

## ***Boletus edulis* Biyokütlesi ile Direct Blue 2 Boyar Maddesinin Giderimi: Sorpsiyon Kinetikleri ve İzoterm Karakteristiği**

Emre ERDEN KOPAR<sup>1\*</sup> 

### **Öz**

Bu çalışmada, *Boletus edulis* biyokütlesi ile sulu çözeltilerden Direct Blue 2 boyar maddesinin giderimi çalışılmıştır. Bu amaçla biyosorbent olarak hazırlanan *B. edulis* biyokütlesi ile farklı koşullarda DB2 giderim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Biyosorbent miktarı, başlangıç DB2 derişimi, pH, biyosorpsiyon sıcaklığı ve sürenin optimizasyonunun ardından izoterm, kinetik ve termodinamik parametreler hesaplanmıştır. Elde edilen verilere göre, 0,02 g/0,02 L biyosorbent miktarının kullanıldığı koşullarda biyosorpsiyon kapasitesi pH:3,0'te 25 °C'de 200 mg/L başlangıç DB2 derişimi için 136,149±0,801 mg/g bulunmuştur. Biyosorpsiyon prosesinin yalancı ikinci derece kinetik modele ve Freundlich izoterm modeline uyumlu, biyosorpsiyonun ekzotermik karakterde olduğu bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Direct Blue 2, *Boletus edulis*, Biyosorpsiyon.

## **Removal of Direct Blue 2 Dyestuff by *Boletus edulis* Biomass**

### **Abstract**

In this study, the removal of Direct Blue 2 dyestuff from aqueous solutions by *Boletus edulis* biomass was investigated. For this purpose, DB2 removal was investigated under different conditions with *B. edulis* biomass prepared as biosorbent. After optimization of biosorbent amount, initial DB2 concentration, pH, temperature and time, isotherm, kinetics and thermodynamics were calculated. According to the obtained data, the biosorption capacity was found to be 136.149±0,801 mg/g for 200 mg/L initial DB2 concentration at 25 °C at pH: 3.0 under conditions where 0.02 g biosorbent amount was used. The biosorption process was fitted with the pseudo-second order kinetic model and Freundlich isotherm model, and the biosorption was found to be exothermic.

**Keywords:** Direct Blue 2, *Boletus edulis*, Biosorption.

<sup>1</sup>Ege Üniversitesi, Biyokimya Bölümü, Fen Fakültesi, İzmir, Türkiye, [emre.erden@ege.edu.tr](mailto:emre.erden@ege.edu.tr)

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

**Geliş/Received:** 11.01.2024

**Kabul/Accepted:** 21.06.2024

**Yayın/Published:** 15.12.2024

## 1. Giriş

Sentetik boyalar, tekstil, deri tabaklama, kağıt ve kağıt hamuru ve gıda işleme endüstrilerinde yüksek talep gören önemli ham maddelerdir. Dünya genelinde yılda yaklaşık  $7 \times 10^5$  ton farklı sentetik boyanın üretildiği, tekstil endüstrisinde ise yılda yaklaşık 10 000 tondan fazla üretilen boyanın kullanıldığı rapor edilmiştir (Sen ve ark., 2011). Tekstil endüstrisinde kullanılan bu boyaların atık sulara karışması sonucu önemli çevre sorunları ortaya çıkmaktadır (Mutlu ve Kılıç Apar, 2023). Endüstriyel boyaların düşük miktarlarının bile nehir ve göllere boşaltılması sonucu bulanıklık miktarı artmakta, sucul ekosisteme zarar vermekte ve temiz su kaynaklarını kirletmektedir (Mazloomi ve ark., 2018; Ramavandi ve ark., 2019; Bonyandi ve ark., 2022).

Atık su arıtım yöntemleri arasında sıklıkla kullanılan elektrokoagülasyon, kimyasal çöktürme, oksidasyon (Cüce ve Temel, 2021a; Cüce ve Temel, 2023), iyon değişimi gibi geleneksel yöntemlerin pahalı olması, işlemin uzun sürmesi ve toksik atıkların oluşması gibi bazı olumsuz yönlerinin olması nedeniyle son yıllarda modern yöntemler arasında yer alan sorpsiyon yöntemi araştırmacılar tarafından oldukça fazla çalışılmaktadır (Adel ve ark., 2021; Sinha ve ark., 2021). Sorpsiyon yönteminin düşük miktarlardaki kirleticilerin uzaklaştırılmasında uygun, verimli, düşük maliyetli (Gürel, 2017; Namal ve Kalipci, 2020; Cüce ve Temel, 2021b) ve kullanılan sorbentin tekrar kullanımına olanak sağlaması gibi birçok avantajı mevcuttur (Dehghani ve ark., 2020; Göçenoğlu Sarıkaya 2022; Başkan ve ark., 2023).

Canlı ya da ölü biyolojik malzemelerin kullanıldığı biyosorpsiyon yönteminde biyosorbent olarak bakteri (Li ve ark., 2019), mantar (Göçenoğlu Sarıkaya ve Erden, 2020), maya (Erdem ve ark., 2016), alg (Bonyandi ve ark., 2022), kefir (Erdoğdular ve Kılıç Apar, 2021), endüstriyel/tarımsal atıklar kullanılabilir. Canlı hücrelerin kullanıldığı aktif biyosorpsiyon yönteminde sorbentin tekrar kullanımına olanak sağlayamaması, aşırı derişik kirletici ortamlarından kolaylıkla etkilenerek hücrelerin ölmesi ve hücrelerin canlılığını koruyabilmek için devamlı besiyeri eklenmesi gibi bazı dezavantajları mevcuttur (Göçenoğlu Sarıkaya, 2021). Ölü hücrelerin kullanıldığı pasif biyosorpsiyon yönteminde ise kullanılan sorbentin rejenere edilerek tekrar kullanıma olanak sağlaması en büyük avantajdır. Böylelikle bu yöntemle verimli ve ekonomik olarak kirleticilerin giderimi gerçekleştirilebilir (Puchana-Rosero ve ark., 2017).

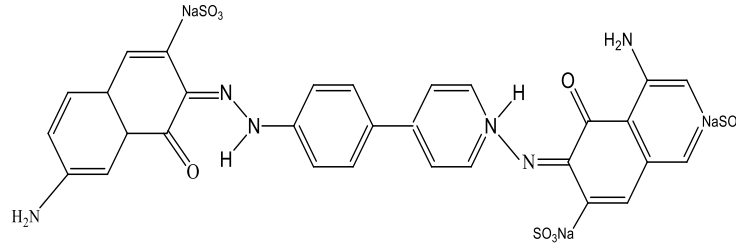
Mantarların kullanıldığı biyosorpsiyon yönteminde, mantar hücre duvarının yapısında bulunan hidroksil, karboksil, amid ve amino gibi bazı fonksiyonel gruplar, biyosorpsiyon yöntemini iyileştirerek ağır metal, boya ve antibiyotiklerin bağlanmasını kolaylaştırır (Raja ve ark., 2015; Lacerda ve ark., 2019; Asliyüce, 2023). Biyosorbent olarak kullanılan filamentli mantarların biyokütlesi, yüksek yüzey alanı nedeniyle genellikle biyosorpsiyon çalışmalarında tercih edilmektedir (Aracagök, 2022).

