

Bakır (II) İyonlarının Bakteriyel Biyosorbent ile Giderimi: Biyosorpsiyonun İzoterm ve Kinetik Modellerle Açıklanması

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 13.06.2025

Kabul/Accepted: 14.11.2025

Yayımlandı/Published: 08.04.2026

Removal of Copper (II) Ions Using a Bacterial Biosorbent: Explanation of Biosorption Through Isotherm and Kinetic Models

Seda ŞEN^{1,2} , Nur KOÇBERBER KILIÇ^{1*} 

¹Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü 06100, Beşevler, Ankara, Türkiye

²Ankara Fen Bilimleri Üniversitesi, 06110, Dışkapı, Ankara, Türkiye



© 2026 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Endüstriyel atıksulardan, Cu(II) ağır metalinin ortamdaki uzaklaştırılması çevresel ve ekolojik dengeyi korumak açısından büyük önem taşımaktadır. Biyolojik arıtım yollarından biyosorpsiyon yoluyla bu tip suların arıtımı, çevre dostu, uygun maliyetli, sürdürülebilir bir yaklaşımdır. Tamamlanan çalışmada, toksik bir ağır metal olan Cu(II), *Leclercia adecarboxylata* bakterisinin ölü biyokütlesi kullanılarak sulu ortamdaki uzaklaştırılmıştır. Denemelerde optimum biyosorpsiyon koşulları belirlenmiştir. Alınan verilere göre optimum pH değeri 5 olarak bulunmuştur. En yüksek Cu(II) biyosorpsiyonuna (%66.5, temas süresi: 120 dakika) başlangıç biyosorbent dozu 2 g/L olduğunda ulaşılmıştır. Başlangıç kirletici konsantrasyonunun (25-700 mg/L) biyosorpsiyona etkisi incelendiğinde, denenen tüm konsantrasyonlarda biyosorpsiyonun etkin yapıldığı görülmüştür. Biyosorbent yüzey morfolojisi, giderim öncesi ve sonrası SEM ile incelenmiş ve biyosorbent tutunma bölgeleri fiziksel olarak gözlemlenerek EDS analizi ile biyosorpsiyon süreci sonrası metal varlığı doğrulanmıştır. Kinetik ve izoterm analizleri, biyosorpsiyonun Freundlich izotermine ve yalancı ikinci derece kinetik modele iyi uyum sağladığını, bunun çok katmanlı ve kimyasal kontrollü bir süreç olduğunu göstermiştir. Deneysel veriler, kuru *L. adecarboxylata* biyosorbentinin özgül yüzey morfolojisiyle yüksek biyosorpsiyon kapasitesi sergileyerek ağır metal biyosorpsiyon süreçlerinde sürdürülebilir, ekonomik ve çevreyle uyumlu bir ajan olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Ağır metal; *L. adecarboxylata*; Biyosorpsiyon; SEM; İzoterm, Kinetik.

Abstract

The removal of Cu(II), a heavy metal, from industrial wastewater is of great importance for the protection of environmental and ecological balance. Among biological treatment methods, biosorption offers an eco-friendly, cost-effective, and sustainable approach for the purification of such wastewater. In this study, the toxic heavy metal Cu(II) was removed from an aqueous medium using the dead biomass of *Leclercia adecarboxylata*. Optimum biosorption conditions were determined through experimental trials. Based on the obtained data, the optimal pH was found to be 5. The highest Cu(II) biosorption efficiency (66.5%, contact time: 120 minutes) was achieved with an initial biosorbent dose of 2 g/L. When the effect of initial pollutant concentration (25–700 mg/L) on biosorption was examined, efficient biosorption was observed across all tested concentrations. The surface morphology of the biosorbent before and after metal removal was examined using SEM, and the attachment regions of the biosorbent were physically observed. The presence of metal on the biosorbent surface after the biosorption process was confirmed via EDX analysis. Kinetic and isotherm analyses indicated that the biosorption process followed the Freundlich isotherm and the pseudo-second-order kinetic model, suggesting a multilayer and chemically controlled mechanism. Experimental data demonstrated that the dried *L. adecarboxylata* biosorbent, with its specific surface morphology, exhibits high biosorption capacity and can be considered a sustainable, economical, and environmentally compatible agent for heavy metal biosorption processes.

Keywords: Heavy metal; *L. adecarboxylata*; Biosorption; SEM; Isotherm; Kinetics.

1. Giriş

Endüstriyel ve beşerî faaliyetler sonucu ağır metal içeren atıksuların herhangi bir arıtım sürecine tabi tutulmaksızın çevreye deşarj edilmesi, ekosistem dengesini bozmakta ve canlı sağlığı açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır (Su vd., 2023). Ağır metaller (Cu²⁺, Fe³⁺, Pb²⁺, As³⁺, Hg²⁺, Ag⁺, Cr⁶⁺, Zn²⁺, Cd²⁺), eser miktarlarda da yüksek toksisiteye sahip olup, aynı zamanda biyolojik olarak parçalanmamaları, besin zincirinde birikmeleri, mutajenik

ve kanserojen etkiler göstermeleri nedeniyle tüm canlı formlarına sorun oluşturmaktadır (Abed El Aziz vd., 2017; Orozco vd., 2023). Bu ağır metaller arasında Cu(II) madencilik, kâğıt üretimi, matbaacılık, elektro kaplama ve kimyasal üretim gibi birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılan bir kirleticidir (Boddu vd., 2022). Bu kirletici, tüm canlılar için yüksek düzeyde toksisiteye sahip olup; insanlarda karaciğer hasarı, böbrek yetmezliği, gastrointestinal bozukluklar ve kanser gibi ciddi sağlık

