



Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Institute of Natural and Applied Science Journal

Dergi ana sayfası/ Journal home page: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/kujs>



E-ISSN: 2587-2389

Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) Küspesinin Boya Adsorpsiyonunda Değerlendirilmesi: Malahit Yeşili Örneği

Sema KAPTANOĞLU¹, Ali Rıza KUL^{2*}, Şeyda ÜSTEK CENGİZ³, Sevgi ÖZTAŞ⁴

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu, Van, Türkiye

²Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Van, Türkiye

³Hacı Ali Akın Ortaokulu, Van, Türkiye

⁴Hakkâri Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu, Hakkâri, Türkiye

(İlk Gönderim / Received: 09. 06. 2026, Kabul / Accepted: 16. 07. 2026, Online Yayın / Published Online: 30. 7. 2026)

Anahtar Kelimeler:

Malahit Yeşili,
Siyah Kimyon (*Nigella sativa* L.),
Biyosorpsiyon,
Adsorpsiyon İzotermi,
Freundlich Modeli,
Atık Su Arıtımı.

Özet: Bu çalışma, endüstriyel atık sularda yaygın olarak bulunan toksik bir katyonik boya olan Malahit Yeşili'nin (MG) sulu çözeltilerden uzaklaştırılması için düşük maliyetli ve doğal bir biyosorbent olarak Siyah Kimyon (*Nigella sativa* L.) tohumu posasının kullanılabilirliğini araştırmaktadır. Su kirliliğinin ekosistemler üzerindeki zararlı etkileri göz önüne alındığında, atık su arıtımı için ekonomik ve çevre dostu alternatifler geliştirmek kritik önem taşımaktadır. Sabit bir pH (5,60) ve 110 rpm karıştırma hızıyla, çeşitli başlangıç boya konsantrasyonları (10, 20, 30, 40 ve 50 ppm) ve sıcaklıklar (25 °C, 30 °C, 35 °C ve 40 °C) kullanılarak, toplu bir sistemde gerçekleştirilmiştir. Temas süresi ve başlangıç konsantrasyonunun adsorpsiyon verimliliği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Verilerin teorik modellerle uyumluluğunu belirlemek için Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon izotermi uygulanmıştır. Freundlich izoterm modelinin, Langmuir modeline kıyasla tüm sıcaklıklarda daha yüksek korelasyon katsayıları ($R^2 = 0,7696 - 0,9475$) sağladığını göstermiştir. Bu, adsorpsiyon sürecinin heterojen yüzeylerde gerçekleştiğini ve çok katmanlı bağlanma mekanizmalarını içerebileceğini düşündürmektedir. Buna karşılık, Langmuir modeli için daha düşük korelasyon değerleri ($R^2 = 0,4742 - 0,6989$), sürecin homojen yüzeylerde ideal tek katmanlı adsorpsiyon varsayımıyla tam olarak açıklanamayacağını göstermektedir. Sonuç olarak, *Nigella sativa* L. tohum posası, Malahit Yeşili giderimi için yüksek potansiyelli, sürdürülebilir ve uygun maliyetli bir biyosorbent olarak tanımlanmıştır. Bu çalışma, tarımsal yan ürünlerin su arıtma teknolojilerine entegrasyonunu destekleyerek döngüsel ekonomiye katkıda bulunmaktadır.

Evaluation of *Nigella sativa* L. Meal in Dye Adsorption: The Case of Malachite Green

Keywords:

Malachite Green,
Nigella sativa L.,
Biosorption,
Adsorption Isotherms,
Freundlich Model,
Wastewater Treatment.

Abstract: This study investigates the potential of black cumin (*Nigella sativa* L.) seed pulp as a low-cost and natural biosorbent for the removal of malachite green (MG), a toxic cationic dye commonly found in industrial wastewater, from aqueous solutions. Given the adverse effects of water pollution on aquatic ecosystems, developing economical and environmentally friendly alternatives for wastewater treatment is critical. The study was conducted in a batch system using various initial dye concentrations (10, 20, 30, 40, and 50 ppm) and temperatures (25 °C, 30 °C, 35 °C, and 40 °C) at a constant pH (5.60) and a stirring speed of 110 rpm. The effects of contact time and initial concentration on adsorption efficiency were analyzed. Langmuir and Freundlich adsorption isotherms were applied to determine the compatibility of the data with theoretical models. The Freundlich isotherm model provided higher correlation coefficients ($R^2 = 0.7696 - 0.9475$) at all temperatures compared to the Langmuir model. This suggests that the adsorption process occurs on heterogeneous surfaces and may involve multilayer adsorption. In contrast, the lower correlation values for the Langmuir model ($R^2 = 0.4742 - 0.6989$) indicate that the process cannot be fully explained by the assumption of ideal monolayer adsorption on homogeneous surfaces. Consequently, *Nigella sativa* L. seed pulp is identified as a highly promising, sustainable, and cost-effective biosorbent for MG removal. This study contributes to circular economy practices by promoting the integration of agricultural by-products into water treatment technologies.

1. GİRİŞ

1. Endüstriyel Kirlilik ve Su Kaynaklarının Korunması

Küresel ölçekte insan sağlığını tehdit eden en kritik unsurların başında gelen çevre kirliliği, endüstriyel faaliyetlerin bir yan ürünü olarak giderek daha karmaşık ve toksik bir yapıya bürünmektedir. Yaşamın devamlılığı için ikame edilemez bir kaynak olan su, günümüzde özellikle fabrikaların kontrolsüz deşarjları nedeniyle ciddi bir kirlilik yükü altındadır. Tekstil endüstrisi, üretim süreçlerinde açığa çıkan boyalı atık sular sebebiyle bu kirliliğin ana odaklarından biridir. Bu sular sadece sucul ekosistemlerin estetik görünümünü bozmakla kalmaz, aynı zamanda içerdiği kimyasallarla biyolojik çeşitliliği ve ekolojik dengeyi de sekteye uğratır. Kirlilik; hava, su, toprak, gürültü ve radyoaktif kirlilik gibi farklı kategorilerde ekosistemin doğal dengesini bozmaktadır. Dünya yüzeyinin yaklaşık %70'ini kaplayan hidrosferin korunması, bu bağlamda hayati bir öneme sahiptir. Özellikle arıtma tesisi bulunmayan tekstil ve boya fabrikalarından doğrudan alıcı ortamlara salınan atık sular, suyun ışık geçirgenliğini azaltmakta ve çözünmüş gaz miktarını olumsuz etkileyerek sucul yaşam üzerinde toksik etkiler yaratmaktadır (Serin, 2010; Yağız, 2016).