*B. edulis* halk arasında çörek mantarı, ayı mantarı, porçini ya da bolet mantarı olarak bilinmektedir. Polisakkarit, karbohidrat, protein ve aminoasit içeriğinin yanı sıra, çinko, demir, mangan, bakır, B vitamini, askorbik asit ve tokoferol açısından da oldukça zengindir (Tan ve ark., 2022). Avrupa, Çin, Japonya gibi ülkelerin yanı sıra Türkiye’de de yetişmektedir (Sarıkurkcu ve ark., 2008). Son yıllarda atık su arıtımında ucuz, etkin ve çevre dostu sorbentlere artan ilgi nedeniyle özellikle mantar kaynaklı biyokütlelerin atık su arıtımında kullanımı oldukça önemlidir. Farklı fungal biyosorbentlerin atık sularından boyar madde gideriminde kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur. 2017 yılında yapılan bir çalışmada fiziksel ve termal işlemlerle inaktive edilen *Trametes* sp. ile sulu çözeltilerden Acid Blue 161 boyar maddesinin % giderimi % 89,47 olarak rapor edilmiştir (Puchana-Rosero ve ark., 2017). 2021 yılında yapılan bir başka çalışmada, *Aspergillus carbonarius* ve *Penicillium glabrum* biyosorbent olarak kullanılmış ve sulu çözeltilerden metilen mavisi giderimi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre *A. carbonarius* ve *P. glabrum*’un metilen mavisi için maksimum biyosorpsiyon kapasitesi sırasıyla 21,88 ve 16,67 mg/g olarak bulunmuştur (Bouras ve ark., 2021). 2020 yılında yapılan bir başka çalışmada ise Direct Blue 2 boyar maddesinin gideriminde *Agaricus campestris* biyokütlesi kullanılmış, maksimum biyosorpsiyon kapasitesi 38,56 mg/g, % tutunma miktarı ise % 93,39 olarak bulunmuştur (Göçenoğlu Sarıkaya ve Erden, 2020). Bu çalışmada Boletaceae familyasının bir üyesi olan *Boletus edulis* mantarından hazırlanan biyokütlenin sulu çözeltilerden Direct Blue 2 boyar maddesinin gideriminde biyosorbent olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan literatür taramasına göre, atık su arıtımında *B. edulis*’in biyosorbent olarak kullanımı rapor edilmemiştir. 2020 yılında yapılan bir çalışmada, *B. edulis*’ten izole edilen lakkaz enziminin immobilizasyonu ile Reaktive Blue-19 boyar maddesinin arıtımı çalışılmıştır. Elde edilen verilere göre immobilize enzimin boyar maddeyi % 91 oranında giderdiği rapor edilmiştir (Tuncay ve Yagar, 2020). Bu çalışmadan elde edilen verilere göre, *B. edulis* biyokütlesinin ilk defa biyosorbent olarak kullanımı rapor edilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

C.I. Direct Blue 2 (diazo-boyar madde,  $C_{32}H_{21}N_6Na_3O_{11}S_3$ ) boyar maddesi (Şekil 1) Burboya Firması’ndan temin edilmiştir. NaOH ( $\geq$  % 98) ve HCl (% 37) Merck (Darmstadt, Germany) firmasından temin edilmiştir. Diğer tüm kimyasallar analitik derecededir.



Şekil 1. Direct Blue 2 boyar maddesinin kimyasal yapısı

## 2.2. Biyosorbentin Hazırlanması ve Karakterizasyonu

*B. edulis* Karen Organik Mantar firmasından (İzmir, Türkiye) temin edilmiştir. Biyosorbentin hazırlanmasında *B. edulis* saf su ile 3 defa yıkandıktan sonra etüvde (70 °C) kurutulmuştur. Kurutulan biyokütle homojenizatör yardımıyla parçalandıktan sonra eleklerden geçirilerek farklı boyutlarda elde edilmiş, ilerleyen çalışmalarda kullanılmak üzere (212-300 µm boyut aralığında) muhafaza edilmiştir.

Biyosorbentin fonksiyonel gruplarının aydınlatılabilmesi ve morfolojik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla biyosorpsiyon öncesi ve biyosorpsiyon sonrası Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (Perkin Elmer Spectrum BX FTIR System) ile spektrumları (Şekil 1) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM, ZEISS EVO 40) ile yüzey görüntüleri alınmıştır (Şekil 2).

## 2.3. Biyosorpsiyon Çalışmaları

Kesikli çalışma sisteminde gerçekleştirilen biyosorpsiyon deneyleri toplam çalışma hacmi 20 mL olacak şekilde 50 mL'lik erlenlerde yürütülmüştür. Çalışmalarda önce biyosorbent miktarı (0,008; 0,016; 0,02 g) belirlenmiş, daha sonra pH değeri (3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0), başlangıç DB2 derişimi (50, 75, 100, 150, 200 mg/L), ortam sıcaklığı (25, 35, 45 °C) ve biyosorpsiyon süresi (5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 90, 120 dakika) optimize edilmiştir. Çalışmalar orbital çalkalamalı inkübatör (Innova40-New Brunswick Scientific) içerisinde, 125 rpm karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir. Tüm çalışmalar 2 tekrarlı (n: 2) çalışılmıştır. Ölçümler Perkin Elmer Lambda 35 UV/Vis Spektrometre ile gerçekleştirilmiş ( $\lambda_{max}$ : 568 nm) ve biyosorpsiyon kapasitesi ( $q_e$ ) (Denklem 1) ve giderim yüzdesi (% G) (Denklem 2) hesaplanmıştır.