sorunlarına neden olmaktadır (Shankar vd., 2023). Bu kirliliğin önlenmesi için etkin ve maliyet açısından uygun arıtma sistemlerinin oluşturulması gerekmektedir (Ordóñez vd., 2023). Günümüzde ağır metal arıtımında, yaygın olarak kullanılan yöntemler; kimyasal çöktürme, kimyasal oksidasyon ve indirgeme, elektrokimyasal arıtım, çözücü ekstraksiyonu, iyon değişimi, ters ozmoz, buharlaştırılmalı geri kazanım ve adsorpsiyon gibi konvansiyonel teknikler olup, bu yöntemler sulu çözeltilerden ağır metallerin gideriminde en sık başvurulan uygulamalardır (Aryal ve Liakopoulou-Kyriakides, 2015). Ancak bu yöntemlerin büyük bir kısmı, yüksek maliyetleri, uzun işlem süreleri ve zehirli çamur oluşumu gibi çevresel açıdan olumsuz yan etkileri nedeniyle endüstriyel ölçekte uygulanabilirlik açısından çeşitli kısıtlamalar taşımaktadır (Shankar vd., 2023; Rizvi vd., 2020). Ayrıca, bu teknikler 100 mg/L'nin altında çözünmüş metal iyonu içeren endüstriyel atıksuların arıtımı için ekonomik olmayan ve uygulama açısından elverişsiz yöntemlerdir (Gabr vd., 2008). Bu sorunlara bir çözüm olarak, basit işletim prensibi, düşük maliyet, yüksek verimlilik ve çevre dostu özellikleri nedeniyle biyoremediasyon gibi alternatif arıtım yöntemlerine yönelinmiş ve son yıllarda bu yöntemler üzerine yoğunlaşmıştır (Kamarudzaman vd., 2021). Bakteriler, mantarlar ve mikroalgler gibi mikroorganizmalar, milyonlarca yıl boyunca gelişen stres mekanizmaları sayesinde ekstrem çevresel koşullara, özellikle de toksik ağır metallerle karşı tolerans geliştirmiş olup; bu organizmaların ağır metal iyonlarını detoksifiye etme, daha az toksik formlara dönüştürme ve hücre yüzeyine adsorbe etme yetenekleriyle bilim insanlarının dikkatini çekmiştir (Merino ve ark., 2019; Dhaliwal ve ark., 2020).

Biyosorpsiyon, büyüme göstermeyen biyokütle (canlı veya ölü biyokütle) veya adsorbanlar tarafından metal iyonlarının hızla tutulması süreci olarak tanımlanmaktadır (Abbas ve ark., 2014). "Biyosorpsiyon" terimi biyolojik kökenli bileşenleri ifade ederken, "sorpsiyon" ise çözünen madde parçacıklarının biyokütle yüzeyine yapışmasını ifade etmektedir (Aryal ve Liakopoulou-Kyriakides, 2015). Farklı biyosorbanların kullanıldığı biyosorpsiyon, ağır metal gideriminde belirli metallerle karşı yüksek seçicilik göstermesi ve etkin metal uzaklaştırma verimliliği gibi çeşitli avantajlara sahiptir (Priyadarshane ve Das, 2021). Literatürde, Cu(II) ağır metal iyonunun giderimine yönelik olarak farklı adsorbanların kullanıldığı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, Milosavljević ve ark. (2011) çalışmada, kitosan-itakonik ve metakrilik asit hidrojel kompozitlerinin Cu(II) iyonlarını 122.59 mg/g kapasiteyle adsorpladığı, adsorpsiyonun pseudo-ikinci dereceden kinetiğe uyduğu ve hidrojinin çoklu kullanıma uygun

olduğu göstermiştir. Bir başka çalışmada, Wang ve ark. (2025), farklı günlerde toplanan kurutulmuş aktif çamurun (KAÇ), Cu(II) biyosorpsiyon performansını karşılaştırmış; en yüksek adsorpsiyon kapasitesini [optimum koşullar: 3 saat temas süresi, pH 3–5, 0.1 g KAÇ, 100 mg/L Cu(II)] 40.32 mg/g olarak bulmuş ve kinetik analizler pseudo-ikinci dereceden modeli desteklemiştir. Bir diğer çalışmada ise, *Azadirachta indica* yaprağının tozu kullanılarak Cu(II) iyonlarının biyosorpsiyonu incelenmiş; optimal koşullarda (pH 5–6, 333 K, 1.0 g/L adsorban dozu) yüksek bir adsorpsiyon kapasitesi elde edilmiş, adsorpsiyonun ağırlıklı olarak kemisorpsiyon mekanizmasıyla gerçekleştiği belirtilmiştir (Ang vd., 2012). Bunun yanı sıra, bakteri, alg ve mantar gibi diğer mikroorganizmalar kullanılarak Cu(II) biyosorpsiyonu üzerine yapılmış çeşitli çalışmalar da mevcuttur. Örneğin, Baran vd. (2021) çalışmada, *Bacillus licheniformis* sp. *B. subtilis* ve *B. subtilis* (ATCC 6051) türleri kullanılarak içme, atık ve nehir sularından Cd(II), Cu(II), Pb(II), Fe(II), Ni(II) ve Zn(II) iyonlarının biyosorpsiyonu incelenmiş; pH 6'da %98'e varan yüksek giderim verimi elde edilmiş ve adsorpsiyonun yüzey morfolojisi SEM ve EDAX analizleriyle incelenmiştir. Bir başka çalışmada Rajendran vd., (2025) ise, yüksek Cu(II) toleransına sahip *Klebsiella pneumoniae* (V1) ve *Cronobacter sakazakii* (V2) suşlarının meyve, süt ve un atıklarından izole etmiştir. Aynı çalışmada, ikili biyosorbentin pH 5–6, 30 °C ve 30 dakikalık temas süresi altında %91.3'e varan Cu(II) biyosorpsiyon verimi elde edilmiş; giderimin Freundlich ve Langmuir izoterm modelleriyle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. *Pantoea agglomerans*'ın liyofilize biyokütlesi kullanılarak yapılan çalışmada da, pH 5.0, 250 mg/L Cu(II) konsantrasyonunda ve 90 dakikalık temas süresinde en yüksek Cu(II) giderimi elde edilmiş; biyosorpsiyon verileri Langmuir ve Freundlich izotermine uyum gösterirken, kinetik analizlerde ise yalancı ikinci dereceden modele en iyi uyum gözlenmiştir (Kıvanc ve Okus, 2022).

