterm sabiti

K_T : Denge bağlanma sabiti (Lg^{-1}) 'dir.

Dördüncü Adsorpsiyon izoterm modeli Dubinin-Radushkevich teorisidir. Dubinin-Radushkevich adsorpsiyon izotermi heterojen bir yüzey üzerindeki potansiyel değişim ile ifade edilir. Adsorpsiyon izoterm mekanizması F9-12 ile elde edilir.

$$q_e = q_m \exp(K_{DR} \left[RT \left(1 + \frac{1}{Ce} \right) \right]^2) \quad (F.9)$$

$$\ln q_e = \ln q_m - K_{DR} \varepsilon^2 \quad (F.10)$$

$$\varepsilon = RT \ln \left[1 + \frac{1}{Ce} \right] \quad (F.11)$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{2K_{DR}}} \quad (F.12)$$

Burada,

R: Gaz sabiti (8.314 J/mol K)

T: Mutlak sıcaklık (K)

K_{DR} : Adsorpsiyon enerjisi ile ilgili izoterm sabiti

q_m : Teorik adsorpsiyon kapasitesi ve

ϵ^2 : Polanyi potansiyelini gösterir.

Ortalama adsorpsiyon enerjisi (E), adsorpsiyon mekanizmasını tahmin etmemize sağlar. Eğer E değeri, 8-16 kJmol⁻¹ ise, adsorpsiyon prosesi iyon değişimiyle ifade edilir, E < 8 kJmol⁻¹ ise adsorpsiyon fiziksel, 20 < E < 40 kJmol⁻¹ ise adsorpsiyon kimyasal olarak tanımlanabilir (Gündüz ve Bayrak, 2017).

3.4.2. Adsorpsiyon Kinetiği

DeneySEL verileri çeşitli kinetik modellere uydurmak, adsorpsiyon hızını, prosesin modelini ve adsorbent/adsorbat arasındaki etkileşimin fiziksel mi yoksa kimyasal mı olduğu hakkında bilgi edinmemizi sağlar (Elmorsi vd., 2014). Adsorpsiyon mekanizmasında hızı belirleyen basamakların belirlenmesi için Fraksiyonel Güç Kinetik Modeli, Elovich Kinetik Modeli, birinci dereceden kinetik modeli, ikinci dereceden kinetik modelleri ve partikül içi difüzyon modelleri vardır. Yalancı birinci mertebe eşitliği, adsorpsiyon prosesinin hız sabitini elde etmek için ilk olarak Langergren ve Svenska tarafından yapılmıştır (Lagergren, 1898; Nazifa vd., 2017) (F.13).

$$\log(q_e - qt) = \log q_e - K_1 t \quad (F.13)$$

Burada,

q_e (mg g⁻¹) ve qt (mg g⁻¹), sırasıyla denge ve herhangi bir t süresindeki adsorpsiyon kapasitelerini ve K_1 (dk⁻¹), yalancı birinci mertebe hız sabitini ifade eder (Rudzinski ve Plazinski, 2006).

Kinetik hesap için kullanılan diğer yalancı ikinci mertebe hız eşitliği F.14'e göre gerçekleştirilir.

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (F.14)$$

Burada, K_2 (g/mg dak.), yalancı ikinci mertebe hız sabitidir (Rudzinski ve Plazinski, 2006).

Ayrıca Weber ve Morris tarafından önerilen partikül içi difüzyon modeli, adsorpsiyonun adsorbat moleküllerinin adsorban üzerine kütle transferi yoluyla gerçekleştiğini kabul eder. (Weber ve Morriss, 1963). Partikül içindeki difüzyonu F.15 ile açıklanır.

$$qt = K_{in}\sqrt{t} + C \quad (F.15)$$

Burada, K_{in} , hız sabiti, C , sınır tabaka kalınlığı hakkında bilgi veren model sabitlerdir.

3.4.3. Adsorpsiyon Termodinamiği

Adsorpsiyon analizleri sonucunda elde edilen serbest enerji (ΔG°), entalpi (ΔH°), entropi (ΔS°) ve denge sabiti büyüklüklerinin araştırılması adsorpsiyon termodinamiği olarak tanımlanabilir. Bu termodinamik parametrelerin eldesinde kullanılan formüller: F.16, 17 ve 18 'de verilmiştir (Bensalah vd., 2021).

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c \quad (F.16)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H - T \Delta S^\circ \quad (F.17)$$

$$\ln K_c = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (F.18)$$

Burada,

ΔG° : Standart Gibbs serbest enerjisi

C: Başlangıç konsantrasyonu

Ce: Denge konsantrasyonu

Kc (C/Ce): Adsorpsiyon denge sabiti

ΔH° : Standart entalpi

ΔS° : Standart entropi

R: Gaz sabiti (8,314 J/mol K)

T: Mutlak sıcaklık (K) değerlerini ifade etmektedir.

3.5. Karakterizasyon Çalışmaları

Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tez çalışmasından kullanılan biyosorbentlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi Tablo 3.3'te verilen analiz yöntemleri kullanılmıştır.

Tablo 3.3. Biyosorbentler üzerinde gerçekleştirilen karakterizasyon yöntemleri.

Malzeme	Analiz Metodu			
	ZETA	XRD	SEM/EDX-MAPPING	FT-IR
Biyosorbent*	✓	✓	✓	✓
Biyosorbent RR195		✓	✓	✓
Meyve			✓	✓
Beyaz Çekirdek			✓	✓
Siyah Çekirdek			✓	✓

* Beyaz ve siyah alıç çekirdeği karışımı.

3.5.1. Taramalı Elektron Mikroskobu/Enerji Dağılım Spektroskopisi Analizi (SEM/EDX)

Taramalı elektron mikroskopisi/Enerji dağılım spektroskopisi malzemelerin yüzey topografisi(morfolojisini) ve kimyasal (elementel içeriklerini) bileşenlerini incelemek için yaygın kullanım alanına sahiptir. Malzemelerin yüzey morfolojisinin ve kimyasal bileşiminin belirlenebilmesi için analiz edilecek numunenin elektriksel iletkenlik özelliğine sahip olması gerekmektedir. Elektriksel olarak iletken olmayan malzemeler ise analiz öncesinde platin, altın veya karbon gibi iletken kaplama malzemeleri ile kaplanarak iletken hâle getirilmektedir. Ardından, uygun analiz tekniği kullanılarak yüksek vakum koşullarında yüzey karakterizasyonu gerçekleştirilmektedir (Şimşek, 2015).

3.5.2. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi Analizi (FT-IR)

FT-IR spektroskopisi, bir molekül veya bileşiğin yapısında bulunan fonksiyonel grupların ve kimyasal bağların belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu teknik, numunenin kızılötesi ışınımını belirli dalga boylarında soğurması prensibine

dayanmaktadır. Malzemelerin farklı dalga boylarındaki absorbans değerleri ise Lambert-Beer Kanunu esas alınarak değerlendirilmektedir (F.19).

$$A = \log \left(\frac{I_0}{I} \right) = \varepsilon \cdot b \cdot c \quad (F.19)$$

Burada:

I_0 : Gelen radyasyon

I : Geçen radyasyon

A : Absorbans

ε : Adsorptivite

b : İç hücre yoğunluğu

c : Absorplanan bileşenin konsantrasyonu olarak verilir (Sarkar vd., 2010).

3.5.3. X Işını Difraktometre Analizi (XRD)

XRD, malzemelerin kristal yapısının, faz bileşiminin, kristalit boyutunun ve faz dönüşüm kinetiğinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan karakterizasyon yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, numune üzerine gönderilen X-ışınları kristal örgü düzlemlerine çarparak kırınıma uğrar. Kristal düzlemlerinden belirli açılarla yansıyan ışınlar, Bragg koşulunu sağlayan θ açısında giriş yapar ve aynı açıyla yansıyarak kırınım desenini oluşturur (Şekil 3.11). “Bu yansıma açısı ile örgü düzlemleri arasındaki uzaklık ise Bragg yasası ile hesaplanır” (F.20) (Niemantsverdriet, 2000).

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (F.20)$$

Burada:

λ : X-ışını dalga boyu, nm

θ : Yansıma açısı

d : Katmanlar (düzlemler) arası uzaklık, nm olarak belirtilmiştir (Niemantsverdriet, 2000).

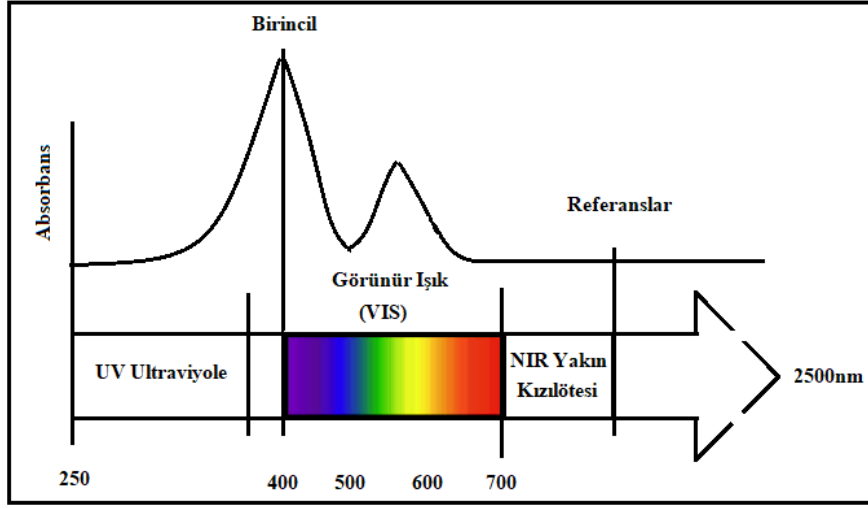
3.5.4. Zeta Potansiyometre

Zeta potansiyel analiz yöntemi, partiküllerin yüzey yüklerinin oluşturduğu potansiyelin dolaylı olarak ölçülmesidir (Bhardwaj, 2003). Diğer bir başka ifadeyle partiküller arasındaki itme veya çekme değeri ölçülmesi olarak tanımlanır. Potansiyel ölçümü ve tanımı çift iyon

tabaka teorisine dayanır. Uygulanan bu teoriye göre, negatif yüklü partiküllerin çevresinde iki ayrı bölge yer alır, birincisi Stern Tabakası; partikül yüzeyine çok yakın bir şekilde sınırlanmış yüksek konsantrasyonlarda pozitif (zıt) iyonlardan meydana gelir. Bu iki tabaka (Stern tabakası ve dağılımlı tabaka) arasındaki iyon dağılımı ortamda potansiyel farkın meydana gelmesine sebep olur. Geniş bir kullanım alanına sahiptir (özellikle, tekstil, kâğıt, çevre vb. gibi endüstrisinde). Örneğin kâğıt üretiminde selüloz liflerin üzerindeki yüklerin belirlenmesi (Bhardwaj, 2003).

3.5.5. Ultraviyole Görünür Bölge Spektroskopisi (UV/VIS Spektroskopisi)

Moleküllerin ihtiyaç duydukları enerjiyi elde etmek(sağlamak) için elektronik geçişlerin absorpladıkları ışınının ve verdiklerin spektrumların değerlendirilmesi temeli olarak açıklanır. UV (Ultraviyole/Mor ötesi) bölgesi, elektromanyetik radyasyonun 200-400 nm (yakın UV) dalga boyundaki ışınları kapsayan bölge olarak ifade edilir (Yani mor ötesi bölgesi). 10-200 nm dalga boyları arasındaki bölgeye uzak UV (Vakum UV) denir. UV spektroskopisinde kullanılan prizmalar, mor ötesi bölgesindeki ışınlar da adi cam tarafından absorplandığı için, cam ve merceklerin ham maddesi kuvarz camdır. 400-780 nm dalga boyları arasındaki bölge UV/VIS'dir (görünür). UV/VIS cihazlarında, farklı dalga boylarında ışınım elde etmek için görünür ve UV bölgeleri için farklı tipte (döteryum(D2), tungsten(W), hidrojen(H2) ve ksenon (Xe)) ışık kaynağından yararlanılmaktadır. Günümüzde kullanılan gelişmiş spektrofotometreler, birden fazla ışık kaynağını içermektedir. Ayrıca, bu spektrofotometreler frekansı düzgün ve otomatik olarak değiştirme özelliğine sahiptirler. UV/VIS cihazları, örnek, monokromatör (dalga boyu seçici), dedektör, ışık kaynağı ve yolu, mercek ve bilgisayar (gönderilen ışınım demeti arasından absorplanan ışınım veya ışınım demetleri cihaz tarafından dedektör aracılığıyla hassas bir şekilde belirlenir ve absorbans bantı (spektrum) olarak elde edilir) kısımlarından oluşmaktadır. Bir örneğin konsantrasyonu, belirli bir dalga boyundaki absorpsiyon değeri ölçülerek elde edilir. Absorpsiyon spektrumu ise, ışığın dalga boyu ya da frekansına karşı, absorpsiyon miktarının veya diğer bir ifadeyle absorbans ve transmitans arasındaki etkileşimin grafik olarak gösterilmesidir (Wathudura vd., 2025). Absorpsiyon spektrumu Şekil 3.11'de verilmiştir.



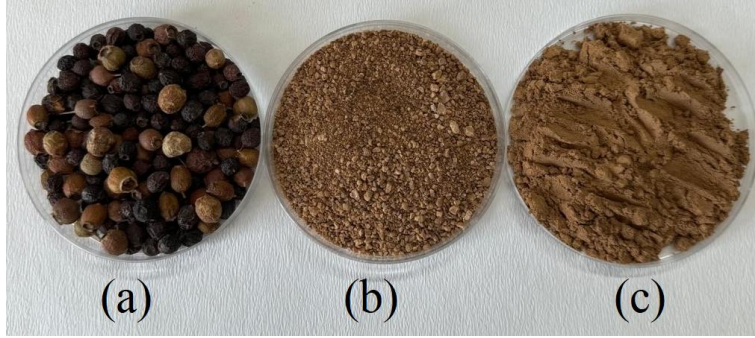
Şekil 3.11. Absorpsiyon spektrumu.

Absorpsiyon spektrumlarının oluşumunda madde (tanecik boyutu ya da molekül boyutu) konsantrasyonu yoğunluğuna bağlı olarak netlik(keskinlik) ve hassasiyetleri değişebilir. Dalga boylarındaki farklılık ve renk skalasının oluşması tanecik boyutlarıyla ilişkilendirilebilir.

4. MATERİYAL VE YÖNTEM

4.1. Biyokütle ve Biyosorbentlerin Hazırlanması

Ticari olarak elde edilen alıç numunesinde iki tür alıç örneği tespit edilmiştir. Bu alıçlara beyaz ve siyah isimlendirilmesi yapılmıştır. Alıç türleri (ham meyve) ve çekirdeklerinin RR195 giderimine etkileri incelenmiştir. Seçilen biyokütle kaynakları oda koşullarında kurutulduktan sonra öğütülmüş ve elekten geçirilmiştir (Şekil 4.1). Ticari alıç örnekleri suda bekletilmiş, bekletme sonrası çekirdekleri ayrılmış ve kurutma işlemleri sonrası ayrı ayrı öğütülmüşlerdir.



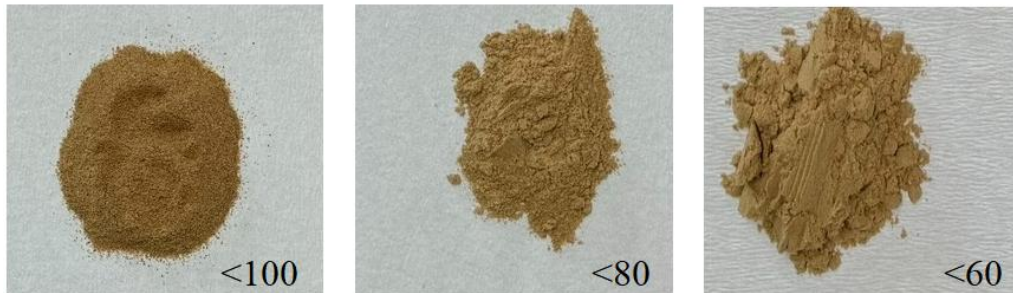
Şekil 4.1. a) Alıç meyve ve çekirdeği, b) Alıç Biyokütlesi, c) Alıç Biyokütlesi (100mesh).

4.2. RR195 Boyar Maddesinin Stok Çözeltisinin Hazırlanması

Yapılan bu çalışma kapsamında kullanılan RR195 boyarmaddesinin derişimi 1000 mgL⁻¹ olacak şekilde stok çözeltileri saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan farklı derişimlerdeki çözelti ise bu stok çözeltisinden seyreltme yolu ile hazırlanmıştır.

4.3. Farklı Boyutlarda *Crataegus* Biyokütlesinin Hazırlanması

Biyosorbent boyutunun RR195 boyar maddesi gideriminde etkisinin incelenmesi için *Crataegus* (meyve ve çekirdek, yalnız çekirdek) biyokütle örnekleri oda sıcaklıklarında kurutulduktan sonra öğütülmüş, öğütülen örnekler 60, 80 ve 100 mesh (sırasıyla, 250, 177 ve 149 mikron) boyutlarındaki elekten geçirilmişlerdir. Örnekler Şekil 4.2. gösterilmiştir.



Şekil. 4.2. Farklı boyutlara (mesh) sahip biyosorbent örnekleri.

4.4. Biyosorpsiyon Çalışmaları

Gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında ilk olarak farklı biyosorbentler (alıç, hindistan cevizi, greyfurt ve şeftali) ve yapay silika kaynaklı adsorbent SBA-15 ile RR195 tekstil boyar maddesinin sulu çözeltilerden giderimi için biyosorbent-adsorban olarak kullanılabilirlikleri araştırılmıştır.

Deneyler, oda sıcaklığında (manyetik karıştırıcıda), çözelti pH'ı ve pH=1 değerlerinde, 50 mL'lik 100 ppm boyarmadde konsantrasyonunda, 1 saat süre boyunca, 0,1 gram biyosorbent/adsorbent varlığında gerçekleştirilmiştir.

Örnekler çözelti pH'ı ve pH=1'e göre şu şekilde isimlendirilmiştir: çözelti pH için; Cr (*Crataegus* çekirdeği), Cr* (*Crataegus* meyvesi ve çekirdeği), Cn (*cocosnucifera*; hindistan cevizi), P (*prunuspersica* L.; şeftali), Ci (*citrusparadisi*; greyfurt) ve SBA-15, pH=1 için: Cr_1 (*Crataegus* seed), Cr*_1 (*Crataegus* meyvesi ve çekirdeği), Cn_1 (*cocosnucifera*), P_1 (*prunuspersica* L.), Ci_1 (*citrus paradisi*) ve SBA-15_1).

Boyar madde çözeltisi ve kullanılan biyosorbent ve/veya adsorbanı ayırmak için 4000 rpm'de 5 dakika süreyle santrifüjleme işlemi yapılmıştır. Santrifüjleme sonrasında Biyosorbent ve/veya adsorbandan ayrılan ve çözeltide kalan boyar maddelerin derişimleri UV (T80 UV/VIS Spectrometer PG Instruments Ltd) spektrofotometre kullanılarak 541 nm (literatürde 520nm (Sennaj vd., 2023), 541(Habibi ve Sardashti, 2010) ve 542nm (Giang vd., 2026) dalga boylarında çalışmalar mevcuttur) dalga boyunda tayin edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en iyi sonucun kuvvetli asidik (pH=1) çözelti ortamında *Crataegus* (*Crataegus species* (hawthorn; alıç, meyve ve çekirdek karışımı)) biyosorbentine ait olduğu belirlenmiştir. En iyi verim elde edilen biyosorbent örneği belirledikten sonra pH optimizasyonu aşamasına geçilmiştir.

pH Optimizasyon Deneyleri:

Biyosorpsiyona etki eden en önemli faktörlerden birisi çözelti pH'ıdır. Bu amaçla ilk olarak pH optimizasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan biyosorbent örneğinden 0,1 g alınarak, 50 mL'lik 100 ppm boyar madde konsantrasyonunda, 1 saat süre ile ve çözelti pH'ları 1-10 aralığında olacak şekilde hazırlanan boyar madde çözeltileri ile biyosorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışılan çözelti pH'ları pH=1, 2, 3, 4, 6, 8 ve 10'dur. pH ayarlanması için derişim, 1 M ve 0,1 M'lık HCl ve/veya 1-0,1 M'lık NaOH çözeltileri kullanılmıştır.

Biyosorbent Miktarının Etkisinin İncelenmesi:

Biyosorbent miktarının etkisinin incelenmesi için bir önceki aşamada elde edilen optimum çözelti pH'ında (pH=1) de hazırlanan 50 mL'lik, 100 ppm RR195 boyar maddesi içeren çözeltiler kullanılmıştır. Biyosorbent miktarını etkisi 0,03-0,25 g aralığında biyokütle kullanılarak test edilmiştir.

Temas Süresi Etkisinin İncelenmesi:

Biyosorpsiyona etki eden önemli bir faktörde temas süresidir. Bu amaçla önceki aşamalarda elde edilen optimum pH ve biyosorbent miktarları kullanılarak temas süresinin biyosorpsiyona etkisi üç farklı sıcaklıkta (25°C, 35°C ve 45°C) 1-90 dk aralığında incelenmiştir.

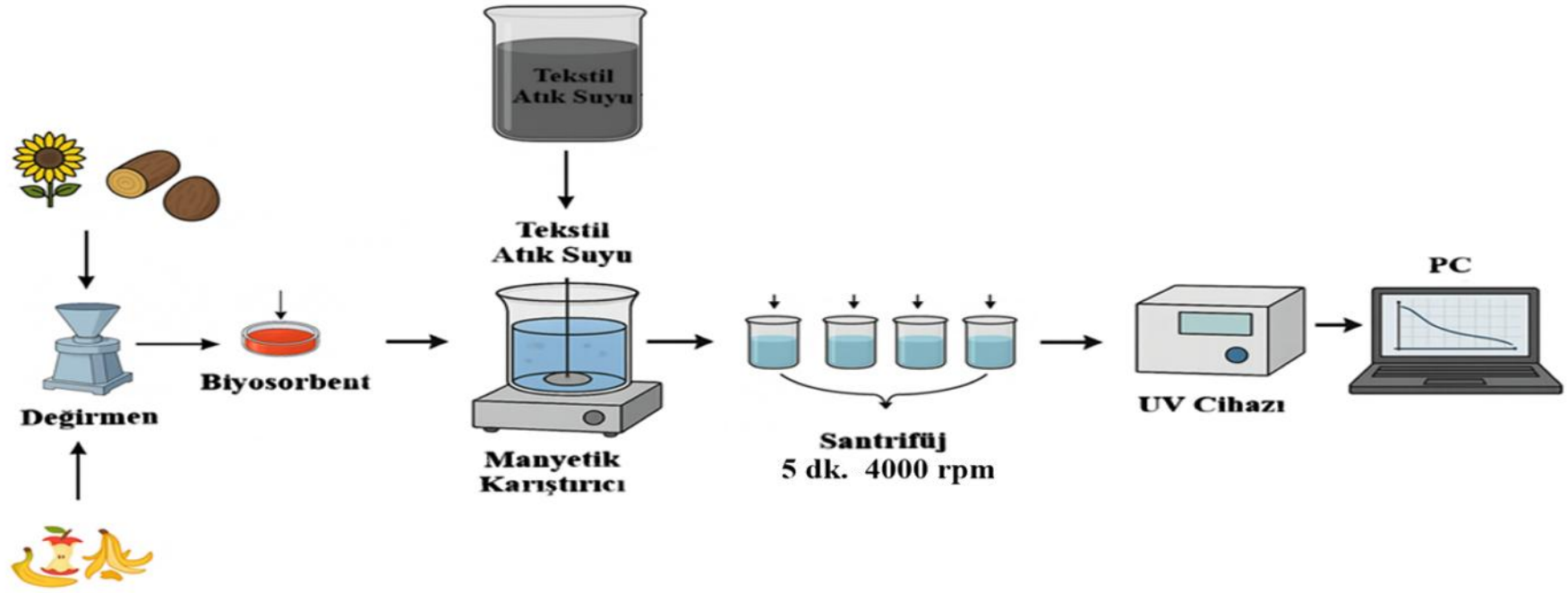
Başlangıç Boyarmadde Konsantrasyonunun İncelenmesi:

Optimum pH, biyosorbent miktarı ve temas süresi belirlendikten sonra başlangıç boyar madde konsantrasyonunun etkisi (10-750 ppm) aralığında yine üç farklı sıcaklık için (25°C, 35°C ve 45°C) araştırılmıştır. Deneysel işlemler aynı koşullarda iki paralel olacak şekilde yapılmıştır. Son olarak biyosorpsiyon mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için elde edilen deneysel verilerin bazı izoterm (Langmuir, Freundlich, Temkin ve Dubinin-Radushkevich) ve kinetik (Yalancı birinci derece, Yalancı ikinci derece ve Partikül içi difüzyon) modellere uygunlukları araştırılarak, termodinamik hesaplamalar yapılmıştır. Tüm aşamalarda kullanılan deney düzeneği Şekil.4.3'te gösterilmiştir.