2. Malahit Yeşili: Karakterizasyonu ve Zararları

Tekstil sektöründe boyama ve redoks indikatörü olarak geniş bir kullanım alanına sahip olan Malahit Yeşili, trifenilmetan yapısında katyonik bir boyadır. Benzaldehit ve dimetil anilinden sentezlenen bu kimyasal; deri, pamuk, ipek ve yün boyama işlemlerinde yaygın olarak tercih edilir. MG, UV/VIS spektrumunda 617 nm dalga boyunda maksimum absorban sergiler. Toksik özelliklerine rağmen, deniz canlılarında antifungal, antiseptik ve antibakteriyel etkileri nedeniyle balık yumurtalarındaki mantar hastalıklarının önlenmesinde kullanılabilmektedir. Ayrıca bakteriyolojide mikroskopik analizler için boya olarak, adli tıpta ise hemogloblin ile reaksiyona girerek gizli kan izlerini ortaya çıkaran "lökomalakit yeşili" formuyla (yeşil renk dönüşümü) kullanılmaktadır.

3. *Nigella sativa* L. ile Adsorpsiyon Çalışmaları

Tarımsal bir yan ürün olarak *Nigella sativa* L. (çörek otu), düşük maliyeti, yaygın bulunabilirliği ve sürdürülebilir yapısıyla öne çıkan, üzerinde durulması gereken önemli bir biyokütle kaynağıdır (Gentscheva vd., 2025). *Nigella sativa* L. tohumlarının yağ çıkarımı sonrası geriye kalan küspesi, zengin fonksiyonel grupları sayesinde sentetik boyar maddelerin gideriminde yüksek adsorpsiyon kapasitesi sergileyen, çevre dostu bir biyosorbent potansiyeline sahiptir (Deniz, 2022; Gentscheva vd., 2025). Literatürde yapılan çalışmalar, bu atık malzemenin özellikle metilen mavisi gibi boyar maddelerin sudan uzaklaştırılmasında başarılı bir şekilde kullanılabileceğini ve adsorpsiyon mekanizmalarının pH gibi çevresel faktörlerden etkilendiğini ortaya koymaktadır (Kaptanoğlu vd., 2023). Adsorpsiyon mekanizmalarının incelenmesinde biyokütle kullanımı, maliyet etkinliği ve çevre dostu yapısı nedeniyle öne çıkmaktadır. *Nigella sativa* L. (çörek otu) ile yürütülen çalışmalarda, pH 5,60 koşullarında değişen boya konsantrasyonları ve sıcaklığın adsorpsiyon kapasitesi

üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu çalışmalar, biyolojik atıkların endüstriyel boyaların gideriminde potansiyel birer adsorban olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

4. Literatürde Malahit Yeşili Giderimi

Literatür verileri, farklı biyolojik ve atık malzemelerin MG giderimindeki etkinliğini farklı parametreler üzerinden ortaya koymaktadır: Kamış talaşı ile ilgili yapılan çalışma 300 °C'de yürütülen çalışmalarda, adsorpsiyon veriminin başlangıç konsantrasyonu ve pH artışıyla paralel olarak yükseldiği, sürecin Langmuir ve Freundlich izoterm modelleriyle uyumlu olduğu saptanmıştır. Elma Kabuğu (*Limonia acidissima*) ile yapılan deneysel analizlerde, sürecin Langmuir modeline daha iyi uyum sağladığı ve 299 K sıcaklıkta maksimum adsorpsiyon kapasitesinin 80.645 mg/g seviyesine ulaştığı bildirilmiştir (Sartape et al., 2014). Termodinamik bulgular, bu etkileşimin kendiliğinden gerçekleşen ve endotermik bir süreç olduğunu doğrulamaktadır (Sartape et al., 2014). Pirinç kabuğu bazlı aktif karbon ile yapılan çalışmalarda, sistemin yaklaşık 90 dakikada dengeye ulaştığı; pH, sıcaklık ve konsantrasyon artışının giderim verimini pozitif yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca iyonik kuvvetin artışı, adsorpsiyon kapasitesini artıran bir diğer faktör olarak belirlenmiştir.

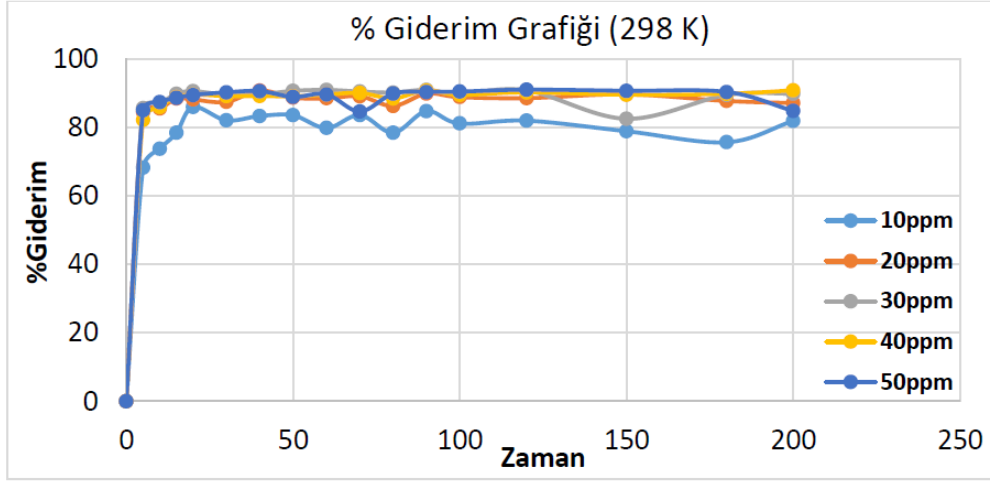
Literatürde *Nigella sativa* L. (çörek otu) küspesinin katyonik boyaların giderimindeki etkinliği incelenmiş ve özellikle Şişmanoğlu ve ark. (2023) tarafından kristal viyole ve metilen mavisi gibi boyar maddelerin adsorpsiyonunda başarılı sonuçlar verdiği rapor edilmiştir. Ancak, su ürünleri yetiştiriciliğinde yaygın olarak kullanılan, yüksek toksik ve kanserojen etkilere sahip olan Malahit Yeşili'nin ham *Nigella sativa* L. küspesi üzerindeki adsorpsiyon kinetiği, izoterm mekanizmaları ve farklı sıcaklıklardaki termodinamik davranışları henüz detaylı bir şekilde araştırılmamıştır. Ayrıca literatürdeki benzer çalışmalar boya giderimi için ek bir termal işlem (biyokömür/biochar aktivasyonu vb.) gerektiren süreçlere odaklanırken, bu çalışma ham küspenin doğrudan kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla mevcut çalışma, ek bir enerji ve maliyet gerektirmeden ham çörek otu küspesinin Malahit Yeşili giderimindeki maksimum performansını ve spesifik yüzey etkileşimlerini inceleyerek literatürdeki bu önemli boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

