



Tarım Atıklarından Aktif Karbon Üretimi ve Atıksudan Boya Giderimi: Karakterizasyon, Kinetik ve Denge Çalışmaları

Hakan YILDIZ¹

¹Harran Üniversitesi, Bozova Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

¹<https://orcid.org/0000-0002-2181-7226>

✉: hyildiz@harran.edu.tr

ÖZET

Tarım atıkları, sürdürülebilir ve çevre dostu atık yönetimi açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada, tarım atıklarından pamuk sapları kullanılarak aktif karbon adsorbenti üretilmiştir. Bu adsorbent ile atık sudan tehlikeli bir boyar madde olan malahit yeşilinin adsorpsiyon prosesi ile giderilmesi incelenmiştir. Adsorbentin BET, SEM ve FT-IR analizleri ile karakterizasyonu yapılmıştır. Adsorpsiyon etkinliğini belirlemek için boya konsantrasyonu ve pH gibi değişkenlerin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Malahit yeşili adsorpsiyonunun doğası hakkında daha iyi bir anlayış elde etmek için kinetik ve denge çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, yalancı ikinci dereceden kinetik modelin adsorpsiyon sürecini en iyi şekilde temsil ettiği, Langmuir izoterminin ise denge özellikleri için en uygun model olduğu belirlenmiştir. Langmuir izoterm verilerine dayanarak, maksimum adsorpsiyon kapasitesi (q_{max}) 69.06 mg g⁻¹ olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, atık pamuk saplarından üretilen adsorbanın çevre dostu, ekonomik ve etkili bir su arıtım malzemesi olarak potansiyelini ortaya koymaktadır.

Çevre Bilimi

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi

Geliş Tarihi : 03.05.2024

Kabul Tarihi : 06.06.2024

Anahtar Kelimeler

Tarımsal Atıklar

Aktif Karbon

Su arıtma

Adsorpsiyon

Activated Carbon Production from Agricultural Wastes and Dye Removal from Wastewater: Characterization, Kinetic and Equilibrium Studies

ABSTRACT

Agricultural wastes have a great potential for sustainable and environmentally friendly waste management. In this study, activated carbon adsorbent was produced using cotton stalks from agricultural wastes. With this adsorbent, the removal of malachite green, a hazardous dyestuff, from wastewater by the adsorption process was investigated. The adsorbent was characterized by BET, SEM, and FT-IR analysis. Optimization of variables such as dye concentration and pH were carried out to determine the adsorption efficiency. Kinetic and equilibrium studies were carried out to obtain a better understanding of the nature of malachite green adsorption. As a result of the studies, it was determined that the pseudo-second-order kinetic model best represents the adsorption process, while the Langmuir isotherm is the most suitable model for equilibrium properties. Based on the Langmuir isotherm data, the maximum adsorption capacity (q_{max}) was determined as 69.06 mg g⁻¹. This study reveals the potential of adsorbent produced from waste cotton stalks as an environmentally friendly, economical, and effective water treatment material.

Environmental Sciences

Research Article

Article History

Received : 03.05.2024

Accepted : 06.06.2024

Keywords

Agricultural Waste

Activated Carbon

Water treatment

Adsorption

Atıf Şekli: Yıldız, H. (2024) Tarım Atıklarından Aktif Karbon Üretimi ve Atıksudan Boya Giderimi: Karakterizasyon, Kinetik ve Denge Çalışmaları. *KSÜ Tarım ve Doğa Derg* 27 (6), 1269-1282. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdog.vi.1477888>

To Cite : Yıldız, H. (2024). Activated Carbon Production from Agricultural Wastes and Dye Removal from Wastewater: Characterization, Kinetic and Equilibrium Studies. *KSU J. Agric Nat* 27 (6), 1269-1282. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdog.vi.1477888>

GİRİŞ

Tarımsal atıklar tarım faaliyetlerinin yan ürünleri

olup, hasat artıkları, işlenmemiş organik materyaller, üretim süreçlerinden kaynaklanan atıklar, pazar atıkları ve ambalaj atıkları gibi çeşitli kaynaklardan

gelirler. Bu atıklar doğru şekilde yönetilmediğinde çevresel sorunlara neden olabilir; ancak doğru şekilde işlendiklerinde gübre olarak geri dönüştürülebilir, biyogaz üretimi için kullanılabilir veya diğer endüstrilerde hammadde olarak değerlendirilebilirler. Bu nedenle, tarımsal atıkların etkili bir şekilde yönetilmesi ve değerlendirilmesi önemlidir (Teo ve ark., 2022). Günümüzde, artan endüstrileşme ve tarımsal faaliyetlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, tarım atıklarının sürdürülebilir atık yönetimi ve su arıtımı alanlarında alternatif kaynaklar olarak değerlendirilmesi giderek artan bir öneme sahiptir. Bu atıklar, sadece çevresel kirliliği azaltmakla kalmayıp aynı zamanda ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir çözümler sağlamak potansiyeline sahiptir (Crist ve ark., 2017).

Temiz ve güvenli içme suyunun giderek azaldığı endişe verici bir çağda yaşamaktayız. Bu kıtlık, nehirler ve göller gibi doğal su kaynaklarının üzerindeki büyük baskının, kirlilik ve aşırı kullanım sonucu doğrudan ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır. Dünya genelinde bazı bölgelerde ise temiz içme suyuna erişim, hayatta kalmak için günlük bir mücadele haline gelmiştir. Maalesef, iklim değişikliği kuraklık riskini artırarak mevcut su kıtlığını daha da derinleştirmekte ve bu durumun daha da kötüleşmesi beklenmektedir. Dahası, birçok topluluk temiz suyu arıtmak ve dağıtmak için gerekli kaynak ve altyapıya sahip değildir, bu da onları kirlenme riskine karşı savunmasız hale getirmektedir. Dolayısıyla, değerli su kaynaklarımızın korunması ve dünya çapında temiz içme suyuna erişim sağlanması için acil eylemler alınması gereklidir (Adeleye ve ark., 2023; United Nations, 2019). Dünya genelinde su kaynaklarının kirlenmesi artmakta olup, bunun başlıca nedeni pestisitler (Rodríguez-Bolaña ve ark., 2023), boyalar (Yildiz ve ark., 2023), farmasötikler (Khan & Jabin, 2023), ağır metaller (Aftab ve ark., 2023), deterjanlar (Pack ve ark., 2023), kişisel bakım ürünleri (Doherty ve ark., 2023) ve fenolik maddeler (Piryaei & Abolghasemi, 2022). Son yıllarda, çevre kirliliğine önemli bir katkı sağladığı için boya kirliliğinin giderilmesi konusunda kapsamlı araştırmalar yapılmaktadır (Ji ve ark., 2020; Stjepanović ve ark., 2021; Yıldiz, 2024). Boyaların su sistemlerine sızması, çevre üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir. Boyaların suya karışması, suyun insan tüketimi için uygun olmayan hale gelmesine ve arıtma sürecinde zorluklara yol açabilir. Boyalar, gıda ve içecek, tekstil ve kozmetik gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu yaygın kullanıma rağmen, boyaların çevreye yayılma ve bozunma süreci oldukça zordur. Bu durumun temel nedeni, boyaların karmaşık kimyasal bileşimleri ve sentetik boyaların endüstrilerde geniş çapta kullanılmasıdır, bu da onları son derece dayanıklı ve doğal yıkıma karşı dirençli hale getirir (Deniz & Yıldiz, 2019; Tang ve ark., 2017a;

Yildiz ve ark., 2023).

Günlük hayatta giysi ve kozmetik ürünlerinde sıkça kullanılan boyalar, canlı renklerin oluşturulmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, bu boyaların üretimi ve kullanımı yüksek düzeyde renkli atık suyun oluşmasına neden olabilir. Bu durum özellikle tekstil, plastik ve baskı gibi sektörlerde yaygın olarak karşılaşılan bir durumdur. Boya üretimi ve kullanımının çevresel etkilerini en aza indirmek için uygun yönetim ve atık su arıtma sistemlerinin uygulanması gereklidir. Bu şekilde, çevresel etkiler azaltılabilir ve su kaynakları korunabilir (Tang ve ark., 2017a). Su içindeki boyaları arıtmak için biyolojik arıtma, çökeltme, flotasyon, ileri oksidasyon, elektrodializ, iyon değişimi, adsorpsiyon, biyosorpsiyon ve membran filtrasyonu gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır (Yildiz ve ark., 2024). Ancak, her bir yöntemin tasarımı, verimliliği ve maliyeti gibi sınırlamaları bulunmaktadır, özellikle düşük giderim verimliliği ve yüksek işletme maliyetleri gibi zorluklarla karşılaşılabılır (Deniz & Yıldiz, 2019a; Valli Nachiyar ve ark., 2023b; Yıldiz ve ark., 2024).