4.5. Karakterizasyon Çalışmaları

SEM/EDX ve MAPPING analizleri Zeiss Supra VP 40 cihazıyla örnekler Pt (platin), kaplanarak gerçekleştirilmiştir. Zeta potansiyel analizleri örnekler saf su içerisinde disperse yapılarak yapıldı. Daha sonra analizler, MALVERN NANO-ZS cihazıyla gerçekleştirilmiştir.

XRD analizleri ise PANALYTICAL EMPYREAN HT-XRD cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örneklerin XRD analizleri $2\theta=0-90^\circ$ dereceleri arasında yapılmıştır. FT-IR analizleri Perkin Elmer marka IR cihazında ATR (Attenuated Total Reflectance) tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Örneklerin FT-IR analizleri $4000-600\text{ cm}^{-1}$ dalga boyları arasında yapıldı.



Şekil 4.3. Gerçekleştirilen deneylerin şematik gösterimi.

4.6. Simüle Edilmiş Atık Suda Biyosorbentin Test Edilmesi

RR195 boyarmaddesinin sulu çözeltilerden biyosorpsiyon yöntemi ile giderimi için hazırlanan biyosorbentin optimizasyon işlemleri tamamlandıktan sonra biyosorbentin endüstriyel atık sudaki giderim potansiyeli de çalışma kapsamında araştırılmıştır. Bu amaçla aşağıda bileşimi verilen bir endüstriyel atık su örneği hazırlanmıştır. Simüle atık su örneği üç farklı araştırmada kullanılan reçete modifiye edilerek hazırlanmıştır (Tablo 4.1).

Tablo 4.1. Endüstriyel simüle atık su reçetesinde kullanılan kimyasallar ve miktarları.

Kimyasal	Miktar(mg/L)	Kaynak
NaCl	100	(Cho vd., 2009)
NaOH	100	(Cho vd., 2009)
Nişasta	400	(Akar vd., 2010)
Na ₂ CO ₃	1250	(Akar vd., 2011)
NiSO ₄ .6H ₂ O	0,6	Bu çalışma
ZnSO ₄ .7H ₂ O	0,5	(Akar vd., 2010)
KH ₂ PO ₄	10	(Akar vd., 2010)
Glikoz	250	(Akar vd., 2011)
MnCl ₂	0,4	Bu çalışma
FeSO ₄ .7H ₂ O	1250	(Akar vd., 2011)
MgSO ₄ .7H ₂ O	15	(Akar vd., 2010)
NH ₄ Cl	100	(Akar vd., 2010)
RR195	100	Bu çalışma

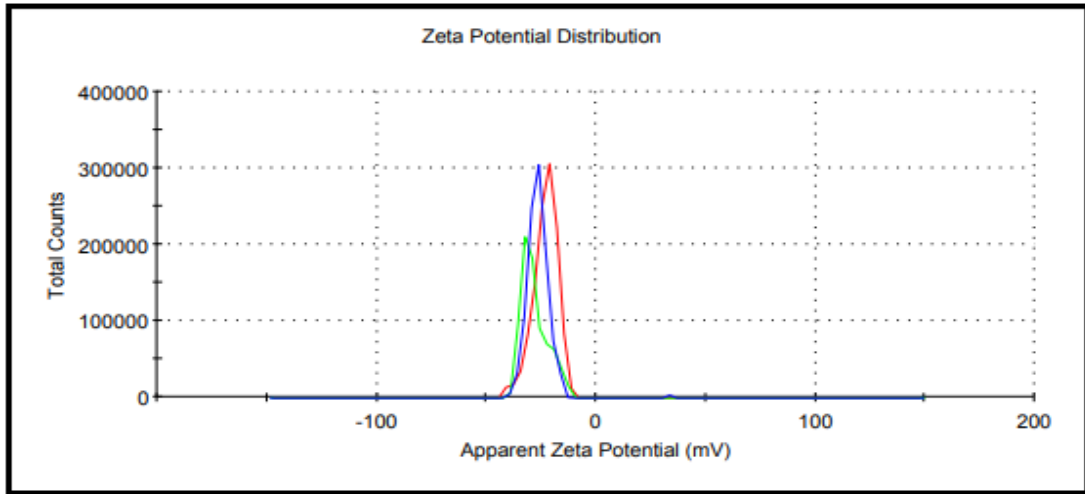
5. ANALİZ VE SONUÇLAR

5.1 Karakterizasyon Çalışmaları

Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında kullanılan biyosorbentin ve tekstil boyar maddesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri hem giderim öncesi (XRD, FT-IR, SEM/EDX ve Zeta potansiyometre) hem de giderim sonrası (FT-IR ve SEM/EDX) farklı analiz yöntemleriyle alt başlıklar altında detaylı olarak incelenmiştir.

5.1.1 Zeta Potansiyometre Analizleri

Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tezi kapsamında biyosorbentin yüzey yükü Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesinde yer alan MALVERN NANO-ZS cihazıyla yapılmıştır. ZETA analiz sonuçları Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Biyosorbente ait yüzey yükü -26.3 mV olarak elde edilmiştir. Biyosorbentin negatif yüke sahip olması maksimum giderim pH'ı ile uyumlu olduğu göstermektedir.

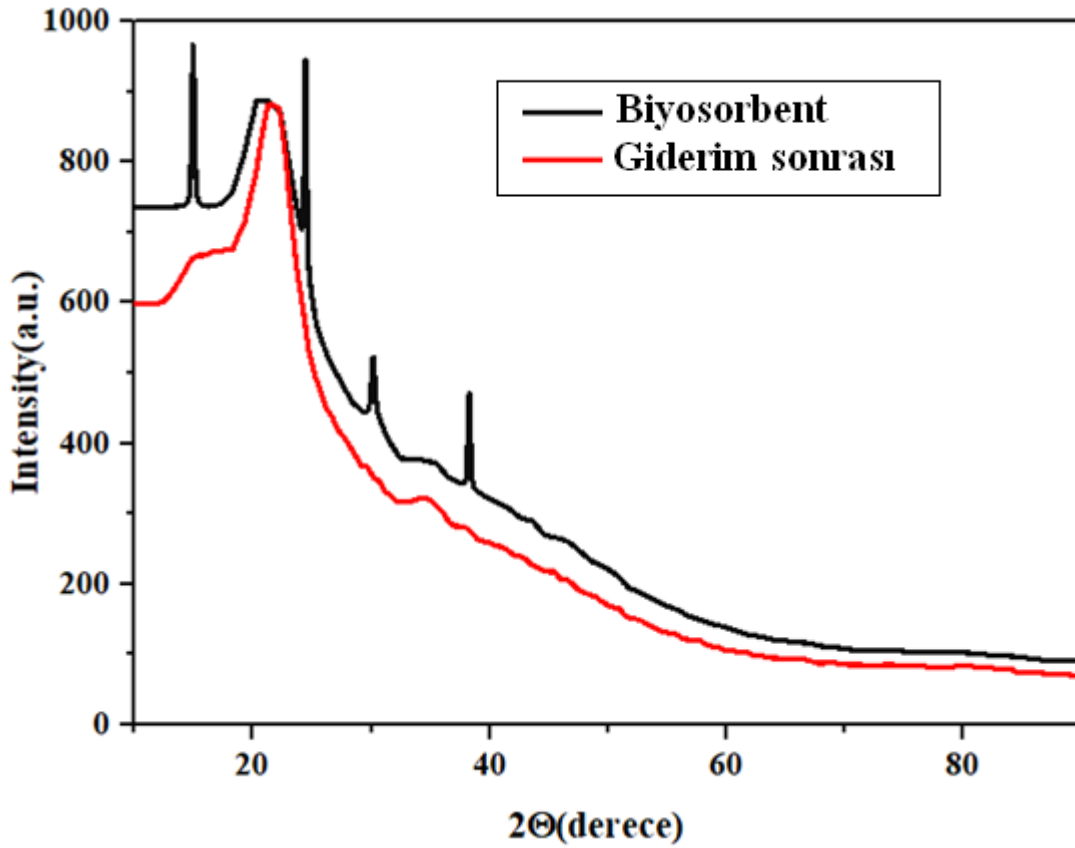


Şekil 5.1. Biyosorbentin zeta potansiyel analiz sonucu

5.1.2. XRD Analizleri

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında kullanılan biyosorbentlere ait XRD analizleri, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezindeki PANALYTICAL EMPYREAN HT-XRD cihazı ile $2\theta=10^{\circ}$ - 90° aralığında yapılmış ve analiz sonuçları Şekil 5.2'de verilmiştir. Boyar madde giderimi öncesi ve sonrası

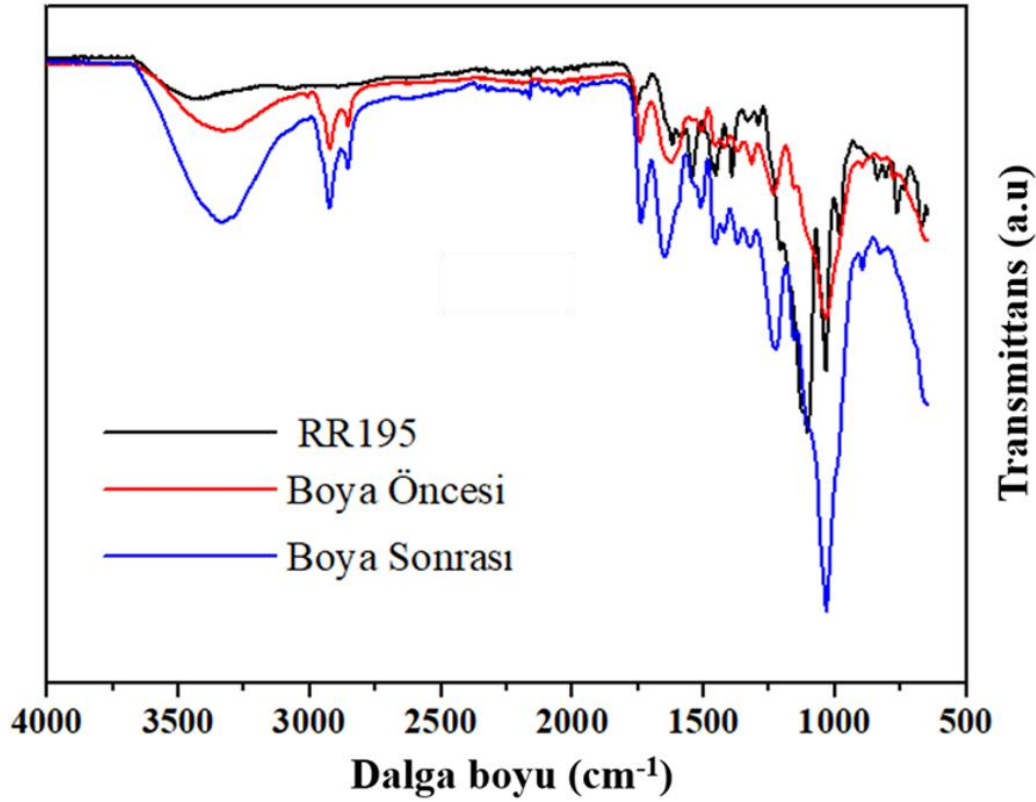
XRD analizlerinde hem amorf hem de kristal yapılar gözlenmiştir. Biyokütleyle ait selüloz yapısını gösteren temel Bragg pikleri elde edilmiştir. 14,94'nin karakteristik tepe noktası, selüloz için (110) kristalin tepe noktasına ve $2\theta = 21,02$ ve $30,15$ 'teki tepe noktaları ise sırasıyla (002) ve (004) kristalin tepe noktalarını ait olarak ifade edebilir (Chaouki vd., 2021; Munagapati vd., 2022) Boyar madde giderimi sonrası (Şekil 5.2), selülozun yapısına ait tepe noktalarının yoğunluğu azaldığı hatta kayboldukları gözlenmiştir. Bu durumun giderim sonrası RR195'in biyosorbentin yüzeyini kaplamasıyla açıklanabilir.



Şekil 5.2. Giderim öncesi ve sonrası biyosorbente ait XRD analiz sonuçları.

5.1.3. FT-IR Analizleri

RR195 boyar madde biyosorpsiyonun da kullanılan biyosorbentin FT-IR analizleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü Laboratuvarında Perkin Elmer marka IR cihazında; ATR tekniği kullanılarak $4000-650\text{ cm}^{-1}$ dalga boyları aralığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen FT-IR sonuçları Şekil 5.3 'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. RR195 boyar maddesi, giderim öncesi ve sonrası biyosorbente ait FT-IR analiz sonuçları.

FT-IR spektrumları incelendiğinde, 3100-3500 cm^{-1} dalga boylarındaki, geniş bantlar selülozik (selüloz, lignin ve odunsu yapılar) yapılarıdaki OH gerilmelerine ait iken 2980-2929 cm^{-1} dalga boylarındaki keskin yapılar simetrik ve asimetrik CH ve CH_2 gerilmelerine ve 1607 cm^{-1} 'deki pik ise lignin yapısında bulunan aromatik halkadaki C=C titreşimini ifade eder. 1320 cm^{-1} piki, selüloz yapısındaki -OH selüloz ve hemiselülozun C-H gerilmesini işaret eder. 1033 cm^{-1} 'deki geniş pik, selüloz ve hemiselülozdaki C-O streslerini göstermektedir.

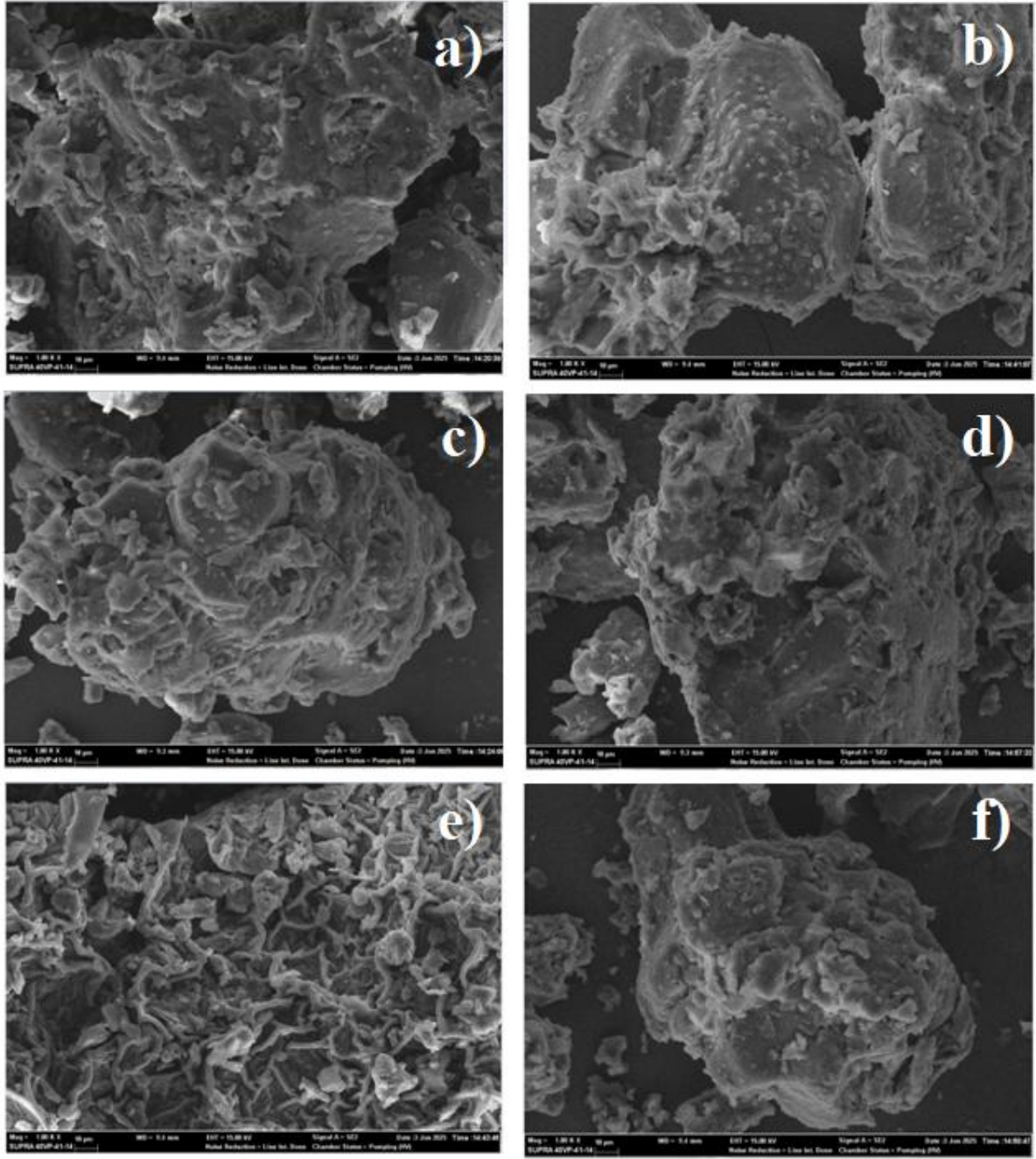
3100-3500 cm^{-1} aralığında gözlenen OH pikleri protein ve karbohidratlara aittir. 2854, 2927 ve 2980 cm^{-1} de gözlenen pikler simetrik ve asimetrik CH ve CH_2 gerilmeleriyle bağlantılıdır. 1742 cm^{-1} 'de gözlenen keskin pik ise, karboksilik asit yapısındaki C=O titreşimine ait spesifik bir tepe noktasıdır. 1461 cm^{-1} de gözlenen pik ise karbohidratlardaki C-H eğilme stresidir. 1159 cm^{-1} dalga boyundaki tepe noktası ise selüloz ve hemiselüloz yapılarındaki C-O-C asimetrik köprü gerilimini işaret eder. 1090 cm^{-1} 'deki tepe ise, inorganik M-O ve M-O-M gerilmelerin varlığına aittir (Öztürk vd., 2022). Tekstil endüstrisinde kullanılan boyar maddeler anyonik (direkt, asit ve reaktif), katyonik (bazik boyar madde) ve

noniyonik boyar maddeler şeklinde sınıflandırılır. Azo bazlı boyar maddeler en önemli sınıflardan biridir ve kromofor olarak azo ($N=N$) ve oksokrom olarak sülfonat ($-SO_3$) gruplarından oluşur. RR195, ayrı ayrı monoklorotriazin ve sülfatoetilsülfon grupları içeren bifonksiyonel reaktif karışık bir boyar maddedir (Daglı ve Oktav Bulut, 2025).

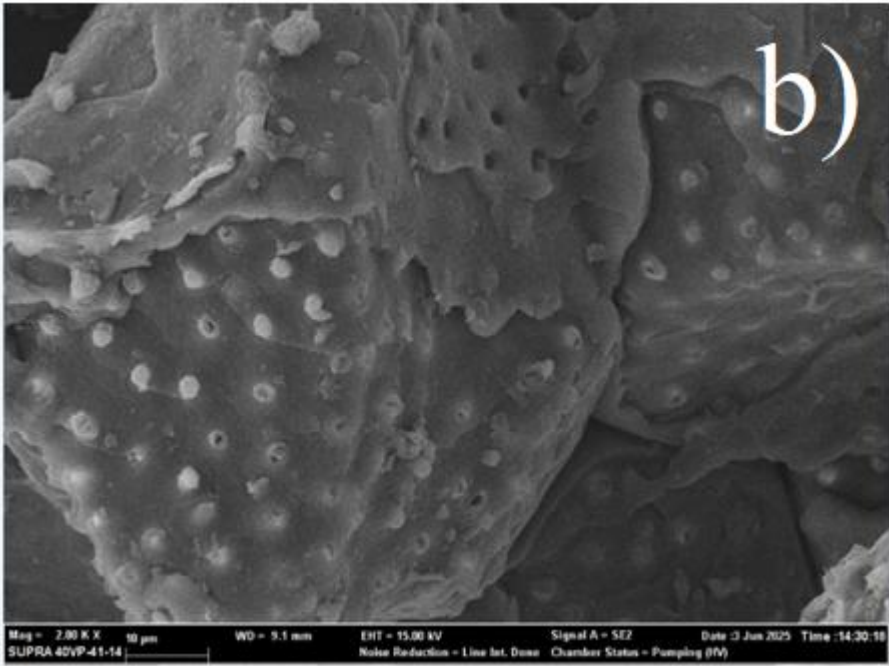
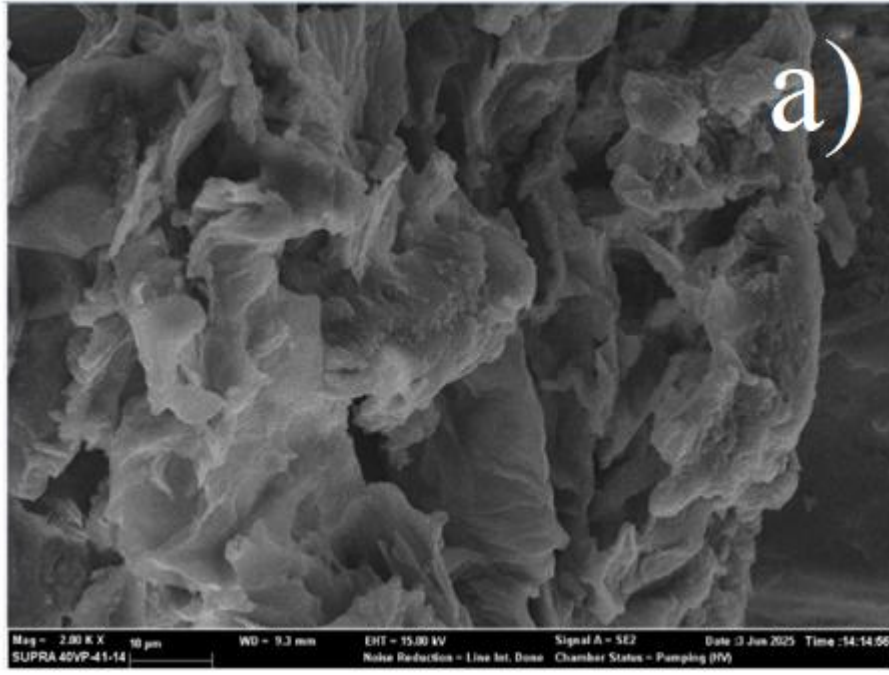
RR195 boyar maddesi için karakteristik bantları $3320-3640\text{ cm}^{-1}$ (gerilme grupları tek bağ NH, tek bağ OH ve rezonans aromatik yapı $=CH$), $2910-2850\text{ cm}^{-1}$ (alifatik tek bağ CH'nin asimetric gerilmesi), $1622,5\text{ cm}^{-1}$ (aromatik halkanın titreşimi) (Pérez-Calderón vd., 2018). 1580 cm^{-1} 'de (C çift bağ N'nin gerilmesi), 1542 cm^{-1} 'de (azo grubu tek bağ N çift bağ N tek bağının gerilmesi) (Çelik vd., 2012). 1420 cm^{-1} 'de simetrik gerilmeler $-N-C$ çift bağ N tek bağ, 1490 ve $1392,79\text{ cm}^{-1}$ 'de (C tek bağ N'nin titreşimsel gerilmesi), $1330,5\text{ cm}^{-1}$ (SO_2 'nin S grubu çift bağ O'nun titreşimleri), $1035,18\text{ cm}^{-1}$ 'de (tek bağ C tek bağ OH ve/veya tek bağ CN'nin gerilmesi) ve $1206,5\text{ cm}^{-1}$ 'de (fenolik tek bağ C tek bağ OH grubunun titreşimleri), 670 cm^{-1} gerilmesi $-S=O$ yapısına aittir (Ghodake vd., 2009).