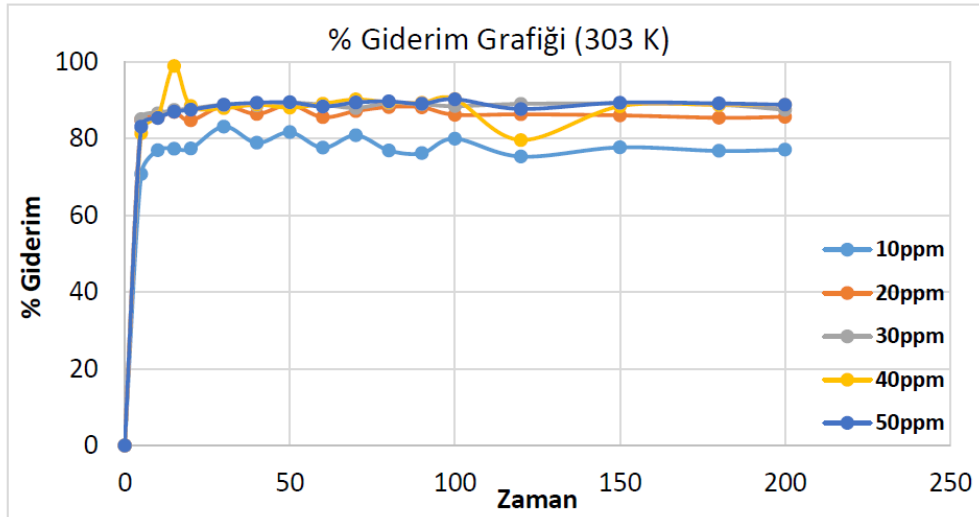
Araştırmada yararlanılan çörek otu (*Nigella sativa* L.), Şanlıurfa ilinden temin edilmiş ve soğuk pres tekniğiyle küspesi elde edilmiştir. Açığa çıkan çörek otu küspesi demir havan yardımıyla ezilerek öğütülmüş, ardından 0,355 mm gözenek çapına sahip standart laboratuvar eleğinden geçirilmiştir. Eleme işleminin sonrasında, adsorban partikülleri oda sıcaklığında 2 saat boyunca kese kağıtları üzerinde havalandırılarak kurutulmuş ve ardından adsorpsiyon proseslerinde kullanılmak üzere muhafaza edilmiştir. Deneyler esnasında pH ayarlamalarında ve çözelti hazırlıklarında kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) ile hidroklorik asit (HCl) analitik saflıkta olup Merck firmasından tedarik edilmiştir. Çalışmanın temel odağı olan katyonik karakterdeki Malahit Yeşili (MG) boyar maddesinin kimyasal formülü C₂₃H₂₅ClN₂, molekül ağırlığı ise 364,91

g/mol'dür. Deneysel sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak adına tüm adsorpsiyon ölçümleri üç tekrarlı (triplicate) olarak gerçekleştirilmiş ve bu verilerin aritmetik ortalaması hesaplanarak bulgular kısmında sunulmuştur. Malahit yeşili ile yapılan sorpsiyon deneylerinde, 1 g Çörek otu (*Nigella sativa* L.) ve 500 ml boya çözeltisi, sıcaklık kontrollü karıştırılmalı su banyosunda 110 rpm karıştırma hızıyla karıştırıldı. Daha sonra, bu karışımlardan belirli zaman aralıklarında 10 cm³'lük örnekler alındı ve 3 dakika boyunca 4100 rpm'de santrifüjlendi. Bu örneklerin maksimum sorbent değeri, UV-vis

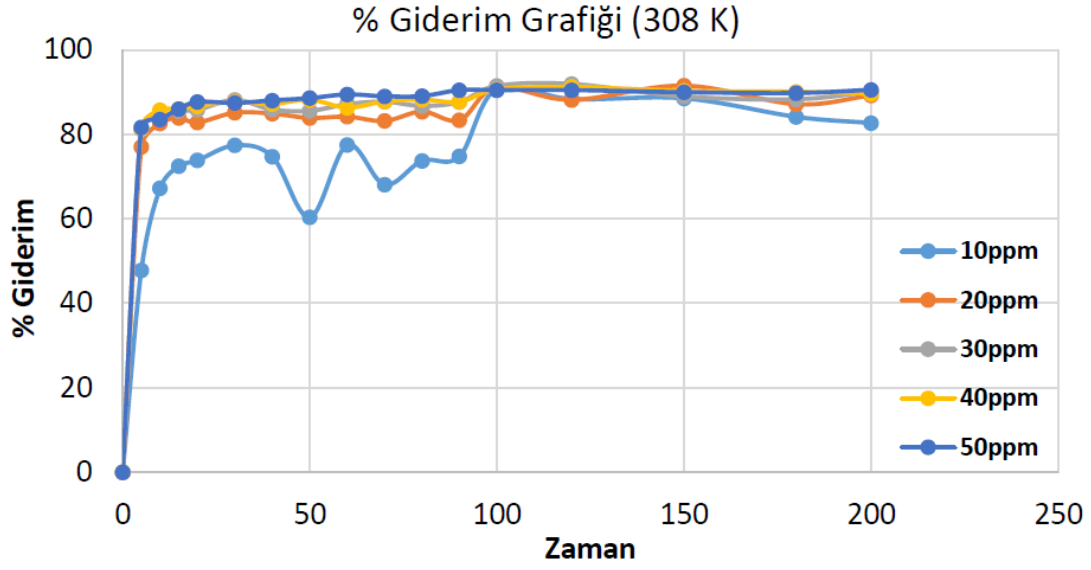
spektrofotometre kullanılarak maksimum dalga boyunda (λ_{max}) malakit yeşili için 617 nm olarak bulundu. Çörek otu (*Nigella sativa* L.) sorbe edilen boya miktarı, boyanın başlangıç konsantrasyonundan son konsantrasyonun çıkarılmasıyla hesaplandı. Konsantrasyonun sorpsiyon üzerindeki etkisini araştırmak için, 5 mg/L, 10 mg/L, 15 mg/L, 20 mg/L ve 25 mg/L'lik boya çözeltileri kullanılarak deneyler yapıldı ve her konsantrasyon için malakit yeşilinin siyah kimyon ile adsorpsiyonu, malakit yeşilinin doğal pH'ı 5,60'ta sabit tutularak 25 °C, 30 °C, 35 °C ve 40 °C sıcaklıklarda gerçekleştirildi.