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

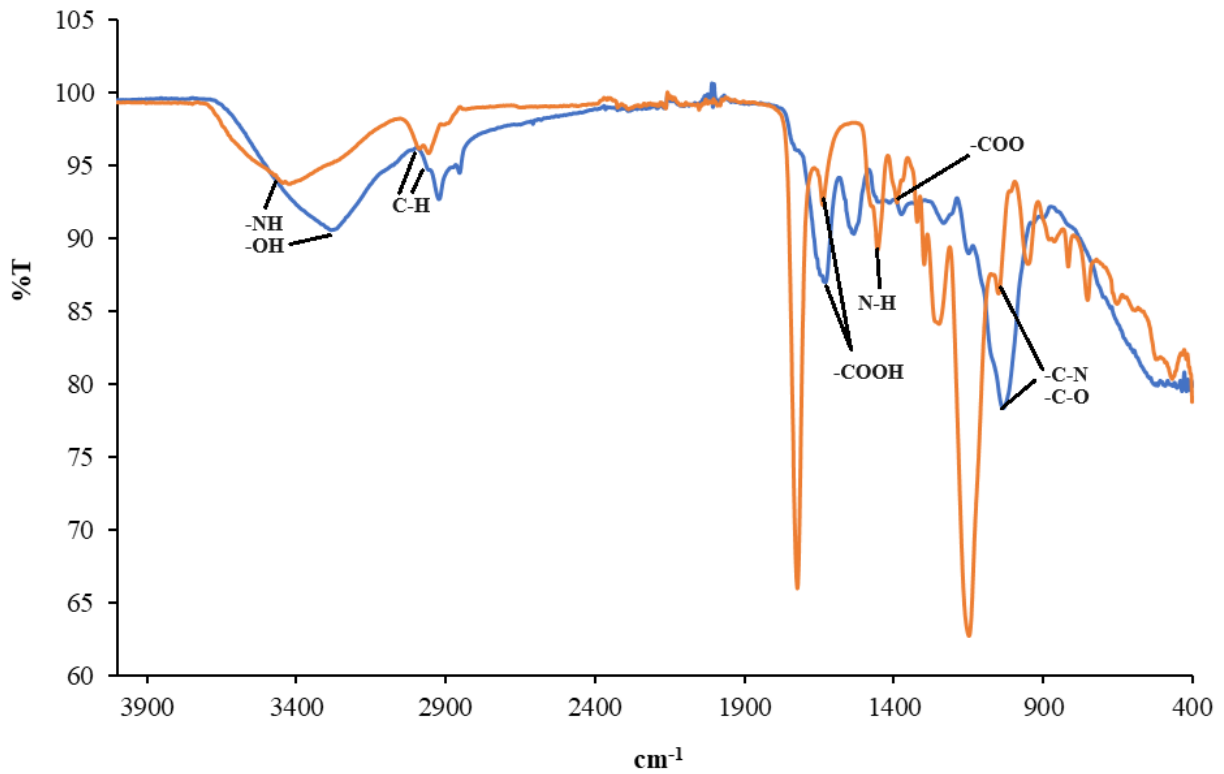
$$\% G = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

Denklemden yer alan  $C_o$  (mg/L) başlangıç DB2 derişimini,  $C_e$  (mg/L) değerleri ise denge halindeki DB2 derişimini vermektedir.  $m$  (g) kullanılan biyosorbent miktarını,  $V$  (mL) ise çözeltinin toplam hacmini vermektedir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

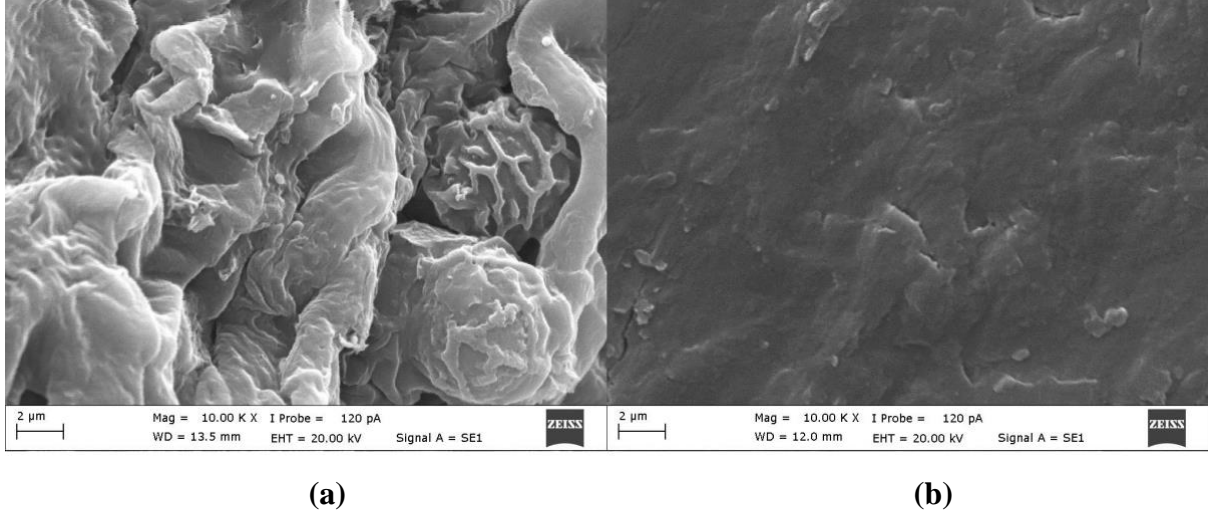
#### 3.1. Biyosorbentin Karakterizasyonu

Biyosorbente ait fonksiyonel grupların aydınlatılabilmesi için biyosorpsiyon öncesi ve sonrası FTIR spektrumları alınmış, biyosorpsiyonda etkili olan olası fonksiyonel gruplar aydınlatılmaya çalışılmıştır (Şekil 2). Elde edilen spektrumlara göre 3410-3430  $\text{cm}^{-1}$  aralığında yer alan bantlar bağlanmış -NH ve -OH gruplarını göstermektedir. C-H gerilmesine ait bant 2956  $\text{cm}^{-1}$ 'de görülmektedir. 1338  $\text{cm}^{-1}$ 'de gözlenen pik -COO gerilmesini, 1048  $\text{cm}^{-1}$  'de gözlenen pik ise -C-N- ve -C-O- gruplarını temsil etmektedir. 1452  $\text{cm}^{-1}$ 'de ve 1637  $\text{cm}^{-1}$ 'de gözlenen pikler ise sırasıyla N-H bozulmasını ve karboksilat ya da karboksil gruplarını göstermektedir (Bayramoğlu ve Arica, 2008; Bayramoğlu ve ark., 2009; Göçenoğlu ve Erden, 2020). Elde edilen spektrumlara göre amin, hidroksil ve karboksil gibi radikal grupların varlığı, mikrobiyal hücre duvarının ve membran bileşenlerinin DB2'nin biyosorpsiyonunda önemli bir rol oynadığını göstermektedir.