Bu bağlamda, mevcut çalışmada yüksek toksisiteye sahip bir ağır metal olan Cu(II)'nin, çevre dostu, ekonomik, hızlı ve etkili bir arıtım yöntemi olan biyosorpsiyon süreci ile sulu ortamdan uzaklaştırılması hedeflenmiştir. Çalışmanın temel amacı, *Leclercia adecarboxylata* bakterisine ait ölü biyokütlenin potansiyel bir yerli biyosorban olarak kullanılmasıyla Cu(II) iyonlarının giderimini araştırmaktır. Biyosorpsiyon performansı; farklı pH seviyeleri, başlangıç metal iyonu ve biyokütle konsantrasyonları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ayrıca biyosorbentin karakterizasyonu için SEM ve EDS analizleri kullanılarak yüzey özellikleri ile Cu(II) tutulumunun doğrulanması amaçlanmıştır. Bununla birlikte süreç, adsorpsiyon kinetiği ve izotermi ile analiz edilerek biyosorpsiyon

mekanizması detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışma, literatürde sınırlı sayıda yer alan yerli *L. adecarboxylata* temelli biyosorpsiyon uygulamalarına katkı sağlamayı ve sürdürülebilir ağır metal giderimi konusunda yeni bir biyosorban alternatifi sunmayı hedeflemektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Bakteriyel Suş, Kültür Koşulları ve Biyosorbent'in Hazırlanması

Biyosorbent olarak kullanılan *L. adecarboxylata* (GenBank no: PP886272), Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü Biyoremediasyon Araştırma Laboratuvarı kültür koleksiyonundan temin edilmiştir. Bakteri, %8 (v/v) melas içeren melaslı besiyerinde (MB) (Aksu ve Dönmez, 2000), 30°C'de, 100 rpm hızla çalışan çalkalayıcı inkübatörde (NB 205 V, Kore) geliştirilmiştir.

Biyokütle eldesi için, geliştirilen bakteri, 6000 rpm'de 10 dakika santrifüjlenmiştir (Hermle Z207A, Almanya). Elde edilen bakteriyel biyokütle, cam petride 70°C'de 24 saat boyunca etüde kurutulmuştur. Kurutulan biyokütle, steril metal spatül ile yüzeyden kazınarak toplanmış ve seramik havanda öğütülerek homojen hale getirilmiştir. Hazırlanan biyosorbent, biyosorpsiyon deneylerinde kullanılmak üzere +4°C'de muhafaza edilmiştir.

2.2 Bakır(II) Stok Solüsyonu

Bakır(II) stok solüsyonu, CuSO₄·5H₂O (Merck) kimyasalı kullanılarak 2 g/L olarak hazırlanmıştır. Stok çözelti istenilen konsantrasyonlarda seyreltmeler yapılarak sulu ortama eklenmiştir.

2.3 Farklı Ortam Koşullarında Cu(II) Biyosorpsiyonu

Denemelerin bu aşamasında, farklı pH, artan *L. adecarboxylata* biyokütle ve artan başlangıç metal iyonu konsantrasyonlarının *L. adecarboxylata* tarafından Cu(II) biyosorpsiyonu üzerine etkisi araştırılmıştır.

2.3.1 pH'nın Cu(II) Biyosorpsiyonuna Etkisi

Deneyde, *L. adecarboxylata*'nın Cu(II) biyosorpsiyonunda en uygun pH değerini belirlemek amacıyla, 25 mg/L Cu(II) içeren ortamda 3, 4, 5 ve 6 olmak üzere dört farklı pH değerinde biyosorpsiyon denemeleri gerçekleştirilmiştir.

2.3.2 Başlangıç Biyosorbent Konsantrasyonunun Cu(II) Biyosorpsiyonuna Etkisi

Araştırmanın bu aşamasında, Cu(II) biyosorpsiyonunda etkili biyosorbent dozunu belirlemek amacıyla, 22.3 mg/L kirlenici içeren ortamda, farklı konsantrasyonlarda (0.1 g/L, 0.25 g/L, 0.5 g/L, 1 g/L, 2 g/L) *L. adecarboxylata* biyosorbentiyile deneyler gerçekleştirilmiştir.

2.3.3 Başlangıç Cu(II) Konsantrasyonunun Cu(II) Biyosorpsiyonuna Etkisi

En uygun pH ve biyosorbent dozunun belirlenmesinin ardından, Cu(II) iyonlarının en yüksek verimle uzaklaştırıldığı başlangıç ağır metal konsantrasyonunu tespit etmek amacıyla, artan konsantrasyonlarda, altı farklı Cu(II) konsantrasyonu (22.8 mg/L, 45.8 mg/L, 109.2 mg/L, 155.4 mg/L, 303.1 mg/L, 692.3 mg/L) kullanılarak biyosorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

2.7 Deneysel Analizler (Metodoloji)

Biyosorpsiyon denemeleri boyunca, 10, 15, 30, 60, 120, 240. dakikalarda 3 mL olacak şekilde örnekler alınmıştır. Örnekler, 6000 rpm'de 10 dakika santrifüjlenerek biyokütle çöktürülmüştür. Süpernatant ortamda kalan kirlenici konsantrasyonunu belirlemek amacıyla kullanılmıştır.

Bakır(II) ağır metalinin analiz yönteminde amonyak (NH₃) (Merck) solüsyonu ve sodyum dietilditiyokarbamat (Merck) çözeltisinin ortamda oluşturduğu sarı renkten yararlanılmıştır. Bakır(II), 460 nm'de dalga boyunda spektrofotometrik olarak ölçülmüştür. (Snell and Snell, 1959).

Cu(II) giderimi, pH, başlangıç biyokütle miktarı ve başlangıç metal konsantrasyonuna bağlı olarak değerlendirilmiş, giderim yüzdesi denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\% \text{Giderim} = \frac{(C_0 - C_s)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

C₀ başlangıç kirlenici konsantrasyonunu, C_s ise deney sonunda ortamda kalan Cu(II) konsantrasyonunu temsil etmektedir.

Her bir deneme çift paralel olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sulu ortamdaki pH'a bağlı bileşenler ile bakır metali arasındaki potansiyel doğrudan etkileşimlerden kaynaklanabilecek giderim miktarı, mikroorganizma biyosorpsiyon veriminin doğruluğunu sağlamak amacıyla sonuçlardan çıkarılmış ve bu amaçla kontrol denemeleri de yapılmıştır.