5.1.4. SEM/EDX Analizleri

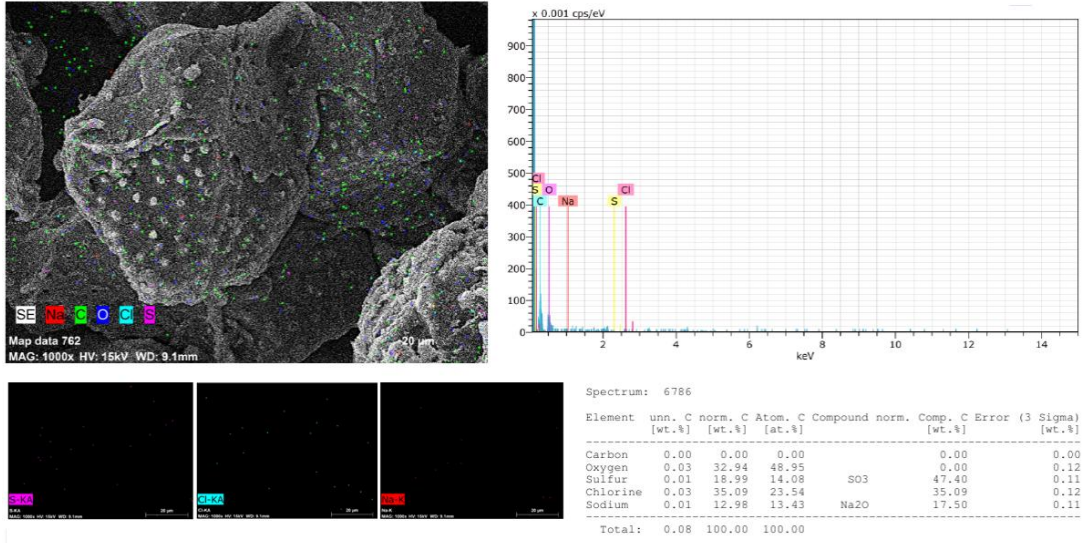
Biyosorbentlere ait SEM/EDX ve MAPPING analizleri görüntüleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Merkezi Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezindeki (BARUM) Zeiss Supra VP 40 cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Cr (*Crataegus* çekirdeği), Cr* (*Crataegus* meyvesi ve çekirdeği) örneklerine ait giderim öncesi ve giderim sonrası SEM/EDX ve MAPPING verileri Şekil 5.7'de verilmiştir. SEM görüntüleri boya öncesi ve sonrasında farklılıkları olduğunu göstermiştir.



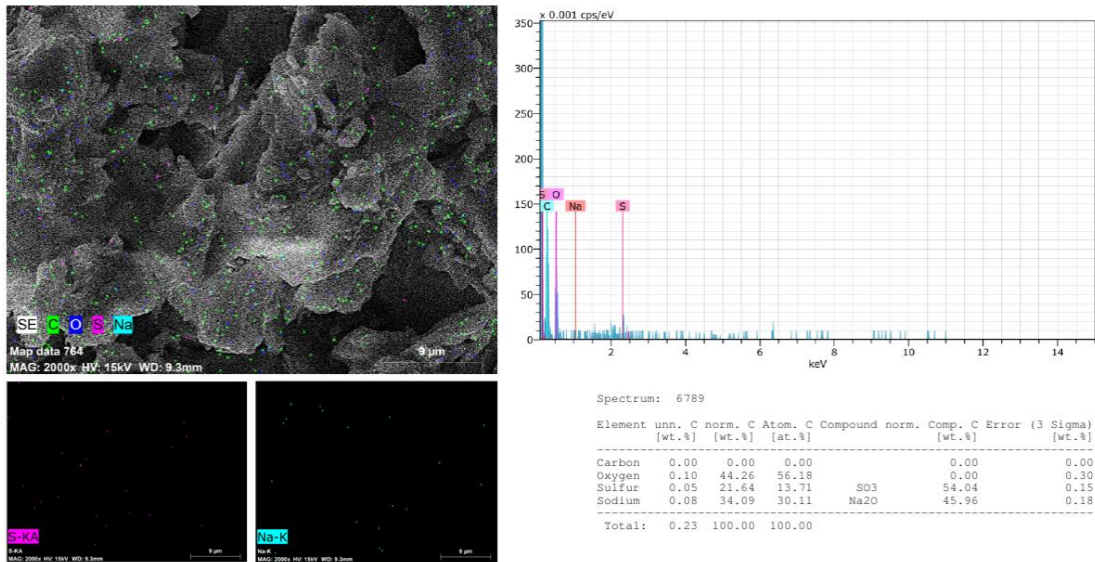
Şekil 5.4. a) Boya öncesi tüm meyve, b) Boya sonrası tüm meyve, c) Boya öncesi siyah - beyaz alıç çekirdeği (100mesh), d) Boya sonrası siyah-beyaz alıç çekirdeği(100mesh), e) Boya öncesi siyah alıç çekirdeği (100mesh), f) Boya sonrası siyah alıç çekirdeği (100mesh).



Şekil 5.5. a) Boya sonrası beyaz alıç çekirdeği(100mesh), b) Boya sonrası beyaz alıç çekirdeği (80 mesh).



Şekil 5.6. SEM/EDX ve MAPPING analiz sonuçları (boya sonrası beyaz alıç çekirdeği (80 mesh).



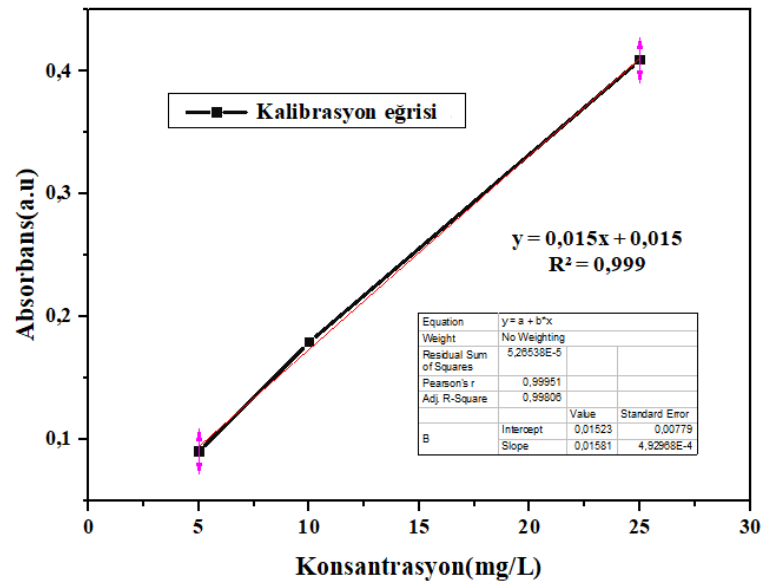
Şekil 5.7. SEM/EDX ve MAPPING analiz sonuçları (boya sonrası beyaz alıç çekirdeği (100 mesh).

EDX ve MAPPING analiz sonuçları giderim sonrası boyar madde yapısında yer alan elementlerin (özellikle S) biyosorbent örneklerinin yüzeyinde dağıldıklarını göstermiştir (Şekil 5. 6 ve 7).

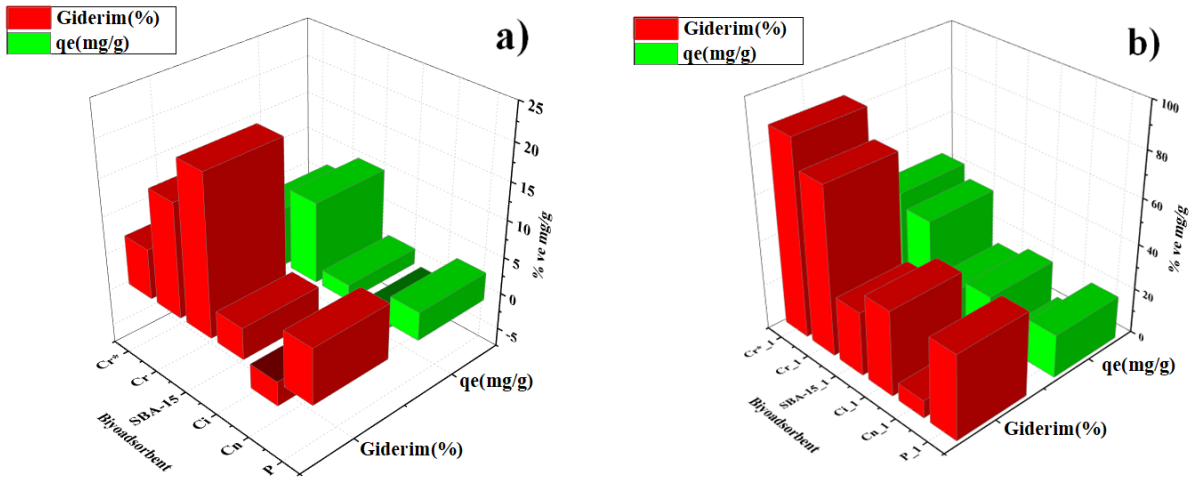
5.2. Adsorpsiyon Deneyleri

5.2.1. Optimizasyon

İlk olarak 541 nm'de 5, 10 ve 25 ppm boyar madde derişimlerine ait kalibrasyon eğrisi çizilmiştir (Şekil 5.8). Ayrıca tüm ölçümler öncesi çizilen kalibrasyon eğrileri EK-2'de verilmiştir. Daha sonra, RR195 giderim deneyleri, farklı biyosorbentler ve adsorbentle, 100 ppm boyar madde derişiminde, 0,1 g biyosorbent/adsorbent varlığında, 50 mL çözelti hacmi, çözelti pH'ı ve pH=1 de 1 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarla giderim (%) ve qe değerleri bulunmuştur. Sadece alıç çekirdeğinin 1 saat sonunda giderim değeri %74,5955 ve qe değeri ise 38,04 mg/g (pH=1, 0,1 g, 50 mL ve 100 ppm deney koşullarında) olarak hesaplanmıştır. Ancak en yüksek boyar madde gideriminin meyve ve çekirdekten oluşan *Crataegus* (*Crataegus species* (hawthorn; alıç)) biyosorbentine ait olduğu belirlenmiştir (%87,47 ve qe değeri ise 43,7355) (Şekil 5.9). SBA-15 adsorbentine ait sonuçlar ise daha sınırlı olmuştur. Sonuç olarak, RR195 tekstil boyar maddesinin sulu ortamdaki giderimi için biyosorbent olarak *Crataegus* biyosorbentinin kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 5.8. Kalibrasyon eğrisi verisi.

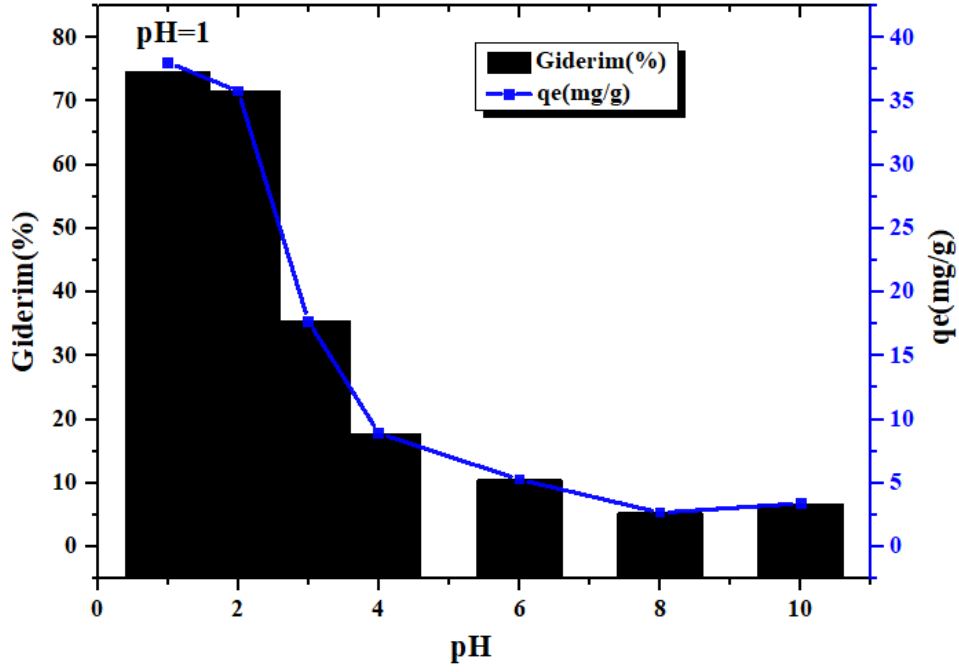


Şekil 5.9. RR195 boyar maddesinin farklı biyosorbentlerle oda koşullarında, a) çözelti pH'ı (Cr, Ci, SBA-15, Cn, Cr* ve P) ve b) pH=1'de (Cr_1, C_1, SBA-15_1, Cn_1 ve P ve Cr*_1(meyve + çekirdek)) % giderim ve adsorpsiyon (biyosorpsiyon) kapasitesi sonuçları (Biyosorbent dozajı: 0.1 g, Temas süresi: 1 saat).

5.2.2. pH Deneyleri

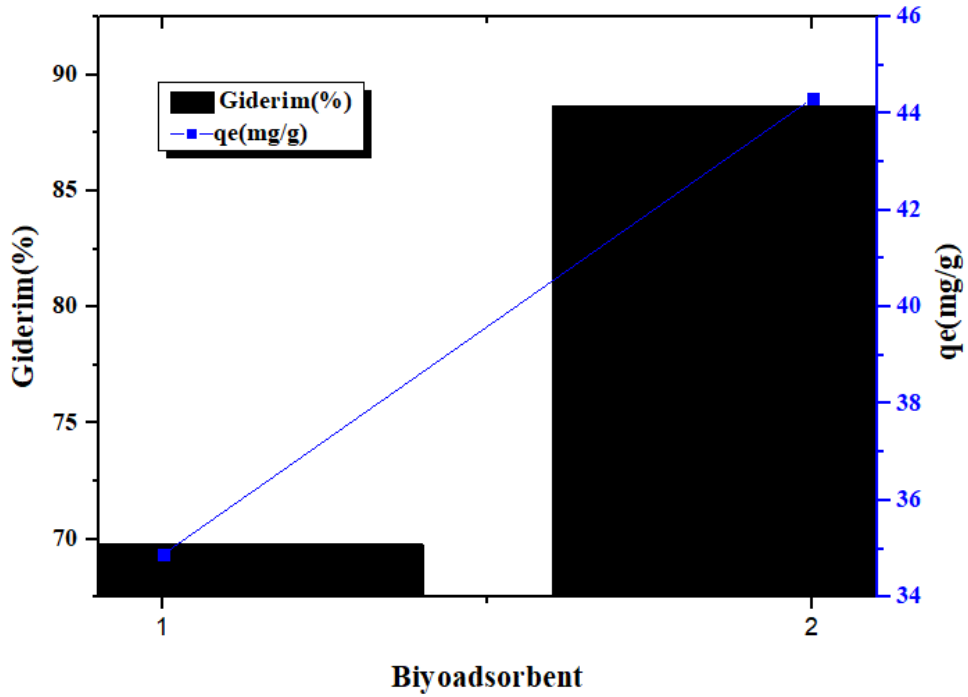
pH, adsorptif molekülün iyonlaşma derecesini ve adsorbanın yüzey yükünü kontrol etmesi açısından adsorpsiyonu etkileyen en önemli parametrelerden biridir (Jawad ve diğerleri, 2020a). İlk olarak hazırlanan biyosorbentten 0,1g alınarak, farklı pH (pH=1, 2, 3, 4, 6, 8 ve 10) larda hazırlanan 100 ppm RR195 boyar maddesi içeren 50 ‘şer mL çözeltiler ile 1 saat süre boyunca karıştırılarak biyosorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.10). 1 saat sonrasında boyar madde çözeltisi ve biyosorbent, 4000 rpm'de 5 dakika süreyle santrifüjlenerek birbirlerinden ayrılmıştır. Santrifüj işlemi sonrasında adsorbandan ayrılan boyar maddelerin derişimleri, UV spektrofotometre cihazı kullanılarak 541 nm dalga boyunda belirlenmiştir.

Ayrıca bu aşamada iki farklı alıç çekirdeğinin de biyosorpsiyon verimi pH=1'de (100 mesh boyutuna sahip, 0,1 g adsorban, 50 mL ve 100 ppm RR195 içeren çözelti varlığında 1 saat boyunca) araştırılmıştır. % giderim ve qe (mg/g) değerleri sırasıyla 69.77, 88.64, 34.88 ve 44.43 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.11). Tüm atıkların değerlendirilmesi için beyaz ve siyah alıç çekirdeklerinin bundan sonraki çalışmalarda biyosorbent olarak birlikte kullanılmasına karar verilmiş ve yeniden pH optimizasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir (pH=1, 2, 3, 4, 6, 8 ve 10). Çözelti pH değerlerinin biyosorpsiyon verimini önemli ölçüde etkilediği açıkça görülmektedir. Deneyler iki paralel şekilde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.12'de gösterilmiştir.

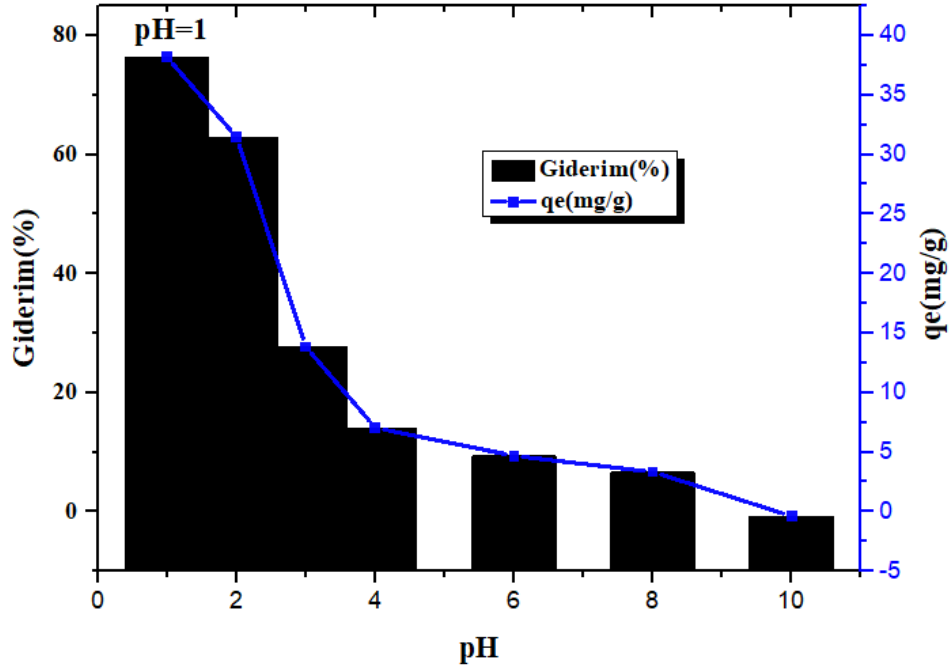


Şekil 5.10. RR195 boyar maddesinin farklı pH'larda % giderim ve qe sonuçları (beyaz alıç çekirdeği).

Veriler incelendiğinde en iyi giderim ve qe (%74,5926 ve 38.0385 mg/g) değerleri pH=1'de elde edilmiştir. pH optimizasyon çalışmaları sonrasında sonraki deneylerin pH=1'de gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.



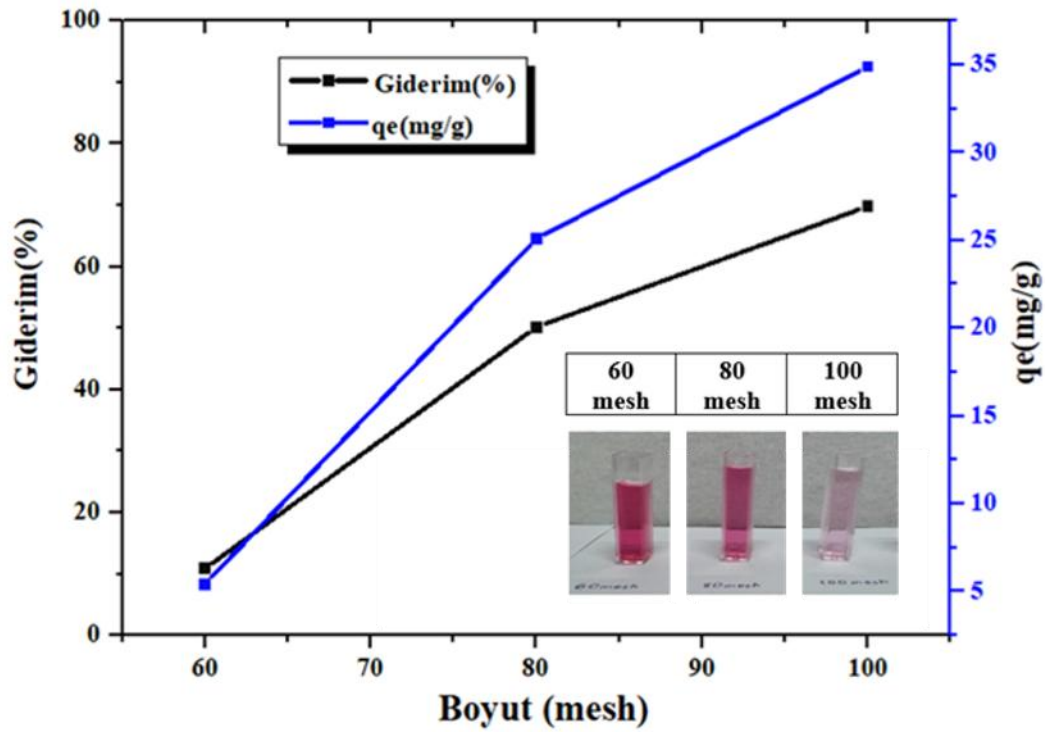
Şekil 5.11. RR195 boyar maddesinin biyosorbentlerle (1: beyaz ve 2: siyah alıç çekirdeği karışımı) farklı pH'larda % giderim ve qe sonuçları (partikül boyutu 100 mesh).



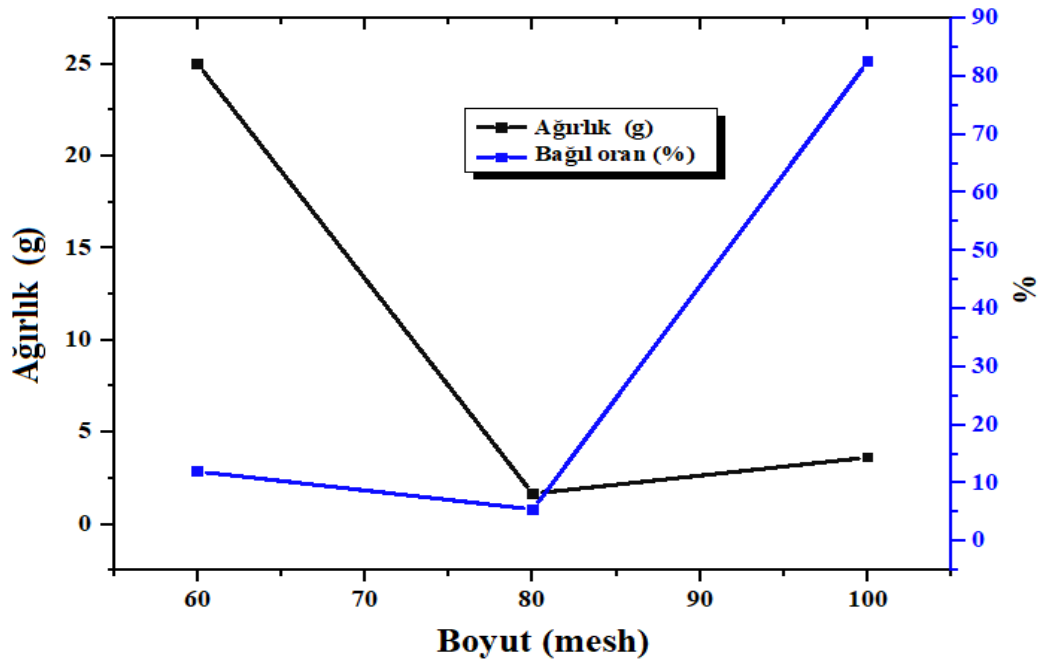
Şekil 5.12. RR195 boyar maddesinin biyosorbentlerin (beyaz ve siyah alıç çekirdeği karışımı) farklı pH'larda % giderim ve qe sonuçları.