Şekil 2. Biyosorbente ait biyosorpsiyon öncesi (mavi) ve sonrası (turuncu) FTIR spektrumları

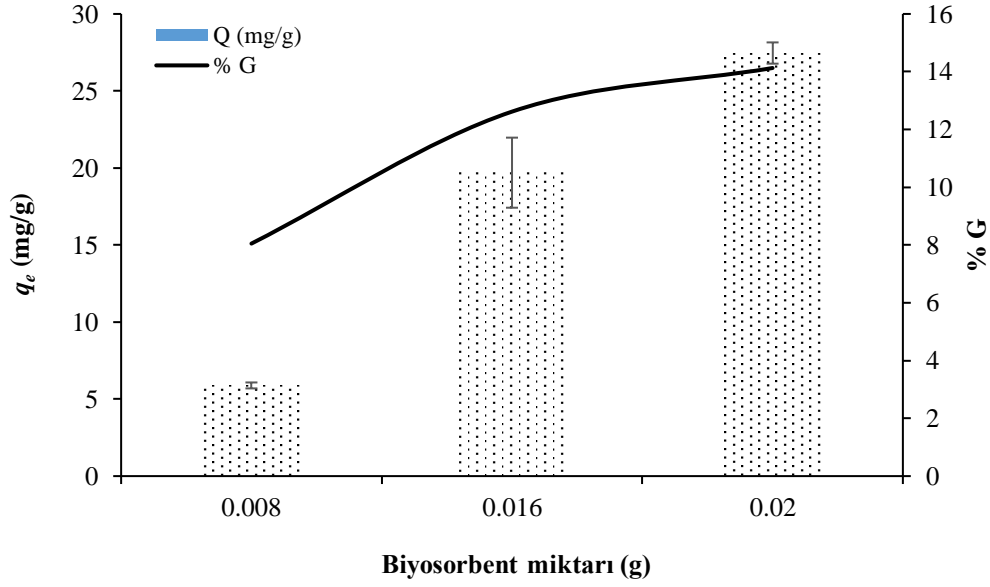
Biyosorbentin yüzey morfolojisinin aydınlatılabilmesi için biyosorpsiyon öncesi ve sonrası SEM görüntüleri alınmıştır (Şekil 3). SEM görüntülerine göre, biyosorpsiyondan önce pürüzlü olan biyosorbent yüzeyi biyosorpsiyon sonrası daha pürüzsüz ve homojen bir hale gelmiştir. Buna göre, DB2'nin biyosorbentin yüzeyinde yer alan fonksiyonel gruplarla etkileşime girdiği ve yüzeyin yapısını değiştirdiği düşünülmektedir.



Şekil 3. Biyosorbentin (a) biyosorpsiyon öncesi, (b) biyosorpsiyon sonrası SEM görüntüleri

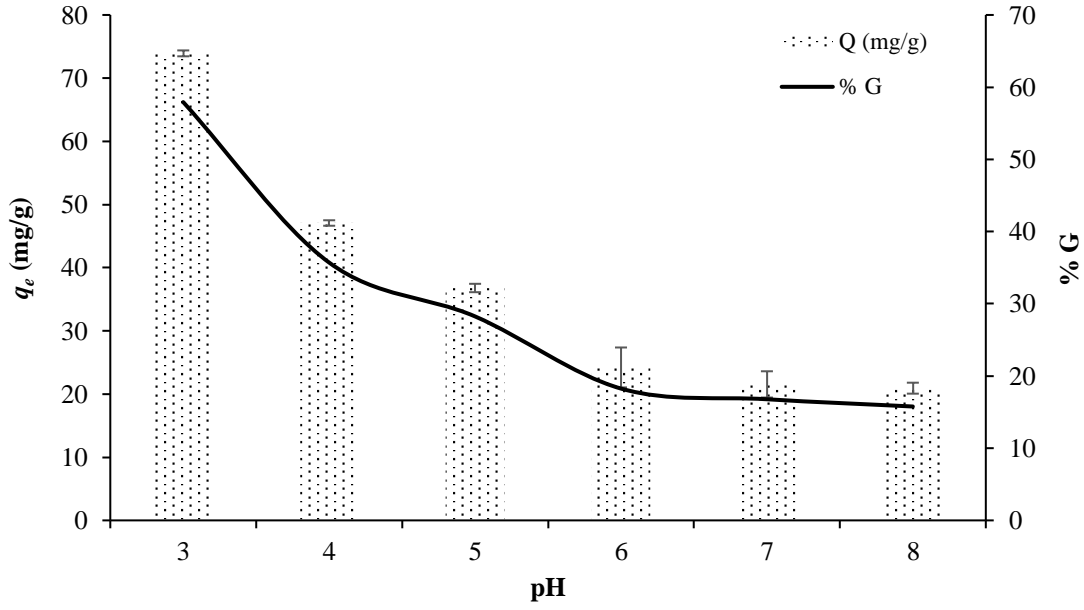
### 3.2. Biyosorpsiyon optimizasyon çalışmaları

Biyosorpsiyon çalışmalarında optimum biyosorbent miktarının belirlenmesi amacıyla 0,008, 0,016 ve 0,02 g biyosorbent kullanılmıştır. Toplam hacim 20 mL, başlangıç DB2 derişimi 200 mg/L olarak ayarlanmış, biyosorpsiyon 2 saat boyunca 25 °C'de 125 rpm karıştırma hızında inkübatör içerisinde gerçekleştirilmiştir (Innova40-New Brunswick Scientific). Biyosorbent miktarının belirlenmesi aşamasında boyar maddenin pH ayarı yapılmamış, biyosorpsiyon DB2'nin kendi pH değerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre  $q_e$  0,02 g biyosorbent miktarı için  $27,462 \pm 0,689$  mg/g, giderim yüzdesi olarak % 14,13 olarak bulunmuştur (Şekil 4). Daha sonraki çalışmalarda optimum biyosorbent miktarı 0,02 g olacak şekilde çalışılmıştır.