Bununla birlikte, diğer yöntemlerle (örneğin, flokülasyon/koagülasyon, biyolojik arıtma, ileri oksidasyon işlemleri, ozonlama ve membran filtrasyonu gibi) karşılaştırıldığında, adsorpsiyon en uygun olanıdır. Çünkü adsorpsiyon yöntemi çok yönlüdür, özelleştirilebilir ve maliyet etkinidir. Adsorpsiyon, kirleticilerin giderilmesi ve değerli metallerin geri kazanılması gibi çeşitli görevler için kullanılabilir. Ayrıca, karmaşık ekipman veya prosedürler gerektirmez, basit bir işlemdir (Sharifi Pajaie ve ark., 2018; Tang ve ark., 2017b; Uddin & Nasar, 2020; H. Yıldiz ve ark., 2023). Kuşkusuz, adsorpsiyon verimliliğinde en önemli rolü, kullanılan adsorban malzemenin giderim verimliliği, yüksek gözenek boyutu, dayanıklılığı ve ekonomik ömrü gibi faktörler oynamaktadır (Kutluay ve ark., 2019a; Philip, 2023). Bu bağlamda, adsorpsiyon işleminde aktif karbon (Alorabi, 2021), zeolit (Imessaoudene ve ark., 2023), silika (Ni'mah ve ark., 2024), grafit (Saleh & Ali, 2018) gibi çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Aktif karbon özellikle çok yönlü bir adsorbant olarak öne çıkar. Büyük yüzey alanı ve yüksek reaktiviteye sahiptir ve farklı kaynaklardan molekülleri çekme ve bağlama yeteneği ile bilinir. Ancak, yenilenemeyen hammaddelerden sentezlenen ticari aktif karbon son derece maliyetlidir (Malik ve ark., 2020).

Aktif karbon, birçok endüstriyel prosesin çok yönlü ve değerli bir bileşenidir. Gazların saflaştırılmasından suyun arıtılmasına (Kausar ve ark., 2023), enerji depolamaya (Sevilla ve ark., 2010), katalizörlere (Fuente ve ark., 2001) ve farmasötik ürünlere (Song ve ark., 2017) kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Son on yılda, araştırmacılar daha ekonomik aktif karbon üretim yöntemleri geliştirmek

için çaba sarf etmektedirler. Bu amaçla, tarımsal atıklar (Yıldız ve ark., 2022), bitkiler (Pathania ve ark., 2017) ve hatta meyve kabukları (Şahin ve ark., 2016) gibi çeşitli biyolojik malzemelerin kullanımı denetlenmektedir. Sonuç olarak, bu karbon kaynakları artık hem çevre dostu hem de ekonomik olan aktif karbonlar üretmek için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, tarımsal atıklardan elde edilen pamuk sapı, malahit yeşili boyasını su ortamından gidermek için aktif karbon adsorbenti olarak kullanılmıştır. Türkiye, uzun süredir dünya pamuk üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Nispeten küçük boyutuna rağmen, Türkiye, Hindistan, Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Brezilya ve Pakistan'ın ardından altıncı sırada yer alarak dünyanın en büyük pamuk üreticileri arasında yer almaktadır (Erdoğan & Sağlan, 2023). Türkiye'nin en önemli pamuk üretim bölgesi, ülkenin güneydoğusunda bulunan Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) bölgesidir. Bu bölgede, Türkiye'nin toplam pamuk üretiminin yarısından fazlası gerçekleştirilmekte olup, yaklaşık 2,9 milyon dekar ekili arazi bulunmaktadır (Ugur & Bayhan, 2023).

Malahit yeşili, deri, tekstil, kauçuk ve kâğıt gibi farklı endüstriyel işlemlerde renklendirici olarak kullanılan ve birçok sağlık ve çevre sorununa neden olan zararlı bir boyadır. Ayrıca, balık yetiştiriciliğinde ve bakteriyolojide güçlü bir ajan olarak kullanılmaktadır (Arora ve ark., 2020). Bu nedenle, MG gibi zararlı boyaların giderilmesi, yaşamsal faaliyetlerin ve ekolojik istikrarın sağlanması için önemlidir (Adeyi ve ark., 2019).

Başlangıç pH'ı ve başlangıç çözelti konsantrasyonunun deneysel parametreleri, adsorpsiyon üzerindeki etkilerini belirlemek için araştırılacaktır. Malahit yeşili açısından adsorbentin kinetiği ve denge modellemesini analiz etmek için ek araştırmalar yapılacaktır.

Çalışma, boya içeren atık sularla ve bunların çevresel etkileriyle mücadele etmek için çevre dostu adsorbanların önemini vurgulamaktadır. Uygun atık yönetimi, kirliliğin çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmada kritik bir rol oynamaktadır. Tarım atıklarından elde edilen adsorbanların kullanımı, su kirliliğinin azaltılmasına ve sürdürülebilir kalkınmanın teşvik edilmesine yardımcı olacaktır.

MATERYAL ve METOD

Adsorbanın Hazırlanması

Adsorpsiyon işleminde kullanılan tüm malzemeler analitik saflıktaydı ve adsorbanın üretiminde kullanılması amaçlanan tarımsal atık pamuk sapsarı Şanhurfa, Türkiye'deki yerel üreticilerden temin edildi. İlk olarak atık pamuk sapsarı öğütülerek 0.5 mm boyuta elenmiştir. Elenen materyal (1g) daha

sonraki modifikasyonu, adsorpsiyon kapasitesini ve yüzey çıkıntılarını artırmak için 24 saat 100 mL 0,3 M Sodyum hidroksit (NaOH) ile muameleyi içermiştir. Modifiye edilen ve aktivasyon aşaması için hazırlanan malzeme bir kül fırınında 600°C'de 45 dakika boyunca aktive edilmiştir. Nihai aktif karbon, malahit yeşili adsorpsiyonu için adsorban olarak kullanılmaya hazır bir şekilde cam bir şişede dikkatlice saklandı.

Karakterizasyon Çalışmaları

Tarım atıklarından üretilen aktif karbonun yüzey alanı ve gözenek hacmi, yüzey morfolojisi ve fonksiyonel grup profilini karakterize etmek için Brunauer-Emmett-Teller analizi (BET) (BET, Quantachrome Nova 1200), Fourier Transform Infrared Spektrometresi (FT-IR, Perkin Elmer Spectrum 400) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM, ZEISS-EVO 50 cihazı) kullanılmıştır.

Malahit yeşili boyası (CAS No: 2437-29-8) Sigma-Aldrich şirketi tarafından temin edilmiştir. Adsorpsiyon işleminde kullanılmak üzere malahit yeşili boya stok çözeltisi (1000 mg L⁻¹) hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalar için çözeltiler (50-250 mg L⁻¹) stoktan distile su ile seyreltilerek elde edildi. Deney test çözeltisinde pH'yı hassas bir şekilde ayarlamak için hem sodyum hidroksit hem de hidroklorik asitin 0,1 mol L⁻¹ çözeltileri kullanılmıştır. (Sodyum hidroksit (NaOH) ve hidroklorik asit (HCl) sırasıyla Scharlau şirketi, Sinopharm kimyasal reaktif şirketi ve Sigma-Aldrich şirketi tarafından tedarik edilmiştir).

Adsorpsiyon Deneyleri

Adsorpsiyon deneyleri için başlangıç pH'ı (pH 2-10) ve boya konsantrasyonu (C₀ 50-250 ppm) belirlenmiştir. Çözelti konsantrasyonları 616 nm dalga sayısında UV-VIS spektrofotometre (Hitachi U-0080D) ile ölçülmüştür. Denge durumunda aktif karbon tarafından malahit yeşili adsorpsiyon miktarı (q_e) Eşitlik 1 ile belirlenmiştir.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{w} \quad (1)$$

Burada, C₀ (ppm) ve C_e (ppm) sırasıyla çözeltideki başlangıç boya konsantrasyonu ve dengedeki boya konsantrasyonu, V (mL) çözelti hacmi, w (g) adsorban miktarıdır.

Adsorpsiyon Kinetiği

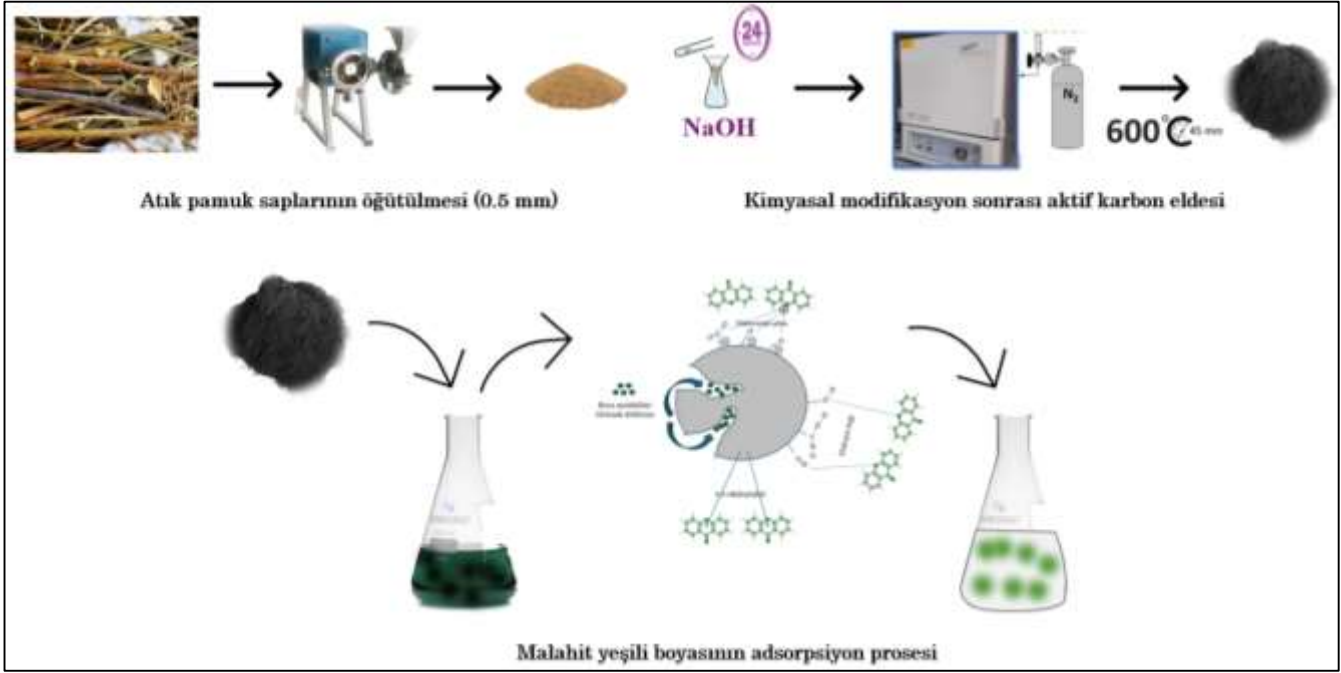
Adsorpsiyon sürecinin dinamik etki mekanizmasını belirlemek ve karakterize etmek için sözde birinci dereceden (SBD) (Lagergren, 1898), sözde ikinci dereceden (SİD) (Weber & Morris 1963a) partikül içi difüzyon (PİD) (HO, 2006), ve Elovich (Weber & Morris 1963b).kinetik modelleri kullanılmıştır. Kullanılan kinetik modeller Eşitlik (2), (3), (4) ve (5) ile verilmiştir:

