

Atıf İçin: Onay, M. (2025). Sorghum Halepense Külü Kullanılarak Malahit Yeşili Boya Giderimi: Etkili Parametrelerin İncelenmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(4), 1383-1396.

To Cite: Onay, M. (2025). Malachite Green Dye Removal Using Sorghum Halepense Ash: Investigation of Effective Parameters. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 15(4), 1383-1396.

Sorghum Halepense Külü Kullanılarak Malahit Yeşili Boya Giderimi: Etkili Parametrelerin İncelenmesi

Muhammed ONAY¹

Öne Çıkanlar:

- Kanyaş otu külü ile malahit yeşili adsorpsiyonu
- Maksimum verim %91.42
- Freundlich izotermi

Anahtar Kelimeler:

- Adsorpsiyon
- Tarımsal atık
- İzoterm
- Sürdürülebilirlik
- Boyar madde

ÖZET:

Bu çalışmada, tarımsal üretimde ‘yabancı ot’ olarak adlandırılan, istenmeyen ürün olan kanyaş otunun (Sorghum halepense) külü kullanılarak, endüstride sıkça kullanılan toksik etkiye sahip Malahit yeşili boyar maddesinin adsorpsiyon yöntemi ile giderimi incelenmiştir. Kesikli (batch) adsorpsiyon sistemi ile gerçekleştirilen deneylerle başlangıç boyar madde konsantrasyonunun (50-250 ppm), adsorban miktarının (1-3 g), temas süresinin (30-120 dk) ve sıcaklığın (20-60 °C) adsorplama verimi üzerine etkileri incelenmiştir. Kullanılan adsorbanın adsorpsiyon sistemine uygunluğunu karakterize etmek için Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, başlangıç boya konsantrasyonunun 150 mg/L, adsorban miktarının 2 g, temas süresinin 90 dk ve sıcaklığın 60 °C olduğu koşullar altında boya giderim veriminin %91.42 olduğu belirlenmiştir. Denge çalışmaları kapsamında adsorpsiyonun hangi izoterm daha uygun olduğunu belirlemek için Freundlich, Langmuir ve Temkin izoterm modelleri deneysel değerlere uygulanmıştır. En iyi uyum sağlayan modelin Freundlich modeli ($R^2:0.999$) olduğu tespit edilmiştir. Bu modele göre adsorpsiyonun tabakalı ve heterojen yüzeye sahip olduğu SEM analizleriyle de desteklenmiştir. Ayrıca birim kanyaş otu külü başına giderilen maksimum malahit yeşili miktarı (Q_0) 17.452 mg/g olarak hesaplanmıştır. Kanyaş otu külünün; doğal, kolay temin edilmesi, sürdürülebilir ve çevre dostu bir adsorban olarak kimyasal bir ön işlem olmadan katyonik boyar maddelerin gideriminde kullanımının uygunluğu bu çalışma ile ortaya koyulmuştur.

Malachite Green Dye Removal Using Sorghum Halepense Ash: Investigation of Effective Parameters

Highlights:

- Adsorption of malachite green with Sorghum halepense ash
- Maximum yield 91.42%
- Freundlich isotherm

Keywords:

- Adsorption
- Agricultural waste
- Isotherm
- Sustainable
- Cationic dyes

ABSTRACT:

In this study, the removal of the toxic Malachite green dyestuff, which is frequently used in the industry, by adsorption method was investigated using the ash of Sorghum halepense, which is an undesirable product called ‘weed’ in agricultural production. The effects of initial dyestuff concentration (50-250 ppm), adsorbent amount (1-3 g), contact time (30-120 min) and temperature (20-60 °C) on adsorption efficiency were investigated in batch adsorption system. Scanning Electron Microscopy (SEM), Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR) and X-Ray Diffraction method (XRD) were used to characterise the suitability of the adsorbent used for the adsorption system. According to the results obtained, it was determined that the dye removal efficiency was 91.42% under conditions where the initial dye concentration was 150 mg/L, the adsorbent amount was 2 g, the contact time was 90 min and the temperature was 60 °C. Freundlich, Langmuir and Temkin isotherm models were applied to the experimental values to determine which isotherm is more suitable for adsorption within the scope of equilibrium studies. Freundlich model ($R^2:0.999$) was found to be the best fitting model. According to this model, it was also supported by SEM analyses that the adsorption had a layered and heterogeneous surface. In addition, the maximum amount of malachite green (Q_0) removed per unit of Sorghum halepense ash was calculated as 17.452 mg/g. This study demonstrated the feasibility of the use of natural, easily available, sustainable and environmentally friendly adsorbent for the removal of cationic dyes without any chemical pretreatment.

¹ Muhammed ONAY ([Orcid ID: 0000-0002-4276-0425](https://orcid.org/0000-0002-4276-0425)), Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Malatya, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Muhammed ONAY, e-mail: muhammed.onay@ozal.edu.tr

GİRİŞ

Son yıllarda, artan karbon emisyonları, iklim değişikliği ve su kıtlığı gibi önemli konular giderek daha fazla gündeme gelmektedir. Bu olumsuz durumların başlıca nedenlerinden biri çevre kirliliğidir. Sanayi tesislerinde üretim sırasında atmosfere salınan zararlı gazlar ve atık sular, çevre kirliliğine yol açan faktörlerden sadece birkaçıdır. Bunun yanı sıra, günümüzde su kaynaklarının büyük oranda azaldığı bilinmektedir. Özellikle tekstil üretiminin fazla olduğu ülkemiz ve bölgemiz, suya olan ihtiyaç açısından oldukça yüksek bir talep göstermektedir. Tüm bu durumları göz önünde bulundurursak, kullanılan suyun arıtılması ve yeniden kullanımı, hem doğaya hem de ekonomiye büyük faydalar sağlayacaktır.

Su arıtma teknolojileri, sanayi süreçlerinde sürdürülebilir bir yaklaşım geliştirilmesine yardımcı olabilirken, aynı zamanda maliyetlerin düşürülmesine ve kaynakların daha verimli kullanılmasına olanak tanır (Boretti ve Rosa, 2019). Bu süreçlerin hayata geçirilmesi, hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de su tasarrufuna katkı sağlayarak, gelecekte daha sağlıklı bir ekosistem oluşturma yolunda önemli bir adım olacaktır. Özellikle su sıkıntısının yaşandığı bölgelerde, bu tür uygulamalar hem yerel halkın hem de sanayinin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir (Baghbanzadeh ve ark., 2017).