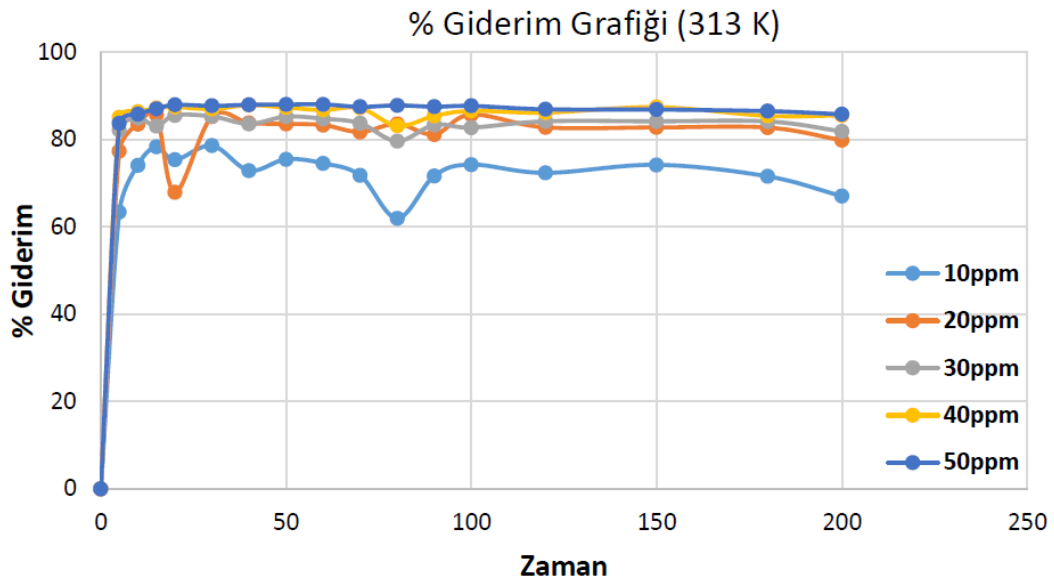
Şekil 1. Malahit yeşilinin Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) üzerindeki % sorpsiyonuna temas zamanının etkisi [C0:10-50ppm, T:298K].



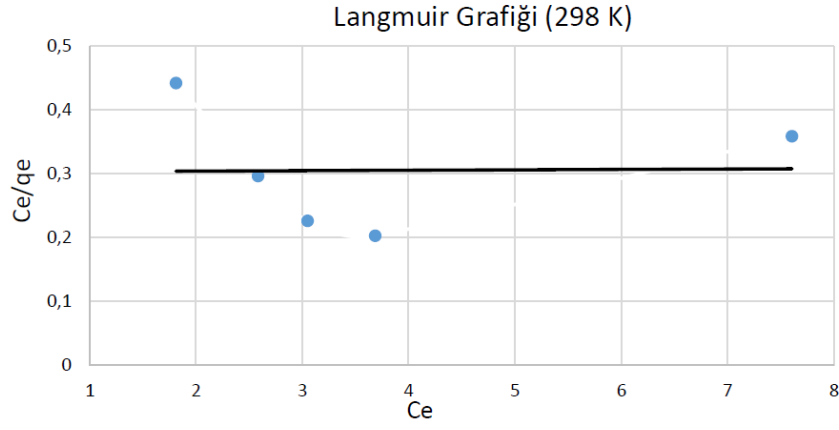
Şekil 2. Malahit yeşilinin Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) üzerindeki % sorpsiyonuna temas zamanının etkisi [C0:10-50ppm, T:303K].



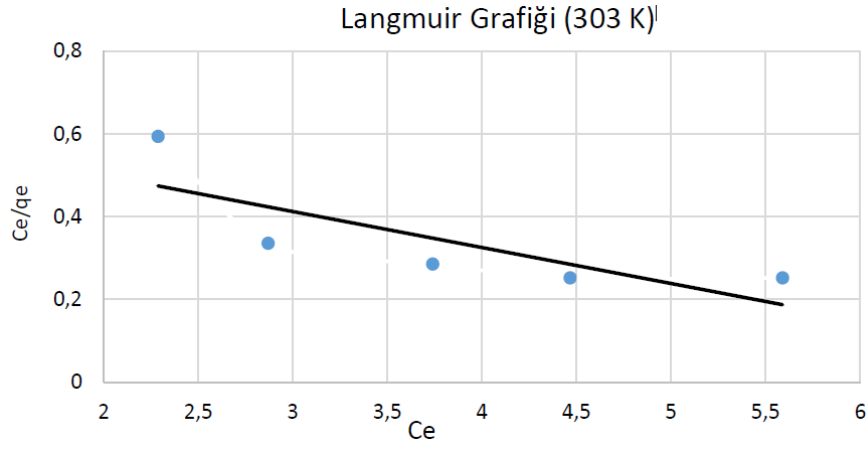
Şekil 3. Malahit yeşilinin Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) üzerindeki % sorpsiyonuna temas zamanının etkisi [C0:10-50ppm, T: 308K].



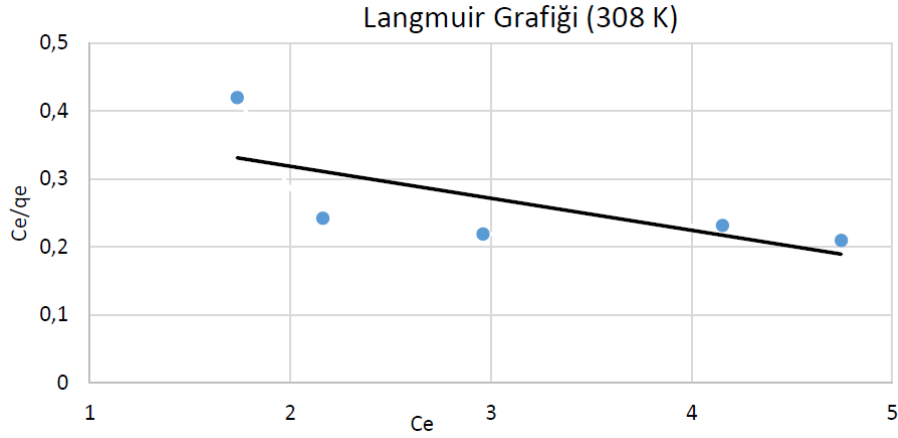
Şekil.4. Malahit yeşilinin Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) üzerindeki % sorpsiyonuna temas zamanının etkisi [C0:10-50ppm, T:313K].



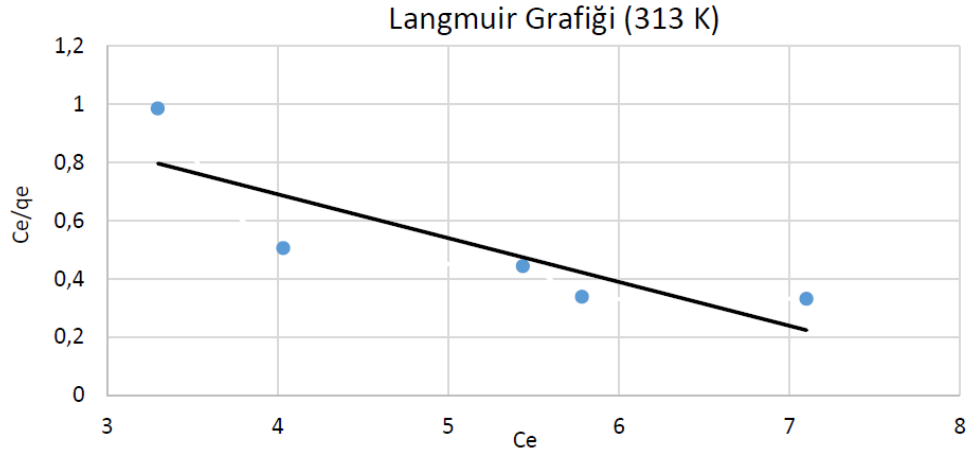
Şekil 5. Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) üzerine malahit yeşilinin Langmuir sorpsiyon izotermi (298 K).