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1t}) \quad (2)$$

$$q_t = \frac{(k_2q_e^2t)}{(1+k_2q_et)} \quad (3)$$

$$q_t = k_{id}t^{\frac{1}{2}} + C \quad (4)$$

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta t + 1) \quad (5)$$



Şekil 1. Atık pamuk saplarından aktif karbon üretimi ve adsorpsiyon süreci

Figure 1. Activated carbon production and adsorption process from waste cotton stalks

Burada q_e (mg g^{-1}) ve q_t (mg g^{-1}) sırasıyla denge ve t (dk) zamanındaki adsorpsiyon kapasitesidir. SBD, SİD ve PİD modellerinin adsorpsiyon hız sabitleri sırasıyla k_1 (dk^{-1}), k_2 ($\text{g mg}^{-1} \text{dk}^{-1}$) ve k_{id} ($\text{mg g}^{-1} \text{dk}^{-1/2}$) ile temsil edilirken, C (mg g^{-1}) sınır tabaka kalınlığı ile ilgili bir sabittir. α ($\text{mg g}^{-1} \text{dk}^{-1}$) parametresi adsorpsiyon sürecinin başlangıcındaki hız olarak tanımlanır. β (g mg^{-1}) parametresi bu süreçle ilişkili desorpsiyon sabitidir.

Adsorpsiyon İzotermi

Adsorpsiyon izoterm çalışması, bir adsorbent materyalin adsorpsiyon kapasitesini ölçerek süreci daha iyi anlamayı amaçlamıştır. Adsorpsiyon izotermi için elde edilen veriler, iyi bilinen dört izoterm modeli kullanılarak değerlendirilmiştir; Freundlich (Freundlich, 1906), Langmuir (Langmuir 1918), Temkin (Temkin & Pyzhev 1940) ve Dubinin ve Radushkevich (DR) (Dubinin & Radushkevich, 1947) dört denklemler Eşitlik (6,7,8,9).

$$q_e = \frac{(q_m K_L C_e)}{(1 + K_L C_e)} \quad (6)$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n_F} \quad (7)$$

$$q_e = B_T \ln A_T + B_T \ln C_e, \quad B_T = \frac{RT}{b} \quad (8)$$

$$q_e = q_m e^{-B\epsilon^2} \quad (9)$$

Burada, q_e (mg g^{-1}) ve q_m (mg g^{-1}) sırasıyla adsorbent denge ve maksimum boya adsorpsiyon kapasitelerini ve C_e (mg L^{-1}) denge çözelti konsantrasyonunu temsil eder. K_L (L mg^{-1}) adsorpsiyon enerjisi ile ilgili Langmuir denge sabitini, K_F ($\text{mg g}^{-1} (\text{L mg}^{-1})^{1/n_F}$) ve n_F sırasıyla adsorpsiyon kapasitesi ve yoğunluğunun Freundlich model sabitlerini temsil eder. B_T (L g^{-1}), bir malzemenin adsorpsiyon kapasitesinin bir ölçüsü olan Temkin izoterm sabitidir. A_T (mg L^{-1}) denge bağlanma sabitidir ve adsorbat moleküllerinin adsorbent yüzeyine ne kadar güçlü bağlandığını gösterir. b (J mol^{-1}) Temkin sabitidir ve sıcaklığın adsorpsiyon sürecini nasıl etkilediği hakkında bilgi verir. B ($\text{mol}^2 \text{kJ}^{-2}$) ve ϵ ($RT \ln(1+1/C_e)$) adsorpsiyon süreçlerinin verimliliğini değerlendirmek için kullanılan iki önemli parametredir. B , bir molekülün bir yüzeye bağlı kalması için gereken enerjinin bir ölçüsü olan adsorpsiyon enerjisi anlamına gelir. ϵ ise, iki molekül arasındaki bağlanmanın termodinamiğini hesaplamak için kullanılan Polanyi potansiyelinin kısaltmasıdır. Bu, adsorbe edilen malzeme miktarının değişen sıcaklıklarla nasıl değişeceğini tahmin etmek için kullanılabilir olduğundan özellikle önemlidir. R ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) gaz sabiti olup, bir gazın basıncının sıcaklığı ve içerdiği molekül sayısı ile doğru orantılı olduğunu belirten ideal gaz yasasında önemli bir faktördür. T (K) Mutlak Sıcaklıktır ve bir sistemde mevcut olan termal enerji miktarını ölçer.

Adsorpsiyon istatistiği

DeneySEL ve modelleme sonucu elde edilen değerler arasındaki sapmayı değerlendirmek için iki hata ölçütü kullanılmıştır. Sıfır olmayan veri noktaları için ortalama bağıl mutlak hata (OBMH) modeli, Eşitlik

$$\text{OBMH model} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|\text{deneysel değer} - \text{modellenmiř değer}|}{\text{deneysel değer}} \times 100 \right) \quad (10)$$

$$\text{NKOKH model} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{deneysel değer} - \text{modellenmiř değer})^2}}{\text{deneysel değer}} \times 100 \quad (11)$$

BULGULAR ve TARTIřMA

Adsorbent Karakterizasyonu (BET, SEM ve FT-IR Analizleri)

BET cihazı, adsorbanın yüzey alanını ve yüzey hacmini kesin olarak belirlemek için kullanıldı. Aktif

(10) ile belirtilmiştir. Ayrıca, normalize edilmiş kök ortalama kare hatası (NKOKH) modeli, Eşitlik (11) ile tanımlanmış olup, deneysel değerlerin tahmin edilmesindeki genel hatayı değerlendirmek için kullanılmıştır (Açın Ok & Kutluay, 2023).

karbon için hesaplanan BET yüzey alanları Çizelge 1'de verilmiştir: Yüzey alanı 547.169 m²/g⁻¹ ve toplam gözenek hacmi 0.299 cm³/g⁻¹'dir. Adsorbanın geniş yüzey alanı ve gözenek hacmi, kirleticileri etkin bir şekilde uzaklaştırma yeteneğini gösterir (Wang ve ark., 2023).

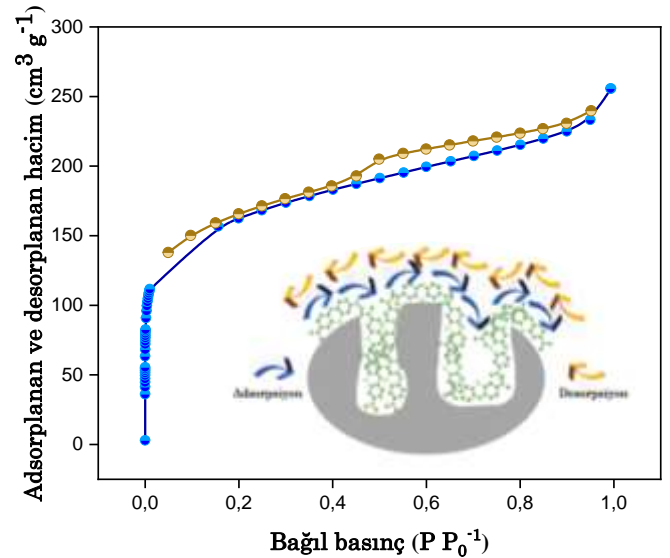
Çizelge 1. Aktif karbonun yüzey alanı, gözenek hacmi ve mikro gözenekliliğın yüzdesi

Table 1 Surface area of activated carbon, volume of pores, and percentage of microporosity

Yüzey Alanı (m ² g ⁻¹)	Gözenek Hacmi (cm ³ g ⁻¹)		Mikro porozite (%)
	V _{mikro}	V _{toplam}	
547.196	0.162	0.299	54.18