**Şekil 4.** Biyosorpsiyon üzerine biyosorbent miktarının etkisi (DB2'nin kendi pH değeri, Co:200 mg/L, t: 2 ssat)

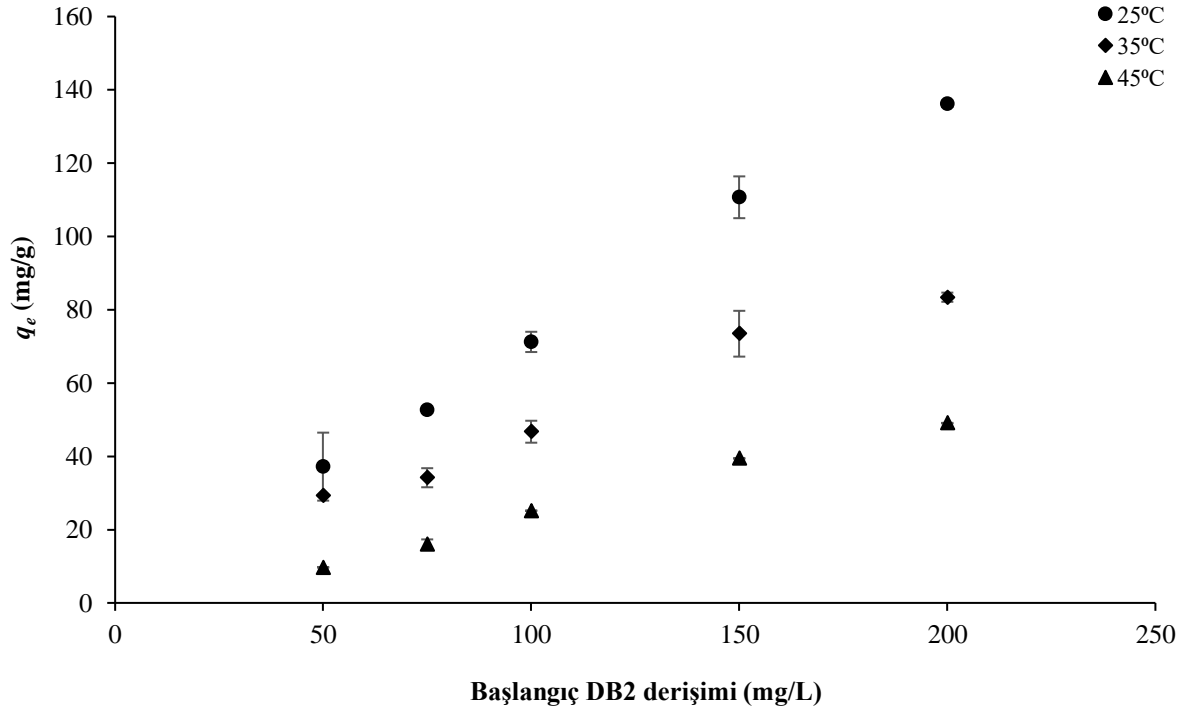
Ortam pH'ı biyosorbentin fonksiyonel gruplarını ve boyar maddenin yükünü etkilediği için, biyosorpsiyon işlemlerinde ortamın pH değeri oldukça önemlidir. Fungal biyosorbentlerde amino, hidroksil, karboksil gibi fonksiyonel grupların fazla olması nedeniyle, ortam pH'ı değiştikçe, fonksiyonel grupların iyonlaşma değerinde de değişimler gözlenir. pH değerinin biyosorpsiyon üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için DB2 çözeltisinin pH değeri 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0 ve 8,0 olacak şekilde farklı çözelti ortamları hazırlanmış ve biyosorpsiyon işlemleri 0,02 g biyosorbentin kullanıldığı koşullarda gerçekleştirilmiştir (V: 20 mL, t: 2 saat, T: 25 °C). En yüksek biyosorpsiyon kapasitesi  $73,923 \pm 0,464$  mg/g, en yüksek giderim yüzdesi ise % 57,93 olarak pH:3,0'te bulunmuştur (Şekil 5).



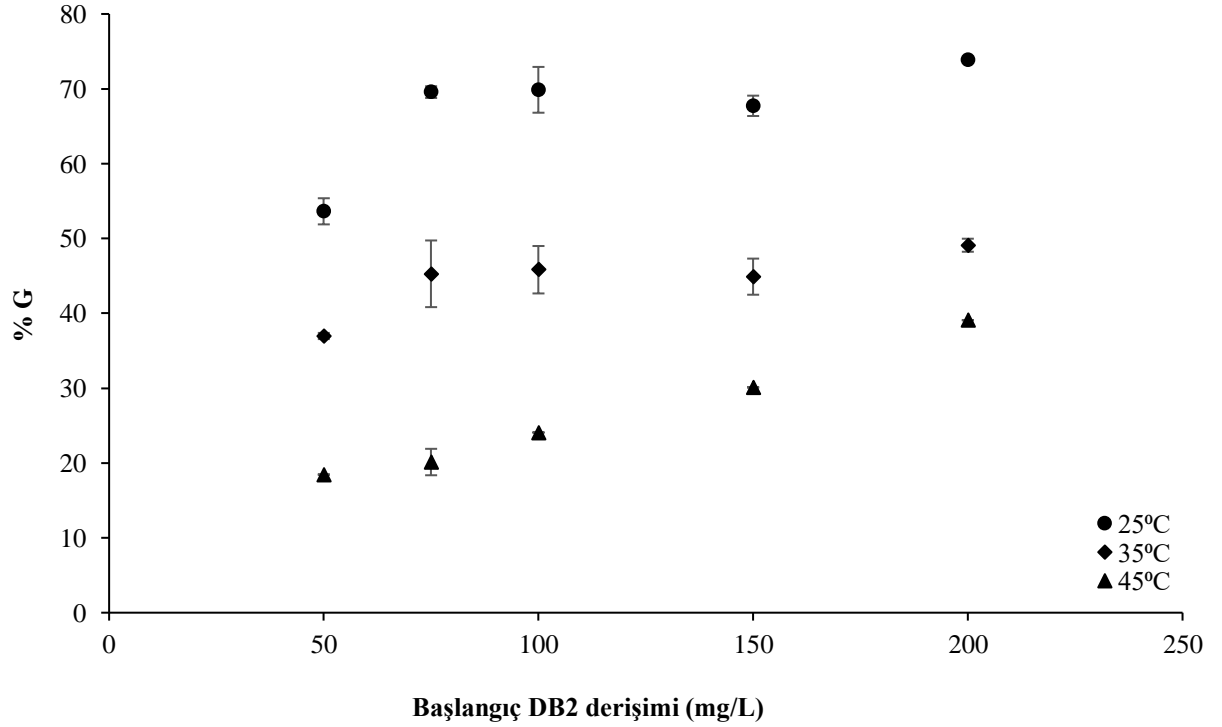
Şekil 5. Biyosorpsiyon üzerine ortam pH değerinin etkisi ( $C_o$ : 100 mg/L, t: 2 saat, T: 25 °C)

Başlangıç DB2 derişiminin ve sıcaklık değerlerinin biyosorpsiyona etkisinin araştırılması amacıyla 50, 75, 100, 150 ve 200 mg/L derişimlerindeki DB2 çözeltilerinin üç farklı sıcaklıkta (25, 35, 45 °C) biyosorpsiyonu gerçekleştirilmiştir. Toplam DB2 hacmi 20 mL, biyosorbent miktarı 0,02 g, çalkalama hızı 125 rpm ve biyosorpsiyon süresi 2 saat olarak ayarlanmıştır. Elde edilen verilere göre  $q_e$  50 mg/L ve 200 mg/L DB2 derişimi için 25 °C'de sırasıyla 37,185±9,279 mg/g ve 136,149±0,801 mg/g bulunmuştur. Başlangıç boyar madde derişiminin artmasıyla biyosorpsiyon kapasitesinde artış gözlenmektedir. Sıcaklığın artmasıyla biyosorpsiyon kapasitesinin düştüğü gözlenmektedir (Şekil 6). 200 mg/L başlangıç DB2 derişimi için biyosorpsiyon kapasitesi 35 °C ve 45 °C için sırasıyla 83,414±1,254 mg/g ve 49,048±0,082 mg/g bulunmuştur. Giderim yüzdesi ise 25 °C'de % 73,81 bulunurken, 35 °C ve 45 °C'de sırasıyla % 49,10 ve % 39,08 olarak bulunmuştur (Şekil 7). Elde edilen verilere göre, biyosorpsiyonun düşük sıcaklıklarda daha etkin gerçekleştiği düşünülmektedir.