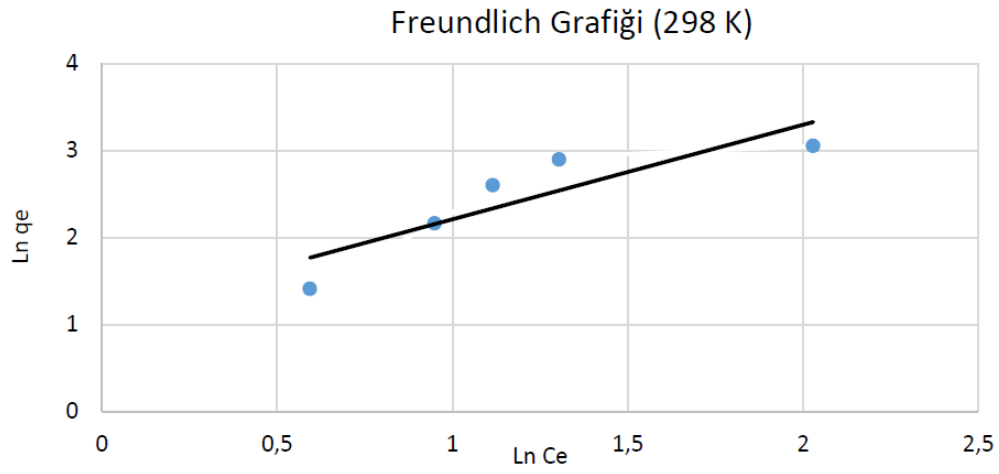
Şekil 6. Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) üzerine malahit yeşilinin Langmuir sorpsiyon izotermi (303 K).



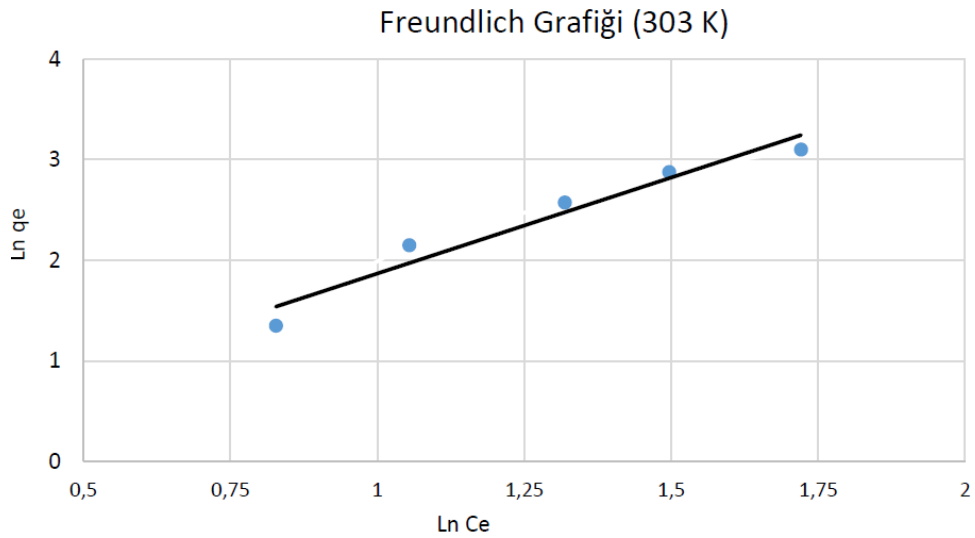
Şekil 7. Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) üzerine malahit yeşilinin Langmuir sorpsiyon izotermi (308 K).



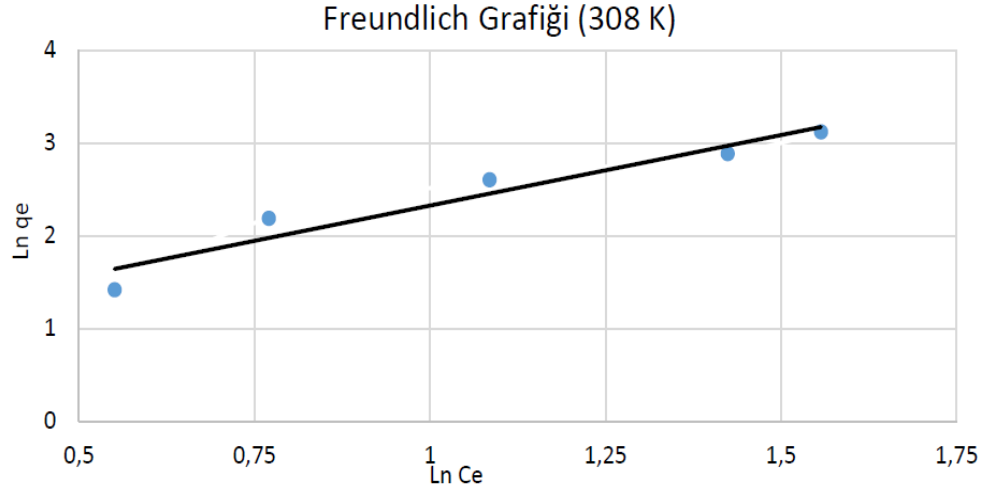
Şekil.8. Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) üzerine malahit yeşilinin Langmuir sorpsiyon izotermi (313 K).



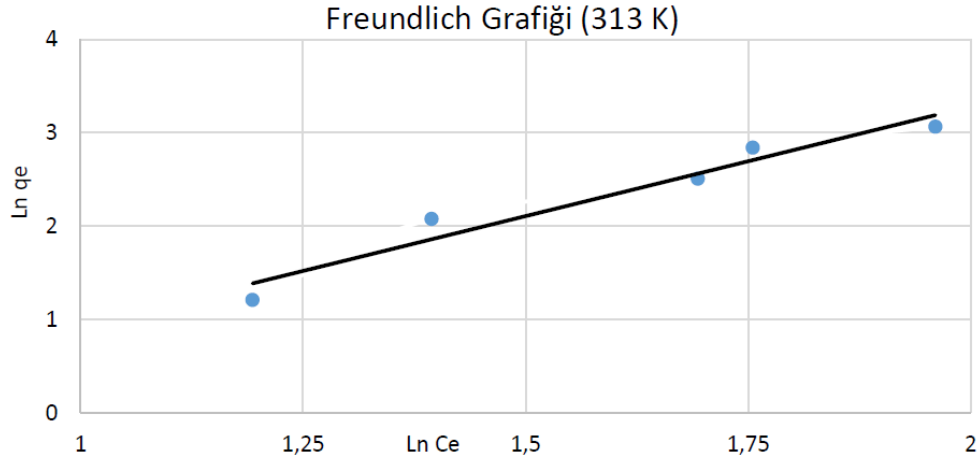
Şekil 9. Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) üzerine malahit yeşilinin Freundlich sorpsiyon izotermi (298 K).