Şekil 2, aktif karbonun adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermelerini göstermektedir ve genellikle mikro ve mezopor materyallerde gözlenen I-IV tipi izotermi içermektedir. Tip I izoterm karakteristk özelliği, düşük basınçlarda azot adsorpsiyon kapasitesinde belirgin bir artışa işaret eden güçlü mikroporlar ile azot molekülleri arasındaki etkileşimlerdir (Kutluay ve ark., 2019b). Bu özellik, hava arıtımı ve su filtrasyonu gibi çeşitli uygulamalarda etkili bir seçenek sunar. Orta ve yüksek bağıl basınçlarda, izoterm tip IV'e dönüşür ve bu dönüşüm, mezoporların oluşumunu ve N₂ moleküllerinin kapiler kondensasyonunu gösterir (Teğin ve ark., 2020). Kapiler kondensasyon sırasında, artan basınç nedeniyle adsorbe gaz molekülleri mikro gözeneklerde sıkıştırılır, böylece yoğun bir faz oluşturur. Bu yoğun faz, basınç değiştikçe çökebilir ve yeniden oluşturabilir, bu da izotermelerde gözlemlenen histerezis davranışına yol açar (Zhang ve ark., 2021). Bu fenomenin anlaşılması, birçok endüstriyel uygulama için kritiktir. Ayrıca, bağıl basınç arttıkça N₂ adsorpsiyon kapasitesinde kademeli bir artış gözlenir, bu da adsorban malzemesinde önemli miktarda mikropor varlığına işaret eder. Bu durum, adsorpsiyon kapasitesinin artmasına ve daha etkili Ayrıca, bu maddenin mikro-morfolojik yapısı ve aktif bölge bileşimi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Fourier dönüşümü kızılötesi (FT-IR) cihazları kullanılarak incelenmiştir. Bu veriler, adsorban ve Malahit yeşili iyonları arasındaki potansiyel

adsorpsiyon uygulamalarına olanak tanır (Kaouah ve ark., 2013).

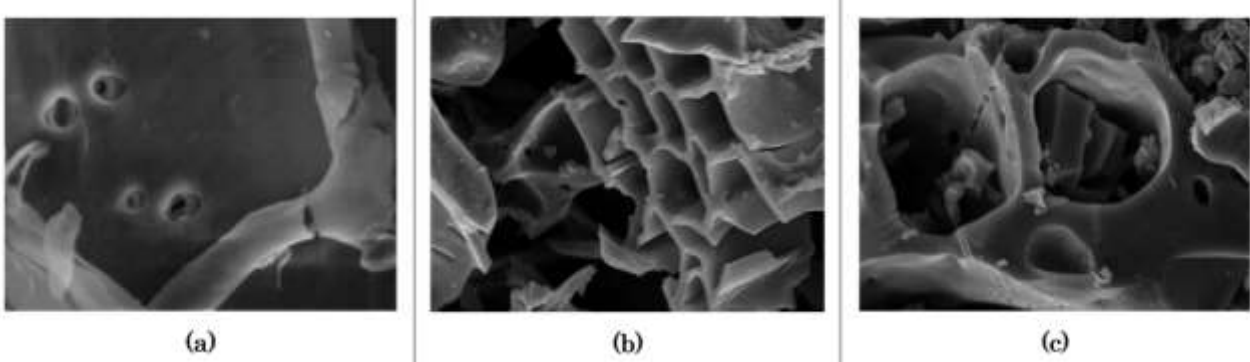


Şekil 2. Adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi
Figure 2. Adsorption-desorption isotherm

etkileşimleri belirlemek için kullanılmış ve adsorpsiyon sürecine ışık tutmuştur. Şekil 3a'da görüldüğü gibi, aktif karbon üretiminde kullanılan hammaddenin SEM görüntüsü boşluksuz bir yüzey ortaya koymaktadır. Üretilen aktif karbonun

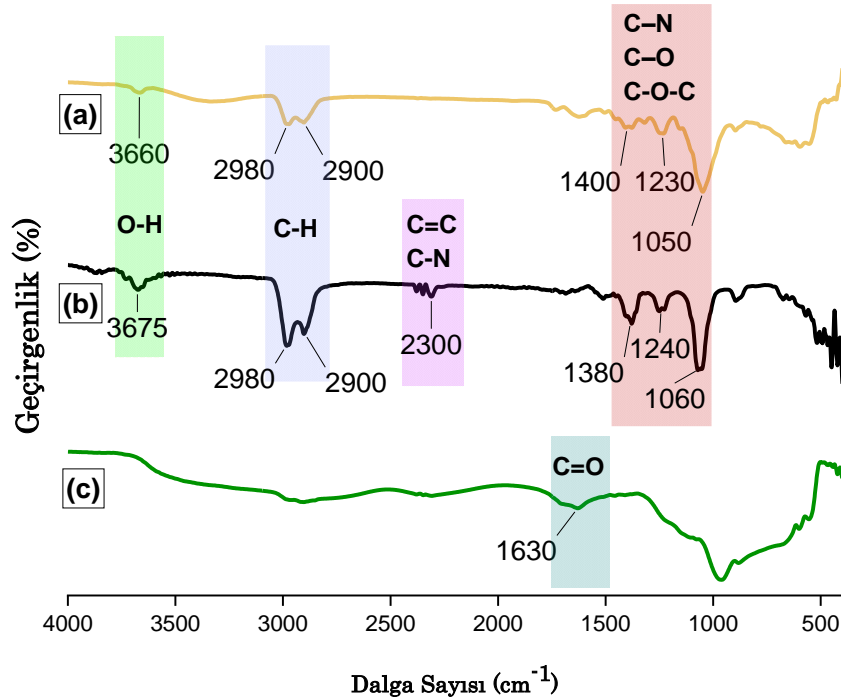
yüzeyinin daha ayrıntılı incelenmesi (Şekil 3b), heterojen olduğunu ve gözenekli bir yapı oluşturan büyük kıvrımlara sahip olduğunu göstermektedir. Bu tür bir yapı, yüksek yüzey alanı nedeniyle adsorpsiyon

performansını artırmaktadır (Şekil 3c). Gözenekler kanal görevi görerek bir sıvı veya gaz akışından moleküllerin adsorpsiyonuna izin verir ve aktif karbonun bunları yakalayıp depolamasını sağlar.



Şekil 3. (a) Ham malzemenin, (b) aktif karbonun ve (c) adsorpsiyon sonrası aktif karbonun taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri (büyütme 500x).

Figure 3. Scanning electron microscopy (SEM) images of (a) raw material, (b) activated carbon and (c) activated carbon after adsorption (magnification 500x).



Şekil 4. (a) Ham malzemenin, (b) aktif karbonun ve (c) boya adsorpsiyonu sonrası aktif karbonun FT-IR spektrumları

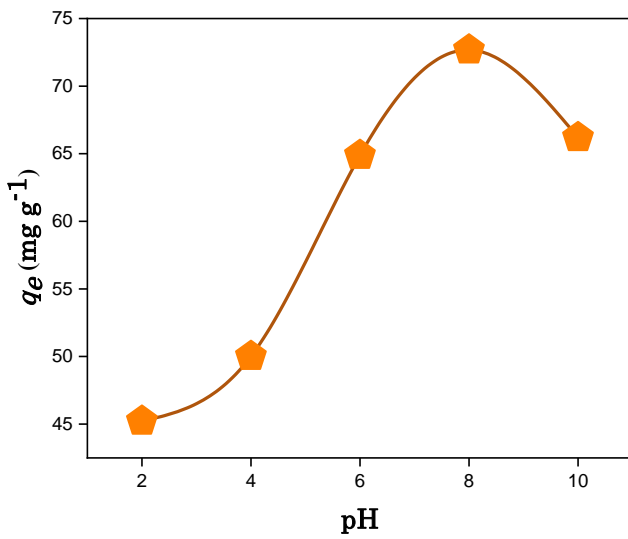
Figure 4. FTIR spectra of (a) raw material, (b) activated carbon and (c) activated carbon after dye adsorption

Şekil 4'te işlenmemiş ham madde, adsorpsiyondan önce aktif karbon ve Malahit yeşili adsorpsiyonundan sonra aktif karbon için Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrumlarının karşılaştırılması gösterilmektedir. Spektrum analizi, 3660-33675 cm^{-1} arasındaki piklerin O-H hidroksil gruplarını (Valencia ve ark., 2022), 2980-2900 cm^{-1} arasındaki piklerin C-H fonksiyonel grubunu temsil ettiğini ortaya koymaktadır (Roy & Rhim, 2019). 2300 cm^{-1} aralığında meydana gelen pikler CC ve C-N gerilmesini temsil etmektedir (Kumari ve ark., 2023).

Ayrıca, 1630 cm^{-1} civarındaki piklerin C=O fonksiyonel grubu ile ilişkili olduğu belirlenmiştir (Cheng ve ark., 2016). Bununla birlikte, 1400, 1380, 1240-30 ve 1060 cm^{-1} civarındaki piklerin C-N, C-O ve C-O-C gruplarını temsil ettiği tespit edilmiştir (S. Liu ve ark., 2018; Nasab ve ark., 2019). 1000 cm^{-1} 'den daha düşük piklerin ise aromatik halkalarla ilişkili fonksiyonel grupların varlığını gösterdiği görülmüştür (Yildiz & Yuksel, 2023).