**Şekil 6.** Biyosorpsiyon üzerine başlangıç DB2 derişiminin ve sıcaklığın etkisi (0,02 g biyosorbent, t: 2 saat, pH: 3,0)



**Şekil 7.** Giderim yüzdesi (%G) üzerine başlangıç DB2 derişiminin ve sıcaklığın etkisi (0,02 g biyosorbent, t: 2 saat, pH: 3,0)

### 3.3. Fizikokimyasal Parametreler: İzoterm ve Kinetikler

Biyosorpsiyon mekanizmasının aydınlatılabilmesi için Langmuir, Freundlich ve Dubinin-Radushkevich (D-R) izoterm modelleri kullanılmıştır. Langmuir izoterm modeli tek tabakalı ve genellikle homojen yüzeylerde gerçekleşen biyosorpsiyon mekanizmalarına uyumluken (Langmuir, 1918), heterojen yüzeylerde farklı biyosorpsiyon enerjilerine sahip bağlanma mekanizmaları için Freundlich izoterm modeli daha uygundur (Freundlich, 1906). D-R izoterm modeli ise, biyosorpsiyon mekanizmasının fiziksel ya da kimyasal özellikte olduğunu aydınlatmaktadır (Dubinin ve Radushkevich, 1947). İzoterm modellerine ait denklemler ve deneysel sonuçlar yardımıyla hesaplanan izoterm parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile yapılan hesaplamalara göre, biyosorpsiyonun heterojen yüzeylerde kendiliğinden gerçekleştiği, Freundlich izoterm modelinde yer alan  $n$  değerinin 1’den küçük olması durumunda sorpsiyonun ağırlıklı olarak fiziksel sorpsiyon şeklinde gerçekleştiğini göstermektedir (Jia ve ark., 2013). D-R izoterm modelinde yer alan  $E_{fe}$  değerinin 8 kJ/mol’den küçük olması fiziksel biyosorpsiyon, 8 kJ/mol ile 16 kJ/mol değeri arasında olması ise kimyasal biyosorpsiyon olduğunu göstermektedir. Elde edilen değerlere göre, her üç sıcaklık değerinde  $E_{fe}$  değeri 8 kJ/mol değerinin altında olması nedeniyle biyosorpsiyonun fiziksel özellikte olduğu düşünülmektedir.

**Tablo 1.** İzoterm modellerine ait denklemler ve parametreler

Model	Denklem		Sıcaklık		
			298	308	318
Langmuir	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_L K_L} + \frac{C_e}{Q_L}$	$K_L \times 10^3$ (L/mg)	4,098	7,024	1,655
		$Q_L$ (mg/g)	1,639	1,254	0,243
		$R^2$	0,784	0,744	0,298
Freundlich	$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e$	$K_F$ (L/mg)	4,267	3,349	3,384
		$n$	0,229	0,499	0,820
		$R^2$	0,994	0,944	0,963
D-R	$\ln Q_e = \ln Q_{D-R} - \beta \varepsilon^2$	$Q_{D-R}$ (mg/g)	113,216	65,911	47,508
		$\beta$ (mol <sup>2</sup> /J <sup>2</sup> )	$4 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-4}$
		$E_{fe}$ (kJ/mol)	0,112	0,085	0,032
		$R^2$	0,940	0,954	0,939

Biyosorpsiyon kinetiği çalışmalarında yalancı-birinci derece (YBD) ve yalancı-ikinci derece (YID) kinetik modellerinden faydalanılmıştır. YBD kinetik model Lagergren’in birinci derece hız denkleminde yararlanılarak hesaplanmaktadır (Lagergren, 1898). YBD kinetik modelin yetersiz

kaldığı durumlarda kullanılan YID kinetik modelden yararlanılmaktadır (Ho ve McKay, 1998). Ayrıca biyosorpsiyon mekanizmasının ve kinetiği etkileyen hız kontrol adımlarının daha iyi anlaşılabilmesi için Weber-Morris parçacık içi difüzyon modelinden de yararlanılmıştır. Parçacık içi difüzyon modeline göre sorpsiyon işlemi dış yüzey sorpsiyonu, parçacık içi difüzyon fazı ve çözeltideki düşük sorbat derişiminin parçacık içi difüzyonun yavaşlamasına neden olduğu denge fazı şeklinde üç fazdan oluşmaktadır (Weber ve Morris, 1963). Kinetik modellere ait denklemler ve deneysel sonuçlar yardımıyla hesaplanan kinetik parametreler Tablo 2’de gösterilmiştir. Sonuçlara göre, yüksek  $R^2$  değerlerinin yanı sıra biyosorpsiyonun deneysel ve hesaplanan  $q_e$  değerlerinin YID kinetik modelle uyumlu olduğu görülmektedir. Tablo 3’te farklı biyosorbentlerin boyar madde giderimine ait kinetik ve izoterm modeller gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre *B. edulis* biyokütlesinin boyar madde giderimi için etkili bir biyosorbent olacağı düşünülmektedir.