Sanayi atık suyu arıtma süreçleri, günümüzde ülkeler için boya ve ağır metaller gibi su kirliliği kaynaklarını ortadan kaldırmak açısından önemli zorluklar içermektedir (Mehta, 2023). Boyalar; gıda, tekstil, kağıt ve kozmetik gibi farklı endüstrilerde renk verici olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tür boyaların çevreye salınması, hatta çok küçük miktarlarının bile ciddi sorunlara yol açabileceği bilinmektedir (Yang ve ark., 2024). Bu boyalardan biri olan malahit yeşili, çalışmada kirletici (adsorbat) faz olarak kullanılmıştır. Tekstil endüstrisinde birçok üretim aşamasında yaygın olarak kullanıldığı bilindiği için bu çalışmada tercih edilen malahit yeşili boyar maddesi, solunum bozuklukları ve karaciğer, böbrek, cilt ve gözler üzerinde tahrip edici etkiye sahiptir (Yonar, M. E., ve Yonar, S. M. 2010). Bu sebeple malahit yeşili bulunduğu ortamdan giderilmeli ve etkisiz hale getirilmelidir.

Tekstil atık sularındaki boya kirleticilerini gidermek için geliştirilmiş çeşitli yöntemler arasında kimyasal oksidasyon, köpük flotasyonu, adsorpsiyon, koagülasyon ve elektrodializ bulunmaktadır (Gupta, V. K. 2009). Bu yöntemler arasında, adsorpsiyon tekniği, diğerlerine göre daha üstün bir potansiyele sahip olduğu bilinmektedir (Kumari ve ark., 2023).

Adsorpsiyon yönteminin birçok avantajı vardır. Öncelikle, düşük maliyeti sayesinde çeşitli endüstriyel uygulamalar için erişilebilir bir seçenek sunmaktadır. Tasarımı ve kurulumu oldukça basit olduğu için mevcut sistemlere kolayca entegre edilebilmektedir (Georgin ve ark., 2024). Ayrıca, bu süreçte kullanılan adsorbanların genellikle kolayca temin edilebilmesi, işletme yükünü azaltmaktadır. Adsorpsiyonun en önemli avantajlarından biri, yüksek konsantrasyonlardaki boyaların bile etkili bir şekilde işlenebilmesidir; birçok diğer yöntem bu seviyelerde etkili olamamaktadır (El Messaoudi ve ark., 2024).

Günümüzde sanayi kuruluşları çevresel sürdürülebilirlik sorunlarıyla başa çıkmaya devam ederken, boya gideriminde adsorpsiyon yöntemi, yalnızca etkinliği nedeniyle değil, aynı zamanda ekonomik uygunluğu ve gerçek dünya senaryolarında uygulanabilirliği açısından da umut verici bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Zhu ve ark., 2023). Bu yöntemin uygulanması, sanayi faaliyetlerinin çevresel etkilerini azaltmaya ve gelecek nesiller için daha temiz su kaynakları sağlamaya önemli katkılar sunacaktır.

Aktif karbon kullanılarak yapılan araştırmalar, adsorpsiyon yönteminin boyar maddelerin gideriminde son derece etkili olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, aktif karbonun üretimi veya temini

günümüzde hala maliyetli olduğundan, düşük maliyetli adsorbanların kullanımına yönelik bir eğilim söz konusudur (Dimbo ve ark., 2024).

Bu bağlamda, tarımsal ve endüstriyel atıklar, düşük maliyetli adsorbanlar sınıfında değerlendirilebilmektedir. Özellikle, doğada herhangi bir işleme tabi tutulmadan mevcut haliyle adsorban olarak kullanılan çeşitli tarımsal atıklar veya bu atıkların temizlik amacıyla yakılması sonucu elde edilen külleri, birkaç önemli avantaj sunmaktadır. Öncelikle, bu malzemeler düşük maliyetlidir ve bol miktarda bulunmaktadır. Ayrıca, sulu çözeltilerden boyar maddeleri ve metal iyonlarını etkili bir şekilde uzaklaştırabilme kapasitesine sahiptirler (Kainth ve ark., 2024). Önceki çalışmalar incelendiğinde adsorban olarak kullanılan tarımsal atıklara; ceviz kabukları (Hajialigol, S., & Masoum, S. 2019), mısır koçanı (Sonawane, G. H., & Shrivastava, V. S. 2009), hindistan cevizi lifi (Banerjee, S., & Sharma, Y. C. 2013), kahve çekirdekleri (Baek ve ark., 2010) ve pirinç kabuğu (Leng, L ve ark., 2015) örnekleri verilebilir.

Bu tür alternatif adsorbanların kullanımı, hem maliyetleri düşürmekte hem de atık yönetimi açısından sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Tarımsal atıkların değerlendirilmesi, çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olurken, aynı zamanda doğal kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır (Sumiyati ve ark., 2024). Böylece, sanayinin su kirliliği sorunlarıyla başa çıkmasına katkıda bulunacak etkili ve ekonomik bir yöntem geliştirilmiş olmaktadır.

Kanyaş otu (*Sorghum halepense*), yaygın olarak "Halep sorgumu" veya "kanyaş" olarak adlandırılan, yüksek verimliliği ve dayanıklılığı ile bilinen bir bitki türüdür. Genellikle sıcak ve kurak iklimlerde yetişir ve tarımsal alanda önemli bir yer tutar. Tarımsal üretimde istenmeyen bir ürün olduğu için genellikle çiftçiler tarafından toplanıp doğaya bırakılmaktadır (Iqbal ve ark., 2024).

Bu çalışmada, su ortamında malahit yeşili boyasının adsorpsiyonu, kanyaş otu külü kullanılarak bir batch sisteminde incelenmiştir. İlk olarak, boyar madde konsantrasyonu, adsorban miktarı, sıcaklık ve toplam temas süresi gibi parametrelerin adsorpsiyon verimliliği üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları, adsorpsiyon dengesi ile ilgili bulgularla birlikte incelenmiş ve elde edilen veriler çeşitli izoterm modelleri ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın amacı, kanyaş otu külünün malahit yeşili boyasının giderimindeki etkinliğini belirlemek ve bu süreçteki çeşitli değişkenlerin adsorpsiyon verimliliğine olan etkilerini anlamaktır. Önceki çalışmalar ışığında, kolay elde edilebilir bir adsorban olan kanyaş otu külünün, su kirliliğinin azaltılmasında potansiyel bir çözüm olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca, farklı izoterm modellerinin karşılaştırılması, adsorpsiyon süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Bu çalışmada kanyaş otunun yakılması ile elde edilen külleri adsorban olarak kullanılmıştır. Çalışmalarımızda kullandığımız Halepense türü bitki, Malatya ilinin Doğanşehir ilçesinden sağlanmıştır. Kurumuş bitki örneği, geniş bir metal kapta doğal yöntemlerle yakılmış ve ardından 500 °C sıcaklıkta bir kül fırınında yaklaşık bir saat bekletilerek külleri elde edilmiştir. Temin edilen kanyaş otunun ve hazır hale getirilen külün görseli, Şekil 1 ile gösterilmektedir.