Boya Adsorpsiyonu

Adsorbantın adsorpsiyon verimliliği, sulu ortamdan boyanın uzaklaştırılmasındaki etkinliğini değerlendirmek amacıyla detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmanın hedefleri doğrultusunda, boya konsantrasyonu ve pH seviyesi gibi ana deneysel parametreler titizlikle ele alınmıştır. Çözeltinin asidik veya alkali olma durumuna bağlı olarak, adsorbantın yüzeyinde çeşitli fonksiyonel gruplar ve yüzey kimyaları tespit edilebilir. Bu sebeple, adsorbantın etkinliğini değerlendirirken çözeltinin başlangıç pH seviyesini göz önünde bulundurmak gereklidir (Liu ve ark., 2021). İlk olarak, farklı başlangıç pH (2-10) değerlerinin malahit yeşili adsorpsiyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir (Şekil 5).



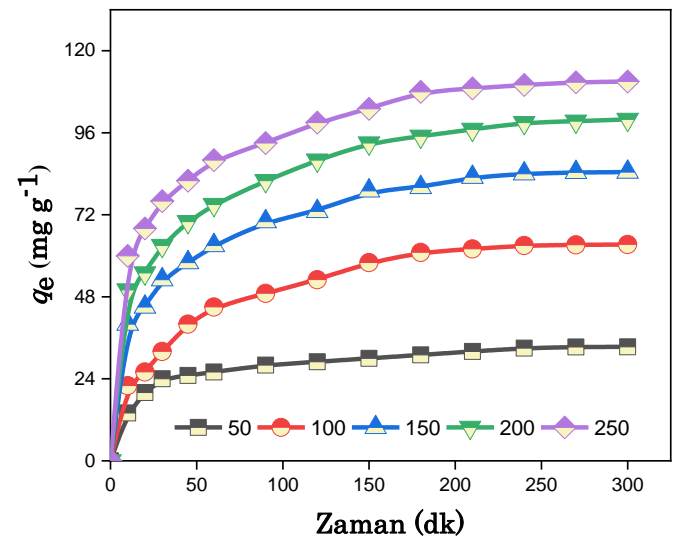
Şekil 5. pH'nın Etkisi (T: 25 °C, V: 100 mL, m: 0.1 g, Co: 100 mg g⁻¹)

Figure 5. Effect of pH (T: 25 °C, V: 100 mL, m: 0.1 g, Co: 100 mg g⁻¹)

Araştırmanın sonuçları, boya adsorpsiyon kapasitesinin başlangıç pH değerinin artmasıyla belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Başlangıç pH değerinin 2 olması, en düşük adsorpsiyon kapasitesiyle sonuçlanırken, başlangıç pH değerinin 8 olması en yüksek adsorpsiyon kapasitesini sağlamıştır. Düşük pH değerlerinde, çözeltideki H⁺ iyonlarının seviyesi belirgin şekilde yüksektir ve bu da asidik bir ortama neden olur. Bu durum, adsorbantın yüzeyinde protonasyonun meydana gelmesine yol açar, yani H⁺ iyonları adsorbant malzemenin yüzeyine bağlanır. H⁺ iyonları yüzeyde yer kapladıkları için ve adsorbe edilebilecek diğer moleküllerin miktarını sınırladıkları için, bu durum malzemenin adsorpsiyon kapasitesinde bir azalmaya neden olabilir (Zhou ve ark., 2019). Öte yandan, hidroksit (OH⁻) konsantrasyonu pH 10'da artarak adsorbant yüzeyinin deprotonasyonuna neden olmuştur. Bu durum, adsorbantın adsorpsiyon kapasitesinde bir düşüşe yol açmıştır. Adsorpsiyon için optimum pH değeri olarak 8

belirlenmiştir.

Çözeltinin başlangıç pH seviyesi belirlendikten sonra, Malahit yeşili adsorpsiyonu üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla çeşitli başlangıç boya konsantrasyonları (50-250 mg L⁻¹) incelenmiştir. Adsorpsiyon hızı ile boya konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi anlamak için boya konsantrasyonları çeşitli değerlerde değiştirilmiştir. Şekil 6, boya başlangıç konsantrasyonları (mg L⁻¹) ile aktif karbon üzerine adsorpsiyon kapasiteleri (qe) arasındaki ilişkiyi açıkça göstermektedir. Başlangıç konsantrasyonu arttıkça, adsorpsiyon kapasitesi de artmaktadır. Bu gözlem, yüksek Malahit yeşili konsantrasyonlarının sudan uzaklaştırılması için aktif karbondan daha büyük bir adsorpsiyon kapasitesi gerektirdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 6. Boya konsantrasyonunun ve adsorpsiyon süresinin adsorpsiyon süreci üzerindeki etkileri (T: 25°C, V: 100 mL, m: 0,1 g, pH: 8)

Figure 6. Effects of dye concentration and adsorption time on the adsorption process (T: 25°C, V: 100 mL, m: 0,1 g, pH: 8)

Bir adsorbant malzemenin adsorpsiyon kapasitesi, büyük ölçüde gözeneklerinin boyutuna ve şekline bağlıdır. Gözenekler daha fazla molekülü adsorbe edebildiğinde, adsorpsiyon kapasitesi hızla artar ve daha fazla gözenek doldukça, adsorpsiyon kapasitesindeki artış oranı azalır. Bu, gözeneklerin doldukça, kalan boş gözeneklere erişimin zorlaşması ve adsorpsiyon oranında bir azalma meydana gelmesiyle açıklanabilir. Bu durum, adsorpsiyon kapasitesinde bir denge noktasına ulaşana kadar devam eder (Liu ve ark., 2010; Yao ve ark., 2023).

Adsorpsiyon kinetik modelleri

Tarım atıklarından elde edilen aktif karbonun, Malahit yeşili boyası adsorpsiyonu için yapılan kinetik modelleme çalışmasının sonuçları Çizelge 2'de sunulmuştur. Adsorpsiyon kinetiği ve reaksiyon

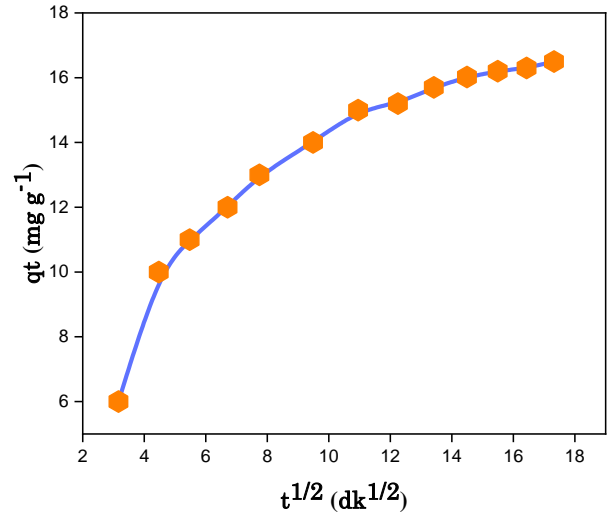
dinamikleri, kimyasal reaksiyonların davranışını anlamada iki temel unsurdur. Bu süreçleri değerlendirmek için kullanılan hız sabitleri, reaktanların ürünlere dönüştürülme hızını ve adsorpsiyonun ne ölçüde gerçekleştiğini ölçer. Adsorpsiyon kinetik modelleri, belirli bir kirleticinin zaman içindeki konsantrasyonunu analiz ederek, kirleticinin adsorban malzeme ile nasıl etkileşime girdiği hakkında bilgi sağlayabilir. Bu, özellikle farklı malzemelerin adsorpsiyon süreçleri için kullanıldığında nasıl performans gösterebileceğini anlamada yardımcı olur (Matos ve ark., 2022).

Çizelge 2. Malahit yeşili adsorpsiyonu için kinetik değerlendirme sonuçları

Table 2. Kinetic evaluation results for malachite green adsorption

Model	Parametre	Değer
SBD	q_e (mg g^{-1})	8.947
	k_1 (min^{-1})	0.0000
	R^2	0.9860
	Adj R^2	0.9847
	RMSE	0.2791
	OBMH (%)	101.11
	NKOKH (%)	91.98
SİD	q_e (mg g^{-1})	17.18
	k_2 ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)	0.0037
	R^2	0.9975
	Adj R^2	0.9973
	RMSE	1.154
	OBMH (%)	58.24
	NKOKH (%)	44.75
PİD	C (mg g^{-1})	7.180
	k_{id} ($\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1/2}$)	0.6081
	R^2	0.8560
	Adj R^2	0.8429
	RMSE	16.95
Elovich	a ($\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1}$)	17.09
	β (g mg^{-1})	0.351
	R^2	0.9663
	Adj R^2	0.9632
	RMSE	0.1599

Kinetik modellerden elde edilen istatistiklerin, deneylerden elde edilen verilerle uyumu regresyon katsayısı (R^2), düzeltilmiş regresyon katsayısı (Adj R^2) ve ortalama karesel hata (RMSE) testleri ile analiz edilmiştir. Bu istatistiksel analiz, boya adsorpsiyonunun deneysel kinetik verilerinin, yüksek R^2 ve düşük OBMH ve NKOKH değerlerine dayanarak sözde ikinci dereceden (SİD) kinetik modeline uygun olduğunu göstermiştir (R^2 : 0.99, Düzeltmeyle Ayarlanmış R^2 : 0.99 ve RMSE: 1.154). Bu model (SİD), aktif karbon yüzeyindeki Malahit yeşili adsorpsiyonunun kimyasal adsorpsiyon olduğunu göstermektedir (de Souza ve ark., 2022).