5.2.3. Biyosorbent Tanecik Boyutunun Boyar madde (Reaktif Red 195) Giderimine Etkisi

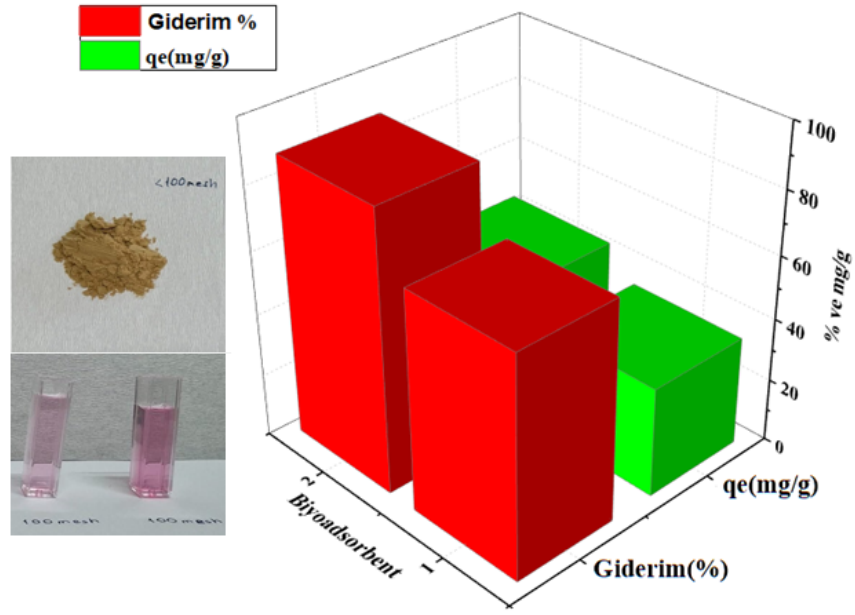
RR195 boyarmaddesinin gideriminde biyosorbentin tanecik boyutunun biyosorpsiyona etkisi 60, 80 ve 100 mesh boyutlarındaki tanecikler ile araştırılmıştır. Deneyler, pH=1'de, 0,1g biyosorbent (60, 80 ve 100 mesh boyutlarında), 50 mL, 100 ppm boyarmadde çözeltileri ile 1 saat sürede gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.13'te verilmiştir. Sonuçlara göre RR195 boyar maddesinin gideriminde tanecik boyutunun çok önemli olduğu belirlenmiştir (bunun sebebinin küçük tanecik boyutlarına sahip biyosorbentlerin daha yüksek yüzey alanına sahip olmalarından kaynaklandığı söylenebilir). Karışım içerisindeki farklı boyutlara ait ağırlık ve %'lik değerleri Şekil 5.14'te gösterilmiştir. Ayrıca beyaz ve siyah alıç çekirdekleri aynı tanecik boyutunda giderim açısından karşılaştırılmıştır (Şekil 5.15). Elde edilen verilere göre alıç türlerine ait çekirdeklerin ve boyutlarının giderim ve qe değerlerinde önemli etkiye sahip oldukları belirlenmiştir. Bu bağlamda tüm atık biyokütlelerin kullanılması amacıyla farklı çeşitlere ait alıç örnekleri birleştirilerek tek bir tanecik boyutunda (100 mesh) sonraki deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.13. RR195 boyar maddesinin % giderimi ve qe değeri için tanecik boyutunun etkisi (pH=1).



Şekil 5.14. Biyosorbent karışımında kullanılan tanecik boyut bağıl oranı ve ağırlık değerleri.



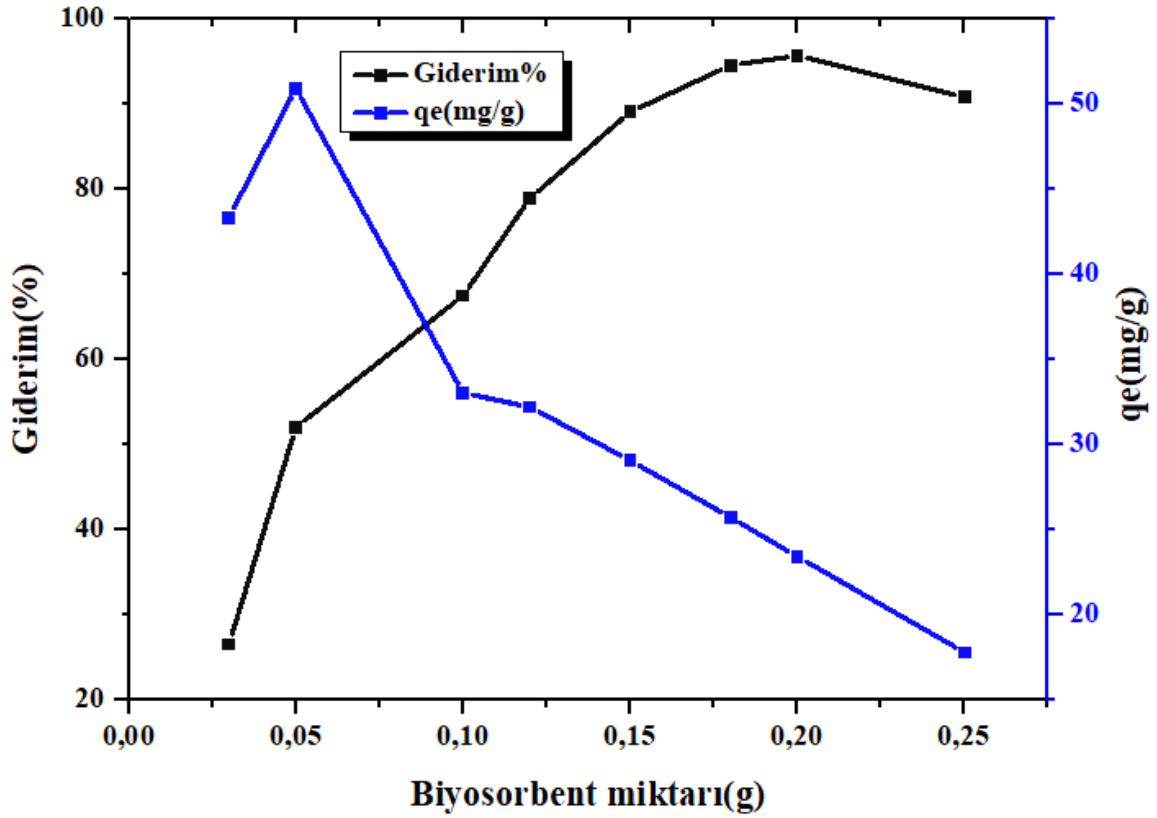
Şekil 5.15. RR195 boyar maddesinin farklı alıç çekirdekleri (1: beyaz ve 2: siyah) kullanılarak elde edilen % giderim ve qe sonuçları (pH=1 ve 100 mesh).

5.2.4. Biyosorbent Miktarı Deneyleri

Biyosorbent miktarı Reaktif Red 195 boyar maddesinin giderimini önemli ölçüde etkileyen önemli koşullardan biridir. Bu etkiyi araştırmak için, 100 ppm, 50 mL RR195 boyarmaddesi içeren çözeltiler ile 0,03-0,25g adsorban varlığında pH=1'de ve 60 dakika süreyle deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.16 'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar biyosorpsiyon kapasitesi ve % verim açısından değerlendirildiğinde 0,18 g biyosorbent miktarının en uygun miktar olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

RR195 boyar madde gideriminin 0,2 g biyosorbent varlığında %95,68 oranında gerçekleştiği gözlenmiştir bu biyosorbent miktarındaki qe değeri ise 23,42 mg/g olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan 0,25 g biyosorbent miktarında ise giderim değerinin düştüğü belirlenmiştir (%90,8). Elde edilen bu sonuçlara çevre, maliyet ve kolay ulaşım açısından bakıldığında kullanılan biyosorbentin oldukça avantajlı olduğu söylenebilir.

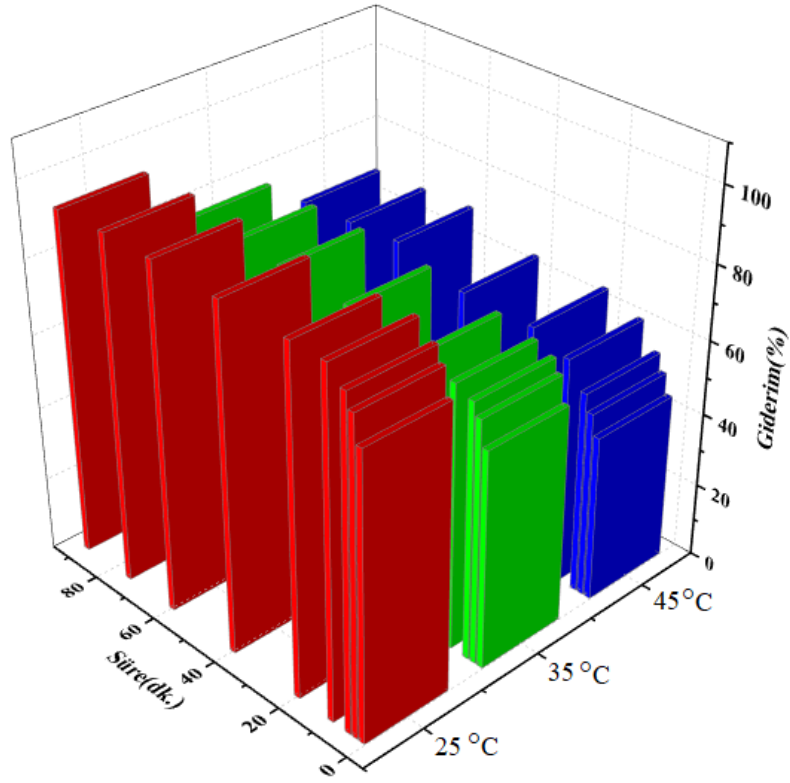
Biyosorbent miktarı analizlerine ait kalibrasyon eğrisi EK-2'a 'da verilmiştir.



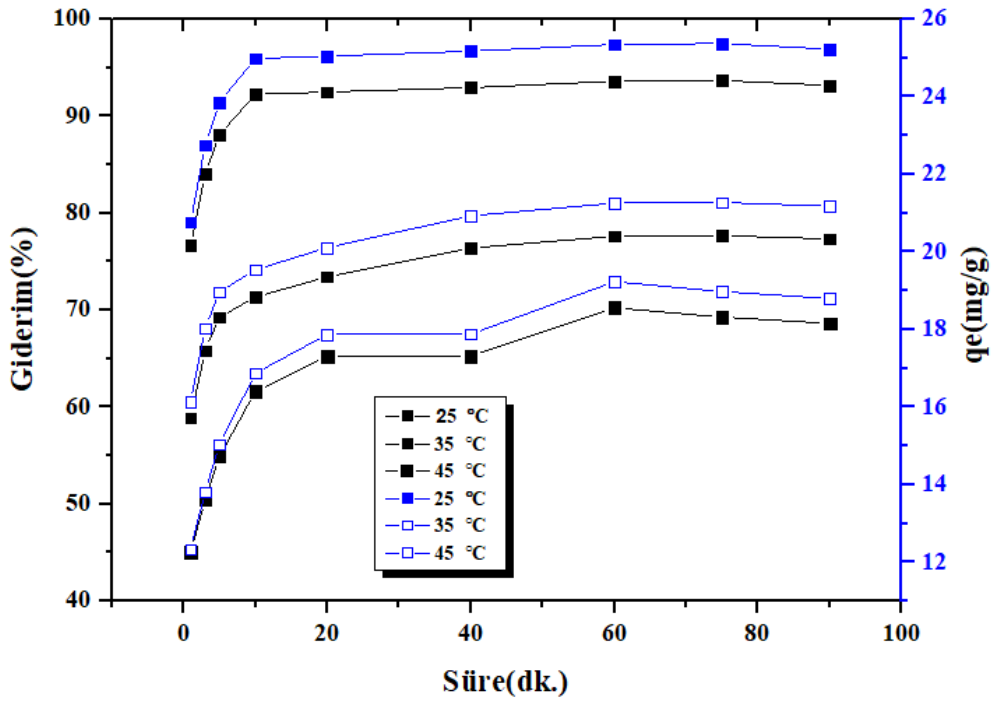
Şekil 5.16. RR195 boyar maddesinin biyosorbent miktarına bağlı % giderim ve qe sonuçları (pH=1, 100 ppm RR195, 50mL, 1 saat).

5.2.5.Temas Süresinin Etkisi

RR195 kimyasalının gideriminde temas süresi bilgisi ekonomik açıdan ve giderim mekanizmasının anlaşılması açısından önem arz eder. Yani kısa sürede maksimum verime ulaşmak giderilecek boyar madde miktarı açısından önemlidir. RR195 boyar maddesinin gideriminde temas süresinin etkisi üç farklı sıcaklıkta (25°C, 35°C ve 45°C 'de) pH=1 değerinde, 100 ppm, 0,18 g biyosorbent varlığında, 50 mL, 100 ppm boyarmadde içeren çözeltiler ile sırası ile 1, 3, 5, 10, 20, 40, 60, 75 ve 90 dakika boyunca araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 5.17 ve 5.18 'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde üç farklı sıcaklık için RR195 boyar madde gideriminde 20 dakika sonunda biyosopsiyonun dengeye geldiği ifade edilebilir. Denge süresinin 20 dakika gibi kısa bir süre olması maliyet açısından da önem arz etmektedir. Farklı sıcaklık ve süre analizlerinde kullanılan kalibrasyon eğrisi EK-2 b'de verilmiştir. Ayrıca oda sıcaklığı verilerinde *Crataegus* biyosorbentin 10. dakikadan sonra dengeye geldiği, 5. dakika gibi kısa bir sürede giderim ve qe değerleri sırasıyla, %88 ve 23,85 mg/g olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.18). Süre analizlerine ait kalibrasyon eğrisi EK-2 c 'de verilmiştir.



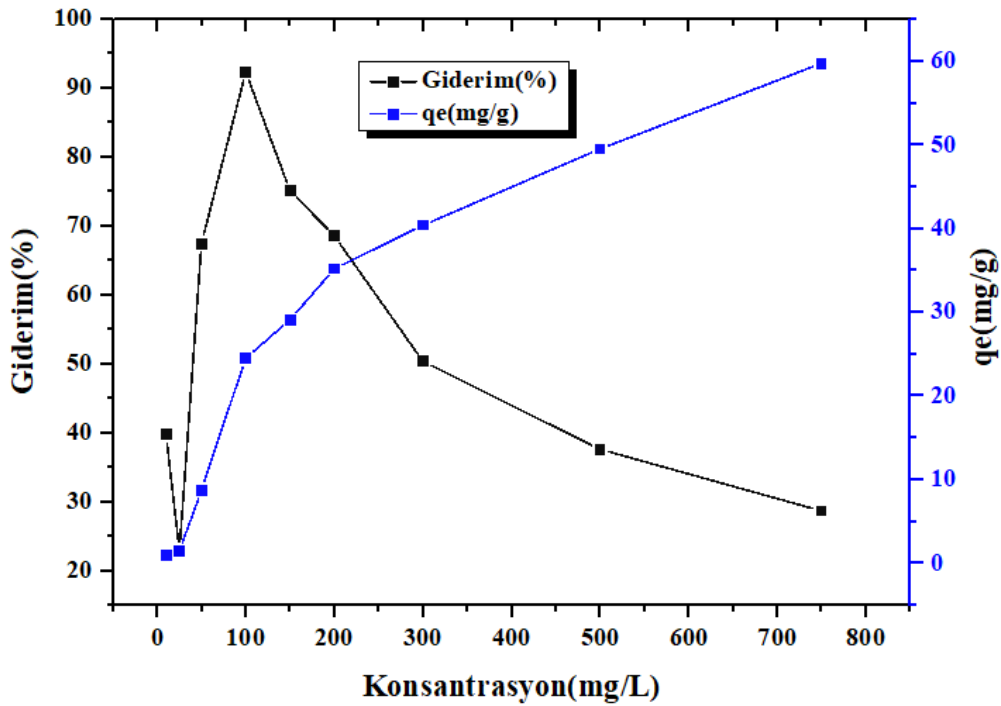
Şekil 5.17. RR195 boyar maddesinin farklı süre ve sıcaklıklardaki % giderim sonuçları (pH=1; ve süre, 1, 3, 5, 10, 20, 40, 60, 75 ve 90dk., çözelti, 100ppm).



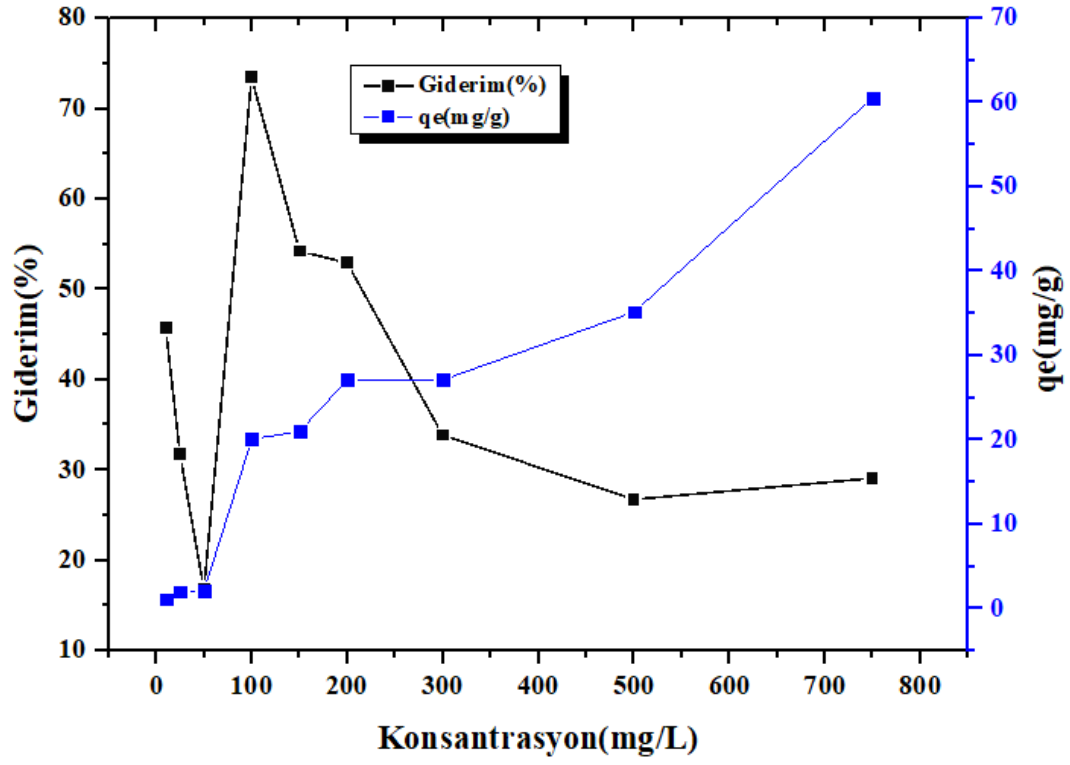
Şekil 5.18. RR195 boyar maddesinin farklı süre ve sıcaklıklardaki % giderim ve qe sonuçları (pH=1; ve süre, 1, 3, 5, 10, 20, 40, 60, 75 ve 90dk., çözelti, 100ppm).

5.2.6. Derişim Deneyleri

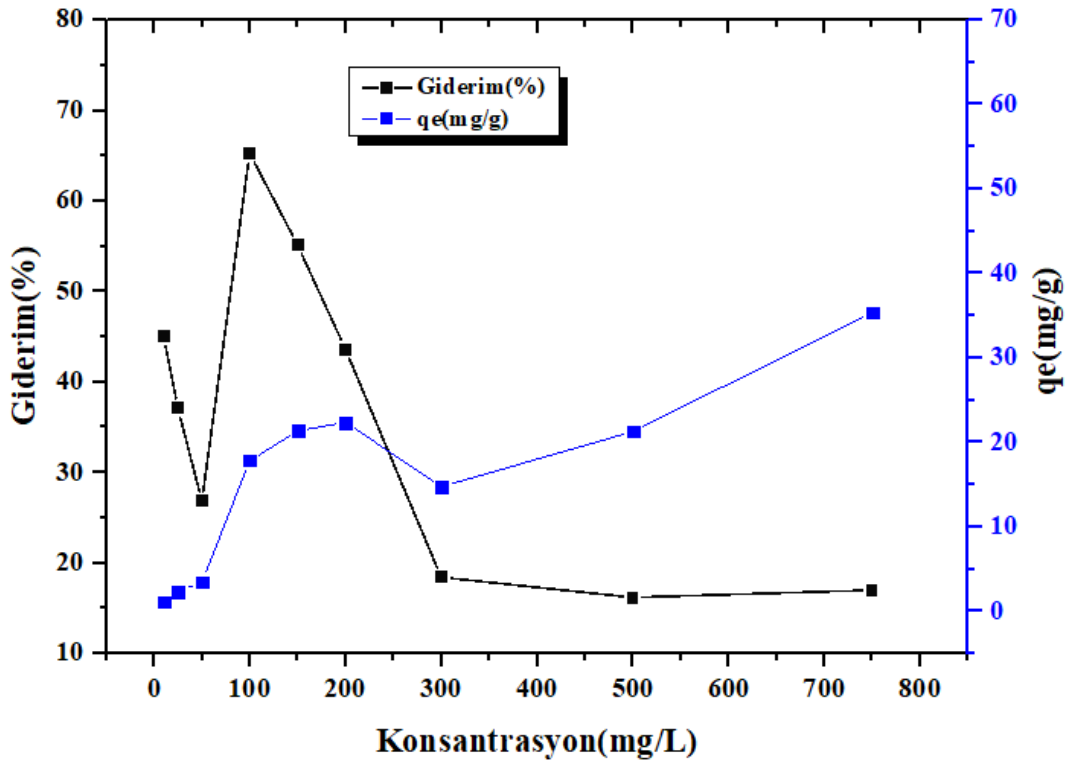
Adsorpsiyonda başlangıç boyarmadde konsantrasyonunun etkisi de çalışma kapsamında araştırılmıştır. Çünkü belirli bir biyosorbent miktarı ile yalnızca sınırlı bir miktarda boyarmadde adsorbe edebildiğinden dolayı başlangıç boyarmadde konsantrasyonu biyosorpsiyonda önemli bir rol oynar (Subash vd., 2013). RR195 boyarmaddesinin başlangıç derişiminin biyosorpsiyona etkisi, pH=1'de, 50 mL, sırası ile 10, 25, 50, 100, 150, 200, 300, 500 ve 750 ppm RR195 boyarmadde içeren çözeltiler ile, 0,18 g biyosorbent varlığında 20 dakika süre ile üç farklı sıcaklıkta (25°, 35°, 45°C) araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.19, 20 ve 21'de verilmiştir. *Crataegus* çekirdeğinden elde edilen biyosorbentlerin en fazla 100 ppm'de etkili olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.16, 17 ve 18).



Şekil 5.19. Farklı konsantrasyonlarda RR195 boyar madde % giderimi ve qe sonuçları (pH=1, sıcaklık 25°C).



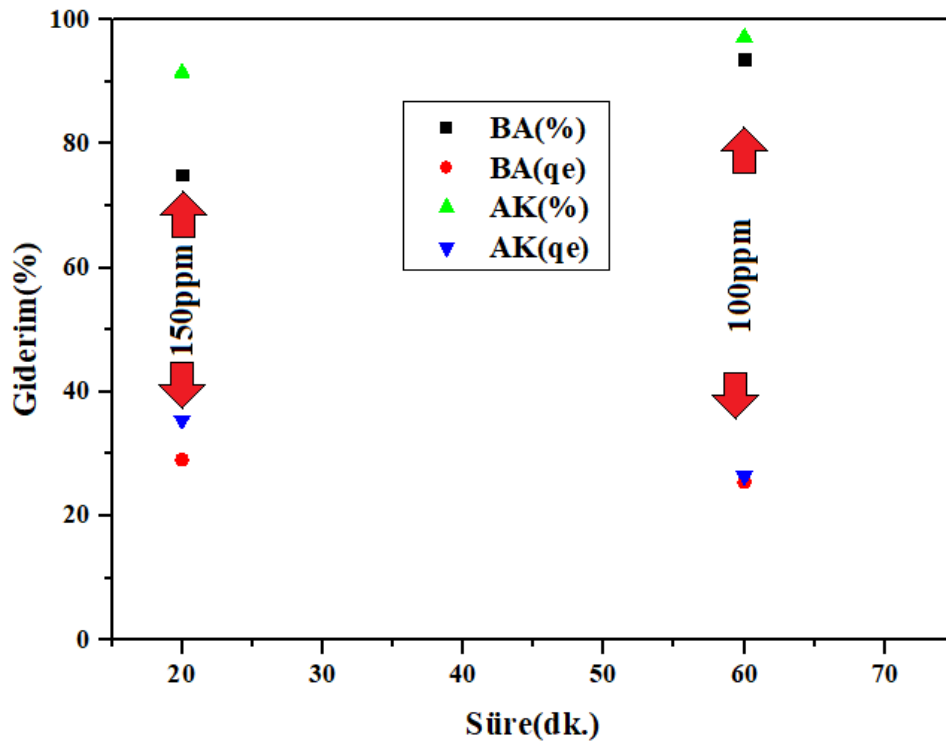
Şekil 5.20. Farklı konsantrasyonlarda RR195 boyar madde % giderimi ve qe sonuçları (pH=1, sıcaklık 35°C).