Şekil.10. Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) üzerine malahit yeşilinin Freundlich sorpsiyon izotermi (303 K).



Şekil 11. Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) üzerine malahit yeşilinin Freundlich sorpsiyon izotermi (308 K).



Şekil 12. Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) üzerine malahit yeşilinin Freundlich sorpsiyon izotermi (313 K).

Tablo 1. Malahit yeşilinin Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) sorpsiyonu için hesaplanan Langmuir ve Freundlich parametreleri.

Sıcaklık K	Langmuir			Freundlich		
	K_L (L/gr)	q_m (mgr/gr)	R^2	n	K_f (L/gr)	R^2
298	43.2711	142.8571	0.5436	0.9186	3.0682	0.7696
303	7.7325	11.4815	0.6227	0.6582	2.2389	0.9475
308	8.7665	21.2314	0.4742	0.5243	0.9607	0.9293
313	8.5897	6.6489	0.6989	0.4263	0.2439	0.9467

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çörek otu (*Nigella sativa* L.) üzerindeki malahit yeşili çözeltilerinin sorpsiyonuna konsantrasyonun etkisi, *Nigella sativa* L.'nin sorpsiyon kapasitesini belirlemek amacıyla çözeltili konsantrasyonu 10-50 ppm aralığında değiştirilerek araştırılmıştır. Aşağıdaki grafiklerde *Nigella sativa* L.'da malahit yeşili sorpsiyon yüzdesindeki zamana bağlı değişim gösterilmektedir.

Sorpsiyon izotermi

Belirli bir konumdaki sorpsiyon sabitini belirlemek için, denge, çözeltilde kalan sorbent miktarına karşı sorbent miktarına göre çizilir. Faz boşlukları içermeyen bu eğriler, absorpsiyon izotermi olarak bilinir. Bu uzak izotermi, bir çözünme işlemi için gerekli sorbent ve sorbent miktarlarının ilk belirlenmesi, ayrıca işlem kapasitesinin ve uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi için çok önemlidir. Bu tür izotermi, teorik bileşen oluşumu ve absorpsiyon ısısı gibi termodinamik değerlerin belirlenmesi için hayati öneme

sahiptir. Bu nedenle, adsorpsiyon izotermelerini bozan farklı adsorpsiyon denge modelleri geliştirilmiştir (Atalay, 2007).

Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) üzerinde malahit yeşili sorpsiyon izotermi

Bu çalışmada Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) kullanılmıştır. Farklı derişimlerdeki malahit yeşili T1:298 K, T2:303 K, T3:308 K, T4:313 K'deki farklı sıcaklıklarda çözeltinin sorpsiyonu ayrıca incelendi. 1 g Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) numuneleri ve 500 ml çözelti her bir deney de kullanıldı.

Nigella sativa L. küspesinin Malahit Yeşili (MG) giderimindeki etkinliği, daha önce yapılan çalışmalarda da maliyetsiz ve güçlü bir adsorban olarak vurgulanmıştır (Seçme ve Savcı, 2018). Çörek otu (*Nigella sativa* L.) üzerinde malahit yeşilinin sorpsiyonu için korelasyon faktörü, T1=298 K'de $R^2 > 0,7696$; T2=303 K'de $R^2 > 0,9475$; T3=308 K'de $R^2 > 0,9293$; ve T4=313 K'de $R^2 > 0,9467$ olarak bulunmuştur. Aynı koşullar altında Langmuir adsorpsiyon izoterm denge sabitleri de belirlenmiştir: T1=298 K'de $R^2 > 0,5436$; T2=303 K'de $R^2 > 0,6227$; T3=308 K'de $R^2 > 0,4742$; ve T4=313 K'de $R^2 > 0,6989$. As is known, ortamın pH değeri sorpsiyon sürecinde önemli bir göstergedir. Bunun nedeni, pH'nın sorbent yüzeyindeki yükü ve sorbent iyonlaşma derecesini etkilediğinin bilinmesidir. Malahit yeşilinin pH=5,60'ta çörek otu tohumlarının adsorpsiyonu üzerindeki etkisi araştırıldı. Diğer pH değerlerinde tekrarlanan çalışmalar, adsorpsiyon süreçleri hakkında çok daha açıklayıcı olabilir.

Tüm test edilen sıcaklıklarda Langmuir izotermi için gözlemlenen nispeten düşük R^2 değerleri (298 K'de $R^2 > 0,5436$, 303 K'de $R^2 > 0,6227$, 308 K'de $R^2 > 0,4742$ ve 313 K'de $R^2 > 0,6989$), sorpsiyon sürecinin kendisi için elde edilen daha yüksek korelasyon faktörlerine kıyasla, ideal tek tabakalı adsorpsiyon modelinden potansiyel bir sapmayı gösterir veya birden fazla adsorpsiyon mekanizmasının dahil olduğunu düşündürür (Taqui vd., 2021). Bu durum, Langmuir modelinin iyi bir sorpsiyon modeli sağlayabilse de, farklı adsorpsiyon çalışmalarında değişen R^2 değerlerinin de gösterdiği gibi, heterojen ve karmaşık etkileşimler için her zaman en iyi uyum olmayabileceğini belirten literatürle de desteklenmektedir (Moustafa, 2023; Sayed vd., 2025). Örneğin, bazı çalışmalar Langmuir izotermi için genellikle 0,90'ı aşan daha yüksek R^2 değerleri gösterirken, diğerleri belirli adsorban ve adsorbat etkileşimlerine bağlı olarak Freundlich veya Temkin gibi alternatif modellerle daha iyi uyum sağladığını bildirmektedir (Abewaa vd., 2023; Al-Ghouti ve Al-Absi, 2020; Coşkun vd., 2019). Örneğin, siyah kimyon üzerine malahit yeşili adsorpsiyonu üzerine yapılan araştırmalar, Langmuir izotermi için 0,97 ile 1 arasında değişen R^2 değerleri bildirmiş ve belirli sıcaklıklarda mükemmel uyum göstermiştir (Şişmanoğlu vd., 2023). Bunun aksine, malahit yeşilinin adsorpsiyonuna ilişkin diğer araştırmalar daha düşük Langmuir R^2 değerleri vermiştir ve bazen adsorpsiyon mekanizmasının daha doğru bir şekilde temsil edilmesi için alternatif izoterm modellerinin dikkate alınmasını gerektirmiştir (Elmorsi, 2011). Dahası, genel sorpsiyon süreci ile Langmuir izotermi arasındaki R^2 değerlerindeki tutarsızlık, malahit yeşilinin *Nigella sativa* L. üzerine karmaşık adsorpsiyon özelliklerini tam olarak