Şekil 1. Kanyaş otu ve külü

Bu çalışmada sulu çözeltiden ayrılan boyar madde yani adsorbat fazı olarak malahit yeşili (MG) kullanılmıştır. MG, katyonik boya sınıfına ait bir bileşiktir. Deneylerde kullanılmak üzere kuru toz halde temin edilen malahit yeşilinin molekül formülü $C_{23}H_{25}ClN_2$ ve molekül ağırlığı ise 364,93 g/mol'dür. Deneyler için 500 ppm konsantrasyonda bir stok çözeltisi hazırlanmış, bu stok çözeltisi belirlenen oranlarda distile (saf) su ile karıştırılarak istenilen konsantrasyonlarda yeni çözeltiler elde edilmiştir. Adsorpsiyon işleminin ardından, süzülen örnekler Shimadzu 2100 S marka ve modelinde UV/Visible spektrofotometre ile analiz edilmiştir. 10 mg/L derişiminde numune kullanılarak yapılan dalga boyu taramasında maksimum absorbands (dalga boyu) değeri 601 nm olarak ölçülmüştür. Ayrıca, konsantrasyon-absorbands ilişkisini ortaya koyan bir kalibrasyon grafiği 1-100 mg/L aralığında beş (5) nokta ile hazırlanmış ve elde edilen kalibrasyon eğrisinin R^2 değeri 0.998 olarak belirlenmiştir. Ölçümler için 5 mililitrelik plastik küvetler kullanılmıştır.

Adsorpsiyon Deneyleri

Adsorpsiyon deneylerinin gerçekleştirilmesi, yani adsorban ve adsorbat fazlarının temas etmesi için 50 ml hacminde, kapaklı plastik malzemeden yapılmış numune kapları kullanılmıştır. Başlangıç boyar madde konsantrasyonunun boya giderimine etkisini araştırmak için 50, 100, 150 200 ve 250 ppm seviyelerinde çözeltiler hazırlanmıştır. Temas süresinin adsorpsiyon verimine olan etkisini araştırmak maksadıyla 30, 60, 90 ve 120 dakika olacak şekilde çeşitli sürelerde deneyler yapılmıştır. Adsorban miktarının boya giderimine etkisini incelemek için 1, 1.5, 2, 2.5 ve 3 gram olmak üzere beş farklı miktarda kanyaş otu külü kullanılarak sabit 50 ml adsorbat hacminde deneyler gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler, deney numunesi ile tamamen aynı koşullarda ve aynı nitelikte eş zamanlı olarak alınan, deney numunesi ile bire bir aynı özelliği gösteren şahit numune alınarak analiz edilmiştir. Sıcaklığın adsorplama üzerindeki etkisini ele almak için 20, 40 ve 60 °C olmak üzere farklı değerlerde gerçekleştirilmiştir. 20 ve 40 °C gibi literatürde yaygın kullanılan ideal sıcaklıkların yanı sıra yüksek sıcaklık ortamında adsorplama davranışının belirlenmesi için ayrıca 60 °C ortamında adsorpsiyon deneyi gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarını yorumlayabilmek ve adsorpsiyon veriminin belirlenmesi için kullanılan, boya gideriminin yüzdesel olarak hesaplanmasına ilişkin matematiksel model, Eşitlik 1. de verilmiştir.

$$\text{boya giderim yüzdesi} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

Denklemden gösterilen C_0 , başlangıçta hazırlanan boyanın derişimini (mg/L) ifade etmektedir. C_e (mg/L) belirlenen süre sonunda adsorplandıktan sonra kalan boyanın konsantrasyon değeridir. Öte yandan adsorpsiyon sürecinde adsorbanın birim ağırlığı başına yüzeyinde tutunan boyar madde miktarı ise q_e (mg/g) şeklinde sembolize edilmiştir ve Eşitlik 2. ile matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$q_e = (C_0 - C_e) \times \frac{V}{m} \quad (2)$$

Denklemden m (g) adsorban miktarını, V (L) ise boyar madde içeren sulu çözeltinin toplam hacmini göstermektedir. Adsorpsiyon işlemlerinde gerçekleştirilen tüm deneyler en az iki kez tekrarlanmıştır. Aynı şekilde, sonuçların güvenilirliğini artırmak amacıyla cihazlarla yapılan ölçümler de tekrar edilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Kanyaş Otu Külü Karakterizasyonu

Kanyaş otu külünü karakterize etmek için adsorpsiyon çalışmalarında sıklıkla kullanılan SEM, FT-IR ve XRD analiz yöntemlerine başvurulmuştur. Bu analizler sayesinde adsorbanın yüzey özellikleri ve adsorpsiyon prosesinde kullanılabilirliği incelenmektedir (Pellenz ve ark., 2023).

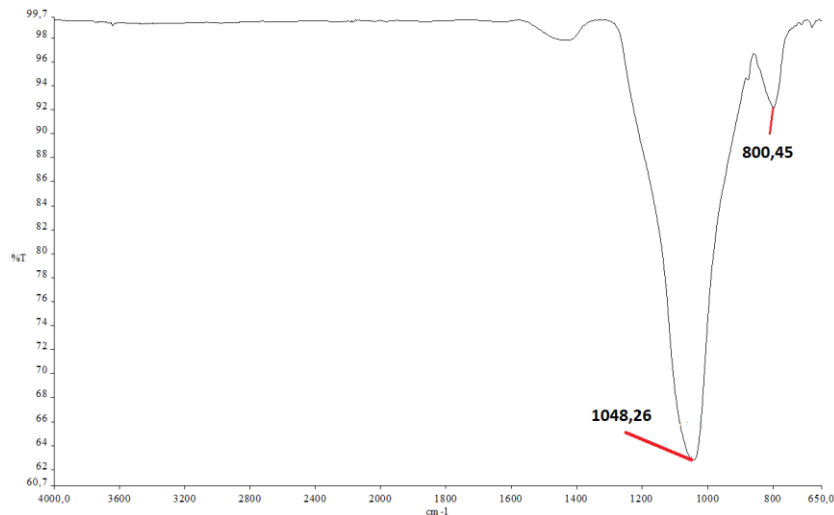
Taramalı elektron mikroskobu (SEM), adsorban karakterizasyonunda yüzeyin gözeneklilik durumunu ve varsa ikincil yapıların varlığı hakkında bilgi edinilmesini sağlayan analiz yöntemlerinden biridir (John, 2024). Adsorbanın SEM görüntüleri uzak ve yakın açılardan çekilmiş halleriyle Şekil 2'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde adsorbanın heterojen bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. Bazı bölgelerin uzun katmanlı ve geniş bir yapıya sahip olduğu, bazı bölgelerde ise kısa ve dar katmanlar göze çarpmaktadır. Ayrıca yakından incelendiğinde amorf ve pürüzlü yapıdaki adsorbanın yer yer mikrogözeneklere sahip olduğu görülmektedir.