Şekil 5.21. Farklı konsantrasyonlarda RR195 boyar madde % giderimi ve qe sonuçları (pH=1, sıcaklık 45°C).

5.2.7. Biyosorbentin Ticari Bir Aktif Karbon Örneği ile Karşılaştırılması

Optimizasyon sonrası seçilen biyosorbent örneği ile ticari olarak kullanılan aktif karbon örneği aynı deney koşullarında karşılaştırılmıştır. Analiz koşulları, 0,18 g adsorban/biyosorbent varlığında, pH=1, 50 mL, 100 ve 150 ppm boyarmadde içeren çözeltiler varlığında, oda sıcaklığında 20 ve 60 dakika sürelerde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.22’te gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde biyosorbentin verimi aktif karbon verimine oldukça yakın olduğu ifade edilebilir. Maliyet analizi yapıldığında sadece doğal kurutma ve bir öğütme işlemiyle elde edilen biyosorbentin ticari aktif karbon örneğine göre daha ekonomiktir denilebilir.

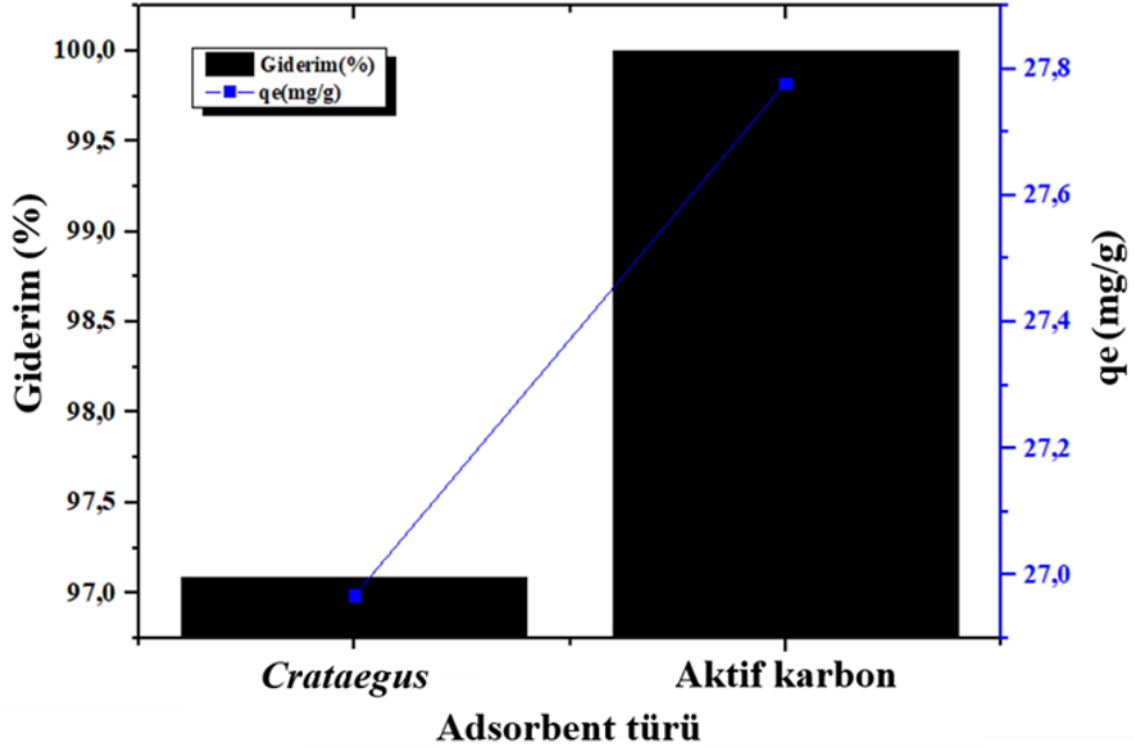


Şekil 5.22. Biyosorbent ve ticari aktif karbonun farklı derişim ve sürelerde RR195 boyar maddesinin % giderim ve qe sonuçları (pH=1, oda sıcaklığında).

5.2.8. Simüle Edilmiş Atık Su Analizleri

Optimizasyon işlemleri sonucunda hazırlanan biyosorbentin endüstriyel atık su giderimindeki potansiyeli de simüle edilmiş bir atık su örneğinde test edilmiştir. Bu amaçla 0.18g biyosorbent, 20 dk. boyunca, oda sıcaklığında 50 mL, 100ppm RR195 boyarmaddesini içeren ve çözelti bileşimi Tablo 4.1 de verilen sentetik olarak hazırlanan atık suda test edilmiştir. Denemeler, 2 paralel olarak yapılmıştır (Şekil 5.23). Dahası üretim, sentez aşamaları ve

sürdürülebilir ekoloji bakımından incelendiğinde kullandığımız biyosorbentin oldukça avantajlı olduğu görülmektedir.



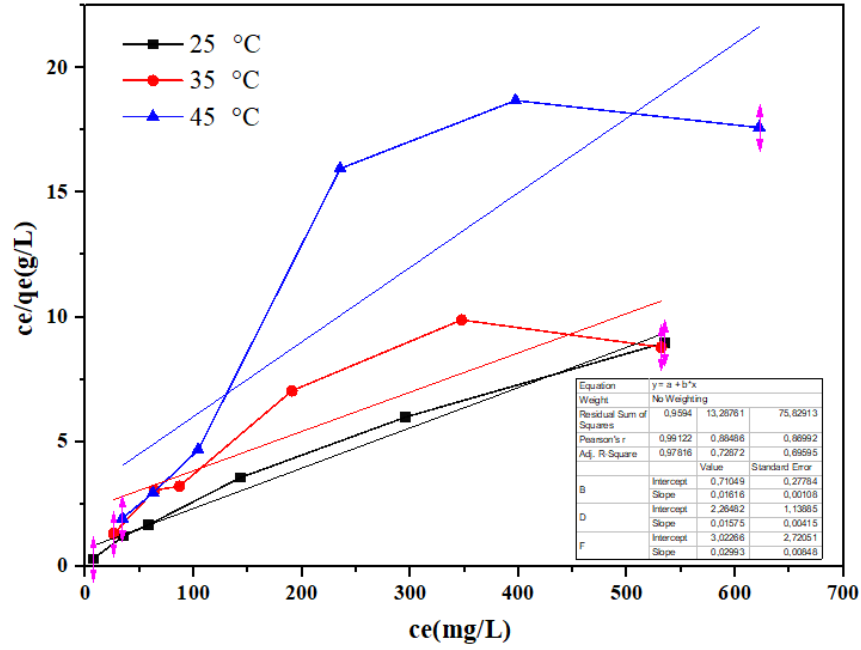
Şekil 5.23. Simüle atık su % giderim ve qe sonuçları (20 dk, oda sıcaklığı, 0,18g, pH=1).

5.3. Adsorpsiyon İzoterm, Kinetiği ve Termodinamik Hesaplamaları

Elde edilen deneysel verilerin bazı izoterm (Langmuir, Freundlich, Temkin ve Dubinin-Radushkevich (D-R) ve kinetik modellere (Yalancı birinci derece, yalancı ikinci derece, Partikül içi Difüzyon) uygunlukları araştırılarak, biyosorpsiyona ait termodinamik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

5.3.1. Adsorpsiyon İzotermi ve Hesaplamaları

Farklı sıcaklıklarda elde edilen RR195 boyar maddesi gideriminden elde edilen deneysel verilerin ilk olarak Langmuir izoterm modeline uygunluğu test edilmiştir. Ce ve ce/qe değerleri kullanılarak her bir sıcaklık için Langmuir izoterm eğrileri çizilmiştir. Elde edilen grafikler Şekil 5.24'te gösterilmiştir.



Şekil 5.24. RR195 boyar maddesinin biyosorbent ile sulu çözelti ortamında farklı sıcaklık ve konsantrasyonlarda (100, 150, 200, 300, 500 ve 750ppm) adsorpsiyonunun Langmuir izoterm eşitliğinin uygulanması.

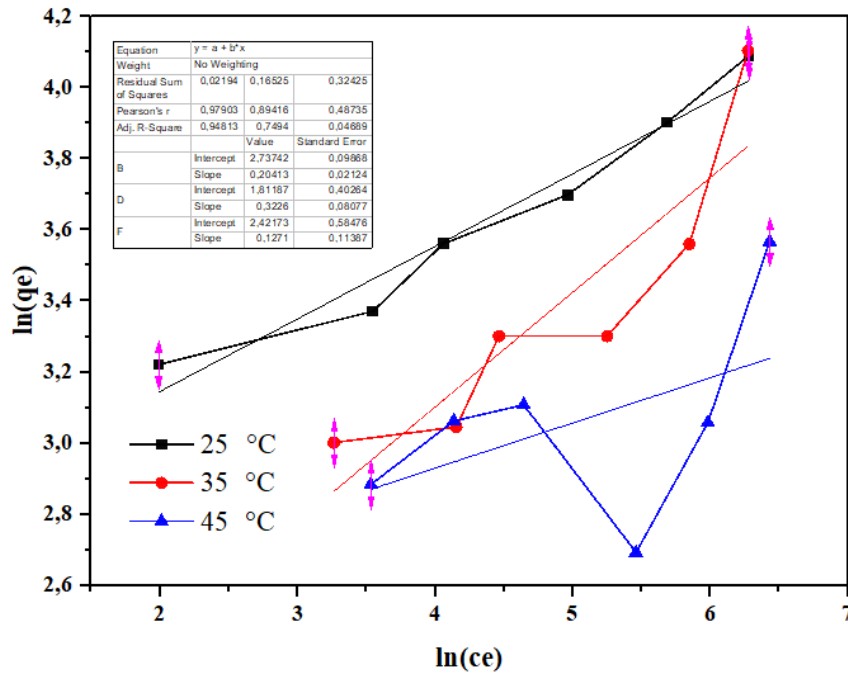
Farklı sıcaklık ve konsantrasyonlar için elde edilen veriler kullanılarak R^2 , K_L ve R_L değerleri elde edilmiştir. Değerler sırasıyla 0,978, 0,0112, 0,4386 (R^2 , K_L , R_L , 25°C), 0,728, 0,0356, 0,2190, (R^2 , K_L , R_L , 35°C), 0,696, 0,0017, 0,8551 (R^2 , K_L , R_L , 45°C), olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.24). Özellikle oda sıcaklığı sonuçları incelendiğinde, adsorpsiyon deneyinin istemli ($0 < R_L < 1$) olduğu belirlenmiştir. Elde edilen değerler Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Biyosorbentin yüzeyine adsorbe edilmiş RR195 boyar maddesine ait adsorpsiyon için Langmuir izoterm parametreleri.

İzoterm Modeli	Sıcaklık(°C)	Parametre	Değeri
Langmuir	25°C	q _{max} (teorik)	61,8811 mg/g
		q _{max} (deneysel)	59,7153 mg/g
		K _L	0,0112 L/mg
		R _L	0,4386
		R ²	0,978
	35°C	q _{max} (teorik)	63,49 mg/g
		q _{max} (deneysel)	60,58 mg/g
		K _L	0,0356 L/mg
		R _L	0,2190
		R ²	0,728
	45°C	q _{max} (teorik)	33,41 mg/g
		q _{max} (deneysel)	35,39 mg/g
		K _L	0,0017 L/mg
		R _L	0,8551
		R ²	0,696

qe; dengedeki değerler alınmıştır.

Diğer bir izoterm modeli olan Freundlich modelide her bir sıcaklık için uygulanmış ve elde edilen grafikler ($\ln q_e$ ve $\ln c_e$ 'ye karşılık) Şekil 5.25'te verilmiştir.



Şekil 5.25. RR195 boyar maddesinin biyosorbent ile sulu çözelti ortamında farklı sıcaklık ve konsantrasyonlarda (100, 150, 200, 300, 500 ve 750ppm) adsorpsiyonunun Freundlich eşitliğinin uygulanması.

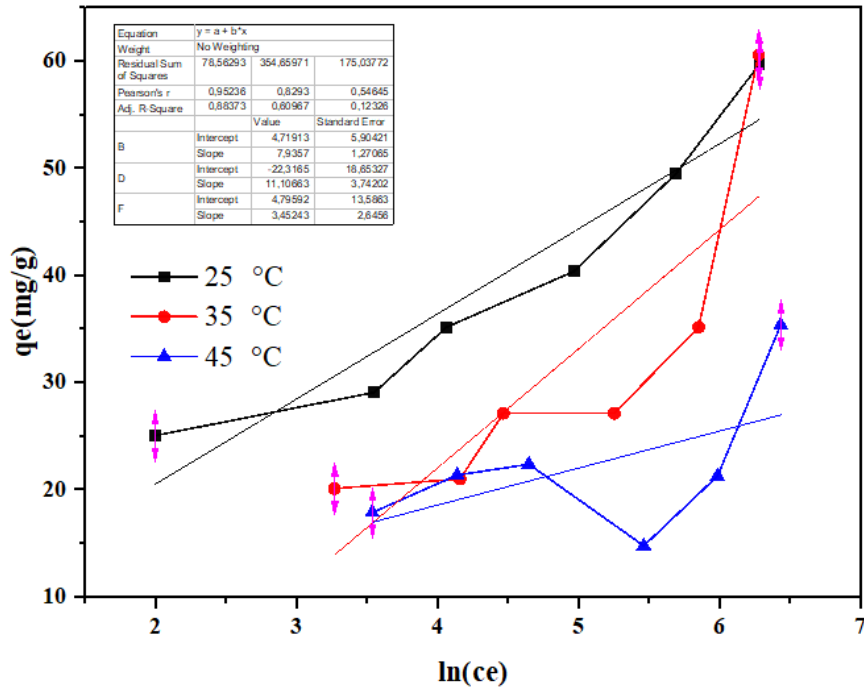
Freundlich izoterm eğrileri kullanılarak n , $1/n$, K_F ve R^2 değerleri 25°, 35° ve 45°C reaksiyon sıcaklıkları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.2'de verilmiştir. En iyi sonuçların oda sıcaklığında (25°C) elde edildiği belirlenmiştir.

Tablo 5.2. Biyosorbent yüzeyine adsorbe edilmiş RR195 boyar maddesine ait adsorpsiyon için Freundlich parametreleri.

İzoterm Modeli	Sıcaklık(°C)	Parametre	Değeri
Freundlich	25°C	n	4,899
		1/n	(0,2041) gL ⁻¹
		K _F	15,44 (mg/g)(Lmg ⁻¹) ^{1/n}
		R ²	0,948
	35°C	n	3,121
		1/n	0,3204 gL ⁻¹
		K _F	6,197 (mg/g)(Lmg ⁻¹) ^{1/n}
		R ²	0,749
	45°C	n	7,86
		1/n	0,1271 gL ⁻¹
		K _F	11,2649 (mg/g)(Lmg ⁻¹) ^{1/n}
		R ²	0,237

qe; dengedeki değerler alınmıştır.

Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tezi kapsamında üçüncü adsorpsiyon izoterm modeli olarak Temkin izoterm modeli 25°, 35° ve 45°C reaksiyon sıcaklıkları için uygulanmıştır. Elde edilen veriler Tablo 5.3 ve grafikler Şekil 5.26'da verilmiştir.



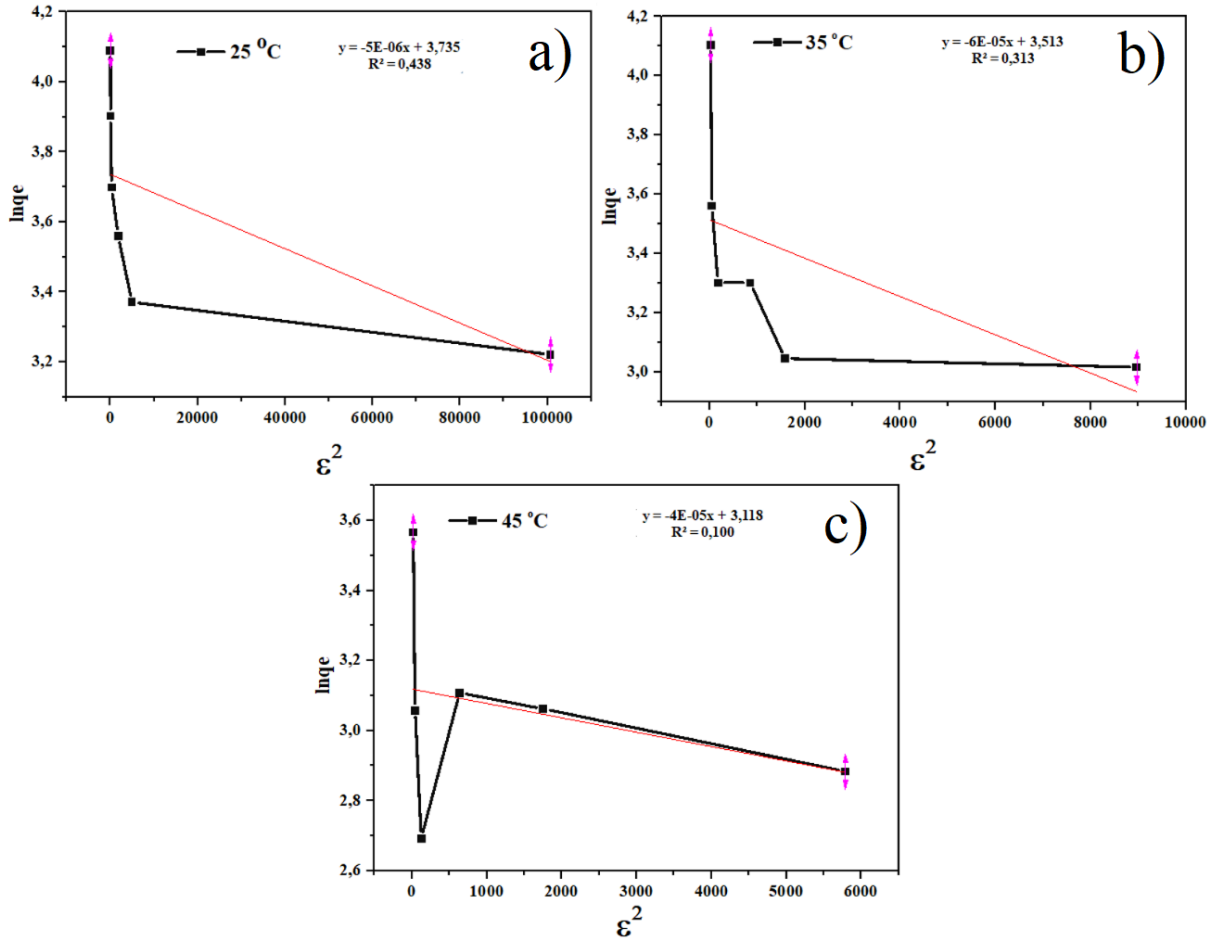
Şekil 5.26. RR195 boyar maddesinin biyosorbent ile sulu çözelti ortamında farklı sıcaklık ve konsantrasyonlarda (100, 150, 200, 300, 500 ve 750 ppm) adsorpsiyonunun Temkin eşitliğinin uygulanması.

Tablo 5.3. Biyosorbentin yüzeyine adsorbe edilmiş RR195 boyar maddesine ait adsorpsiyon için Temkin parametreleri.

İzoterm Modeli	Sıcaklık(°C)	Parametre	Değeri
Temkin	25°C	B_T	7,9357 j/mol
		b	312,363
		K_T	1,8 mg/g
		R^2	0,88
	35°C	B_T	11,106 j/mol
		b	230,669
		K_T	0,134 mg/g
		R^2	0,61
	45°C	B_T	3,45 j/mol
		b	766,69
		K_T	4,008 mg/g
		R^2	0,123

q_e ; dengedeki değerler alınmıştır.

Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tezi kapsamında dördüncü adsorpsiyon izoterm modeli olarak Dubinin-Radushkevich modeli 25°, 35° ve 45°C reaksiyon sıcaklıkları için yapılmıştır. Elde edilen veriler Tablo 5.4 ve grafikler Şekil 5.27'te verilmiştir.



Şekil 5.27. RR195 boyar maddesinin biyosorbent ile sulu çözelti ortamında farklı sıcaklık ((a) 25°C, (b) 3 °C 5, (c) 45 °C) ve konsantrasyonlarda (100, 150, 200, 300, 500 ve 750 ppm) adsorpsiyonunun Dubinin-Radushkevich eşitliğinin uygulanması.

Tablo 5.4. Biyosorbentin yüzeyine adsorbe edilmiş RR195 boyar maddesine ait adsorpsiyon için Dubinin-Radushkevich parametreleri.

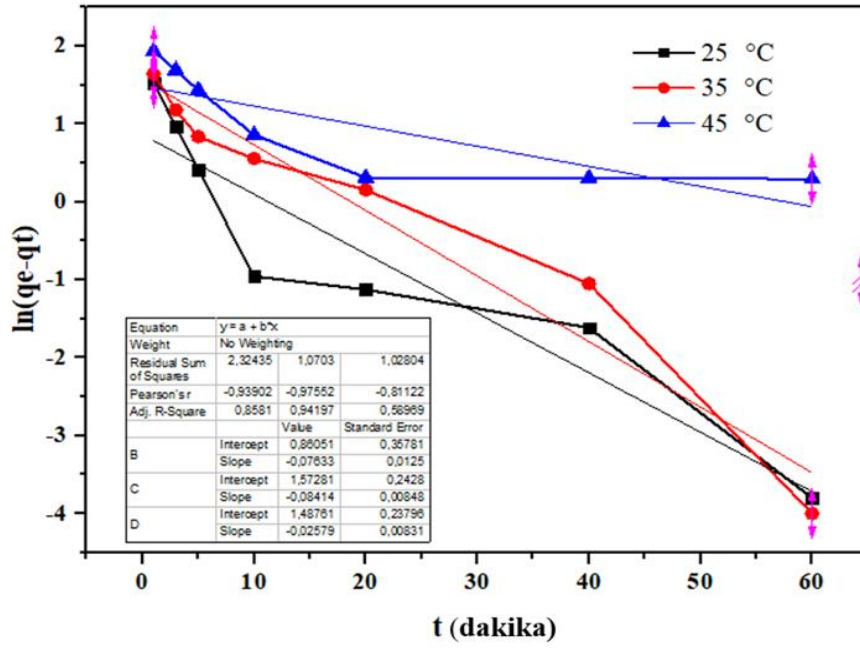
İzoterm Modeli	Sıcaklık(°C)	Parametre	Değeri
Dubinin-Radushkevich	25°C	(qm)	3,69.10 ⁻⁵ mol/g
		K_{DR}	-5.10 ⁻⁶ mol ² .kj ⁻²
		R ²	0,438
		E	0,316 kj/mol
	35°C	qm	2,95.10 ⁻⁵ mol/g
		K_{DR}	-6.10 ⁻⁵ mol ² .kj ⁻²
		R ²	0,314
		E	0,091 kj/mol
	45°C	qm	1,9895 mol/g
		K_{DR}	-4.10 ⁻⁵ mol ² .kj ⁻²
		R ²	0,1003
		E	0,112 kj/mol

qe; dengedeki değerler alınmıştır.

Tablo 5.4 ve Şekil 5.27'e ait sonuçlar incelendiğinde, her bir sıcaklık için 'E' değerleri ise 8 kj/mol'den düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu sonuçlardan fiziksel adsorpsiyon işlemlerinin hem boyar madde yapısına hem de biyokütleye zarar vermeyeceği sonucu çıkarılabilir. Ancak bu model için R² değerleri incelendiğinde çok yüksek bir korelasyon elde edilmediği görülmektedir. Bu sonuçlar farklı sıcaklık ve konsantrasyonlardaki adsorpsiyon deneylerinin fiziksel olduğunu gösterse de belirtilen R² değerleri ile bu yorumun sınırlı kalacağı da öngörülmektedir

5.3.2. Adsorpsiyon Kinetiği ve Hesaplamaları

Gerçekleştirilen bu çalışmada adsorpsiyon kinetiği hesaplamaları, Yalancı Birinci Dereceden Kinetik Modeli, Yalancı İkinci Dereceden Kinetik Modelleri ve Weber ve Morris tarafından önerilen partikül içi difüzyon modelleri kullanılarak araştırılmıştır. İlk olarak Yalancı Birinci dereceden kinetik modeli için hesaplamalar yapılmış, elde edilen sonuçlar Şekil 5.28'de verilmiştir.