aydınlatmak için Freundlich veya Temkin gibi alternatif izoterm modellerinin daha kapsamlı bir şekilde incelenmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır (Abate vd., 2020). Bu tür bir karşılaştırmalı analiz, adsorbat-adsorbent etkileşimlerinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayarak, çok katmanlı bir adsorpsiyon olgusunu veya *Nigella sativa* L. biyosorbentinde heterojen yüzey enerjisi dağılımını ortaya çıkarabilir; bu durum genellikle Freundlich modelinin daha iyi tanımladığı bir olgudur (Hassan vd., 2021). Yapılan analizler sonucunda, 298 K sıcaklık için Langmuir modeline ait belirleyicilik katsayısı (R^2) 0,5436, Freundlich modeline ait R^2 değeri ise 0,7696 olarak hesaplanmıştır. Bu düşük R^2 değerleri, deneysel verilerin doğrusal izoterm modelleri ile tam olarak tanımlanamadığını ve adsorpsiyon sürecinin sadece monotabaka veya heterojen yüzey etkileşimleriyle açıklanamayacak kadar kompleks, muhtemelen çok katmanlı veya kinetik sınırlamaların baskın olduğu bir mekanizmaya sahip olduğunu göstermektedir. Langmuir'in R^2 değerlerinin uyumu gösterebileceği dikkate değer olmakla birlikte, doğrusal olmayan ki-kare testi gibi diğer istatistiksel ölçümler, en uygun adsorpsiyon izoterm modelinin daha sağlam bir değerlendirmesini sağlayabilir (Raval vd., 2016). Malahit yeşili adsorpsiyonu için farklı çalışmalardaki R^2 değerlerindeki varyasyon, Langmuir modelinin uygulanabilirliğinin, belirli deneysel koşullara ve adsorbanın fizyokimyasal özelliklerine büyük ölçüde bağlı olduğunu ve adsorpsiyon mekanizmasının kapsamlı bir şekilde anlaşılması için diğer izoterm modellerinin kritik bir şekilde değerlendirilmesini gerektirdiğini göstermektedir (Jasper vd., 2020). Ayrıca, Langmuir izotermi için gözlemlenen R^2 değerleri, özellikle 0,7'nin altındaki değerler, enerjik olarak eşdeğer bağlanma bölgeleri ve tek tabakalı adsorpsiyon varsayımının, malahit yeşilinin *Nigella sativa* L. üzerine adsorpsiyonunun karmaşıklığını tam olarak yansıtmayabileceğini düşündürmektedir (Nnaji vd., 2021). Bu, çok bileşenli bir izoterm modelinin veya yüzey heterojenliğini hesaba katan bir modelin, adsorpsiyon sürecinin daha doğru bir tasvirini sunabileceği anlamına gelir (Ellela vd., 2024). Langmuir modeli için gözlemlenen korelasyon katsayıları, bazı bilgiler sağlarken, kimyasal adsorpsiyon süreçlerini genellikle daha iyi tanımlayan ve adsorpsiyonun hız sınırlayıcı adımlarına ilişkin bilgiler sunabilen sözde ikinci dereceden kinetik modelin uygunluğuna ilişkin daha fazla araştırma yapılmasını gerektirebilir (Das vd., 2020). Dahası, malahit yeşilinin *Nigella sativa* L. üzerindeki sorpsiyonu için genel sorpsiyon korelasyon faktörlerine kıyasla nispeten düşük Langmuir R^2 değerleri (0,7'nin altında), muhtemelen heterojen yüzeyleri içeren daha karmaşık bir adsorpsiyon mekanizmasının söz konusu olabileceğini ve bunun Freundlich izotermi gibi modellerle daha iyi açıklanabileceğini düşündürmektedir (El-Sheekh vd., 2023).

Bu bulgular, çörek otu küspesinin yapısında bulunan kompleks fonksiyonel grupların adsorpsiyon sürecini domine ettiğini ortaya koymaktadır. Çörek otu küspesi, yüzeyinde yoğun miktarda hidroksil (-OH), karboksil (-COOH) ve amin (-NH₂) grupları barındıran selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi polimerik yapılardan oluşmaktadır. Sıcaklık artışının adsorpsiyon kapasitesini pozitif yönde etkilemesi, üç ana nedene dayanmaktadır:

- 1) Sıcaklık artışı ile birlikte boyar madde moleküllerinin kinetik enerjisi artarak, adsorbanın aktif yüzeyindeki gözeneklere daha kolay difüze olmasını sağlamıştır.
- 2) Yüksek sıcaklık, küspenin polimerik yapısında genleşmeye neden olarak boyar madde moleküllerinin iç gözeneklere erişimini kolaylaştırmıştır.
- 3) Adsorban yüzeyindeki aktif bölgeler ile boyar madde arasındaki kimyasal bağların (hidrojen bağları veya elektrostatik etkileşimler) oluşumu için gerekli olan aktivasyon enerjisi, sıcaklıkla daha kolay sağlanmıştır.

4. SONUÇ

Bu çalışma, ham *Nigella sativa* L. (çörek otu) küspesinin sulu çözeltilerden Malahit Yeşili giderimindeki yüksek adsorpsiyon potansiyelini ortaya koymuştur. Deneysel veriler, adsorpsiyon sürecinin Freundlich izoterm modeline daha uygun olduğunu göstermiştir. Elde edilen en yüksek adsorpsiyon kapasitesi (q_{max}) 58,14 mg/g olarak belirlenmiş ve proses için optimum sıcaklık 40 °C olarak tespit edilmiştir. Bu şartlar altında, maksimum giderim verimi %98,5 seviyesine ulaşmıştır. Çalışma sonuçları, düşük maliyetli ve doğal bir atık olan çörek otu küspesinin, boyar madde içeren endüstriyel atık suların arıtılmasında sürdürülebilir ve çevreci bir adsorban olarak kullanılabileceğini kanıtlamaktadır. Ancak, bu adsorbanın gerçek atık su matrislerindeki (yüksek tuzluluk, pH dalgalanmaları ve çoklu kirletici varlığı) performansının değerlendirilmesi ve pilot ölçekli sistemlere adaptasyonu, gelecekteki uygulama potansiyelini güçlendirmek adına kritik bir öneme sahiptir.