**Tablo 2.** Kinetik modellerine ait denklemler ve parametreler

Model	Denklem	Sıcaklık			
		298	308	318	
YBD	$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$	$q_e$ (mg/g) (deneysel)	136,149	83,414	49,048
		$k_1$ (d <sup>-1</sup> )	0,042	0,040	0,032
		$q_e$ (mg/g)	123,998	78,668	50,096
		$R^2$	0,975	0,909	0,972
YID	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$	$k_2 \times 10^3$ (g/mg d)	0,351	0,702	0,587
		$q_e$ (mg/g)	156,250	86,207	48,139
		$R^2$	0,987	0,980	0,992
Weber Morris	$q_t = K_{id} t^{1/2} + C$	$K_{id}$ (mg/g d)	1,561	0,766	0,617
		$C$ (mg/g)	60,139	37,270	15,668
		$R^2$	0,803	0,934	0,894

**Tablo 3.** Boyar madde gideriminde farklı biyosorbentlerin kinetik ve izoterm modelleri

Biyosorbent	Boyar madde	$q_e$ (mg/g)	% Giderim	İzoterm modeli	Kinetik model	Kaynaklar
<i>Trichoderma harzianum</i>	Reaktif	-	97,47	Freundlich	-	Karthik ve ark., 2019
<i>Lactarius salmonicolor</i>	Reaktif	109,69	-	Langmuir	YID	Karagöz, 2015
Manyetik özellik kazandırılmış <i>Lactarius salmonicolor</i>	Reaktif	115,23	-	Langmuir	YID	Karagöz ve ark., 2018
<i>Lactarius salmonicolor</i>	Remazol	126,57	99,82	Freundlich	YID	Göçenoğlu Sarıkaya, 2022
<i>Lactarius salmonicolor</i>	Marine Blue					
<i>Agaricus campestris</i>	Direct Blue 2	38,56	93,39	Freundlich	YID	Göçenoğlu Sarıkaya ve Erden, 2020
<i>Boletus edulis</i>	Direct Blue 2	136,149	-	Freundlich	YID	Mevcut Çalışma

Biyosorpsiyon termodinamiğinin hesaplanabilmesi için Gibbs serbest enerji ( $\Delta G^0$ ), entropi ( $\Delta S^0$ ) ve entalpi ( $\Delta H^0$ ) değişimleri van't Hoff eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır (Denklem 3).

$$\ln K_L = -\frac{\Delta H^0}{RT} + \frac{\Delta S^0}{R} \quad (3)$$

Denklemden verilen  $K_L$  Langmuir denge sabitini,  $T$  (K) mutlak sıcaklığı,  $R$  ise evrensel gaz sabitini (8,314 J/mol K) belirtmektedir.  $\Delta S^0$  (J/mol K) ve  $\Delta H^0$  (kJ/mol) değerleri  $K_L$ 'ye karşı çizilen  $1/T$  grafiğinden hesaplanmaktadır (Denklem 4).

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (4)$$

Elde edilen deneysel veriler yardımıyla hesaplanan termodinamik parametreler Tablo 4'te verilmiştir.  $\Delta G^0$  değerinin negatif olması biyosorpsiyonun kendiliğinden gerçekleştiğini, negatif  $\Delta H^0$  değeri ise biyosorpsiyonun ekzotermik karakterde olduğunu göstermektedir.

**Tablo 4.** Termodinamik modele ait parametreler

	$\Delta H^o$	$\Delta S^o$	
	-15,571	49,886	
<b>T (K)</b>	298	308	318
$\Delta G^o$ (kJ/mol)	-30,437	-30,936	-31,434

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada biyosorbent olarak hazırlanan *B. edulis* biyokütlesinin sulu çözeltilerden DB2 boyar maddesinin giderimindeki etkinliği çalışılmıştır. Optimum koşullar 0,02 g biyosorbent miktarının kullanıldığı biyosorpsiyon prosesinde maksimum biyosorpsiyon kapasitesi pH: 3,0'te 25 °C için 200 mg/L başlangıç DB2 derişimi için 136,149±0,801 mg/g olarak bulunmuştur. Biyosorpsiyonun doğasının aydınlatılabilmesi için izoterm ve kinetik parametreler hesaplanmış, elde edilen verilere göre prosesin Freundlich izoterm modeline ve YID kinetik modele uyumlu olduğu bulunmuştur. Termodinamik parametrelerin hesaplanması ile biyosorpsiyonun ekzotermik karakterde olduğu ve kendiliğinden gerçekleştiği bulunmuştur. Sonuç olarak yenilebilir bir mantar türü olan *B. edulis* mantarından elde edilen biyokütlenin sulu çözeltilerden DB2 boyar maddesinin biyosorpsiyonunda etkin olduğu düşünülmektedir. Biyosorpsiyon çalışmalarında biyosorbentin rejenerasyonu ve tekrar kullanımı oldukça önemlidir. Biyosorbentin tekrar ve etkin bir şekilde kullanımı açısından farklı rejenerasyon ajanlarıyla desorpsiyon çalışmaları yapılarak, ilerleyen çalışmalarda biyosorbentin tekrar kullanımı araştırılabilir.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

## Kaynaklar

- Adel, M., Ahmed, M.A., Mohamed, A.A. (2021). Effective removal of indigo carmine dye from wastewaters by adsorption onto mesoporous magnesium ferrite nanoparticles. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 65, 100550.
- Aracagök, Y.D. (2022). Biosorption of lead by a soil isolate *Aspergillus neoalliaceus*. *Archives of Microbiology*, 204, 547.
- Asliyüce, S. (2023). Screening the heavy metal removal capacity of magnetically modified fungal biosorbent, *Chemical Papers*, <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02782-8>.
- Başkan, G., Açıklı, Ü., Levent, M. (2023). Removal of oxytetracycline hydrochloride from aqueous solutions using natural zeolite, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(3), 1505-1517.
- Bayramoğlu, G. ve Arica, M. Y. (2008). Removal of heavy mercury (II), cadmium (II) and zinc (II) metal ions by live and heat inactivated *Lentinus edodes* pellets. *Chemical Engineering Journal*, 143, 133– 140.
- Bayramoğlu, G., Gursel, I., Tunali, Y., Arica, M. Y. (2009). Biosorption of phenol and 2-chlorophenol by *Funalia trogii* pellets. *Bioresource Technology*, 100, 2685-2691.
- Bonyandi, Z., Nasoudari, E., Ameri, M., Ghavami, V., Shams, M., Sillanpää, M. (2022). Biosorption of malachite green dye over *Spirulina platensis* mass: process modeling, factors optimization, kinetic, and isotherm studies. *Applied Water Science*, 12, 167.
- Bouras, H.D., Isik, Z., Arıkan, E.B., Yeddou, A.R., Bouras, N., Chergui, A., Favier, L., Amrane, A., Dizge, N. (2021). Biosorption characteristics of methylene blue dye by two fungal biomasses. *International Journal of Environmental Studies*, 78,(3), 365-381.
- Cüce, H. ve Temel, F.A. (2021a). Classical-fenton and photo-fenton oxidation of wastewater arising from cosmetic automobile care products. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40(6), e13701.
- Cüce, H. ve Temel, F.A. (2021b). Reuse of agro-wastes to treat wastewater containing dyestuff: sorption process with potato and pumpkin seed wastes. *International Journal of Global Warming*, 24(1), 14-37.
- Cüce, H. ve Temel, F.A. (2023). Efficient removal performance of COD in real laundry wastewater via conventional and photo-fenton degradation systems: a comparative study on oxidants and operating time by  $H_2O_2/Fe^{2+}$ . *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48, 15823-15835.
- Dehghani, M.H., Karri, R.R., Yeganeh, Z.T., Mahvi, A.H., Nourmoradi, H., Salari, M., Zarei, A., Sillanpää, M. (2020). Statistical modelling of endocrine disrupting compounds adsorption onto activated carbon prepared from wood using CCD-RSM and DE hybrid evolutionary optimization framework: Comparison of linear vs non-linear isotherm and kinetic parameters. *Journal of Molecular Liquids*, 302, 112526.
- Dubin, M.M. ve Radushkevich, L.V. (1947). The equation of the characteristic curve of activated charcoal. *Proceeding of the Academy of Sciences, Physical Chemistry Section*, 55, 331.
- Erdem, F., Tosun, A., Ergun, M. (2016). Biosorption of Remazol Yellow (RR) by *Saccharomyces cerevisiae* in a batch system. *Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(4), 971-978.
- Erdoğdular, A.O. ve Kılıç Apar D. (2021). Biosorption of reactive dye Remazol Ultra Red RGB by metabolically active kefir biomass. *Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(2), 1055-1073.
- Freundlich, H. (1906). Over the adsorption in solution. *The Journal of Physical Chemistry*, 57, 385.
- Göçenoğlu Sarıkaya, A. (2021). Kinetic and thermodynamic studies of the biosorption of Cr (VI) in aqueous solutions by *Agaricus campestris*. *Environmental Technology*, 42(1), 72-80.
- Göçenoğlu Sarıkaya, A. (2022). Biosorption of Remazol Marine Blue textile dye by *Lactarius salmonicolor* biomass: Kinetic, isothermal and thermodynamic parameters. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(2), 1121-1137.
- Göçenoğlu Sarıkaya, A. ve Erden E. (2020). Direct Blue 2 tekstil boyar maddesinin *Agaricus campestris* biyokütlesi tarafından biyosorpsiyonu: Kinetik, İzotermal ve Termodinamik çalışmalar. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 13(1), 258-273.
- Gürel, L. (2017). Applications of the biosorption process for nickel removal from aqueous solutions- a review. *Chemical Engineering Communications*, 204(6), 711-722.
- Ho, Y.S. ve McKay G. (1998). Sorption of dye from aqueous solution by peat, *Chemical Engineering Journal*, 70, 115- 124.