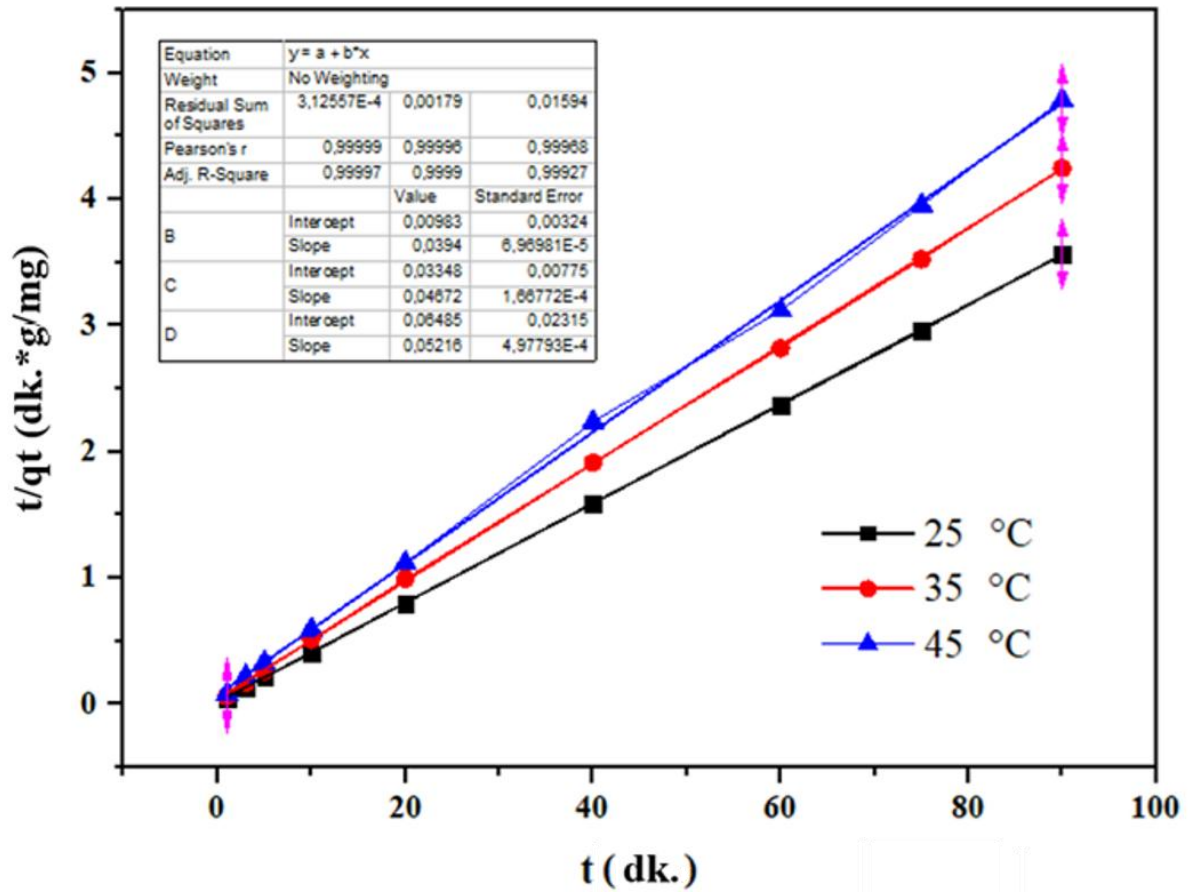


Şekil 5.28. RR195 boyar maddesinin biyosorbent ile gideriminde Yalancı birinci derece kinetik model sonuçları (25, 35 ve 45°C de).

Tablo 5.5. Biyosorbent yüzeyine adsorbe edilmiş RR195 boyar maddesine ait adsorpsiyon için yalancı birinci merteye verileri.

Sıcaklık (°C)	Yalancı birinci derece	
25°C	qe (deneysel)	25,374 mg/g
	qe (hesaplanan)	2,36 mg/g
	K ₁	0,76 (dk ⁻¹)
	R ²	0,881
35°C	qe (deneysel)	21,279 mg/g
	qe (hesaplanan)	4,80 mg/g
	K ₁	0,084 (dk ⁻¹)
	R ²	0,942
45°C	qe (deneysel)	19,236 mg/g
	qe (hesaplanan)	4,42 mg/g
	K ₁	0,026 (dk ⁻¹)
	R ²	0,59

qe; dengedeki değerler alınmıştır.



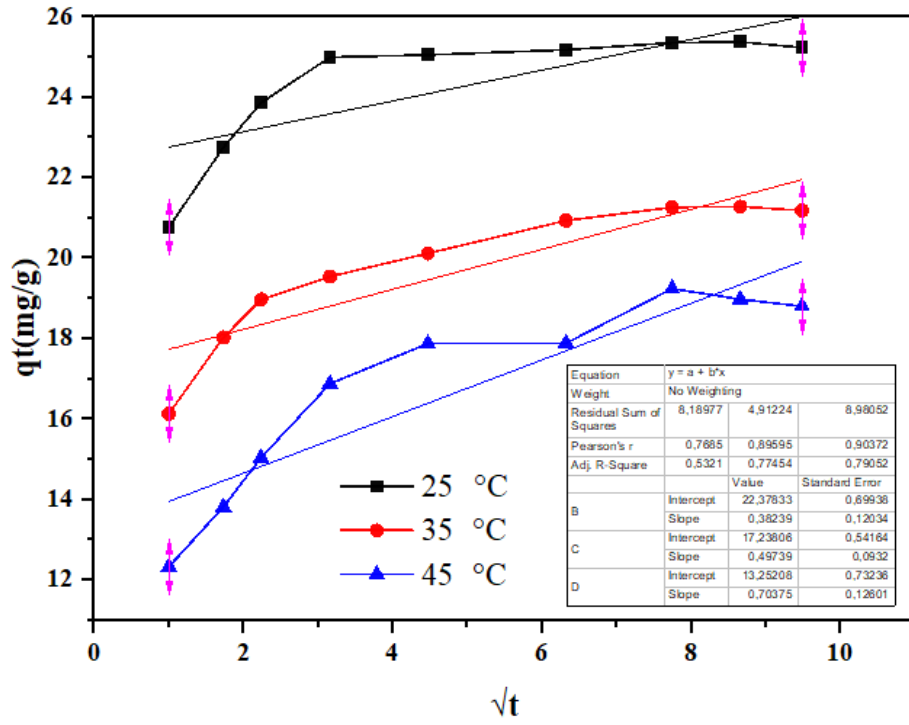
Şekil 5.29. RR195 boyar maddesinin biyosorbent ile gideriminde Yalancı ikinci derece kinetik model sonuçları (25, 35 ve 45°C de).

Daha sonra yalancı ikinci dereceden kinetik modeli için hesaplamalar yapılmış, elde edilen sonuçlar Tablo 5.6 ve Şekil 5.29'da gösterilmiştir. Son olarak ise partikül içi difüzyon modeli uygulanmıştır. Elde edilen veriler Tablo 5.7 ve Şekil 30'da verilmiştir. Kütle transferi ve reaksiyon basamaklarını belirlemede kullanılan bu üç model (Yalancı birinci-ikinci mertebe ve partikül içi difüzyon) için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında deneylerin yalancı ikinci derece kinetik modeline daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5.6. Biyosorbent yüzeyine adsorbe edilmiş RR195 boyar maddesine ait adsorpsiyon için yalancı ikinci merteye verileri.

Sıcaklık (°C)	Yalancı ikinci derece	
25°C	qe (deneysel)	25,374 mg/g
	qe (hesaplanan)	25,380 mg/g
	K ₂	0,009 (q/mg.dk)
	h	5,8 (mg/g.dk)
	R ²	0,9999
35°C	qe (deneysel)	21,279 mg/g
	qe (hesaplanan)	21,40 mg/g
	K ₂	0,033 (q/mg.dk)
	h	15,115(mg/g.dk)
	R ²	0,999
45°C	qe (deneysel)	19,236 mg/g
	qe (hesaplanan)	19,17 mg/g
	K ₂	0,064 (q/mg.dk)
	h	23,52 (mg/g.dk)
	R ²	0,999

qe; dengedeki değerler alınmıştır.



Şekil 5.30. RR195 boyar maddesinin biyosorbent ile gideriminde Partikül İçi Difüzyon modeli sonuçları (25, 35 ve 45°C de).

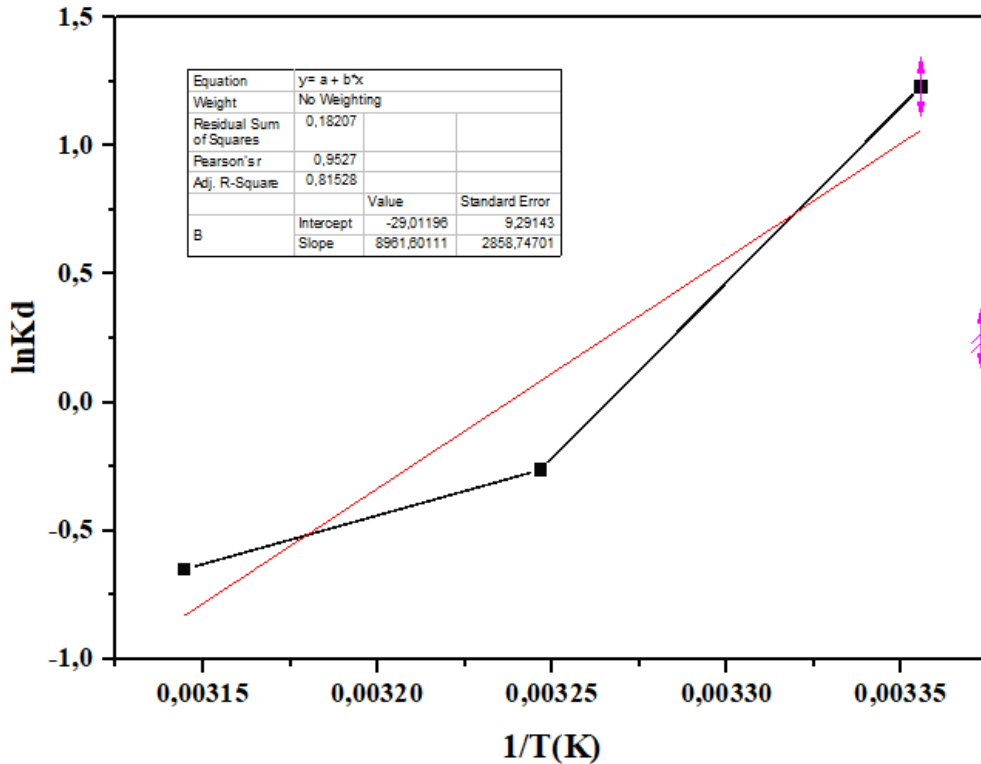
Tablo 5.7. Biyosorbent yüzeyine adsorbe edilmiş RR195 boyar maddesine ait adsorpsiyon için partikül içi difüzyon verileri.

Sıcaklık (°C)	Partikül içi difüzyon modeli	
25°C	qe(deneysel)	25,374 mg/g
	Kin	0,3824 (mg/g.dk ^{1/2})
	C	22,37 mg/g
	R ²	0,59
35°C	qe(deneysel)	21,279 mg/g
	Kin	0,4974 (mg/g.dk ^{1/2})
	C	17,23 mg/g
	R ²	0,802
45°C	qe(deneysel)	19,236 mg/g
	Kin	0,70375 (mg/g.dk ^{1/2})
	C	13,25 mg/g
	R ²	0,816

qe; dengedeki değerler alınmıştır.

5.3.3. Adsorpsiyon Termodinamiği ve Hesaplamaları

Biyosorpsiyon analizleri sonucunda elde edilen deneysel veriler kullanılarak biyosorpsiyon mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için biyosorpsiyona ait termodinamik veriler de hesaplanmıştır. Serbest enerji (ΔG°), Entalpi (ΔH°) ve Entropi (ΔS°) değerleri hesaplanmış ve elde edilen veriler Tablo 5.8’de verilmiştir. $\ln K_d$ 'ye karşılık $1/T$ değerlerinden elde edilen grafik Şekil 5.31'da gösterilmiştir. Serbest enerji değerinin negatif olarak bulunması, biyosorpsiyonun kendiliğinden gerçekleştiğini (25°C ve 35°C) ve reaksiyonun istemli olarak yürüdüğünü belirtir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ΔH değeri negatif (-) olarak hesaplanmıştır. Entalpi değerinin negatif olması ekzotermik adsorpsiyon sürecinin etkili olduğunu ve adsorpsiyon kapasitesinin sıcaklığın artışına bağlı olarak azalmayla sonuçlanacağını göstermektedir. Ayrıca biyosorbentlerde bulunan protein ve polisakkaritlerin sıcaklıkla etkilendiği ve bu yapılarda meydana gelen bozulmaların adsorpsiyon kapasitesini negatif yönde etkilediği ifade edilir. ΔS° değerinin negatif (-) çıkmasına bağlı olarak adsorpsiyon sırasında yüzeye tutunan taneciklerin serbestliklerinin düştüğünü ifade eder. Ayrıca sıcaklıkların ortalama değerlerine ait $\ln K_d$ ve $1/T$ grafiği EK-3’te verilmiştir.



Şekil 5.31. $\ln K_d$ 'ye karşılık $1/T$ grafiği.

Tablo 5.8. Biyosorpsiyona ait termodinamik veriler.

T(°K)	Ln(Kd)	$\Delta G^\circ(\text{Jmol}^{-1})$	$\Delta H^\circ(\text{KJmol}^{-1})$	$\Delta S^\circ(\text{Jmol}^{-1})$
298,15	1,229	-2593,24	-74,51	-241,21
308,15		-181,14		
318,15		+2230,96		

6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tezi, tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan RR195 boyar maddesinin sulu ortamdan biyosorpsiyon yöntemi ile giderilmesi üzerine odaklanmıştır. Gerçekleştirilen bu tezin hedeflerinden birisi de çevre dostu, ekonomik ve kolay ulaşılabilir biyosorbentlerin elde edilmesine yöneliktir. Tekstil endüstrisinde kullanılan boyar maddeler, ekolojik anlamda çevre kirliliğinin başlıca kaynaklarından birisidir. Yani sentetik boyar maddeler içeren atık sular kontrolsüz bir şekilde canlı ve cansız ekosistemlere deşarj edildiklerinde hem canlı hem de insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. RR195 boyar maddesinin sulu ortamdan uzaklaştırılması için ilk olarak farklı biyosorbentler (alıç, hindistan cevizi kabuğu, greyfurt kabuğu, şeftali biyosorbentleri) ve SBA-15 adsorbantı denenmiştir. Elde edilen deneysel verilere bakıldığında tüm bu maddeler içerisinde *Crataegus* (*Crataegus species* (hawthorn; alıç)) biyosorbentinin RR195 boyar maddesinin gideriminde etkili olduğu ve ucuz ve kolay temin edilebilir olması gibi nedenlerden dolayı belirtilen biyosorbentin RR195 boyar maddesinin gideriminde optimizasyon ve karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır.

Bu çalışmayı diğer çalışmalara göre daha avantajlı kılan özelliklere bakıldığında; kullanılan biyosorbentin ulaşılabilir, ucuz, çevreci çok ekonomik olmasının yanında %90'ın üzerinde giderim değerine sahip olmasıdır (Hem boyar madde çözeltisinde hem de sentetik olarak hazırlanan simüle atık su örneklerinde). Diğer önemli bir avantajı da giderim sürecinde herhangi bir ikincil toksik çıktıya sahip olmamasıdır. Ayrıca kullanılan biyosorbent örneği herhangi bir kimyasal işleme ihtiyaç duymadan sadece doğal koşullarda kurutma ve öğütme yöntemleri ile hazırlanabilmektedir. 20 dakika gibi kısa sürede %90'ının üzerinde giderim sağlanması ve düşük miktarlarda yüksek giderim kapasitene sahip olması da diğer avantajlarıdır.

Tüm bu verilere bakılarak kullanılan *Crataegus* (*Crataegus species* (hawthorn; alıç)) biyosorbentinin sulu çözeltilerden RR195 boyar maddesinin gideriminde ekonomik, kolaylıkla temin edilebilir ve çevre dostu bir biyosorbent olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

KAYNAKÇA

- Adegoke, K.A., Bello, O.S. (2015). Dye sequestration using agricultural wastes as adsorbents. *Water Resources and Industry*, 12, 8-24.
- Ahmad, A.A.; Hameed, B.H.; Aziz, N. (2007). Adsorption of Direct Dye on Palm Ash: Kinetic and Equilibrium Modeling. *J. Hazard. Mater.* 2007, 141, 70–76.
- Ahmad, A., Mohd-Setapar, S.H., Chuong, C.S., Khatoon, A., Wani, W.A., Kumar, R., Rafatullah, M. (2015). Recent Advances in New Generation Dye Removal Technologies: Novel Search for Approaches to Reprocess Wastewater. *RSC Adv.*, 5, 30801–30818.
- Ahmed Alsharif, M. (2025). Understanding Adsorption: Theories, Techniques, and Applications. In *Adsorption- Fundamental Mechanisms and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1008865>.
- Ahmed, M.J., Dhedan, S.K. (2012). Equilibrium Isotherms and Kinetics Modeling of Methylene Blue Adsorption on Agricultural Wastes-Based Activated Carbons. *Fluid. Phase Equilib.*, 317, 9–14.
- Akar, S.T., Gorgulu, A., Akar, T., Celik, S. (2011). Decolorization of Reactive Blue 49 contaminated solutions by Capsicum annum seeds: Batch and continuous mode biosorption applications. *Chemical Engineering Journal*, 168(1), 25-133.
- Akar, T., Divriklioğlu, M. (2010). Biosorption applications of modified fungal biomass for decolorization of Reactive Red 2 contaminated solutions: Batch and dynamic flow mode studies, *Bioresource Technology*, 101, 7271-7277, DOI: 10.1016/j.biortech.2010.04.044.
- Akkaya, G. (2012). Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Aksakal, O. Uzun, H. (2010). Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of the biosorption of textile dye (Reactive Red 195) onto Pinussylvestris L., *Journal of Hazardous Materials*, 181, Issues 1–3, 666-672, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.064>.
- Alirezalu, A., Ahmadi, N., Salehi, P., Sonboli, A., Alirezalu, K., Khaneghah, A.M., Barba, F.J., Munekata, P.E.S., Lorenzo, J.M. (2020). Physicochemical characterization, antioxidant activity, and phenolic compounds of hawthorn (*Crataegus spp.*) fruits species for potential use in food applications. *Foods*, 9, 436.
- Alves de Lima, R.O., Bazo, A. P., Salvadori, D. M. F., Rech, C. M., Oliveira, D. P., Umbuzeiro, G. A. (2007). “Mutagenic and carcinogenic potential of a textile azo dye processing plant effluent that impacts a drinking water source”, *Mutation Research*, 1-2, 53–60.
- Al-Ghouti, M.A., Li, J., Salamh, Y., Al-Laqtah, N., Walker, G., Ahmad, M.N.M. (2010). Adsorption mechanisms of removing heavy metals and dyes from aqueous solution using date pits solid adsorbent. *J. Hazard. Mater.*, 176, 510–520.
- Asouhidou, D. D., Triantafyllidis, K. S., Lazaridis, N. K., Matis, K. A., Kim, S. S., Pinnavaia, T. J. (2009). “Sorption of reactive dyes from aqueous solutions by ordered hexagonal and disordered mesoporous carbons”, *Microporous and Mesoporous Materials*, 1-2, 257–267.

- Atkins, P.W. (2001). Fizikokimya, Bilim Yayıncılık, Ankara, 975-556-049-1.
- Bağcı, G. (2012). Atık Sulardan Reactive Red 239'un Biyosorpsiyonunun Kinetik Ve Termodinamiği, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 63-78.
- Bashir, I., Lone, F.A., Bhat, R.A., Mir, S.A., Dar, Z.A., Dar, S.A. (2020). Concerns and Threats of Contamination on Aquatic Ecosystems. *Bioremediation and Biotechnology*. 27:1–26. doi: 10.1007/978-3-030-35691-0_1.
- Begon, M., Townsend, C. R., & Harper, J. L. (2006). *Ecology: From Individuals to Ecosystems* (4th ed.). Oxford: Blackwell Publishing.
- Belessi, V., Romanos, G., Boukos, N., Lambropoulou, D., C Trapalis, C. (2009). Removal of Reactive Red 195 from aqueous solutions by adsorption on the surface of TiO₂ nanoparticles, *J.Hazard. Mater.*, 170, 836–844.
- Bensalah, J., Habsaoui, A., Dagdag, O., Lebdiri, A., Ismi, I., Rifi, E. H., Warad, I., Zarrouk, A. (2021). Adsorption of a cationic dye (Safranin) by artificial cationic resins Amberlite®IRC-50: Equilibrium, kinetic and thermodynamic study. *Chemical Data Collections*, 35, 100756.
- Berradi, M., Hsissou, R., Khudhair, M., Assouag, M., Cherkaoui, O., El Bachiri, A., El Harfi, A. (2019). Textile finishing dyes and their impact on aquatic environs. *Heliyon*, 5, e02711.
- Bhardwaj, N.K., Duong, T.D. and Nguyen, L.K. (2003). Pulp charge determination by different methods: effect of beating, *Colloids and Surfaces: Physicochem. Eng.Aspects* pp.39- 44.
- Bhattacharjee, C., Dutta, S., Saxena, V.K. (2020). A review on biosorptive removal of dyes and heavy metals from wastewater using watermelon rind as biosorbent. *Environ. Adv.*, 2, 100007.
- Brookstein, D.S. (2009). Factors associated with textile pattern dermatitis caused by contact allergy to dyes, finishes, foams, and preservatives. *Dermatol Clin.*, 27(3):309-22. doi: 10.1016/j.det.2009.05.001.
- Burakov, A.E., Galunin, E.V., Burakova, I.V., Kucherova, A.E., Agarwal, S., Tkachev, A.G., Gupta, V.K. (2018). Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purposes: A review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 148, 702–712.
- Carneiro, P. A., Umbuzeiro, G. A., Oliveira, D. P., Zanoni, M. V. B. (2010). “Assessment of water contamination caused by a mutagenic textile effluent/dyehouse effluent bearing disperse dyes”, *Journal of Hazardous Materials*, 1–3, 694–699.
- Cebeci, Ö. (2014). Boyaların sentetik tekstil atık suyundan biyosorpsiyonla giderimi, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Chaouki, Z., Hadri, M., Nawdali, M., Benzina, M., Zaitan, H. (2021). Treatment of a landfill leachate from Casablanca city by a coagulation-flocculation and adsorption process using a palm bark powder (PBP), *Sci. African* 12, e00721.
- Chang, W.T., Dao, J., Shao, Z.H. (2005). Hawthorn: Potential roles in cardiovascular disease. *Am. J. Chin. Med.* 2005, 33, 1–10.