Şekil 7. PİD kinetik modelinin grafiği
Figure 7. Plot of IPD kinetic model

Boya moleküllerinin adsorpsiyon hızı üzerindeki etkisi, PİD kinetik modeli kullanılarak değerlendirildi. Şekil 7'de, kinetik modelin grafiği gösterilmektedir. Bu grafik, Orijin üzerinden geçmemiştir ve tek bir çizgide değildir. Yapılan araştırma, boyanın adsorpsiyon mekanizmasının çeşitli hız kontrol adımlarından etkilendiğini göstermiştir (Li ve ark., 2018). Elovich modeli, moleküllerin değişen adsorpsiyon kapasitelerini dikkate alırken, zamana bağlı olarak değişen adsorpsiyon oranını açıklayan bir denklem üzerine kurulmuştur (Shahat ve ark., 2023).

Adsorpsiyon izoterm modelleri

Adsorpsiyona ait deneysel izoterm verileri Freundlich, Langmuir, Temkin ve D-R izoterm modelleri kullanılarak değerlendirilmiştir (Çizelge 3). Çizelge 3'te sunulan yüksek regresyon (R^2) katsayılarına ve düşük OBMH ve NKOKH değerlerine dayanarak, adsorpsiyon denge verilerinin Langmuir izotermiyle etkili bir şekilde uyumlu olduğu gözlemlenebilir. Bu model, adsorpsiyonun homojen bölgelerde gerçekleştiğini önerdiğinden, tek katmanlı bir adsorpsiyon sürecini desteklemektedir (Zaini ve ark., 2023). En iyi modeli seçerken sadece R^2 değerlerine bakmak yeterli değildir. En doğru kararı vermek için, denge verilerini hesaplanan maksimum adsorpsiyon kapasitesi (q_{max}) ile karşılaştırmalıyız (Yağmur & Kaya 2021). Maksimum adsorpsiyon kapasitesi (q_{max}) 69.06 mg g^{-1} olarak bulunmuştur.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, tarımsal atık olan pamuk sapları kullanılarak üretilen bir adsorbentten Malahit yeşili boyasının su ortamından giderimi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Karakterizasyon bulguları, üretilen adsorbentin birçok çıkıntı ve boşluk içeren heterojen

bir yüzey morfolojisine ve zengin bir fonksiyonel grup özelliğine sahip olduğunu göstermektedir. Adsorpsiyon süreci, pH (2-10) ve çözelti başlangıç konsantrasyonu ($50-250 \text{ mg L}^{-1}$) parametrelerinin incelenmesi ile başlar. pH 8'in etkili adsorpsiyon için uygun olduğu bulunmuştur. Adsorpsiyon prosesinin kinetik ve denge modelleme çalışmaları, SİD ve Langmuir modellerinin adsorbentten boya giderim davranışını açıklamada en etkili modeller olduğunu göstermiştir.

Çizelge 3. Malahit yeşili adsorpsiyonu için izoterm değerlendirme sonuçları

Table 3. Kinetic evaluation results for malachite green adsorption

Model	Parametre	Değer
Freundlich	$K_f (\text{mg g}^{-1} (\text{L mg}^{-1})^{1/n_f})$	0.0358
	n_f	0.58
	R^2	0.9666
	Adj R^2	0.9555
	RMSE	0.0178
	OBMH (%)	114.87
	NKOKH (%)	85.11
Langmuir	$q_{\text{max}} (\text{mg g}^{-1})$	69.06
	R^2	0.9966
	Adj R^2	0.9955
	RMSE	0.084
	OBMH (%)	62.13
	NKOKH (%)	46.22
	Temkin	$B_T (\text{J mol}^{-1})$
$K_T (\text{L mg}^{-1})$		0.030
R^2		0.7942
Adj R^2		0.7256
RMSE		26.65
OBMH (%)		101.55
NKOKH (%)		98.23
D-R	$q_m (\text{mg g}^{-1})$	107.88
	$E_{\text{DR}} (\text{kJ mol}^{-1})$	36.73
	R^2	0.8126
	Adj R^2	0.7502
	RMSE	0.7505
	OBMH (%)	121.44
	NKOKH (%)	87.24

Çizelge 4. Farklı aktif karbonların maksimum adsorpsiyon kapasiteleri

Table 4. Maximum adsorption capacity of different activated carbons

Hammadde	$q_{\text{max}} (\text{mg g}^{-1})$	Kaynak
Pamuk Sapı	69.06	Bu çalışma
Gat sapı (<i>Catha edulis</i>)	5.62	(Abate ve ark., 2020)
Hindistan cevizi lifi	27.44	(Uma ve ark., 2013)
Kavak ağacı talaşı	15.0	(Yıldız ve ark., 2023)
Irak hurması çekirdeği	7.04	(Jawad & Khadim, 2022)
Guava (<i>Psidium guajava</i>) tohumları	31.82	(Elwardany ve ark., 2023)
Tohum kabuğu (<i>Jatropha curcas</i> L.)	8.40	(Mohammad ve ark., 2018)

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış

Karşılaştırma Çalışması

Çizelge 4, Malahit yeşili için Langmuir izoterm modeline dayalı olarak farklı hammaddelerden üretilen aktif karbonların maksimum adsorpsiyon kapasitelerini (q_{max}) göstermektedir. Üretilen adsorban, yakın zamanda literatürde bildirilen diğer birçok adsorbandan daha yüksek malahit yeşili adsorpsiyon kapasitesine sahiptir. Bu çalışma, kirliliğin giderilmesi ve çevrenin korunmasının yanı sıra, atık yönetimi ve çevre dostu, uygun maliyetli ve verimli adsorbanların üretilebileceğini göstermiştir.

Ortalama adsorpsiyon serbest enerjisi (E_{DR}) $36.73 \text{ kJ mol}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır; bu, adsorpsiyon sürecinin kimyasal mekanizmalar tarafından yönlendirilebileceğini göstermektedir ($E_{\text{DR}} = 1/\sqrt{2B}$). Bu değer, E_{DR} değeri, adsorpsiyon mekanizması hakkında bilgi sağlar; E_{DR} değerleri $> 16 \text{ kJ mol}^{-1}$ kemisorpsiyonu gösterirken, $E_{\text{DR}} < 8 \text{ kJ mol}^{-1}$ fizisorpsiyon olarak kabul edilir (Fawzy ve ark., 2022).

Temkin modeli, tek katmanlı adsorbantın heterojen bölgeler üzerinde dağılımını, bağlanma enerjisinin düzgün dağılımını ve Langmuir modeli gibi adsorban ve çözünen madde arasında tutarlı bir etkileşimi karakterize eder. Temkin izotermine göre, 90.69 J mol^{-1} 'lik ısı adsorpsiyonu (B_T) değerinin pozitif olduğu gözlemlenmiştir, bu da adsorpsiyon sisteminin endotermik bir süreçten geçtiğini göstermektedir (Vargas ve ark., 2011; Wu ve ark., 2009).

Langmuir izotermine göre q_{max} 69.06 mg g^{-1} olarak belirlenmiştir. Atık pamuk sapından üretilen yeni adsorbent malzemenin atık sulardan sentetik boyaların gideriminde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Bu adsorbent, farklı kirleticilerin giderilmesinde oldukça etkili olduğu kanıtlandığı için atık su kirliliği sorununa potansiyel bir çözüm olarak kullanılabilir. Sadece sentetik boyaların uzaklaştırılmasıyla sınırlı olmayıp, ağır metaller, farmasötikler ve organik bileşikler gibi diğer kirleticilerin atık sudan uzaklaştırılması için de kullanılabilir. Bu sayede, tarımsal atıkların yeniden değerlendirilmesiyle çevremizde bulunan kirletici miktarı önemli ölçüde azaltılabilir ve daha temiz ve sağlıklı bir geleceğe katkıda bulunabiliriz.