2.4. SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) Görüntüleme

Kuru *L. adecarboxylata* biyokütlesinin Cu(II) biyosorpsiyonu işleminden önce ve sonra morfolojik özelliklerini incelemek ve biyosorpsiyon sonrası biyosorbentteki Cu(II) varlığını doğrulamak amacıyla taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) entegre, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizi gerçekleştirilmiştir. Görüntüleme işlemi öncesinde, yüzey iletkenliğini artırmak ve yüksek çözünürlüklü analiz sağlamak amacıyla biyokütle örnekleri, 17 nm kalınlığında

karbon tabakası ile kaplanmıştır. SEM analizleri, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) sistemiyle entegre edilmiş GAI3 SEM (Oxford XMax 150 EDS) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

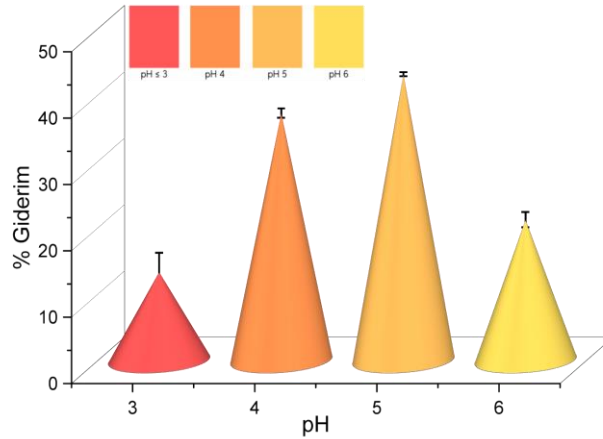
2.5 Adsorpsiyon Kinetiği ve İzoterm Çalışması

Bakır(II) biyosorpsiyon sürecinin değerlendirilmesinde, biyosorbent ile kirletici arasındaki etkileşimi anlamaya yönelik olarak izoterm ve kinetik modeller temel

hesaplama araçları olarak kullanılmıştır. İzoterm analizlerinde elde edilen veriler; Freundlich, Langmuir, Temkin ve Elovich modelleriyle değerlendirilmiştir. Kinetik değerlendirmede ise biyosorpsiyon hızını belirlemek amacıyla yalancı birinci ve ikinci dereceden doğrusal ve doğrusal olmayan modellerin yanı sıra parçacık içi difüzyon modeli uygulanmıştır. Bu modellere ait hesaplamalarda kullanılan tüm denklemler Tablo 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Bakır(II) biyosorpsiyonunda izoterm ve kinetik modeller

Modeller	Doğrusal Olmayan Form	Doğrusal Form	Sabitler
Yalancı birinci derece kinetik modeli	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$	$\ln \ln \left(\frac{q_e - q_t}{q_e} \right) = \ln \ln \left(\frac{q_e}{q_e} \right) - k_1 t$	k_1 (dk ⁻¹)
Yalancı ikinci derece kinetik modeli	$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t}$	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$	k_2 (g/mg dk)
Parçacık içi difüzyon kinetik modeli	$q_t = K_{diff} t^{1/2} + C$		K_{diff} (mg/g dk ^{1/2})
Freundlich izotermi	$q_e = K_F C_e^{1/n}$		K_F
Langmuir izotermi	$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$		K_L (L/mg) q_m (mg/g)
Temkin izotermi	$q_e = A + B \ln C_e$		A (L/g) B (J/mol)
Elovich izotermi	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln (\alpha \beta t + 1)$		R (8.314 J/mol K) α (mg/g dk) β (g/mg)



Şekil 1. *L. adedecarboxylata* ölü biyokütlesi tarafından Cu(II) biyosorpsiyonuna pH etkisi (pH: 3-6; C_0 :25 mg/L; T: 30°C; $V_{\text{çalışma}}$ solüsyonu: 40 mL; biyokütle konsantrasyonu: 0.25 g/L; temas süresi: 120 dakika)

3. Bulgular

3.1 Bakır(II) Biyosorpsiyonuna pH Etkisi

Deneyde biyosorpsiyon sürecinde pH'nın etkisini değerlendirmek amacıyla 3, 4, 5 ve 6 olmak üzere dört farklı pH değeri test edilmiştir. Her bir pH değerinde, 25 mg/L Cu(II) içeren sulu ortamda gerçekleştirilen deneylerdeki 120. dakika temas süresi sonundaki veriler Şekil 1'de sunulmuştur. Deney sonuçlarına göre, pH 3'te biyosorpsiyon verimi %13.3 olarak bulunmuştur. Aynı koşullar altında, pH 4'e yükseldiğinde ise biyosorpsiyon

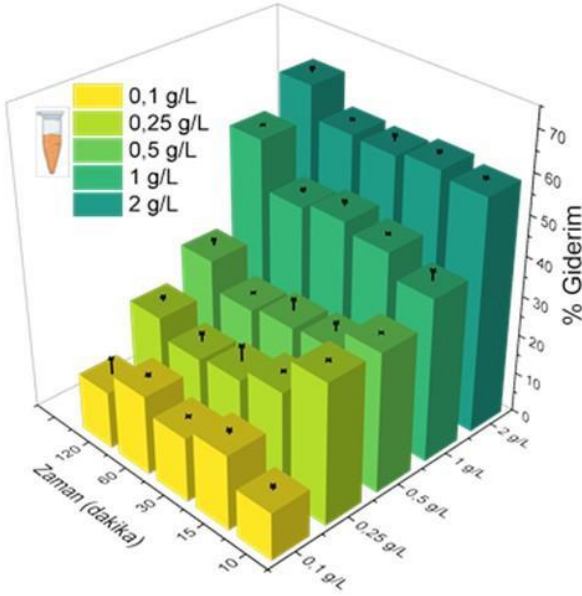
%37.3 olmuştur. En yüksek kirletici giderimin gözlemlendiği pH 5'te ise %43.1 verimle Cu(II) biyosorpsiyonu sağlanmıştır. Ortamdaki pH'nın daha da artmasıyla (pH 6) giderim %21.2 olarak kaydedilmiştir.

3.2 Bakır(II) Biyosorpsiyonunda Başlangıç Biyosorbent Konsantrasyonunun Etkisi

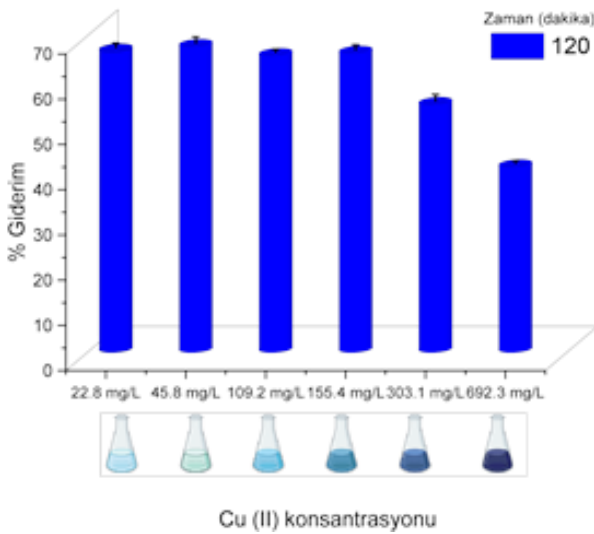
Bakır(II) giderimi için, en uygun biyokütle konsantrasyonunu belirlemek amacıyla 22.3 mg/L Cu(II) metali içeren sulu ortamda, 5 farklı biyosorbent dozuyla (0.1-2 g/L) denemeler gerçekleştirilmiştir. Biyosorpsiyon

sürecinin 10, 15, 30, 60 ve 120. dakikalarında elde edilen verilen şekil 2’de gösterilmiştir.