- Chen, D., Wang, L., Ma, Y., Yang, W., (2016). Super-adsorbent material based on functional polymer particles with a multilevel porous structure. *NPG Asia Mater* 8, e301. <https://doi.org/10.1038/am.2016.117>.
- Cho, S.H., Shim, J., Moon, S.H. (2009). Detoxification of simulated textile wastewater using a membraneless electrochemical reactor with immobilized peroxidase. *Journal of Hazardous Materials*, 162(2–3), 1014–1018.
- Cribb, J. (2010). *The Coming Famine*. University of California Press, Berkeley, California, US.
- Crini, G., Lichtfouse, E., Wilson, L.D., *et al.*, (2019). Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environ Chem Lett.*, 17, 195–213 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0786-8>.
- Çelik, L., Öztürk, A and Abdullah, M.I. (2012). Biodegradation of reactive red 195 azo dye by the bacterium *Rhodopseudomonas palustris* 51ATA, *African Journal of Microbiology Research*, 6(1), pp. 120–126.
- Dąbrowski, A. (2001). Adsorption — from theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, 93, 135–224.
- Dagli, A., Oktav Bulut, M. (2025). Sustainable color stripping for cotton fabric dyed with C.I reactive red 195 in green chemicals and UV irradiation. *Cellulose* 32, 5083–5099. <https://doi.org/10.1007/s10570-025-06483-1>.
- Demiral, İ., Şamdan, C.A and Demiral, H. (2016). Production and characterization of activated carbons from pumpkin seed shell by chemical activation with ZnCl₂. *Desalination and Water Treatment*, (2016), 57.6, pp. 2446–2454.
- Deng, D., Lamssali, M., Aryal, N., Ofori-Boadu, A., Jha, M.K., Samuel, R.E. (2020). Textiles wastewater treatment technology: A review. *Water Environ. Res.*, 92, 1805–1810.
- Edwards, J.E., Brown, P.N., Talent, N., Dickinson, T.A., Shipley, P.R. (2012). A review of the chemistry of the genus *Crataegus*. *Phytochemistry*, 79, 5–26.
- El-Azazy, M., El-Shafie, A.S., Issa, A.A., Al-Sulaiti, M., Al-Yafie, J., Shomar, B., Al-Saad, K. (2019). Potato peels as an adsorbent for heavy metals from aqueous solutions: Eco-structuring of a green adsorbent operating Plackett–Burman design. *J. Chem.*, 2019, 4926240.
- Elmorsi, T.M., Mohamed, Z.H., Shopak, W., Ismaiel, A.M. (2014). Kinetic and Equilibrium Isotherms Studies of Adsorption of Pb (II) from Water onto Natural Adsorbent. *Journal of Environmental Protection*, 5, 1667–1681.
- Etana, R., Angassa, K. & Getu, T. (2025). Dye removal from textile wastewater using scoria-based of vertical subsurface flow constructed wetland system. *Sci Rep* 15, 949. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79174-9>.
- Flores Alarcón, M.A.D., Revilla Pacheco, C., Garcia Bustos, K., Tejada Meza, K., Terán-Hilares, F., Pacheco Tanaka, D.A., Colina Andrade, G.J., Terán-Hilares, R. (2022). Efficient Dye Removal from Real Textile Wastewater Using Orange Seed Powder as Suitable Bio-Adsorbent and Membrane Technology. *Water*, 14, 4104. <https://doi.org/10.3390/w14244104>.

- Foley, J., Ramankutty, A., Navin, B., Kate, A., Cassidy, Emily S.G., James, S.J., Matt, M., Nathaniel, D.O'C., Christine, R., Deepak, K.W., Paul, C.B., Christian, B., Elena, M.C., Stephen, R., Jason, M., Chad, P., Stephen, R., Johan, S., John, S., Stefan, T., David, Z., David, P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet, *Nature*, 478, pp. 337-342, <https://doi.org/10.1038/nature10452>.
- Gahlot, R., Taki, K., Kumar, M. (2020). Efficacy of Nanoclays as the Potential Adsorbent for Dyes and Metal Removal from the Wastewater: A Review. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.*, 14, 100339.
- Gerland, P., Raftery, A.E., Sevciková, H., Li, N., Gu, D., Spoorenberg, T., Alkema, L., Fosdick, B.K., Chunn, J., Lalic, N., Bay, G., Buettner, T., Heilig, G.K., Wilmoth, J. (2014). "World population stabilization unlikely this century. *Science*, 10;346 (6206):234-7. doi: 10.1126/science.1257469.
- Ghodake, G.S., Talke, A.A., Jadhav, J.P. Govindwar, S.P. (2009). Potential of Brassica juncea in order to treat textile-effluent- contaminated sites, *Int. J. Phytoremediation*, 11, pp. 297-312, DOI: 10.1080/15226510802429518.
- Giang, H. L., Duong, A. T., Trang, T.T. P., Quang, V. T., Nhiem, N. D., Kien, T. N., Trang, T.T. Q. (2026). Rapid and efficient removal of azo dye RR195 from textile wastewater using a Z-scheme silver vanadate/graphene oxide: Optimization, photocatalytic mechanism, and antibacterial activity, *Journal of Water Process Engineering*, 82, 109536, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2026.109536>.
- Golka, K., Kopps, S., Myslak, Z.W. (2004). Carcinogenicity of azo colorants: influence of solubility and bioavailability, *Toxicol. Lett.* 2004, 151, 203–210.
- Gündüz, F., Bayrak, B. (2017). Biosorption of malachite green from an aqueous solution using pomegranate peel: Equilibrium modelling, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Molecular Liquids*, 243, 790-798.
- Habibi, M. & Sardashti, M. (2010). Ultrasound Synergistic Effect on the Photocatalytic Degradation of Eriochrome Blue Black B, C.I. Reactive Yellow 84, C.I. Reactive Red 195 and Methyl Orange in the Presence of Nanostructure Zinc Oxide Thin Film in Aqueous Environment. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 13(2), 184-191. <https://doi.org/10.1515/jaots-2010-0206>.
- Hamutoğlu, R., Dinçsoy, A.B., Duman-Cansaran, D., Aras, S. (2012). "Biosorption, adsorption, phytoremediation methods and applications" *Türk Hij Den Biyol Derg*, 69(4): 235-253.
- Hatipoğlu, M., Sağlam, M., Köseoğlu, S., Köksal, E., Keleş, A., Esen, H.H. (2015). The Effectiveness of *Crataegus orientalis* M Bieber. (Hawthorn) Extract Administration in Preventing Alveolar Bone Loss in Rats with Experimental Periodontitis. *PLoS ONE* 10 (6): e0128134. doi: 10.1371/journal.pone.0128134.
- Holkar, C.R., Jadhav, A. J., Pinjari, D.V., Mahamuni, N.M., Pandit, A.B. (2016). A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. *Journal of Environmental Management*, 182, 351-366.
- <https://labakademi.com/ultraviyole-teknolojisi-ve-sterilizasyonda-kullanimi/> (erişim 03.05.2025).
- Hossain, L., & Khan, M. S. (2020). Water Footprint Management for Sustainable Growth in the Bangladesh Apparel Sector. *Water*, 12 (10), 2760. <https://doi.org/10.3390/w12102760>.

- Hosseini, S. M. S., Maghool, M. A., & Eghbali, H. (2026). Effective degradation of Reactive Blue 21 and Reactive Red 195 by copper (II) oxide nanoparticles biosynthesized by pistachio hulls extract. *Scientific reports*, 16 (1), 10287. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-40721-1>.
- Hunger, K. (2003). *Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Applications*. Wiley-VCH, Germany.
- Jahani, F., Maleki, B., Mansouri, M., Noorimotlagh, Z., Mirzaee, S.A. (2023). Enhanced photocatalytic performance of milkvetch-derived biochar via ZnO–Ce nanoparticle decoration for reactive blue 19 dye removal, *Sci.Rep.*, 13, 17824.
- Jarrar, R., Abbas, M.K.G. & Al-Ejji, M. (2024) Environmental remediation and the efficacy of ceramic membranes in wastewater treatment—a review. *emergent mater.* 7, 1295–1327. <https://doi.org/10.1007/s42247-024-00687-0>.
- Jawad, A. H., Mubarak, N.S.A., & Abdulhameed, A. S. (2020a) Hybrid crosslinked chitosan-epichlorohydrin/TiO₂ nanocomposite for reactive red 120 dye adsorption: kinetic, isotherm, thermodynamic, and mechanism study. *Journal of Polymers and the Environment*, 28 (2), 624-637.
- Jawaduddin, M., Su, Z., Siddique, M.S., Rashid, S., Yu, W. (2024). Purifying surface water contaminated with azo dyes using nanofiltration: Interactions between dyes and dissolved organic matter, *Chemosphere*, 361, 142438.
- Khatri, A., Peerzada, M.H., Mohsin, M., White, M. (2015). A review on developments in dyeing cotton fabrics with reactive dyes for reducing effluent pollution. *Journal of Cleaner Production*, 87, 50-57.
- Kamranifar, M. et al. (2018). Comparison the removal of reactive red 195 dye using powder and ash of barberry stem as a low cost adsorbent from aqueous solutions: Isotherm and kinetic study, *J. Mol. Liq.* 255, 572–577.
- Karacakaya, P., Kiliç, N. K., Duygu, E., Dönmez, G. (2009). “Stimulation of reactive dye removal by cyanobacteria in media containing triacontanol hormone”, *Journal of Hazardous Materials*, 2-3, 1635–1639.
- Keeble, B.R. (1988). The Brundtland report: ‘Our common future’. *Medicine and War*, 4(1): p. 17-25.
- Khan, A.A., Naqvi, S.R., Ali, I., Arshad, M., AlMohamadi, H., Sikandar, U. (2023). Algal-derived biochar as an efficient adsorbent for removal of Cr (VI) in textile industry wastewater: Non-linear isotherm, kinetics and ANN studies. *Chemosphere*, 316, 137826.
- Khehra, M.S., Saini, H.S., Sharma, D.K., Chadha, B.S., Chimni, S.S. (2006). Biodegradation of azo dye C.I. Acid red 88 by an anoxic–aerobic sequential bioreactor. *Dyes Pigments*, 70:1–7.
- Kipling, I. I. (1965). *Adsorption from solutions of Non – Electrolytes*, Academic Press, N. Y., London.
- Klaus, W. and Hans-Jurgen A. (1997). *Industrial organic chemistry*. 1997, VCH Verlagsgesellschaft.
- Klepacz-Smółka, A., Sójka-Ledakowicz, J., Paździor, K., Ledakowicz, S. (2010). Application of Anoxic Fixed Film and Aerobic CSTR Bioreactor in Treatment of Nanofiltration Concentrate of Real Textile Wastewater. *Chem. Pap.* 2010, 64, 230–236.

- Kocaer, F. O., Alkan, U. (2002). "Boyar madde içeren tekstil atık sularının arıtım alternatifleri" *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 7, Sayı 1, 47-55.
- Kostić, D.A., Velicković, J.M., Mitić, S.S., Mitić, M.N., Randelović, S.S. (2012). Phenolic content, and antioxidant and antimicrobial activities of *Crataegus oxyacantha* L (Rosaceae) fruit extract from Southeast Serbia. *Trop. J. Pharm. Res.*, 11, 117–124.
- Kuhlman, T., Farrington, J. (2010). What is Sustainability. *Sustainability*, 2 (11): 3436-8.
- Kumari, S., Singh, R., Jahangeer, J. *et al.* (2024). Innovative Strategies for Dye Removal from Textile Wastewater: A Comprehensive Review of Treatment Approaches and Challenges. *Water Air Soil Pollut.*, 235, 720. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07532-4>.
- Kumar, M. Kushwaha, A. Goswami, L. Singh, A.K. Sikandar, M. (2021). A review on advances and mechanism for the phycoremediation of cadmium contaminated wastewater. *Clean. Eng. Technol.*, 5, 100288.
- Kumar, D., Arya, V., Bhat, Z.A., Khan, N.A., Prasad, D.N. (2012). The genus *Crataegus*: Chemical and pharmacological perspectives. *Braz. J. Pharmacogn.*, 22, 1187–1200.
- Lagergren, S. (1898). Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe, *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar* 24, 1–39.
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum, *Journal of the American Chemical Society*, 40, 1361–1403.
- Lazaridis, N. K., Karapantsios, T. D., Georgantas, D. (2003). "Kinetic analysis for the removal of a reactive dye from aqueous solution onto hydrotalcite by adsorption", *Water Research*, 12, 3023–3033.
- Lellis, B., Fávaro-Polonio, C.Z., Pamphile, J.A., Polonio, J.C. (2019). Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. *Biotechnol. Res. Innov.*, 3, 275–290.
- Ljubuncic, P., Portnaya I., Cogan, U., Azaizeh, H., Bomzon, A. (2005). Antioxidant activity of *Crataegus aronia* aqueous extract used in traditional Arab medicine in Israel. *Journal of ethnopharmacology*. 2005; 101 (13): 153–61. doi: 10.1016/j.jep. 2005. 04. 024.
- Lima, E.C., Royer, B., Vaggetti, J.C.P., Simon, N.M., Da Cunha, B.M., Pavan, F.A., Benvenutti, E.V., Cataluna-Veses, R., Airolti, C. (2008). "Application of Brazilian pine-fruit shell as a biosorbent to removal of reactive red 194 textile dye from aqueous solution. Kinetics and equilibrium study", *Journal of Hazardous Materials*, 3, 536–550.
- Lin, S. H. and Chen, M. L. (1997). Treatment of textile wastewater by electrochemical methods for reuse, *Water Research*, 31, 868–876.
- Mahanna, H., Samy, M. (2020). Adsorption of Reactive Red 195 dye from industrial wastewater by dried soybean leaves modified with acetic acid, *Desalination and Water Treatment*, 178, 312-321, <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.24960>.
- Maina, I.W., Obuseng, V., Nareetsile, F. (2016). Use of *Moringa oleifera* (Moringa) seed pods and *Sclerocarya birrea* (Morula) nut shells for removal of heavy metals from wastewater and borehole water. *J. Chem.*, 2016, 9312952.
- Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

- Mittal, Y. et al. (2022). Azo dye containing wastewater treatment in earthen membrane based unplanted two chambered constructed wetlands-microbial fuel cells: a new design for enhanced performance. *Chem. Eng. J.* 427, 131856.
- Mohamed, A. H., Ahmed El, N. (2017). Health and Environmental Impacts of Dyes: Mini Review. *Am. J. Environ. Sci. Eng.*, 1, 64–67.
- Molles, M. C. (2019). *Ecology: Concepts and Applications* (8th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Munagapati, V. S. et al. (2022). Removal of sulfonated azo Reactive Red 195 textile dye from liquid phase using surface-modified lychee (*Litchi chinensis*) peels with quaternary ammonium groups: Adsorption performance, regeneration, and mechanism, *Journal of Molecular Liquids*, 368, Part A, 120657, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120657>.
- Myers, D. (1999). *Surfaces, Interfaces, and Colloids: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 0-471-23499-0.
- Nazifa, T. H., Habba, N., Salmiati, Aris, A., & Hadibarata, T. (2017). Adsorption of Procion Red MX-5B and Crystal Violet Dyes from Aqueous Solution onto Corncob Activated Carbon. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 65(2), 259-270.
- Niemantsverdriet, J. W. (2000). *Spectroscopy in Catalysis An Introduction*. Second Completely Revised Edition, Wiley-Vch, Weinheim, 39-60, 138-139, 169-171.
- Oke, N.; Mohan, S. (2022). Development of nanoporous textile sludge based adsorbent for the dye removal from industrial textile effluent. *J. Hazard. Mater.*, 422, 126864.
- O'Neill, C., Hawkes, F. R., Hawkes, D. L., Lourenço, N. D., Pinheiro, H. M. and Delée W. (1999). Colour in textile effluents – sources, measurement, discharge consents and simulation: a review, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 74, 1009–1018.
- Osman, A.I., El-Monaem, E.M.A., Elgarahy, A.M., Aniagor, C.O., Hosny, M., Farghali, M., Rashad, E., Ejimofor, M.I., López-Maldonado, E.A., Ihara, I. (2023). Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: A review. *Environ. Chem. Lett.*, 21, 2337–2398.
- Öztürk, F.S., Önal, Y. & Gökbulut, İ. (2022). Alıç (*Crataegus orientalis subsp.*) Çekirdeğinin Bazı Karakteristik Özellikleri ve Çekirdek Yağının Yağ Asidi Bileşen Karakterizasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (41), 79-84).
- Paul, J., Rawat, K. P., Sarma, K.S.S., Sabharwal, S. (2011). “Decoloration and degradation of Reactive Red-120 dye by electron beam irradiation in aqueous solution”, *Applied Radiation and Isotopes*, 7, 982–987.
- Pearce, C. I., Lloyd, J. R., Guthrie, J. T. (2003). “The removal of colour from textile wastewater using whole bacterial cells: a review”, *Dyes and Pigments*, 3, 179–196.
- Perdan, S. (2011). “The Concept of Sustainable development and its Practical Implications., in *Sustainable Development in Practice: Case Studies for Engineers and Scientists*”. 2nd. ed. John Wiley&Sons Ltd, 3-25, A. Azapagic, Editor. 2011.
- Pérez-Calderón, J., Santos, M.V., Zaritzky, N. (2018). Reactive RED 195 dye removal using chitosan coacervated particles as bio-sorbent: Analysis of kinetics, equilibrium and adsorption mechanisms, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 6, Issue 5, 2018, Pages 6749-6760, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.10.039>.

- Periyasamy, A. P. (2024). Recent Advances in the Remediation of Textile-Dye-Containing Wastewater: Prioritizing Human Health and Sustainable Wastewater Treatment. *Sustainability*, 16 (2), 495. <https://doi.org/10.3390/su16020495>.
- Platin, S., Kunduhoğlu, B. (2018). Biyosorpsiyon ve katı-faz fermantasyonu ile boya gideriminde tarımsal atıkların kullanım potansiyelleri. *Research Journal of Biology Sciences*, E-ISSN:1308-0261,11(2), 30-34.
- Price Waterhouse Cooper. (2010). Global City GDP Rankings 2008–2025. London, UK.
- Pokhrel, D., Viraraghavan, T. (2004). Treatment of pulp and paper mill wastewater—a review. *Sci. Total Environ.*, 333, 37-58.
- Popli, S., Patel, U.D. (2015). Destruction of azo dyes by anaerobic–aerobic sequential biological treatment: a review. *Int J Environ Sci Technol*, 12:405–420.
- Rana, V., Bandyopadhyay, S., Maiti, S.K. (2025). Bioadsorbents for Industrial Wastewater Treatment. In: Baskar, C., Ramakrishna, S., Rosa, A.D.L. (eds) *Encyclopedia of Green Materials*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4618-7_55.
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation—A Review. *Waste*, 1 (3), 775-805. <https://doi.org/10.3390/waste1030046>.
- Raqba, R. et al. (2022). Biodegradation of Reactive Red 195 azo dye and Chlorpyrifos organophosphate along with simultaneous bioelectricity generation through bacterial and fungal based biocathode in microbial fuel cell, *J. Water Process Eng.* 50, 103177.
- Rashid, R., Shafiq, I., Akhter, P. et al. (2021). A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques: the effectiveness of adsorption method. *Environ Sci Pollut Res* 28, 9050–9066. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12395-x>.
- Rashtbari, Y., Parastar, S., Poureshgh, Y., Ghotekar, S., Asl, F.B., Abazari, M., Shabanloo, A. (2025). Reactive Blue 19 Dye's Decomposition in Aqueous Environments Using Combined PS/US/AC-Fe₃O₄ Process. *ChemistrySelect*, 10, e202404801. <https://doi.org/10.1002/slct.202404801>.
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77 (3), 247–255. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00080-8).
- Rosa, S., Laranjeira, M. C. M., Riela, H. G., Fávere, V. T. (2008). “Cross-linked quaternary chitosan as an adsorbent for the removal of the reactive dye from aqueous solutions”, *Journal of Hazardous Materials*, 1-2, 253–260.
- Rouquerol, F., Rouquerol, J., Sing, K. (1999). *Adsorption by Powders & Porous Solids: Principles, Methodology and Applications*, Academic Press, Londra, 0-12-598920-2.
- Royer, B., Cardoso, N. F. Lima, E.C., Macedo, T. R., Airoidi, C. (2010). “A useful organo functionalized layered silicate for textile dye removal”, *Journal of Hazardous Materials*, 1–3, 366–374.
- Royer, B., Cardoso, N.F., Lima, E.C., Vaggetti, J.C.P., Simon, N.M., Calvete, T., Veses, R.C. (2009). “Applications of Brazilian pine-fruit shell in natural and carbonized forms as adsorbents to removal of methylene blue from aqueous solutions-Kinetic and equilibrium study”, *Journal of Hazardous Materials*, 2-3, 1213–1222.

- Rudzinski, W., Plazinski, W. (2006). Kinetics of Solute Adsorption at Solid/Solution Interfaces: A Theoretical Development of the Empirical Pseudo-First and Pseudo-Second Order Kinetic Rate Equations, Based on Applying the Statistical Rate Theory of Interfacial Transport. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110, 16514-16525.
- Šabanović, E., Memić, M., Sulejmanović, J., Selović, A. (2020). Simultaneous adsorption of heavy metals from water by novel lemon-peel based biomaterial. *Pol. J. Chem. Technol.*, 22, 46–53.
- Sadaf, M., Anwar, A., Batool, I., Yaseen, B., Sheikh, T.A., Khan, F.A., Imran, M. (2025). Efficient mitigation of reactive red dye by PEG capsulated MnCo₂O₄ nanostructures: Synthesis, characterization, kinetics and thermodynamic studies, *Inorganic Chemistry Communications*, 172, 113743, <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113743>.
- Sarkar, A., Ghosh, S. K., Pramanik, P. (2010). Investigation of the catalytic efficiency of a new mesoporous catalyst SnO₂/WO₃ towards oleic acid esterification. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 327, 73-79.
- Schwarzenbach, R.P., Egli, T., Hofstetter, T.B., von Gunten, U., Wehrli, B. (2010). Global Water Pollution and Human Health. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 35, 109–136.
- Sennaj, R., Lemriss, S., Souiri, A., Kabbaj, S.E.L., Chafik, A., Essamadi, A.E., Benali, T., Fassouane, A., Dari, K., Aassila, H. (2023). Eco-friendly degradation of reactive red 195, reactive blue 214, and reactive yellow 145 by *Klebsiella pneumoniae* MW815592 isolated from textile waste, *Journal of Microbiological Methods*, 204, 106659, <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2022.106659>.
- Sharma, J., Sharma, S., Soni, V. (2021). Classification and impact of synthetic textile dyes on Aquatic Flora: A review, *Regional Studies in Marine Science* 45, 101802.
- Shukla, S.R. (2007). Pollution Abatement and Waste Minimisation in Textile Dyeing. In *Environmental Aspects of Textile Dyeing*; Christie, R.M., Ed.; Woodhead Publishing Series in Textiles; Woodhead Publishing: Sawston, UK, 2007; pp. 116–148. ISBN 9781845691158.
- Singh, R., Martin, C., Barr, D., Rosengren, R. (2019). Immobilised apple peel bead biosorbent for the simultaneous removal of heavy metals from cocktail solution. *Cogent Environ. Sci.*, 5, 1673116.
- Song, S., He, Z., Qiu, J., L. Xu, Chen, J. (2007). Ozone assisted electrocoagulation for decolorization of CI Reactive Black 5 in aqueous solution: An investigation of the effect of operational parameters, *Sep. Purif. Technol.* 2007, 55, 238–245.
- Sözer, U., Dönmez, A.A., Meriçli, A.H. (2006). Constituents from the leaves of *Crataegusdavisii* Browicz. *SciPharm.* 74:203–8.
- Street, G. (1994). *Highly Selective Separations in Biotechnology*, Blackie Academic and Professional, London, 0-7514-0051-3.
- Subash, B. Krishnakumar, B. Swaminathan, M. & Shanthi, M. (2013). Highly efficient, solar active, and reusable photocatalyst: Zr-loaded Ag–ZnO for reactive red 120 dye degradation with synergistic effect and dye-sensitized mechanism", *Langmuir* 29: 939-949. DOI: 10.1021/la303842c.
- Sukmana, H., Bellahsen, N., Pantoja, F., Hodur, C. (2021). Adsorption and coagulation in wastewater treatment—Review. *Prog. Agric. Eng. Sci.* 17, 49–68. <https://doi.org/10.1556/446.2021.00029>.