Adsorpsiyonda sıklıkla kullanılan karakterizasyon yöntemlerinden biride FT-IR analizidir. Bu kızılötesi spektroskopisi yöntemiyle moleküler bağ karakterizasyonu yapılarak organik bileşiklerdeki fonksiyonel gruplar, bağlanma yerleri ve aromatik veya alifatik olma durumları incelenmektedir. Şekil 3 ile kanyaş otu külüne ait $650-4000 \text{ cm}^{-1}$ aralığındaki FTIR spektrumu gösterilmektedir. Spektrum incelendiğinde en belirgin olarak yaklaşık 900 ile 1200 cm^{-1} bant genişliğinde 1148.26 cm^{-1} noktasında zirve yapan pik göze çarpmaktadır. Bu değer aralığındaki bant oluşumu yapı içerisindeki C-O-C ve C-O gruplarının göstergesi olarak yorumlanabilir (Nkosi ve ark., 2024). Ayrıca ikinci olarak dikkat çeken yaklaşık 750 ile 900 cm^{-1} bant genişliğinde 800.45 cm^{-1} noktasında zirve yapan pik göze çarpmaktadır. Bu değer düzlem dışında oluşabilecek N-H eğilme pikleri olarak yorumlanabilir (Makharadze ve ark., 2024). FT-IR analizinde yukarıda bahsedilen grupların tümü, fiziksel bağlarla oluştuğu için katyonik boyaların adsorpsiyonunu kolaylaştırmaktadır (Jawad ve ark., 2023). Adsorpsiyon olayı yüzeyde gerçekleştiği için FT-IR sonuçlarına göre yüzey aktif maddeleri olumsuz etkileyebilecek gruplar belirlenmemiştir.

Doğal, sentetik veya atık olsun tüm adsorbanların yüzey özellikleri prosesin seyri açısından son derece önemlidir. Yapının kristal veya amorf olup olmadığı XRD analizi ile belirlenmektedir (Kwon ve ark., 2023). Kanyaş otu külünün XRD spektrumu Şekil 4'de gösterilmektedir. Şekle göre yoğunluk değerlerinin belirli bir açıya kadar ($2\theta=10-20^\circ$ aralığında) kademeli olarak arttığı ve sonrasında ani bir şekilde azaldığı görülmektedir. Yaklaşık $2\theta=19^\circ$ 'de, numunenin yapısının kristal olmadığını gösteren yaklaşık $1,85 \text{ nm}$ 'lik bir ara katmana karşılık gelen geniş bir pik gözlenmiştir (Lin ve ark., 2023).

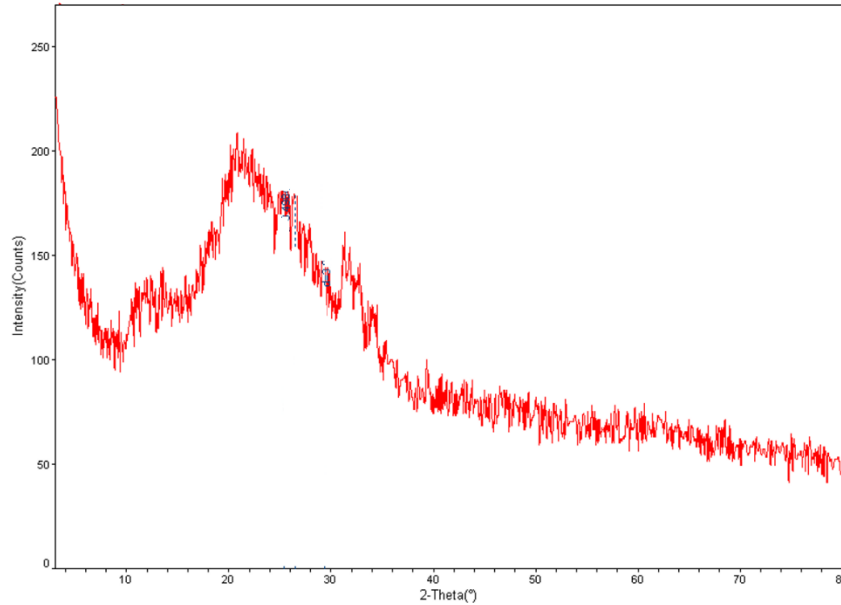


Şekil 2. Kanyaş otu külünün taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü



Şekil 3. Kanyaş otu külünün FTIR spektrumu

Bu spektrumdan, kanyaş otu külünün bitkisel yapıdaki doğal polimerlerin bir özelliği olan oldukça amorf ve gözenekli olduğu anlaşılabılır (Arumugam ve ark., 2024). Bu özellik, malzemenin yüzey alanını, hacmine oranla daha çok artırdığından dolayı adsorpsiyon için önemlidir. 18° ve 25° arasında gözlemlenen yüksek pikler karbonhidratlara, özellikle de selüloza karşılık gelmektedir (Oloyede ve ark. 2023; Wang ve ark. 2020) ve bu da adsorbanın düşük kristallikliğini göstermektedir.

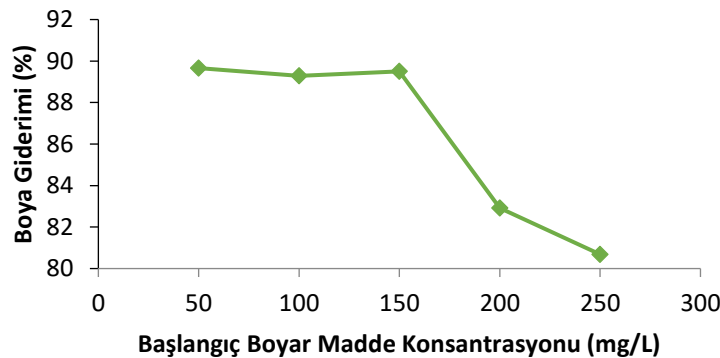


Şekil 4. Adsorbanın X-ışını kırınım analizi sonucunda oluşan pikler

Adsorpsiyon Çalışmaları

Başlangıç boyar madde konsantrasyonunun giderime etkisi

Malahit yeşili adsorpsiyonu için başlangıç boya konsantrasyonunun etkisi Şekil 5'de gösterilmiştir. Deneyler 20 °C sıcaklıkta ve 350 rpm karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir. Temas süresinin 90 dk ve kanyaş otu miktarının 2 gram olduğu bu deney setinde, 150 ppm değerine kadar başlangıç konsantrasyonu arttıkça boya giderim oranının büyük oranda değişmediği belirlenmiştir. Ancak 150 ppm'den daha yüksek değerlerde giderim veriminin düştüğü görülmektedir. Bu durum doygunluk değerine ulaşıldığının bir göstergesidir (Lu ve ark. 2023).