Şekil 2’de gösterilmiş olan verilere göre, 0.1 g/L biyokütle konsantrasyonunda inkübasyonun 10. dakikasında giderim %12, 120. dakikada %14.4 iken biyokütlenin 2.5 kat artırılmasıyla (0.25 g/L) biyosorpsiyon 10. dakikada %35.5 olarak bulunmuştur. Biyokütle konsantrasyonu 0.5 g/L ve 1 g/L olduğunda ise temas süresinin 10. ve 120. dakikasında sırasıyla %35.1, %35.5 ve %41, %58.6 giderime ulaşılmıştır. En yüksek biyosorbent dozu olan 2 g/L’de temas süresinin ilk 10 dakikasında giderim %58.6 iken 120. dakikada %66.5 şeklinde yüksek Cu(II) giderimi sağlanmıştır.



Şekil 2. Artan *L. adedecarboxylata* ölü biyokütlesinin Cu(II) biyosorpsiyonuna etkisi (Biyokütle konsantrasyonu: 0.1-2 g/L; pH: 5; C₀: 22.3 mg/L; T: 30°C; V_{çalışma} çözümü: 40 mL)



Şekil 3. Artan Cu(II) konsantrasyonunun Cu(II) biyosorpsiyonuna etkisi (Biyokütle konsantrasyonu: 2 g/L; pH: 5; C₀: 22.8-692.3mg/L; T: 30°C; V_{çalışma} çözümü: 40 mL)

3.3. Başlangıç Cu(II) Konsantrasyonunun Cu(II) Biyosorpsiyonuna Etkisi

Artan Cu(II) konsantrasyonunun biyosorpsiyon üzerine etkisini belirlemek amacıyla, altı farklı Cu(II) (25-700 mg/L) konsantrasyonunda, optimum pH (5) ve biyokütle konsantrasyonu (2.0 g/L) koşullarında denemeler yapılmıştır.

Şekil 3’te özetlenen verilere göre, 22.8 mg/L Cu(II) içeren ortamda inkübasyon süresinin 120. dakikasında %66.5 biyosorpsiyon kapasitesine ulaşılmıştır. Başlangıç Cu(II) konsantrasyonu 45.8 mg/L’ye yükseldiğinde bu sürede değer %68.9 olarak bulunmuştur. Bakır(II) konsantrasyonu 109.2 mg/L ve 155.4 mg/L olduğunda ise inkübasyonun 120. dakikasında sırasıyla %65.5 ve %69.1 verimle ortamdaki Cu(II) biyosorpsiyonu sağlanmıştır. Ortamda 303.1 mg/L Cu(II) varlığında 120. dakikada biyosorpsiyon kapasitesi %54.7 olarak kaydedilmiştir. En yüksek Cu(II) konsantrasyonunun denendiği 692.3 mg/L Cu(II) varlığında giderim kapasitesi 120. dakikada %40.9’a ulaşmıştır.

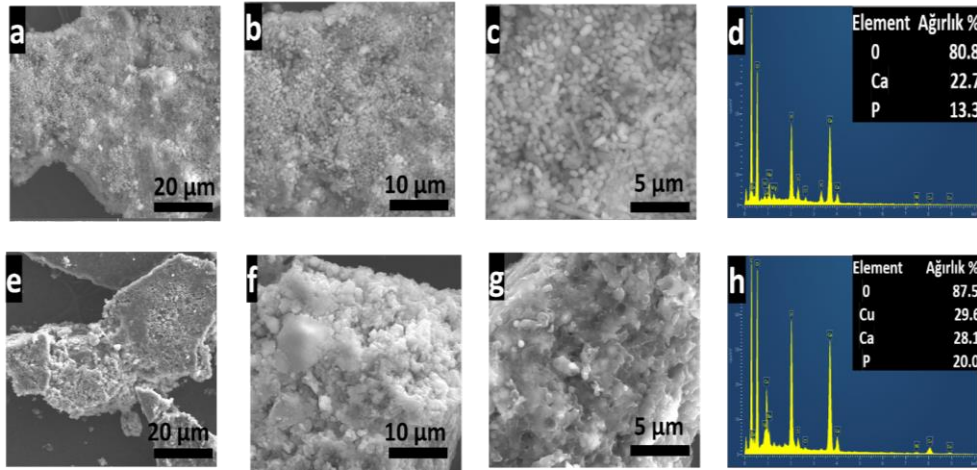
3.4. SEM & EDS ile Biyokütlenin Morfolojik Analizi

Ölü *L. adedecarboxylata* biyokütlesinin biyosorpsiyon öncesi ve sonrası yüzey morfolojisinin incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Bakır (II) biyosorpsiyonu öncesi ve sonrası yüzey bileşen dağılımları da EDS ile belirlenmiştir. Tüm bu görseller Şekil 4’te verilmiştir.

Şekil 4a, 4b ve 4c’deki SEM analizinde, öncelikle *Leclercia adedecarboxylata* biyosorbentinin herhangi bir kirletici ile muamele edilmemiş yüzey morfolojisi sunulmaktadır. Bu mikrograflar incelendiğinde, biyosorbent yüzeyinde gelişigüzel konumlanmış kristalin yapılar tarafından oluşturulmuş ağsı yapı gözlemlenmektedir.

Şekil 4e, 4f ve 4g’de ise *L. adedecarboxylata* biyosorbentinin Cu(II) metali ile biyosorpsiyonu sonrasında SEM mikrografları yer almaktadır. Biyosorpsiyon işlemi sonrası yüzey morfolojisinde meydana gelen değişiklikler açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu değişiklikler, biyosorbent ile kirletici arasındaki etkileşimin doğasını ve adsorpsiyon sürecinin etkilerini açıkça ortaya koymaktadır.