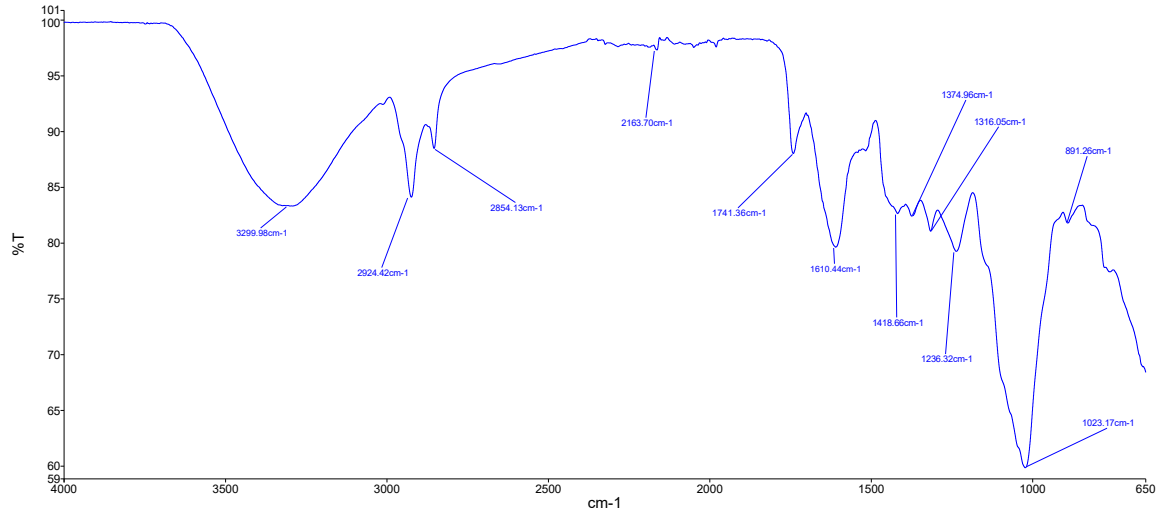
- Şimşek, Ö. & Pat, Z. (2026). Investigation of the Effect of pH in Aqueous Media on Reactive Red 195 Textile Toxic Dye Using Different Adsorbents: pH Optimization for the *Crataegus*, *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 10 (2), 183-190.
- Şimşek, Ö., Atılgan Türkmen, B. (2024). Beslenme ve Sürdürülebilirlik, *DEU 3rd International Symposium on Graduate Research*, 2024.
- Şimşek, V., Pat, Z., Mürtezoğlu, K. (2019). Adsorption Conditions Investigation of Reactive RED 120 Dyes on the Silica-Based Porous Material, *BSEU Journal of Science*, 6, 237-246, <https://doi.org/10.35193/bseufbd.603274>.
- Şimşek, V., vd. (2023). Treatment of textile dye via economic fungi/MCM-41 bio-based adsorbent: Application of neural network approach, *Journal of Cleaner Production*, 421, 138448, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138448>.
- Şimşek, V., (2015). Synthesis, characterization and investigation catalytic activity in the glycerol esterification reaction of acidic catalyst, Ph. D. Thesis. Gazi University, Gazi university graduate school of natural and applied sciences, Ankara.
- Temkin, M., Pyzhev, V. (1940). Recent Modifications to Langmuir isotherms. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 12, 217–222.
- Thambiliyagodage, C., Kumara, A., Jayanetti, M., L. Usgodaarachchi, L., Liyanaarachchi, H., Lansakara, B. (2022). Fabrication of dual Z-scheme g-C₃N₄/Fe₂TiO₅/Fe₂O₃ ternary nanocomposite using natural ilmenite for efficient photocatalysis and photosterilization under visible light, *Appl. Surf. Sci. Adv.* 2022, 12, 100337.
- Thi Quyen, V., Pham, T.-H., Kim, J., Thanh, D.M., Thang, P.Q., Van Le, Q., Jung, S.H., Kim, T. (2021). Biosorbent derived from coffee husk for efficient removal of toxic heavy metals from wastewater. *Chemosphere*, 284, 131312.
- Tilman, D., Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515, 518–522 (2014). <https://doi.org/10.1038/nature13959>.
- Tsoutsas, E.K., Tolkou, A.K., Kyzas, G.Z. *et al.* (2024). An Update on Agricultural Wastes Used as Natural Adsorbents or Coagulants in Single or Combined Systems for the Removal of Dyes from Wastewater. *Water Air Soil Pollut* 235, 178. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-06979-9>.
- UN, 2015. “Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri, Küresel Amaçlar”, <https://www.kureselamaclar.org/> (erişim 13.05.2025).
- Vandervivere, P., C, Bianchi, R and Verstraete W. (1998). Treatment and reuse of wastewater from the textile wet-processing industry: review of emerging technologies. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 72 (3), 289-302.
- Wang, J., Guo, X. (2020). Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method, *Chemosphere*, 258, 127279, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127279>.
- Waring, D.R., Hallas, G. (2013). *The Chemistry and Application of Dyes*. Springer Science & Business Media.
- Wasilewska, M., Deryło-Marczewska, A. (2022). Adsorption of Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs on Alginate-Carbon Composites—Equilibrium and Kinetics. *Materials*. 15 (17) (2022), 6049. <https://doi.org/10.3390/ma15176049>.

- Wathudura, P., Pham, H., Siriwardana, K., Athukorale, S., Jayasundara, U., Gunatilake, S.R., Cao, Z.Y., Collier, W.E., Moon, A., Zhang, D. (2025) Expanding the Horizons of UV-vis Spectroscopy Education: Beyond the Beer-Lambert Law. *J Chem Educ.* 102(6):2389-2397. doi: 10.1021/acs.jchemed.5c00255.
- Wawrzkievicz, M., Polska-Adach, E., Hubicki, Z. (2019). Application of titania-based adsorbent for removal of acid, reactive and direct dyes from textile effluents. *Adsorption*, 25:621–630.
- Weber, J.W.J., Morriss, J.C. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *J. Sanit. Eng. Div. Am. Soc. Civil Eng.* 89, 31–60.
- Wong, J.K.H., Tan, H.K., Lau, S.Y., Yap, P-S., Danquah, M.K. (2019) Potential and challenges of enzyme incorporated nanotechnology in dye wastewater treatment: a review. *J Environ Chem Eng*, 7: 103261.
- Won, S.W., Han, M.H., Yun, Y.S. (2008). Different binding mechanisms in biosorption of reactive dyes according to their reactivity. *Water Research*, 42, 4847-4855.
- Yahya, N., Aziz, F., Jamaludin, N., Mutalib, M., Ismail, A., Salleh, W., Jaafar, J., Yusof, N., Ludin N. (2018). A review of integrated photocatalyst adsorbents for wastewater treatment. *J Environ Chem Eng* 6: 7411 – 7425.
- Yao, M., Ritchie, H.E., Brown-Woodman, P. D. (2008). Are productive screening test of hawthorn. *Journal of ethnopharmacology*. 2008; 118 (1):127–32. doi: 10.1016/j.jep.2008.03.020.
- Yaseen, D.A., Scholz, M. (2019). Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16, 1193–1226 (2019). <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z>.
- Zaharia, C., Musteret, C.-P., & Afrasinei, M.-A. (2024). The Use of Coagulation–Flocculation for Industrial Colored Wastewater Treatment—(I) The Application of Hybrid Materials. *Applied Sciences*, 14 (5), 2184. <https://doi.org/10.3390/app14052184>.
- Zhang, L.L., Zhang, L.F., Xu, J.G. (2020). Chemical composition, antibacterial activity and action mechanism of different extracts from hawthorn (*Crataeguspinnatifida* Bge.). *Sci. Rep.*, 10, 8876.
- Zubrik, A., Marek, M., Slavomír, H., Michal, L., Zuzana, D., Milota, K., Jaroslav, B. (2017). Preparation of chemically activated carbon from waste biomass by single-stage and two-stage pyrolysis. *Journal of Cleaner Production*, 143 (2017), 643-653. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.095>.

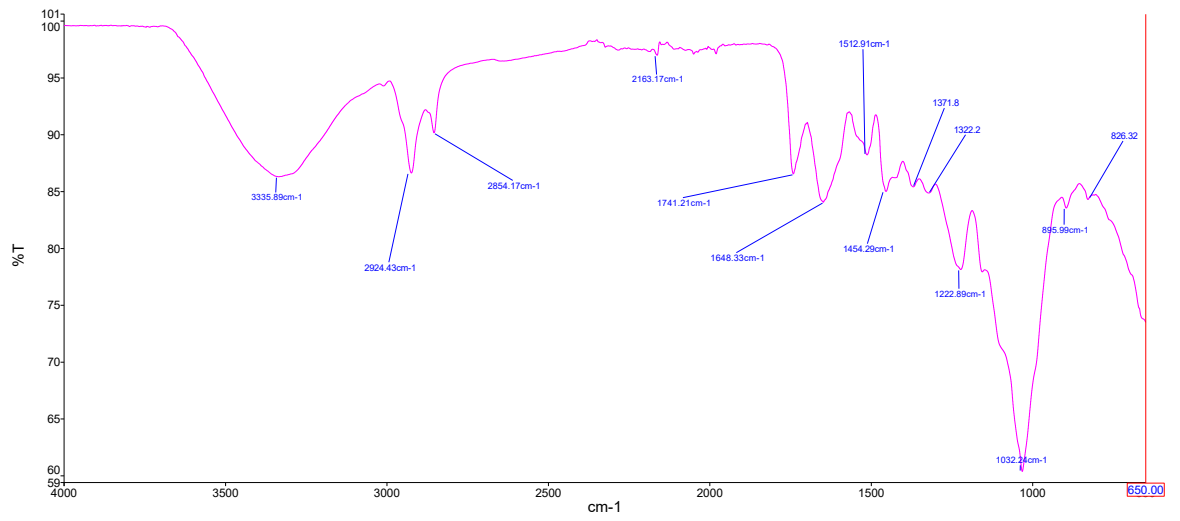
EKLER

EK-1:

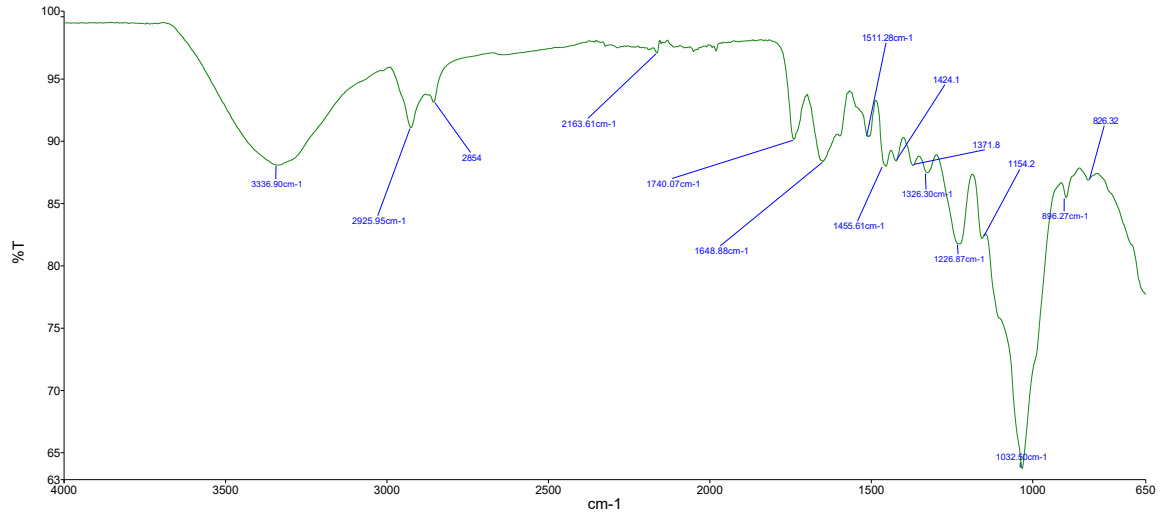
a) Tam meyve



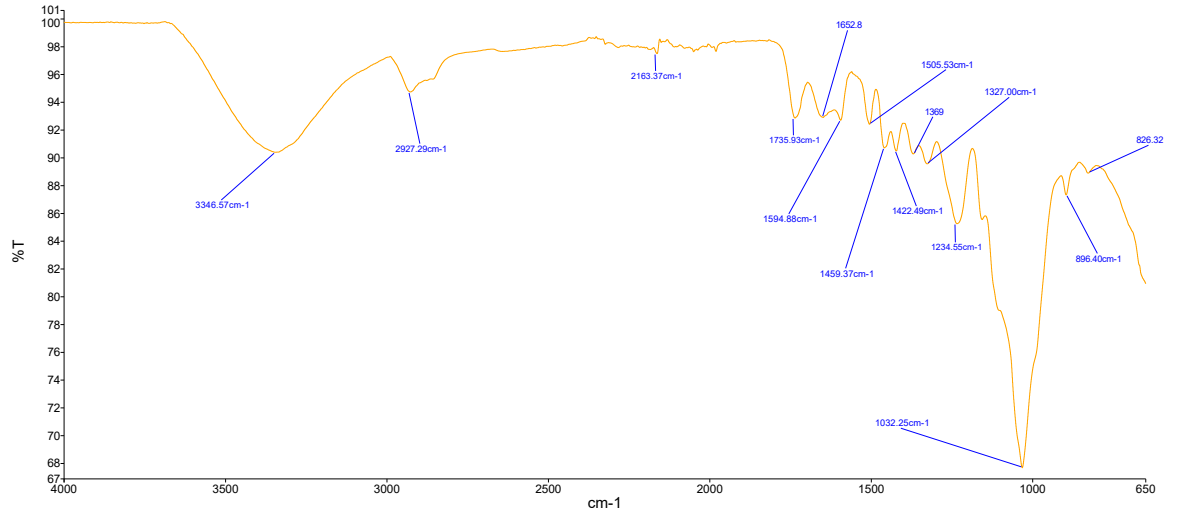
b) Tam meyve ve boyar madde (RR195) sonrası



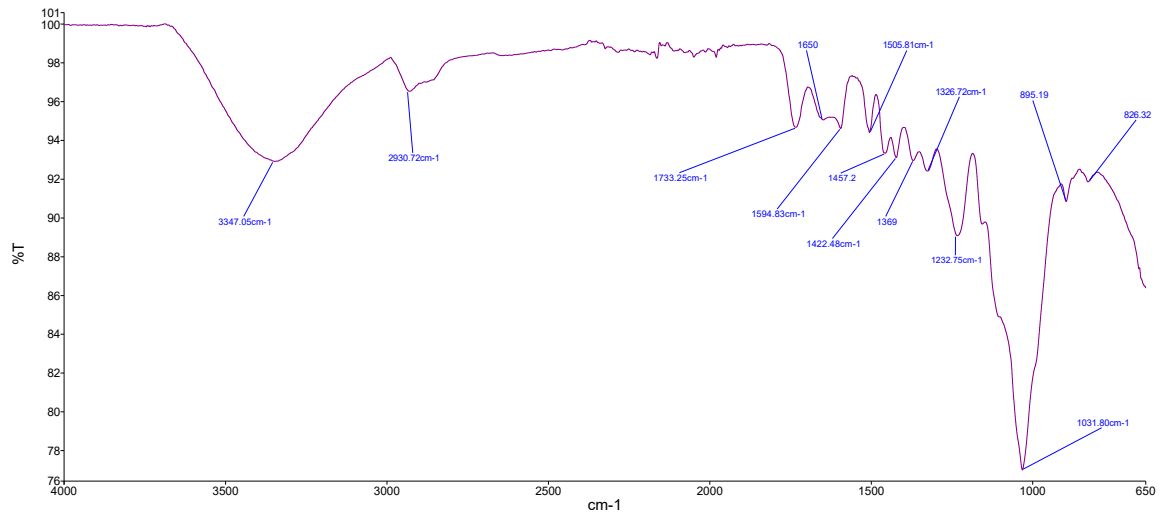
c) Beyaz alıç çekirdeği ve boyar madde sonrası (100 Mesh)



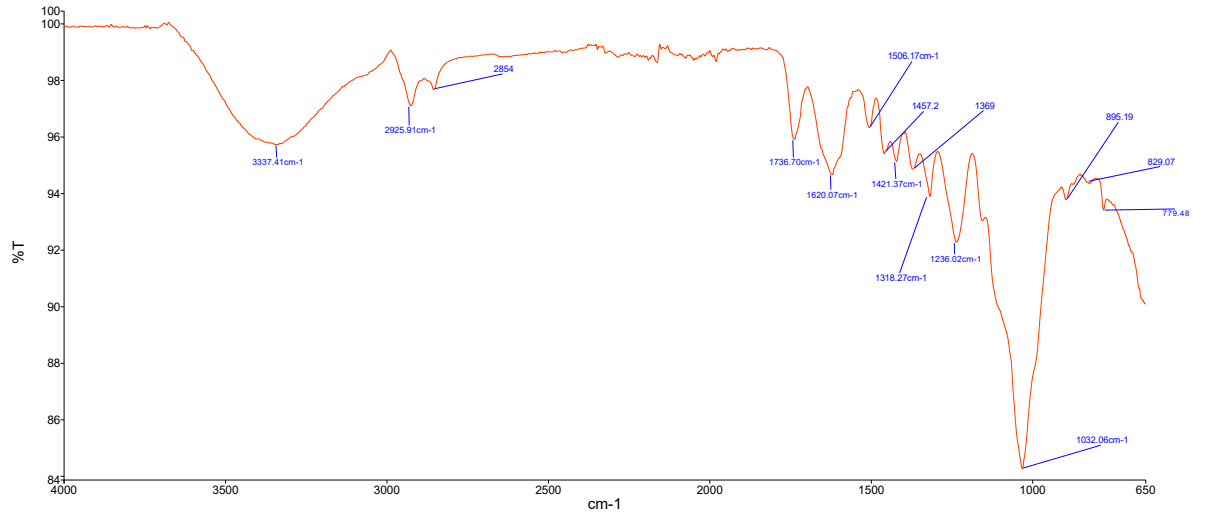
d) Beyaz alıç çekirdeği ve boyar madde sonrası (80 Mesh)



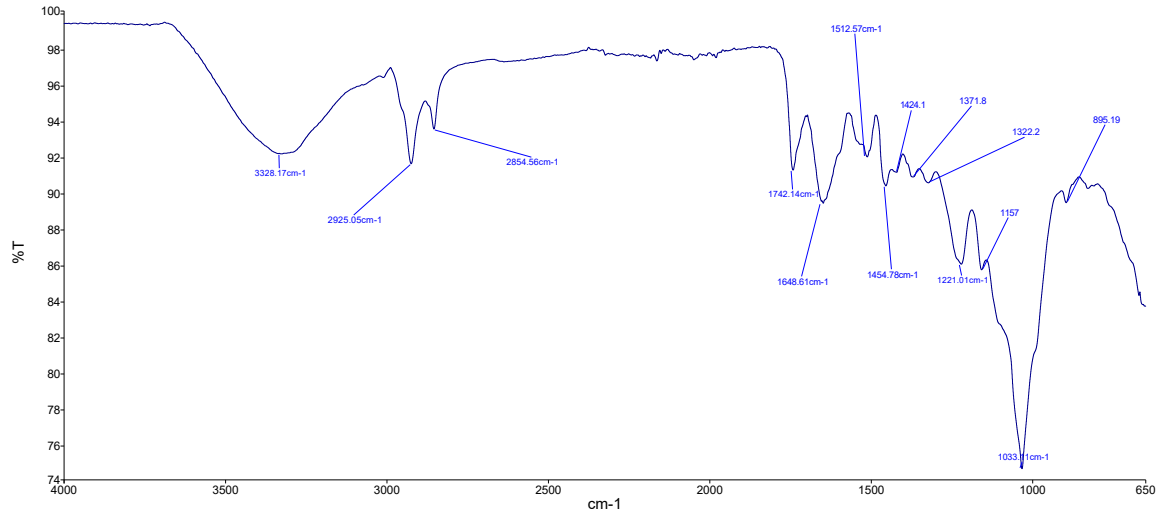
e) Beyaz alıç çekirdeği ve boyar madde sonrası (60 Mesh)



f) Siyah alıç çekirdeği ham (100 Mesh)

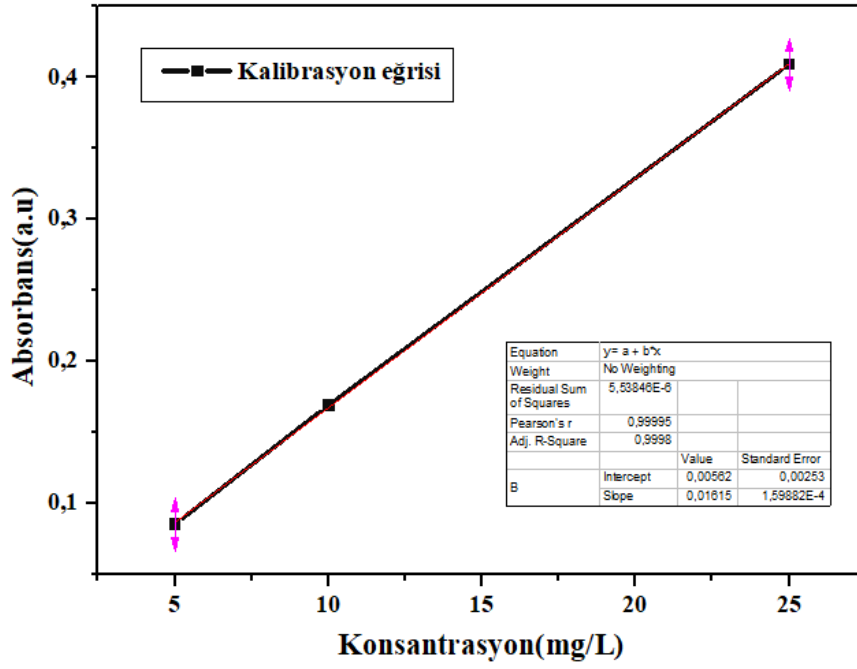


g) Siyah alıç çekirdeği boyar madde sonrası (100 Mesh)

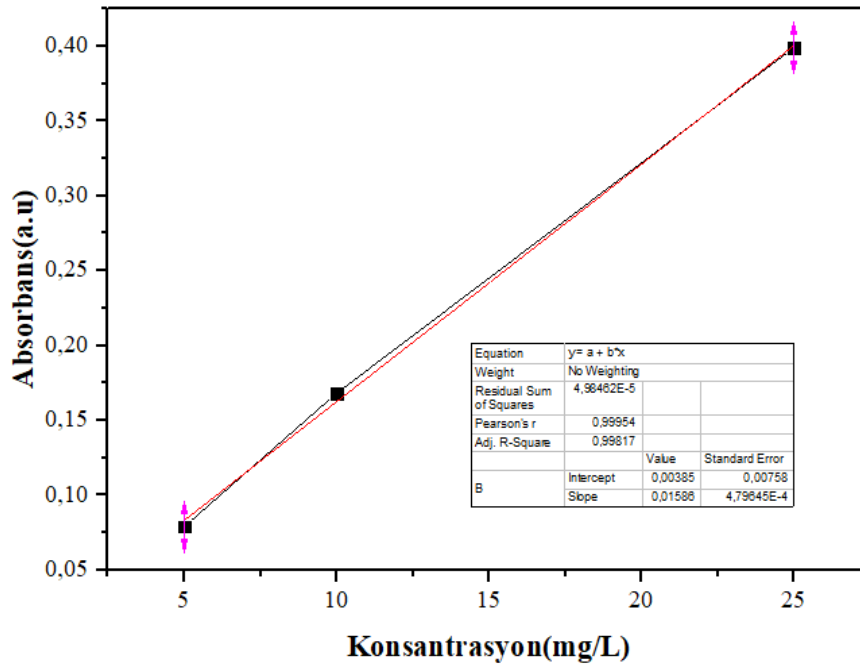


EK-2:

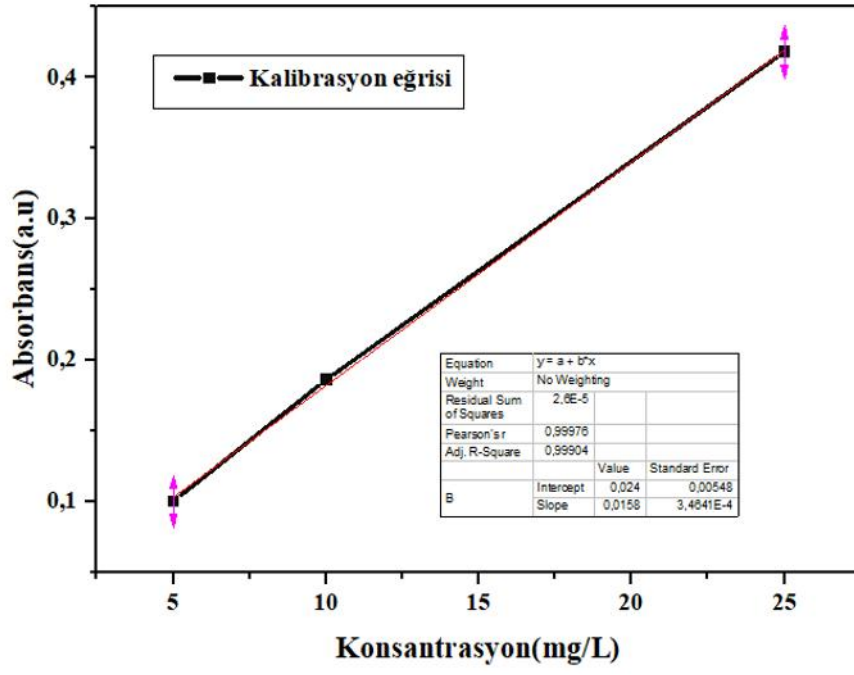
a) Biyosorbent miktarı analizlerinde kullanılan kalibrasyon eğrisi verileri



b) Farklı süre ve sıcaklık analizlerinde kullanılan kalibrasyon eğrisi verileri



c) Süre analizlerinde kullanılan kalibrasyon eğrisi verileri



EK-3:

a) RR195 boyar maddesinin biyosorbent ile sulu çözelti ortamında farklı sıcaklık ve 100 ppm konsantrasyon adsorpsiyonunun Dubinin-Radushkevich eşitliğinin uygulanması.