5. KAYNAKLAR

- Abate, G. Y., Alene, A. N., Habte, A. T., & Getahun, D. M. (2020). Adsorptive removal of malachite green dye from aqueous solution onto activated carbon of *Catha edulis* stem as a low-cost bio-adsorbent. *Environmental Systems Research*, 9(1), 15.
- Abewaa, M., Mengistu, A., Takele, T., Fito, J., & Nkambule, T. T. I. (2023). Adsorptive removal of malachite green dye from aqueous solution using *Rumex abyssinicus*-derived activated carbon. *Scientific Reports*, 13(1), 14701.
- Al-Ghouti, M. A., & Al-Absi, R. S. (2020). Mechanistic understanding of the adsorption and thermodynamic aspects of cationic methylene blue dye onto cellulosic olive stones biomass from wastewater. *Scientific Reports*, 10(1), 15928.
- Atalay, N. (2007). Ni(II) iyonlarının poli(2,5-dihidro-2,5-dimetoksifuran) üzerine adsorpsiyonu [Yüksek lisans tezi, Kırıkkale Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Coşkun, Y. İ., Aksuner, N., & Yanık, J. (2019). Sandpaper wastes as adsorbent for the removal of brilliant green and malachite green dye. *Acta Chimica Slovenica*, 66(2), 402–413.
- Das, R. R., Mukherjee, A., Sinha, I., Roy, K., & Dutta, B. K. (2020). Synthesis of potential bio-adsorbent from Indian Neem leaves (*Azadirachta indica*) and its optimization for malachite green dye removal from industrial wastes using response surface methodology: Kinetics, isotherms and thermodynamic studies. *Applied Water Science*, 10(5), Article 117.
- Deniz, F. (2022). Application of biorefinery by-product of *Nigella sativa* L. herb for green treatment of synthetic dye impurity in aquatic environment: A circular economy based approach to water purification. *International Journal of Phytoremediation*, 25(1), 27–35.
- Ellela, M. H. A., Aamer, N., Abdallah, H. M., López-Maldonado, E. A., Mohamed, Y. M. A., Nazer, H. A. E., & Mohamed, R. R. (2024). Novel high-efficient adsorbent based on modified gelatin/montmorillonite nanocomposite for removal of malachite green dye. *Scientific Reports*, 14(1), 1228.
- Elmorsi, T. M. (2011). Equilibrium isotherms and kinetic studies of removal of methylene blue dye by adsorption onto Miswak leaves as a natural adsorbent. *Journal of Environmental Protection*, 2(6), 817–827.
- El-Sheekh, M. M., Deyab, M., Hassan, N. I., & Ahmed, S. E. A. (2023). Bioremediation of malachite green dye using sodium alginate, *Sargassum latifolium* extract, and their silver nanoparticles. *BMC Chemistry*, 17(1), 108.
- Gentsheva, G., Vassileva, P., Tzvetkova, C., Pashev, A., Yotkovska, I., Mladenov, M., & Vassilev, T. (2025). Eco-friendly dye removal: Black cumin seed press cake for toluidine blue adsorption. *Separations*, 12(10), 258.
- Guo, Y. P., Zhao, J. Z., Zhang, H., Yang, S. F., & Wang, Z. C. (2005). The adsorption of colored dyes by rice husk-based porous carbons. *Dyes and Pigments*, 65(1), 25–34.
- Hameed, B. H., & El-Khaiary, M. I. (2008). Removal of basic dye from aqueous medium using a novel agricultural waste material: Pumpkin seed hull. *Journal of Hazardous Materials*, 155(3), 601–609.
- Hassan, A. A., Al-Isawi, R., & Saleh, Z. A. (2021). The use of pre-heated black cumin seeds (*Nigella sativa* L.) for sorption of basic dyes from aqueous solutions. *Journal of Ecological Engineering*, 22(9), 149–158.
- Jasper, E. E., Ajibola, V. O., & Onwuka, J. C. (2020). Nonlinear regression analysis of the sorption of crystal violet and methylene blue from aqueous solutions onto an agro-waste derived activated carbon. *Applied Water Science*, 10(6), 132.
- Kaptanoğlu, S., Kul, A. R., Üstek Cengiz, Ş., & Öztaş, S. (2023). Çörek otu (*Nigella sativa* L.) küspesinin metilen mavisi biyosorpsiyonunda kullanılabiliirliğinin araştırılması. *EJONS International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences*, 7(2), 209–219.

- Moustafa, M. T. (2023). Preparation and characterization of low-cost adsorbents for the efficient removal of malachite green using response surface modeling and reusability studies. *Scientific Reports*, 13(1), 4493.
- Nnaji, C. C., Agim, A. E., Mama, C. N., Emenike, P. C., & Ogarekpe, N. (2021). Equilibrium and thermodynamic investigation of biosorption of nickel from water by activated carbon made from palm kernel chaff. *Scientific Reports*, 11(1), 7808.
- Raval, N. P., Shah, P. U., & Shah, N. K. (2016). Nanoparticles loaded biopolymer as effective adsorbent for adsorptive removal of malachite green from aqueous solution. *Water Conservation Science and Engineering*, 1(1), 69–81.
- Sartape, A. S., Mandhare, A. M., Jadhav, V. V., Raut, P. D., Anuse, M. A., & Kolekar, S. S. (2014). Removal of malachite green dye from aqueous solution with adsorption technique using Limonia acidissima (wood apple) shell as low cost adsorbent. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3229–S3238.
- Sayed, A., Behalo, M. S., Feteha, A., Younis, A., Keshawy, M., Yousry, R., & Abdel-Raouf, M. E. (2025). Unveiling the removal performance of banana peel biochar and rice husk nanoparticles for crystal violet and methylene blue dyes from aqueous media. *Discover Environment*, 3(1), 143.
- Seçme, H., & Savcı, S. (2018). Dye removal by adsorption from aqueous solution using pulp (*Nigella sativa* L.). *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(4), 147–154.
- Serin, D. S. (2010). Supranol Yellow 4 GL boyar maddesi ve nikel (II) iyonlarının portakal kabuğuna adsorpsiyonunun kesikli ve sürekli sistemlerde incelenmesi [Yüksek lisans tezi, Mersin Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Sun, X., Wang, S., Liu, X., Gong, W., Bao, N., Gao, B., & Zhang, H. (2008). Biosorption of malachite green from aqueous solutions onto aerobic granules: Kinetic and equilibrium studies. *Bioresource Technology*, 99(9), 3475–3483.
- Şişmanoğlu, S., Akalın, M. K., Akalın, G. O., & Topak, F. (2023). Effective removal of cationic dyes from aqueous solutions by using black cumin (*Nigella sativa* L.) seed pulp and biochar. *BioResources*, 18(2), 3414–3439.
- Taqi, S. N., Mohan, C. S., Khatoon, B. A., Soudagar, M. E. M., Khan, T. M. Y., Mujtaba, M. A., Ahmed, W., Elfakhany, A., Kumar, R., & Pruncu, C. I. (2023). Sustainable adsorption method for the remediation of malachite green dye using nutraceutical industrial fenugreek seed spent. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(10), 9119–9130.
- Yağız, A. (2016). Çörek otu (*Nigella sativa* L.) kullanarak sulu çözeltilerden tekstil boyar maddelerin adsorpsiyonu [Yüksek lisans tezi, Ordu Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.