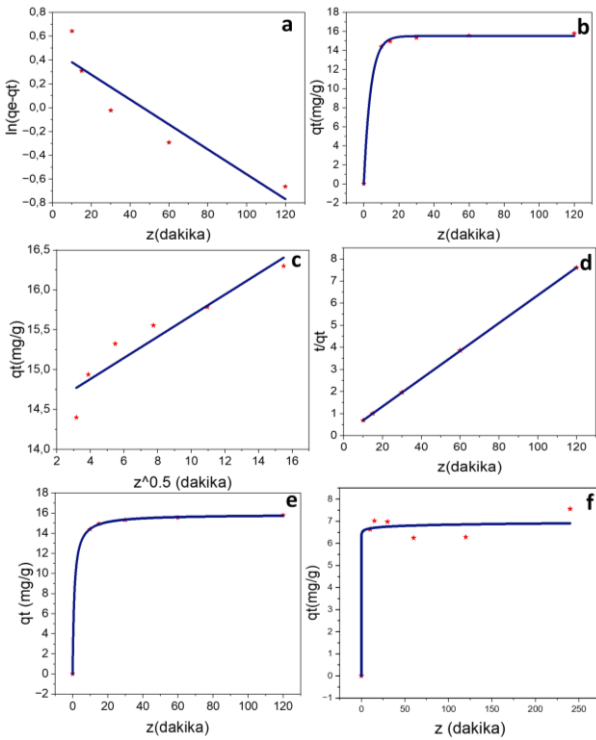
EDS analizinde, biyosorpsiyon öncesinde *L. adedecarboxylata* biyosorbentinde oksijen, kalsiyum ve fosfor elementlerinin varlığı tespit edilmiştir (Şekil 4d). Cu(II) biyosorpsiyonu sonrasında yapılan EDS elementel analizinde ise oksijen, kalsiyum ve fosfor elementlerine ek olarak Cu(II) (%29.6) metalinin varlığı da gözlemlenmiş ve bu durum biyosorbent tarafından Cu(II) biyosorpsiyonunun gerçekleştiğini doğrulamıştır (Şekil 4h).



Şekil 4. a, b, c Biyosorpsiyon öncesi ölü *L. adedecarboxylata* biyokütlesi SEM mikrografları, d Biyosorpsiyon öncesi ölü *L. adedecarboxylata* biyokütlesi EDS elementel analizi, e, f, g Cu(II) biyosorpsiyonu sonrası sonrası ölü *L. adedecarboxylata* biyokütlesinin SEM mikrografları, h Cu(II) biyosorpsiyonu sonrası ölü *L. adedecarboxylata* biyokütlesinin elementel analizi.

3.5. Kinetik çalışması

Bakır(II) iyonlarının adsorpsiyon kinetiği, yalancı birinci dereceden, yalancı ikinci dereceden, intra-partiküler difüzyon ve Elovich kinetik modelleri kullanılarak incelenmiştir ve ilgili grafikler Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. *L. adedecarboxylata* biyokütlesinin Cu(II) biyosorpsiyon kinetiği a yalancı birinci dereceden doğrusal, b yalancı birinci dereceden doğrusal olmayan, c yalancı ikinci dereceden doğrusal, d yalancı ikinci dereceden doğrusal, e Parçacık içi difüzyon f Elovich kinetik modeli

Adsorpsiyon kinetiği çalışmasında elde edilen deneysel veriler yalancı ikinci dereceden kinetik modele yüksek uyum göstermiştir. Bu modele ait korelasyon katsayısı (R^2) 0.9999 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, yalancı birinci dereceden kinetik modele ait korelasyon katsayısı olan 0.8637'ye kıyasla oldukça yüksektir.

Çizelge 2. Bakır(II) biyosorpsiyonuna ait kinetik modellerinden elde edilen değerler

Kinetik Modelleri	DeneySEL q_e	16.3 (mg/g)
Yalancı Birinci Dereceden Doğrusal Olmayan	q_e R^2	15.5 (mg/g) 0.9991
Yalancı Birinci Dereceden Doğrusal	q_e R^2	1.62 (mg/g) 0.8637
Yalancı İkinci Dereceden Doğrusal	q_e R^2	15.7 (mg/g) 0.9999
Yalancı İkinci Dereceden Doğrusal	q_e R^2	15.9 (mg/g) 0.9999
Parçacık İçi Difüzyon	K_{diff} C R^2	0.1324 14.35 0.8884
Elovich	α β R^2	$6,81 \times 10^{37}$ 13.78 0.970

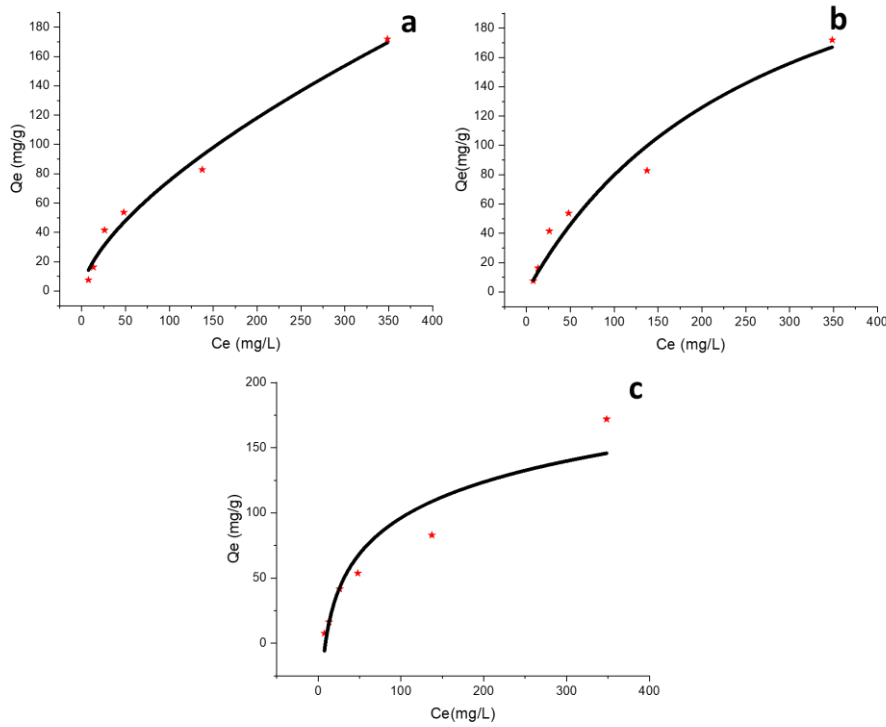
Yalancı ikinci dereceden kinetik modele göre teorik denge adsorpsiyon kapasitesi (q_e) değeri 15.9 mg/g olarak hesaplanmıştır. Bu değer, deneysel olarak elde edilen 16.3 mg/g'lık q_e değerine oldukça yakındır ve modelin geçerliliğini desteklemektedir. Buna karşılık, yalancı birinci dereceden kinetik modele göre hesaplanan q_e değeri 1.62 mg/g olup, deneysel değeri yeterince yansıtmamaktadır (Tablo 2). Bu sonuçlar, *L. adedecarboxylata* biyokütlesi ile gerçekleştirilen Cu(II) iyonlarının giderim sürecinin yalancı ikinci dereceden kinetik modele daha iyi uyduğunu göstermektedir. İntrapartikül difüzyon modelinden elde edilen sonuçlar, uyum eğrisinin orijinden sapsması ve nispeten düşük korelasyon katsayısı ($R^2 = 0.8884$) nedeniyle, bu