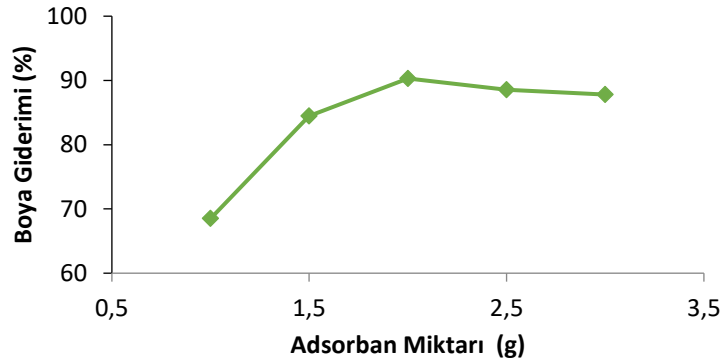


Şekil 5. Başlangıç boya konsantrasyonunun giderime etkisi

Adsorban miktarının giderime etkisi

Atık suların arıtılmasında adsorbanın boya giderme verimliliği esas olarak adsorban üzerinde bulunan aktif adsorpsiyon bölgelerinin sayısına bağlıdır (İftekhari ve ark. 2018). Adsorpsiyonda kullanılan adsorban miktarı, sistemdeki adsorbat-adsorban dengesini belirlediği ve birim boya çözeltisi başına adsorbanın arıtma maliyetini tahmin ettiği için özellikle önemlidir (Yadav ve ark. 2020). Kanyaş otu külü miktarının etkisi, 1-3 g aralığında farklı miktarlarda adsorban kullanılarak 150 ppm başlangıç boya konsantrasyonunda ve 20 °C sıcaklıkta 350 rpm karıştırma hızında 1.5 saat temas süresiyle gerçekleştirilmiştir ve Şekil 6'da sonuçlar gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde, adsorban miktarı 1-2 g aralığında arttığında boya giderimi %68.5'dan %90 seviyelerine kadar artmaktadır. Ancak adsorban miktarı 2.5 ve 3 g değerlerine arttığında, adsorbat moleküllerinin sayısı değişmediği için giderim verimi üzerine belirgin bir değişim söz konusu olmamıştır. Giderim veriminin 1 ile 2 g aralığında artması,

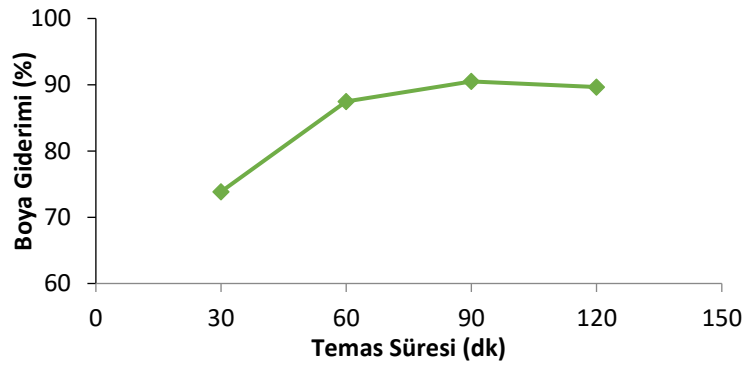
toplam yüzey alanındaki artış ve yüzeyde adsorpsiyon için daha fazla bağlanma bölgesinin mevcudiyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir (De Santana ve ark. 2024).



Şekil 6. Adsorban miktarının giderime etkisi

Temas süresinin giderime etkisi

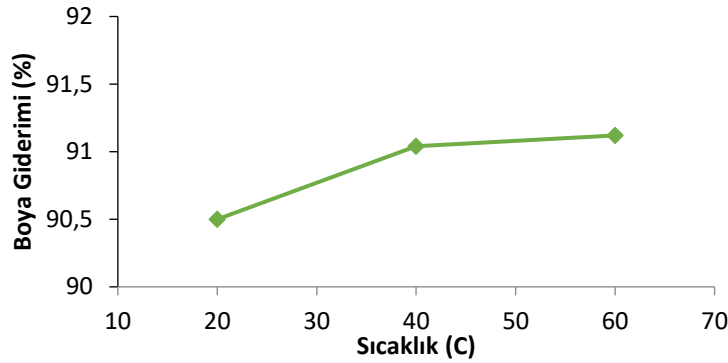
Temas süresinin adsorplama verimi üzerindeki etkilerini belirlemek için deneyler 150 ppm başlangıç konsantrasyonu, 2 gram kanyaş otu külü kullanılarak, 350 rpm karıştırma hızında ve 20 °C’de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre adsorplama süresi arttığında, yani adsorban ve adsorbat fazları daha uzun süre temas ettiğinde, boyarmadde giderimi artmaktadır ve yaklaşık 90. dakikada denge durumuna ulaştığı belirlenmiştir (Şekil 7). Ayrıca, artış 30-60 dakikalar arasında nispeten daha yüksektir. İlk aşamada adsorpsiyondaki hızlı artış muhtemelen adsorbanın yüzeyindeki boş aktif bölgelerin mevcudiyetinden kaynaklanıyor olabilir (Paradelo ve ark. 2023). Daha sonraki aşamadaki yavaş artış, dış bölgeler tamamen dolu olduğu için boyanın adsorban gözeneklerine iç difüzyondan kaynaklanmaktadır (Shi ve ark. 2022).



Şekil 7. Temas süresinin giderime etkisi

Sıcaklığın giderime etkisi

Proses işletme sıcaklığı ile boya giderim miktarının arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla 20, 40 ve 60 °C farklı sıcaklık değerlerinde deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 8’de gösterilmektedir. Deneyler başlangıç adsorbat konsantrasyonu 150 ppm, adsorban miktarı 2 gram ve 90 dk temas süresi boyunca sabit karıştırma hızı (350 rpm) ile gerçekleştirilmiştir. Şekil incelendiğinde sıcaklık arttıkça boya gideriminin arttığı görülmektedir. Ancak bu artış çok az denebilecek seviyelerde gerçekleşmiştir. Örneğin 20 °C’de boya giderim oranı %90.5 değerinde olurken 40 °C’de bu değer yaklaşık %91 değerine çıkmıştır. Ayrıca sıcaklık iyice artırılarak 60 °C olduğunda giderim oranı neredeyse sabit kalmıştır. Bu değerler ışığında oda sıcaklığı olan 20 °C değerinde çalışmanın gerçekleştirilmesi adsorbanın enerji maliyeti gerektirmeksizin kullanılabilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 8. Sıcaklığın giderime etkisi

Adsorpsiyon denge izotermi

Adsorpsiyon izotermi, ele alınan adsorpsiyon prosesinde kullanılacak cihaz ve yöntemlerin belirlenmesinde önemlidir. Ayrıca denge çalışmaları adsorban kapasitelerini tahmin etmek için kullanılmaktadır (Loutfi ve ark. 2023). İzoterm araştırmalarının amacı, kirletici konsantrasyonu ile adsorban yüzeyleri arasındaki ilişkiyi anlamak ve böylece sulu çözeltilerden kirletici giderimi için adsorban kullanımını geliştirmektir (Thamer ve ark. 2023). Denge izotermi testi, adsorbe edilen moleküller ile sorbent yüzeyi arasındaki değişimi ortaya koymaktadır. En uygun izoterm modelini tespit edebilmek için Freundlich (Freundlich, 1907), Langmuir (Langmuir, 1918), Temkin (Temkin ve Pyzhev, 1940) gibi doğrusal modeller çalışmada kullanılmıştır. Bu modeller için kullanılan denklemler sırasıyla Eşitlik 3, 4 ve 6. ile sunulmuştur.