olduklarını beyan eder.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

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), 29. <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00191-4>
- Açın Ok, R., & Kutluay, S. (2023). Designing novel perlite-Fe₃O₄@SiO₂@8-HQ-5-SA as a promising magnetic nanoadsorbent for competitive adsorption of multicomponent VOCs. *Chemosphere*, 338, 139636. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139636>
- Adeleye, A. T., Bahar, M. M., Megharaj, M., & Rahman, M. M. (2023). Recent developments and mechanistic insights on adsorption technology for micro- and nanoplastics removal in aquatic environments. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103777. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103777>
- Adeyi, A. A., Jamil, S. N. A. M., Abdullah, L. C., & Choong, T. S. Y. (2019). Adsorption of Malachite Green Dye from Liquid Phase Using Hydrophilic Thiourea-Modified Poly(acrylonitrile-co-acrylic acid): Kinetic and Isotherm Studies. *Journal of Chemistry*, 2019, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2019/4321475>
- Aftab, A., Aziz, R., Ghaffar, A., Rafiq, M. T., Feng, Y., Saqib, Z., Rafiq, M. K., & Awan, M. A. (2023). Occurrence, source identification and ecological risk assessment of heavy metals in water and sediments of Uchalli lake – Ramsar site, Pakistan. *Environmental Pollution*, 334, 122117. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122117>
- Alorabi, A. Q. (2021). Effective Removal of Malachite Green from Aqueous Solutions Using Magnetic Nanocomposite: Synthesis, Characterization, and Equilibrium Study. *Adsorption Science & Technology*, 2021, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2021/2359110>
- Arora, C., Kumar, P., Soni, S., Mittal, J., Mittal, A., & Singh, B. (2020). Efficient removal of malachite green dye from aqueous solution using Curcuma caesia based activated carbon. *Desalination And Water Treatment*, 195, 341–352. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25897>
- Cheng, Y., He, H., Yang, C., Zeng, G., Li, X., Chen, H., & Yu, G. (2016). Challenges and solutions for biofiltration of hydrophobic volatile organic compounds. *Biotechnology Advances*, 34(6), 1091–1102. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.06.007>
- Crist, E., Mora, C., & Engelman, R. (2017). The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. *Science*, 356(6335), 260–264. <https://doi.org/10.1126/science.aal2011>
- de Souza, C. C., de Souza, L. Z. M., Yılmaz, M., de Oliveira, M. A., da Silva Bezerra, A. C., da Silva, E. F., Dumont, M. R., & Machado, A. R. T. (2022). Activated carbon of *Coriandrum sativum* for adsorption of methylene blue: Equilibrium and kinetic modeling. *Cleaner Materials*, 3, 100052. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100052>
- Deniz, F., & Yildiz, H. (2019). Bioremediation potential of a widespread industrial biowaste as renewable and sustainable biosorbent for synthetic dye pollution. *International Journal of Phytoremediation*, 21(3), 259–267. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1524451>
- Doherty, A.-C., Lee, C.-S., Meng, Q., Sakano, Y., Noble, A. E., Grant, K. A., Esposito, A., Gobler, C. J., & Venkatesan, A. K. (2023). Contribution of household and personal care products to 1,4-dioxane contamination of drinking water. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 31, 100414. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100414>
- Elwardany, R. E., Shokry, H., Mustafa, A. A., & Ali, A. E. (2023). Influence of the prepared activated carbon on cellulose acetate for malachite green dye removal from aqueous solution. *Macromolecular Research*, 31(11), 1043–1060. <https://doi.org/10.1007/s13233-023-00187-w>
- Erdoğan, O., & Sağlan, Z. (2023). Antifungal activity of local isolates of *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin against *Verticillium dahliae* Kleb. causing wilt disease of cotton. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 33(1), 52. <https://doi.org/10.1186/s41938-023-00684-1>
- Fawzy, M. A., Darwish, H., Alharthi, S., Al-Zaban, M. I., Noureldeen, A., & Hassan, S. H. A. (2022). Process optimization and modeling of Cd²⁺ biosorption onto the free and immobilized *Turbinaria ornata* using Box–Behnken experimental design. *Scientific Reports*, 12(1), 3256. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07288-z>
- Feuzer-Matos, A. J., Testolin, R. C., Pimentel-Almeida, W., Radetski-Silva, R., Deomar-Simões, M. J., Poyer-Radetski, L., Ariento-Neto, R., Batista-Barwinski, M. J., Somensi, C. A., & Radetski, C. M. (2022). Treatment of Wastewater Containing New and Non-biodegradable Textile Dyes: Efficacy of Combined Advanced Oxidation and Adsorption Processes. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(7), 273. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05751-1>
- Freundlich, H. M. F. (1906). Over the adsorption in solution. *Journal of Physical Chemistry*, 57, 385–470.
- Fuente, A. M., Pulgar, G., González, F., Pesquera, C., & Blanco, C. (2001). Activated carbon supported Pt catalysts: effect of support texture and metal precursor on activity of acetone hydrogenation.

- Applied Catalysis A: General*, 208(1–2), 35–46. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(00\)00699-2](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(00)00699-2)
- Ho, Y. (2006). Review of second-order models for adsorption systems. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 681–689. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.043>
- Imessaoudene, A., Cheikh, S., Hadadi, A., Hamri, N., Bollinger, J.-C., Amrane, A., Tahraoui, H., Manseri, A., & Mouni, L. (2023). Adsorption Performance of Zeolite for the Removal of Congo Red Dye: Factorial Design Experiments, Kinetic, and Equilibrium Studies. *Separations*, 10(1), 57. <https://doi.org/10.3390/separations10010057>
- Jawad, E., & Khadim, L. (2022). Study of Adsorption for Fast Green and Malachite Green Dyes on the Activated Surface. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(131), 717–725. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2022.130851.5758>
- Ji, Q., Li, H., & Zhang, J. (2020). Preparation and characterization of bio-based activated carbon from fish scales. *BioResources*, 16(1), 614–621. <https://doi.org/10.15376/biores.16.1.614-621>
- Kaouah, F., Boumaza, S., Berrama, T., Trari, M., & Bendjama, Z. (2013). Preparation and characterization of activated carbon from wild olive cores (oleaster) by H₃PO₄ for the removal of Basic Red 46. *Journal of Cleaner Production*, 54, 296–306. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.038>
- Kausar, A., Zohra, S. T., Ijaz, S., Iqbal, M., Iqbal, J., Bibi, I., Nouren, S., El Messaoudi, N., & Nazir, A. (2023). Cellulose-based materials and their adsorptive removal efficiency for dyes: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 224, 1337–1355. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.220>
- Khan, J. A., & Jabin, S. (2023). Nanocomposites for the removal of pharmaceuticals in drinking water sources. *Çinde Nanocomposites-Advanced Materials for Energy and Environmental Aspects* (ss. 469–494). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99704-1.00019-9>
- Kumari, R., Singh, V., & Ravi Kant, C. (2023). Enhanced performance of activated carbon-based supercapacitor derived from waste soybean oil with coffee ground additives. *Materials Chemistry and Physics*, 305, 127882. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127882>
- Kutluay, S., Baytar, O., & Şahin, Ö. (2019a). Adsorption kinetics, equilibrium and thermodynamics of gas-phase toluene onto char produced from almond shells. *Research on Engineering Structures and Materials*. <https://doi.org/10.17515/resm2019.73en1122>
- Kutluay, S., Baytar, O., & Şahin, Ö. (2019b). Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for dynamic adsorption of benzene in gas phase onto activated carbon produced from elaeagnus angustifolia seeds. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2), 102947. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102947>
- Lagergren, S. (1898). About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *K Sven Vetenskapsakad Handl.*, 24, 1–39.
- Li, C., Wang, X., Meng, D., & Zhou, L. (2018). Facile synthesis of low-cost magnetic biosorbent from peach gum polysaccharide for selective and efficient removal of cationic dyes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 1871–1878. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.058>
- Liu, Q.-S., Zheng, T., Li, N., Wang, P., & Abulikemu, G. (2010). Modification of bamboo-based activated carbon using microwave radiation and its effects on the adsorption of methylene blue. *Applied Surface Science*, 256(10), 3309–3315. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.12.025>
- Liu, S., Sang, S., Wang, T., Du, Y., Jia, J., & Fang, H. (2018). The effects of CO₂ on organic groups in bituminous coal and high-rank coal via Fourier transform infrared spectroscopy. *Energy Exploration & Exploitation*, 36(6), 1566–1592. <https://doi.org/10.1177/0144598718764752>
- Liu, X.-J., Li, M.-F., & Singh, S. K. (2021). Manganese-modified lignin biochar as adsorbent for removal of methylene blue. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1434–1445. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.076>
- Malik, K., Salama, E.-S., Kim, T. H., & Li, X. (2020). Enhanced ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* fermentation post acidic and alkali chemical pretreatments of cotton stalk lignocellulose. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 147, 104869. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104869>
- Mohammad, M., Maitra, S., & Dutta, B. K. (2018). Comparison of Activated Carbon and Physic Seed Hull for the Removal of Malachite Green Dye from Aqueous Solution. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229(2), 45. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3686-4>
- Nasab, S. G., Semnani, A., Teimouri, A., Yazd, M. J., Isfahani, T. M., & Habibollahi, S. (2019). Decolorization of crystal violet from aqueous solutions by a novel adsorbent chitosan/nanodiopside using response surface methodology and artificial neural network-genetic algorithm. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 429–443. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.148>
- Ni'mah, Y. L., Pertiwi, A. C., & Suprpto, S. (2024). Adsorption of Cu(II) on silica gel synthesized from chemical bottle glass waste: Response surface methodology-Box Behnken design optimization. *South African Journal of Chemical Engineering*, 48, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.01.007>
- Pack, E. C., Lee, H. G., Jeong, H., Lee, J., Jang, D. Y., Kim, H. S., Lee, S. H., Lim, K. M., & Choi, D. (2023).