mekanizmanın adsorpsiyon sürecine katkıda bulunduğunu, ancak tek başına hız sınırlayıcı basamak olmadığını ortaya koymaktadır (Yang ve ark., 2017).

3.6 İzoterm çalışması

Biyosorpsiyon mekanizmasını daha iyi anlayabilmek adına, deneysel veriler Freundlich, Langmuir ve Temkin olmak üzere üç farklı temel adsorpsiyon izotermi modeliyle analiz edilmiştir. Grafikler Şekil 7’de sunulmuştur. Yapılan adsorpsiyon izoterm modelleme çalışmaları sonucunda, deneysel verilerin Freundlich izoterm modeline en iyi uyumu gösterdiği belirlenmiştir.

Freundlich modeline ait korelasyon katsayısı (R^2) 0.983 olup, bu değer Langmuir ($R^2 = 0.964$) ve Temkin ($R^2 = 0.905$) izotermine kıyasla daha yüksektir. Freundlich modelinin bu şekilde uyum sağlaması, çalışmada kullanılan *L. adecarboxylata* biyokütlesinin heterojen yüzey özelliklerine sahip olduğunu ve adsorpsiyon sürecinin karmaşık bir yapıda ilerleyebileceğini göstermektedir (Hegazy vd., 2023). Ayrıca n değeri 1.58 olarak 1’den büyük bulunmuştur (Tablo 3), bu da bakır iyonlarının uygun koşullarda biyosorpsiyonunun gerçekleştiğini temsil etmektedir (Khan vd., 2022).



Şekil 7. *Leclercia adecarboxylata* biyokütlesinin Cu(II) biyosorpsiyonunda a) Freundlich izoterm grafiği, b) Langmuir izoterm grafiği, c) Temkin izoterm grafiği

Çizelge 3. *Leclercia adecarboxylata* biyokütlesi tarafından Cu(II) biyosorpsiyonuna ait izoterm modellerinden elde edilen değerler

Freundlich	Langmuir	Temkin
R^2 : 0.983	R^2 : 0.964	R^2 : 0.905
K_F : 3.8	K_L : 0.00364	A: 0.112
n: 1.54	Q_m : 298.5	B: 39.75

4. Sonuçlar ve Tartışma

Elde edilen veriler, Cu(II) iyonlarının bakteriyel biyosorbentler aracılığıyla uzaklaştırılmasında biyosorpsiyon parametrelerinin süreç üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu parametreler arasında pH, mikroorganizmanın biyosorpsiyon kapasitesini doğrudan etkileyen ve metalin taşınımı ile bağlanma süreçlerinde kilit rol oynayan bir faktördür

(Ramachandran vd., 2022). Çalışmamızda, en yüksek giderim pH 5’de gerçekleşmiştir. Bizim çalışmamızda bulunan bu veri, daha önce literatürde farklı biyosorbentler kullanılarak gerçekleştirilen Cu(II) biyosorpsiyon çalışmalarındaki pH parametresi ile ilgili alınan sonuçlarla paraleldir.

Örneğin, Ang ve diğerleri (2013) Cu(II) iyonlarının biyosorpsiyonunda *Azadirachta indica* bitkisinin kuru sorbentini kullanmışlardır. Aynı çalışmalarda denemelerde, çözeltinin pH değeri, yüksek alkali koşullarda çökelme oluşması ve yüksek asidik ortamlarda ağır metal iyonlarının adsorpsiyon hızının azalması nedeniyle, optimum pH aralığını 5-6 arasında bulmuşlardır (Ofomaja vd., 2009; Ang vd., 2013). Başka bir çalışmada ise, *Klebsiella pneumonia* ve *Cronobacter sakazakii* bakterileri Cu(II) biyosorpsiyonunda

kullanılmıştır. Her iki suş için de maksimum Cu(II) biyosorpsiyonunun pH 5'te gerçekleştiği belirlenmiştir. Bakır(II) iyonlarının pH 5'te maksimum seviyede ortamdaki uzaklaştırılması durumunun, bağlanma bölgelerinin protonlanması nedeniyle, H⁺ ve Cu²⁺ iyonları arasında bağlanma bölgeleri için bir rekabetin gerçekleşmesinden kaynaklandığı gösterilmiştir (Sulaiman et al 2021). pH arttıkça proton rekabeti azalır ve yüzey fonksiyonel grupları bağlanma için kullanılabilir hale gelir; bu da pH 5–6 aralığında daha iyi biyosorpsiyon kapasitesi sağlamaktadır (Rajendran et al 2025). Öte yandan bakır, sulu çözeltilerde pH değerine bağlı olarak Cu²⁺, Cu(OH)⁺ ve Cu(OH)₂ gibi farklı formlarda bulunabilir; pH 5.0'te Cu(OH)₂'nin çözünürlüğünün yüksek olması nedeniyle çözeltide ağırlıklı olarak Cu²⁺ iyonları mevcutken, pH 5.0'ın üzerine çıktığında Cu(OH)₂'nin çözünürlüğü azalmakta ve bu da bakır iyonlarının çözeltiden çökmesine yol açmaktadır (Milosavljevic vd., 2011; Lee vd., 2003). Mevcut çalışmamızda elde edilen veriler, literatürde bildirilen bu bulgularla uyumlu olup, en yüksek biyosorpsiyon kapasitesi pH 5'te (%43.1) gerçekleşmiştir.