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (3)$$

Bu eşitlik de dahil olmak üzere hemen hemen hepsinde görülen q_e ifadesi, denge durumundaki birim adsorban tarafından mg/g biriminde ortamdan uzaklaştırılan kirletici miktarını ifade etmektedir. K_f , Freundlich adsorpsiyon sabitidir ve $1/n$ değeri, yüzeydeki aktif merkezlerin yoğunluğunun bir göstergesidir.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_0 b} + \frac{C_e}{Q_0} \quad (4)$$

Eşitlik 4'te b , L/mg biriminde Langmuir eşdeğerlik sabitini temsil etmektedir. Q_0 , adsorpsiyon kapasitesini ifade etmektedir ve birimi mg/g şeklindedir. Ek olarak, Langmuir izoterm modelinde dağılım sabiti (R_L) belirlenmelidir. Bu değer hesaplanması için kullanılan matematiksel ifade Eşitlik 5. ile gösterilmektedir.

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad (5)$$

Burada, R_L izotermi uygun olup olmadığını belirlemek için kullanılırken, C_0 ise başlangıçtaki kirletici konsantrasyonudur (mg/L).

$$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln A_T + \frac{RT}{b_T} \ln C_e \quad (6)$$

Eşitlik 6'da R , 8.314 J/mol.K biriminde evrensel gaz sabitini ifade etmektedir. T , Kelvin biriminde sıcaklığı göstermektedir. Son olarak b_T , kJ/mol biriminde Temkin izoterm sabitini temsil etmektedir.

Freundlich, Langmuir ve Temkin izoterm modellerinden hangisinin en uygun olduğunu belirlemek için elde edilen sonuçlar Çizelge 1'de gösterilmektedir. Öte yandan, farklı sıcaklıklar için elde edilen denge grafiği ve 20 °C'de uygulanan her bir izoterm modelinin doğrusal uygulaması Şekil 9'de gösterilmektedir.

Çizelge 1. İzoterm modelleri için elde edilen değerler

İzoterm Modeli	Sıcaklık (°C)		
Freundlich	20	40	60
K_f (L/g)	1.066	1.497	1.658
n	1.645	1.513	1.478
R^2	0.999	0.994	0.991
Langmuir			
Q_0 (mg/g)	15.191	16.474	17.452
b (L/mg)	0.034	0.023	0.019
R^2	0.966	0.976	0.981
R_L	0.164	0.225	0.259
Temkin			
A_T	2.474	3.653	4.194
M	3.064	3.249	3.403
R^2	0.956	0.964	0.967

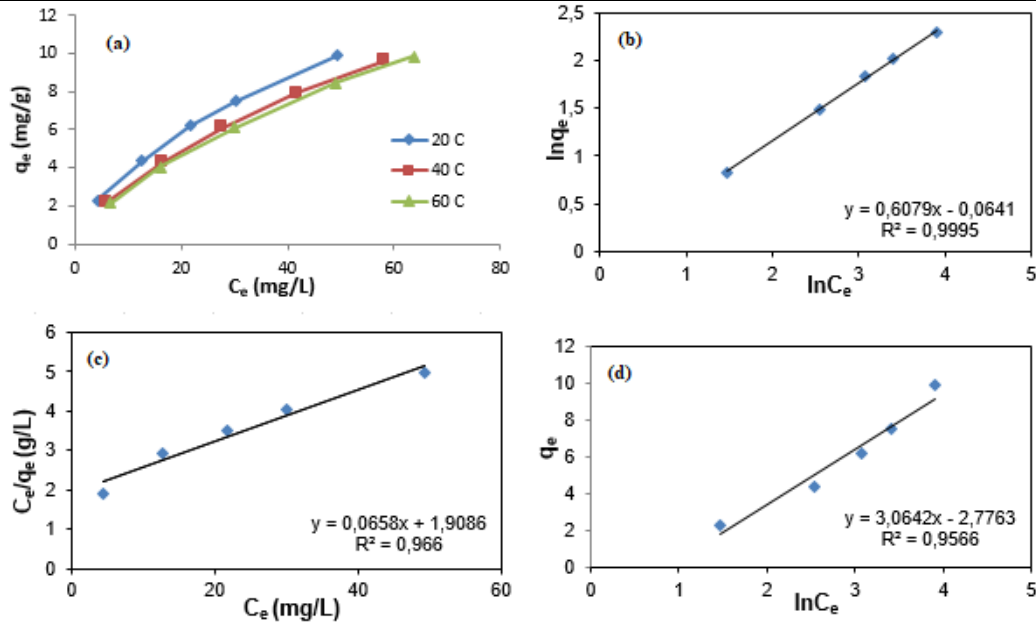
*M: RT/b_T

Şekil 9'de (a) kısmında bulunan adsorpsiyon denge grafiğine göre, deneysel adsorplama kapasitesinin 10.18 mg/g'a ulaştığı görülmektedir. Çizelgeye göre denge verilerine en iyi uyum sağlayan modelin Freundlich modeli (R^2 :0.999) olduğu gözlenmiştir. Freundlich izotermi, heterojen yüzeylerde (adsorban yüzey bölgeleri farklı bağlanma enerjileri spektrumuna sahiptir) ideal olmayan ve tersinir bir adsorpsiyon sistemi tanımlamaktadır, tek katmanlı oluşumla sınırlı değildir ve çok katmanlı adsorpsiyona uygulanabilir (Debnath ve Das 2023; Agarwala ve Mulky 2023). Bu sonuç, kanyaş otu külünün heterojen bir mikro yapıya sahip olduğunu ve SEM sonuçlarıyla da bu durumun destekler nitelikte olduğu düşünülmektedir. Langmuir modeli incelendiğinde birim adsorban yüzeyin tutunan kirlenici miktarı 60 °C'de 17.452 mg/g seviyelerine kadar yükseldiği görülmektedir. Literatürle uyumlu değerlere sahip olan kanyaş otu külünün adsorpsiyonunda sıcaklık arttıkça maksimum adsorplama kapasitesinin (Q_0) artması ve benzer şekilde K_f değerinin artması Freundlich izotermine uyan bir adsorpsiyon sisteminde beklenen durumlardan biridir (Rajoriya ve ark. 2021). Ayrıca literatüre göre Freundlich izotermine $1/n$ değerinin 0 ile 1 değerleri arasında olması durumunda adsorpsiyonun bu izotermine daha uygun olduğu düşünülmektedir ve bu değer 1'den küçük olduğunda fiziksel adsorpsiyonun gerçekleştiği varsayılmaktadır (Vigdorowitsch ve ark. 2021). Benzer şekilde Langmuir izotermine R_L değerinin 0 ile 1 değerleri arasında olması uygun olduğu sonucunu vermektedir.