- Tiered human health risk assessment of antibacterial quaternary ammonium compounds (QACs) in dishwashing detergents. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 137, 105306. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2022.105306>
- Pathania, D., Sharma, S., & Singh, P. (2017). Removal of methylene blue by adsorption onto activated carbon developed from *Ficus carica* bast. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S1445–S1451. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.04.021>
- Philip, J. (2023). Magnetic nanofluids (Ferrofluids): Recent advances, applications, challenges, and future directions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 311, 102810. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102810>
- Piryaee, M., & Abolghasemi, M. M. (2022). Hierarchically Synthesis of Nanoflakes of Molybdenum Disulfide on Electrochemically Anodized Pencil Lead for Determination Trace Amounts of Phenolic Compounds in Water Samples. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 1–10. <https://doi.org/10.1080/10406638.2022.2127798>
- Rodríguez-Bolaña, C., Pérez-Parada, A., Tesitore, G., Goyenola, G., Kröger, A., Pacheco, M., Gérez, N., Berton, A., Zinola, G., Gil, G., Mangarelli, A., Pequeño, F., Besil, N., Niell, S., Heinzen, H., & Teixeira de Mello, F. (2023). Multicompartmental monitoring of legacy and currently used pesticides in a subtropical lake used as a drinking water source (Laguna del Cisne, Uruguay). *Science of The Total Environment*, 874, 162310. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162310>
- Roy, S., & Rhim, J.-W. (2019). Melanin-Mediated Synthesis of Copper Oxide Nanoparticles and Preparation of Functional Agar/CuO NP Nanocomposite Films. *Journal of Nanomaterials*, 2019, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2019/2840517>
- Şahin, Ö., Saka, C., Ceyhan, A. A., & Baytar, O. (2016). The pyrolysis process of biomass by two-stage chemical activation with different methodology and iodine adsorption. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(12), 1756–1762. <https://doi.org/10.1080/15567036.2014.956195>
- Saleh, T. A., & Ali, I. (2018). Synthesis of polyamide grafted carbon microspheres for removal of rhodamine B dye and heavy metals. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 5361–5368. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.033>
- Sevilla, M., Alam, N., & Mokaya, R. (2010). Enhancement of Hydrogen Storage Capacity of Zeolite-Templated Carbons by Chemical Activation. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(25), 11314–11319. <https://doi.org/10.1021/jp102464e>
- Shahat, A., Kubra, K. T., & El-marghany, A. (2023). Equilibrium, thermodynamic and kinetic modeling of triclosan adsorption on mesoporous carbon nanosphere: Optimization using Box-Behnken design. *Journal of Molecular Liquids*, 383, 122166. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122166>
- Sharifi Pajaie, S. H., Archin, S., & Asadpour, G. (2018). Optimization of Process Parameters by Response Surface Methodology for Methylene Blue Removal Using Cellulose Dusts. *Civil Engineering Journal*, 4(3), 620. <https://doi.org/10.28991/cej-0309121>
- Song, J. Y., Bhadra, B. N., & Jhung, S. H. (2017). Contribution of H-bond in adsorptive removal of pharmaceutical and personal care products from water using oxidized activated carbon. *Microporous and Mesoporous Materials*, 243, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.02.024>
- Stjepanović, M., Velić, N., Galić, A., Kosović, I., Jakovljević, T., & Habuda-Stanić, M. (2021). From Waste to Biosorbent: Removal of Congo Red from Water by Waste Wood Biomass. *Water*, 13(3), 279. <https://doi.org/10.3390/w13030279>
- Tang, R., Dai, C., Li, C., Liu, W., Gao, S., & Wang, C. (2017a). Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution Using Agricultural Residue Walnut Shell: Equilibrium, Kinetic, and Thermodynamic Studies. *Journal of Chemistry*, 2017, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2017/8404965>
- Tang, R., Dai, C., Li, C., Liu, W., Gao, S., & Wang, C. (2017b). Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution Using Agricultural Residue Walnut Shell: Equilibrium, Kinetic, and Thermodynamic Studies. *Journal of Chemistry*, 2017, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2017/8404965>
- Teğin, Ş. Ö., Şahin, Ö., Baytar, O., & İzgi, M. S. (2020). Preparation and characterization of activated carbon from almond shell by microwave-assisted using ZnCl₂ activator. *International Journal of Chemistry and Technology*, 4(2), 130–137. <https://doi.org/10.32571/ijct.747943>
- Teo, S. H., Ng, C. H., Islam, A., Abdulkareem-Alsultan, G., Joseph, C. G., Janaun, J., Taufiq-Yap, Y. H., Khandaker, S., Islam, G. J., Znad, H., & Awual, M. R. (2022). Sustainable toxic dyes removal with advanced materials for clean water production: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 332, 130039. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130039>
- Uddin, M. K., & Nasar, A. (2020). Walnut shell powder as a low-cost adsorbent for methylene blue dye: isotherm, kinetics, thermodynamic, desorption and response surface methodology examinations. *Scientific Reports*, 10(1), 7983. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64745-3>
- Uğur, T., & Bayhan, E. (2023). Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde pamuk ekiliş alanlarındaki yaprakpireleri (Hemiptera:Cicadellidae) ile birlikte avcı böceklerin belirlenmesi. *Türkiye Biyolojik Mücadele Dergisi*. <https://doi.org/10.31019/tbmd.1200190>
- Uma, Banerjee, S., & Sharma, Y. C. (2013). Equilibrium and kinetic studies for removal of

- malachite green from aqueous solution by a low cost activated carbon. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(4), 1099–1105. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.11.030>
- United Nations. (2019). *World Population Prospects 2019 Highlights*.
- Valencia, A., Muñoz-Valencia, R., Ceballos-Magaña, S. G., Rojas-Mayorga, C. K., Bonilla-Petriciolet, A., González, J., & Aguayo-Villarreal, I. A. (2022). Cyclohexane and benzene separation by fixed-bed adsorption on activated carbons prepared from coconut shell. *Environmental Technology & Innovation*, 25, 102076. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102076>
- Valli Nachiyar, C., Rakshi, A. D., Sandhya, S., Britlin Deva Jebasta, N., & Nellore, J. (2023). Developments in treatment technologies of dye-containing effluent: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7, 100339. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100339>
- Vargas, A. M. M., Cazetta, A. L., Kunita, M. H., Silva, T. L., & Almeida, V. C. (2011). Adsorption of methylene blue on activated carbon produced from flamboyant pods (*Delonix regia*): Study of adsorption isotherms and kinetic models. *Chemical Engineering Journal*, 168(2), 722–730. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.01.067>
- Wang, Q., Oluwaseyi Fagbohun, E., Zhu, H., Hussain, A., Wang, F., & Cui, Y. (2023). One-step synthesis of magnetic asphalt-based activated carbon with high specific surface area and adsorption performance for methylene blue. *Separation and Purification Technology*, 124205. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124205>
- Weber, W. J., & Morris, J. C. (1963a). Kinetics of Adsorption on Carbon from Solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(2), 31–59. <https://doi.org/10.1061/JSEDAI.0000430>
- Weber, W. J., & Morris, J. C. (1963b). Kinetics of Adsorption on Carbon from Solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(2), 31–59. <https://doi.org/10.1061/JSEDAI.0000430>
- Wu, F.-C., Tseng, R.-L., & Juang, R.-S. (2009). Characteristics of Elovich equation used for the analysis of adsorption kinetics in dye-chitosan systems. *Chemical Engineering Journal*, 150(2–3), 366–373. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.01.014>
- Yağmur, H. K., & Kaya, İ. (2021). Synthesis and characterization of magnetic ZnCl₂-activated carbon produced from coconut shell for the adsorption of methylene blue. *Journal of Molecular Structure*, 1232, 130071. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130071>
- Yao, F., Ye, G., Peng, W., Zhao, G., Wang, X., Wang, Y., Zhu, W., Jiao, Y., Huang, H., & Ye, D. (2023). Preparation of activated biochar with adjustable pore structure by hydrothermal carbonization for efficient adsorption of VOCs and its practical application prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 109611. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109611>
- Yildiz, H., Gülşen, H., Şahin, Ö., Baytar, O., & Kutluay, S. (2023). Novel adsorbent for malachite green from okra stalks waste: synthesis, kinetics and equilibrium studies. *International Journal of Phytoremediation*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2243621>
- Yıldız, H., Gülşen, H., Şahin, Ö., Baytar, O., & Kutluay, S. (2022). Atık biyokütleden (Tütün Sapı) Mikrodalga Destekli İmpregnasyon Yöntemi ile Aktif Karbon Sentezi ve Karakterizasyonu. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*. <https://doi.org/10.46578/humder.1076166>
- Yildiz, Hakan. (2024). The production of a novel adsorbent from forest waste (*Platanus orientalis* L.) for dye adsorption: Adsorption process optimization and experimental design. *Materials Science and Engineering: B*, 304, 117366. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117366>
- Yildiz, Hakan, Dolas, H., Baytar, O., & Şahin, O. (2024). Bioeconomic transformation of bio-oil production wastes: a novel adsorbent material for toxic dye adsorption and optimization of process parameters. *The Journal of The Textile Institute*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/00405000.2024.2352677>
- Yildiz, Hakan, & Yuksel, A. Y. (2023). Novel Adsorbent for Methylene Blue from Waste Fish Scales (*Cyprinus Carpio*): Kinetics and Equilibrium Studies. *Environmental Engineering and Management Journal*, 22(6), 1073–1080. <https://doi.org/10.30638/eemj.2023.088>
- Yıldız, D., Demir, I., & Demiral, H. (2023). Adsorption of malachite green on to poplar sawdust activated carbon. *Separation Science and Technology*, 58(12), 2099–2114. <https://doi.org/10.1080/01496395.2023.2240492>
- Zaini, M. S. M., Arshad, M., & Syed-Hassan, S. S. A. (2023). Adsorption Isotherm and Kinetic Study of Methane on Palm Kernel Shell-Derived Activated Carbon. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 8(1), 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.11.002>
- Zhang, G., Lei, B., Chen, S., Xie, H., & Zhou, G. (2021). Activated carbon adsorbents with micro-mesoporous structure derived from waste biomass by stepwise activation for toluene removal from air. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105387. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105387>
- Zhou, Y., Lu, J., Zhou, Y., & Liu, Y. (2019). Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: A review. *Environmental Pollution*, 252, 352–365. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.072>