- Jia, M., Wang, F., Bian, Y., Jin, X., Song, Y., Kengara, F. O., Xu, R., Jiang, X. (2013). Effects of pH and metal ions on oxytetracycline sorption to maize-straw-derived biochar. *Bioresource Technology*, 136, 87-93.
- Karagöz, R. (2015). Manyetik *Lactarius salmonicolor* biyokütlesi ile Reaktif sarı 2 biyosorpsiyonunun istatistiksel tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Karagöz, R., Tunali Akar, S., Turkyilmaz, S., Celik, S., Akar, T. (2018). Process design and potential use of a regenerable biomagsorbent for effective decolorization process. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 93, 554-565.
- Karthik, V., Sivarajasekar, N., Padmanaban, V.C., Nakkeeran, E., Selvaraju, N. (2019). Biosorption of xenobiotic Reactive Black B onto metabolically inactive *T. harzianum* biomass: optimization and equilibrium studies. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 3625-3636.
- Lacerda, E.C.M., Baltazar, M.P.G., dos Reis, T.A., do Nascimento, C.A.O., Correa, B., Gimenes, L.J. (2019). Copper biosorption from an aqueous solution by the dead biomass of *Penicillium ochrochloron*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 247.
- Lagergren, S. (1898). Zur theorie der Sogenannten Adsorption Gelöster Stoffe, *Kungliga svenska vetenskapsakademiens, Handlingar*, 24(4), 1-39.
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of American Chemical Society*, 40, 1361-1403.
- Li, H.-h., Wang, Y.-t., Wang, Y., Wang, H.-x., Sun, K.-k., Lu, Z.-m. (2019). Bacterial degradation of anthraquinone dyes. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B*, 20(6), 528-540.
- Mazloomi, S., Ghodsei, S., Amraei, P., Bonyadi, Z. (2018). Data on the removal of turbidity from aqueous solutions using polyaluminum chloride. *Data Brief*, 20, 371-374.
- Mutlu, H. ve Kılıç Apar, D. (2023). Conventional and sonication-assisted biosorption of Remazol Orange RGB dye by active kefir biomass. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(4), 1979-1993.
- Namal, O.O, Kalipci, E. (2020). Adsorption kinetics of methylene blue removal from aqueous solutions using potassium hydroxide (KOH) modified apricot kernel shells. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 100(14), 1549-1565.
- Puchana-Rosero, A.J., Lima, E.C., Ortiz-Monsalve, S., Mella, B., da Costa, D., Poll, E., Gutterres, M. (2017). Fungal biomass as biosorbent for the removal of acid Blue 161 dye in aqueous solution. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 4200-4209.
- Raja, C.P., Jacob, J.M., Balakrishnan, R.M. (2015). Selenium biosorption and recovery by marine *Aspergillus terreus* in an upflow bioreactor. *Journal of Environmental Engineering*, 142, C4015008.
- Ramavandi, B., Najafpoor, A.A., Alidadi, H., Bonyadi, Z. (2019). Alizarin red-S removal from aqueous solutions using *Saccharomyces cerevisiae*: kinetic and equilibrium study. *Desalination and Water Treatment*, 144, 286-291.
- Sarikurkcu, C., Tepe, B., Yamac, M. (2008). Evaluation of the antioxidant activity of four edible mushroom from the Central Anatolia, Eskişehir-Turkey: *Lactarius deterrimus*, *Suillus collitinus*, *Boletus edulis*, *Xerocomus chrysenteron*, *Bioresource Technology*, 99(14), 6651-6655.
- Sen, T.K., Afroze, S., Ang, H. (2011). Equilibrium, kinetics and mechanism of removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto pine cone biomass of *Pinus radiata*. *Water Air and Soil Pollution*, 218(1), 499-515.
- Sinha, A.K., Sasmal, A.K., Pal, A., Pal, D., Pal, T. (2021). Ammonium phosphomolybdate [(NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>PMo<sub>12</sub>O<sub>40</sub>] an inorganic ion exchanger for environmental application for purification of dye contaminant wastewater. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 418, 113427.
- Tan, Y., Zeng, N.-K., Xu, B. (2022). Chemical profiles and health-promoting effects of porcini mushroom (*Boletus edulis*): a narrative review. *Food Chemistry*, 390, 133199.
- Tuncay, D., Yagar, H. (2020). Decolorization of Reactive blue-19 textile dye by *Boletus edulis* laccase immobilized onto rice husks. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 3177-3188.
- Weber, W. ve Morris, J. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(2), 31-60.