Mukayese edebilmek adına farklı tarımsal atıklar kullanılarak malahit yeşili boyar maddesinin adsorpsiyon metoduyla giderimi sonucu elde edilen maksimum adsorplama kapasiteleri Çizelge 2'de gösterilmektedir. Çizelge incelendiğinde bu çalışmada elde edilen Q_0 değerinin diğer tarımsal atıklara göre daha düşük bir seviyede olduğu görülmektedir. Ancak bu çalışmada kullanılan adsorbanın her hangi bir kimyasal ön işleme tabi olmadığı halde bu seviyelerde adsorplama kapasitesine ulaşması, atık suların katyonik boyaların gideriminde etkin bir şekilde kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Çizelge 2. Farklı tarımsal atıkların maksimum adsorplama kapasiteleri

Adsorban	Q_0 (mg/g)	Kaynak
Kanyaş otu	17.452	Bu çalışma
Ceviz kabuğu	11.76	Hajialigol ve Masoum, 2019
Mısır koçanı	60.64	Sonawane ve Shrivastava, 2009
Hindistan cevizi lifi	27.44	Banerjee & Sharma, 2013
Kahve çekirdeği	55.30	Baek ve ark., 2010
Pirinç kabuğu	32.50-67.60	Leng ve ark., 2015

**Şekil 9.** Adsorpsiyon denge grafiği (a), Freundlich modeli (b), Langmuir modeli (c) ve Temkin modeli (d)

SONUÇ

Bu çalışmada, suda toksik etkilere neden olan malahit yeşili boyasının adsorpsiyonu ucuz, doğal yollarla elde edilen bir tarımsal atık olan kanyaş otu külü ile gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyon prosesinin belirlenmesinde etkili parametreler olan sıcaklık, adsorban miktarı, başlangıç boya konsantrasyonu ve temas süresinin değişiminin etkileri incelenmiştir. Kesikli sistem adı verilen çalkalama yöntemi ile gerçekleştirilen adsorpsiyon deneylerinden elde edilen sonuçlara göre boyar madde giderimi için en uygun izoterm modelinin Freundlich (R^2 0.999) olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, başlangıç boya konsantrasyonunun 150 mg/L, adsorban miktarının 2 g, temas süresinin 90 dk ve sıcaklığın 60 °C olduğu koşullar altında boya giderim veriminin %91.42 olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, adsorpsiyona uygunluğunu detaylı bir şekilde ortaya koyabilmek maksadıyla kanyaş otu külünün SEM, FT-IR ve XRD analizleriyle karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sayesinde yüzeyde aktif merkez oluşturabilecek fonksiyonel gruplar tespit edilmiş ve gözenek yapısı hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

Yapılan bu çalışma sonucunda, doğal ve kolay temin edilebilen tarımsal bir atık malzeme olan kanyaş otu külünün, katyonik boyalardan malahit yeşilinin adsorpsiyon yöntemiyle sulu çözeltilerden giderilmesinde kullanılabilir ve etkili olduğunu ortaya koymuştur. Günümüzde yeşil alan yetersizliği, su kaynaklarının yitilmesi, iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi olumsuz çevresel faktörler düşünüldüğünde gelecek çalışmalarda da tarımsal atıkların geri dönüşümü ve su arıtımı gibi çalışmalara önem verilmesi gerekmektedir.

Bilindiği gibi boyamanın da dâhil olduğu tekstil son işlemlerinde boyar maddenin dışında bir çok yardımcı kimyasal madde de kullanılmaktadır. Bu çalışma kanyaş otu külünün boyar madde adsorplayabildiğini gösteren bir başlangıç olarak kabul edilebilir. Bundan sonraki çalışmaların ise

gerçek tekstil atıksularında yürütülerek diğer kirleticilerin etkisinin ortaya konması, gelecek çalışmalarda düşünülebilir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Agarwala, R., & Mulky, L. (2023). Adsorption of dyes from wastewater: A comprehensive review. *ChemBioEng Reviews*, 10(3), 326-335.
- Arumugam, M., Gopinath, S. C., Anbu, P., Packirisamy, V., Yaakub, A. R. W., & Wu, Y. S. (2024). Efficient Copper Adsorption from Wastewater Using Silica Nanoparticles Derived from Incinerated Coconut Shell Ash. *BioNanoScience*, 1-11.
- Baek, M. H., Ijagbemi, C. O., Se-Jin, O., & Kim, D. S. (2010). Removal of Malachite Green from aqueous solution using degreased coffee bean. *Journal of hazardous materials*, 176(1-3), 820-828.
- Baghbanzadeh, M., Rana, D., Lan, C. Q., & Matsuura, T. (2017). Zero thermal input membrane distillation, a zero-waste and sustainable solution for freshwater shortage. *Applied Energy*, 187, 910-928.
- 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.
- Boretti, A., & Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the world water development report. *NPJ Clean Water*, 2(1), 15.
- De Santana, J. E., de Andrade, F. G. S., Ferreira, A. F., Ghislandi, M. G., & da Motta Sobrinho, M. A. (2024). Isotherms, kinetics and thermodynamics of industrial dye acid red 27 adsorption on Sugarcane Bagasse Ash. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-15.
- Debnath, S., & Das, R. (2023). Strong adsorption of CV dye by Ni ferrite nanoparticles for waste water purification: Fits well the pseudo second order kinetic and Freundlich isotherm model. *Ceramics International*, 49(10), 16199-16215.
- Dimbo, D., Abewaa, M., Adino, E., Mengistu, A., Takele, T., Oro, A., & Rangaraju, M. (2024). Methylene blue adsorption from aqueous solution using activated carbon of spathodea campanulata. *Results in Engineering*, 21, 101910.
- El Messaoudi, N., Franco, D. S. P., Gubernat, S., Georgin, J., Şenol, Z. M., Ciğeroğlu, Z., ... & El Hajam, M. (2024). Advances and future perspectives of water defluoridation by adsorption technology: A review. *Environmental Research*, 118857.
- Freundlich, H. (1907). Über die adsorption in lösungen. *Zeitschrift für physikalische Chemie*, 57(1), 385-470.
- Georgin, J., Franco, D. S. P., Meili, L., Bonilla-Petriciolet, A., Kurniawan, T. A., Imanova, G., ... & Ali, I. (2024). Environmental remediation of the norfloxacin in water by adsorption: Advances, current status and prospects. *Advances in Colloid and Interface Science*, 103096.
- Gupta, V. K. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal—a review. *Journal of environmental management*, 90(8), 2313-2342.
- Hajialigol, S., & Masoum, S. (2019). Optimization of biosorption potential of nano biomass derived from walnut shell for the removal of Malachite Green from liquids solution: experimental design approaches. *Journal of Molecular Liquids*, 286, 110904.

- Iftekhar, S., Ramasamy, D.L., Srivastava, V., Asif, M.B., Sillanpää, M., (2018). Understanding the factors affecting the adsorption of Lanthanum using different adsorbents: a critical review. *Chemosphere* 204, 413–430.
- Iqbal, A., Badshah, S. L., Alves, J. L. F., da Silva, J. C. G., & Di Domenico, M. (2024). An insight into the thermokinetics of the pyrolysis of invasive grass *Sorghum halepense* towards its bioenergy potential. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(4), 5305-5318.
- Jawad, A. H., Saber, S. E. M., Abdulhameed, A. S., Farhan, A. M., AlOthman, Z. A., & Wilson, L. D. (2023). Characterization and applicability of the natural Iraqi bentonite clay for toxic cationic dye removal: Adsorption kinetic and isotherm study. *Journal of King Saud university-science*, 35(4), 102630.
- John, A. (2024). Removal of hexachlorocyclohexane isomers from wastewater using activated carbon from *Musa paradisiaca* peel: Adsorption isotherms, kinetic, and thermodynamic studies. *Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis*, 15, 100140.
- Kainth, S., Sharma, P., & Pandey, O. P. (2024). Green sorbents from agricultural wastes: A review of sustainable adsorption materials. *Applied Surface Science Advances*, 19, 100562.
- Kumari, S., Chowdhry, J., Sharma, P., Agarwal, S., & Garg, M. C. (2023). Integrating artificial neural networks and response surface methodology for predictive modeling and mechanistic insights into the detoxification of hazardous MB and CV dyes using *Saccharum officinarum* L. biomass. *Chemosphere*, 344, 140262.
- Kwon, Y. M., Chang, I., & Cho, G. C. (2023). Xanthan biopolymer-based soil treatment effect on kaolinite clay fabric and structure using XRD analysis. *Scientific Reports*, 13(1), 11666.
- Leng, L., Yuan, X., Zeng, G., Shao, J., Chen, X., Wu, Z., ... & Peng, X. (2015). Surface characterization of rice husk bio-char produced by liquefaction and application for cationic dye (Malachite green) adsorption. *Fuel*, 155, 77-85.
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical society*, 40(9), 1361-1403.
- Lin, Y., Alengaram, U. J., & Ibrahim, Z. (2023). Effect of treated and untreated rice husk ash, palm oil fuel ash, and sugarcane bagasse ash on the mechanical, durability, and microstructure characteristics of blended concrete—A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 78, 107500.
- Loutfi, M., Mariouch, R., Mariouch, I., Belfaqir, M., & ElYoubi, M. S. (2023). Adsorption of methylene blue dye from aqueous solutions onto natural clay: Equilibrium and kinetic studies. *Materials Today: Proceedings*, 72, 3638-3643.
- Lu, J., Zhou, Y., & Zhou, Y. (2023). Recent advance in enhanced adsorption of ionic dyes from aqueous solution: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(19), 1709-1730.
- Makharadze, D., Kantaria, T., Yousef, I., Del Valle, L. J., Katsarava, R., & Puiggali, J. (2024). PEGylated micro/nanoparticles based on biodegradable poly (ester amides): Preparation and study of the core-shell structure by synchrotron radiation-based FTIR microspectroscopy and electron microscopy. *International journal of molecular sciences*, 25(13), 6999.
- Mehta, A. (2023). Dye Removal Using Magnetized Nanohybrid Adsorbent. In *Nanohybrid Materials for Treatment of Textiles Dyes* (pp. 381-399). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Nkosi, N., Shooto, N. D., Nyamukamba, P., & Thabede, P. M. (2024). Binary adsorption of toxic nickel (II) and cadmium (II) ions from aqueous solution by acid modified chilli peppers. *Energy Nexus*, 100313.

- Oloyede, C. T., Jekayinfa, S. O., Alade, A. O., Ogunkunle, O., Otung, N. A. U., & Laseinde, O. T. (2023). Exploration of agricultural residue ash as a solid green heterogeneous base catalyst for biodiesel production. *Engineering Reports*, 5(1), e12585.
- Paradelo, R., García, P., González, A., Al-Zawahreh, K., & Barral, M. T. (2023). Influence of Zinc and Humic Acids on Dye Adsorption from Water by Two Composts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(7), 5353.
- Pellenz, L., de Oliveira, C.R.S., da Silva Júnior, A.H., da Silva, L.J.S., da Silva, L., Ulson de Souza, A.A., de Souza, S.M. de A.G.U., Borba, F.H., da Silva, A., (2023). A comprehensive guide for characterization of adsorbent materials. *Sep. Purif. Technol.* 305, 122435.
- Rajoriya, S., Saharan, V. K., Pundir, A. S., Nigam, M., & Roy, K. (2021). Adsorption of methyl red dye from aqueous solution onto eggshell waste material: Kinetics, isotherms and thermodynamic studies. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100180.
- Shi, Y., Chang, Q., Zhang, T., Song, G., Sun, Y., & Ding, G. (2022). A review on selective dye adsorption by different mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108639.
- Sonawane, G. H., & Shrivastava, V. S. (2009). Kinetics of decolourization of malachite green from aqueous medium by maize cob (Zea maize): An agricultural solid waste. *Desalination*, 247(1-3), 430-441.
- Sumiyati, S., Samadikun, B. P., Widiyanti, A., Budihardjo, M. A., Al Qadar, S., & Puspita, A. S. (2024). Life cycle assessment of agricultural waste recycling for sustainable environmental impact. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(2), 907-938.
- Temkin, M. J.; Pyzhev, V. (1940). Recent Modifications to Langmuir Isotherms. *Acta Phys. Chem.*, 12, 271-279.
- Thamer, B. M., Al-aizari, F. A., & Hameed, M. M. A. (2023). Zero-valent Ni/NiO core-shell nanosheets supported on graphene for highly efficient dye adsorption: Isotherm, kinetic and thermodynamic study. *Chemical Engineering Research and Design*, 197, 656-668.
- Vigdorowitsch, M., Pchelintsev, A., Tsygankova, L., & Tanygina, E. (2021). Freundlich isotherm: An adsorption model complete framework. *Applied Sciences*, 11(17), 8078.
- Wang, K., Peng, N., Sun, J., Lu, G., Chen, M., Deng, F., ... & Zhong, Y. (2020). Synthesis of silica-composited biochars from alkali-fused fly ash and agricultural wastes for enhanced adsorption of methylene blue. *Science of the total environment*, 729, 139055.
- Yadav, S., Asthana, A., Chakraborty, R., Jain, B., Singh, A. K., Carabineiro, S. A., & Susan, M. A. B. H. (2020). Cationic dye removal using novel magnetic/activated charcoal/ β -cyclodextrin/alginate polymer nanocomposite. *Nanomaterials*, 10(1), 170.
- Yang, P., Lu, Y., Zhang, H., Li, R., Hu, X., Shahab, A., ... & Ali, E. (2024). Effective removal of methylene blue and crystal violet by low-cost biomass derived from eucalyptus: Characterization, experiments, and mechanism investigation. *Environmental Technology & Innovation*, 33, 103459.
- Yonar, M. E., & Yonar, S. M. (2010). Changes in selected immunological parameters and antioxidant status of rainbow trout exposed to malachite green (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum, 1792). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 97(1), 19-23.
- Zhu, H., Chen, S., & Luo, Y. (2023). Adsorption mechanisms of hydrogels for heavy metal and organic dyes removal: A short review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, 100552.