Bir diğer parametre olarak *L. adecarboxylata* biyokütlesinin artışının Cu(II) biyosorpsiyonu üzerindeki etkisi incelendiğinde, biyokütle miktarının artırılmasıyla birlikte Cu(II) iyonlarının biyosorpsiyon veriminde bir artış gözlemlenmiştir. Bakır(II) konsantrasyonu 22.3 mg/L olduğunda, 0.1 g/L biyokütle miktarında, inkübasyonun 120. dakikasında %14.4; 0.25 g/L biyokütle miktarında ise %26.5 verimle kirletici ortamdaki uzaklaştırılmıştır. En yüksek biyokütle konsantrasyonunda ise (2 g/L) giderim %66.5 olarak ölçülmüştür. Ancak bu artış, biyokütledeki artış oranıyla doğrusal bir ilişki göstermemiş, daha sınırlı düzeyde gerçekleşmiştir.

Bu konu hakkında literatür incelendiğinde benzer şekilde sonuçlar bulunmuştur. Wang ve ark. (2025) yapmış oldukları çalışmada, farklı günlerdeki kuru aktif çamurların Cu(II) biyosorpsiyonunu incelemiş ve biyosorpsiyon veriminin belirli bir sorbent konsantrasyonlarına kadar arttığını fakat 0.10 g'ın üzerindeki dozlarda giderim artış hızının azaldığını belirtmiştir. Aynı çalışmada bu durumun, sabit metal iyonu konsantrasyonunda azalan metal/biyosorbent oranı ve yüksek sayıdaki aktif bölgelerin üst üste binmesinden kaynaklı olduğunu açıklamışlardır. Milosavljevic vd. (2011) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, Cu(II) iyonlarının giderimi için kitosan, itakonik asit ve metakrilik asit kullanılarak sentezlenen Ch/IA/MAA hidrojelini adsorban olarak kullanmıştır. Aynı çalışmada, adsorban dozunun giderime etkisi denemelerinde, 0.035 g'ın üzerine çıktıklarında adsorpsiyon kapasitesinin artmak yerine azaldığını; bunun

nedeninin ise yüzey ve çözelti metal iyonu konsantrasyonlarının dengeye ulaşmasından kaynaklı olduğunu belirtmişlerdir. Kurniawan ve ark. (2022), sentetik atıksudan Zn(II), Pb(II), Cd(II) ve Cu(II) iyonlarının uzaklaştırılmasında aktif çamur ile *Aeromonas hydrophila* ve *Branhamella* spp. türlerinin biyosorpsiyon kapasitelerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, tüm biyosorbentler için metal giderim veriminin adsorban dozundaki artışla birlikte yükseldiği, ancak belirli bir noktadan sonra doz artışına paralel bir giderim artışı gözlenmediği rapor edilmiştir.

Bu çalışmada ise biyosorbent dozundaki artış, adsorpsiyon işlemi sırasında metal iyonlarının yüzeye bağlanabileceği daha fazla aktif bölge sağlamış; bu durum, toplam metal uzaklaştırma veriminin yükselmesine katkı sağlamıştır. Bununla birlikte, 1 g/L'de 2 g/L'ye biyosorbent dozunun 2 kat artırılmasıyla, Cu(II) biyosorpsiyon kapasitesinde inkübasyon süresinin 10. Dakikasında %17.6'lık bir artış gözlemlenmiştir. Artan Cu(II) konsantrasyonunun Cu(II) biyosorpsiyonuna etkisinin incelendiği denemelerde ise, 22.8 mg/L Cu(II) konsantrasyonundan 155.4 mg/L Cu(II) konsantrasyonuna kadar ağır metal giderimi devam etmiş metal konsantrasyonunun 303.1 ve 692.3 mg/L'ye çıkarılması ile giderimin azaldığı gözlemlenmiştir.

Artan başlangıç metal iyonu konsantrasyonu, biyosorbentlerin metal iyonlarına karşı gösterdiği spesifik alımı artırmıştır (Ang vd., 2013; Uma vd., 2010). Mevcut çalışmada *L. adecarboxylata* kuru biyokütlesi, 155.4 mg/L başlangıç Cu(II) konsantrasyonunda maksimum biyosorpsiyon kapasitesine (%69.1) ulaşarak bakır iyonlarını etkin biçimde uzaklaştırmıştır. Bu konsantrasyonun üzerinde, biyokütle üzerindeki fonksiyonel aktif grupların doygunluğa ulaşması nedeniyle biyosorpsiyon kapasitesinde azalma gözlemlenmiştir. Elde edilen bu bulgu, literatürde bildirilen verilerle de örtüşmektedir. Örneğin, Ang vd., (2013) çalışmalarında Cu(II) iyon konsantrasyonunun 100 mg/L'den 750 mg/L'ye artmasıyla biyosorpsiyon kapasitesinin 38.73 mg/g'den 146.30 mg/g'ye yükseldiğini, ancak 750 mg/L'nin üzerinde bu kapasitenin azaldığını belirtmişlerdir. Bir diğer yandan, düşük konsantrasyonlardaki (1–50 mg/L) ağır metaller, toksisitelerini korumaya devam ettiklerinden, bu aralıktaki metal iyonlarının gideriminde fizikokimyasal yöntemler yetersiz kalmaktadır (Haque et al., 2021). Mevcut çalışmada, 22.8 mg/L ve 45.8 mg/L başlangıç Cu(II) konsantrasyonlarında, inkübasyonun 15. dakikasında sırasıyla %61.5 ve %65.2 oranlarında giderim sağlanarak düşük konsantrasyonlardaki etkin biyosorpsiyon potansiyeli ortaya konmuştur.

SEM analizinde Cu(II) giderimi öncesi biyokütle ve Cu(II) giderimi sonrası biyokütle mikrografları incelenmiştir. Biyosorpsiyon uygulanmadan önce, yüzeyde homojen olmayan bir şekilde konumlanmış kristalin yapılar dikkat çekmiştir. Ayrıca çevredeki kümelenmiş tortuların, muhtemelen bakteriyel kaynaklı ekstraselüler polimerlerden (EPS) oluştuğu düşünülmektedir (Li vd.,2021). Bu morfolojik özellikler, biyosorbentün özgün yüzey karakteristiklerini ve potansiyel biyosorpsiyon bölgelerini yansıtmaktadır.

Metal biyosorpsiyonu sonrası hücre yüzeyinin morfolojik yapısında dikkate değer değişiklikler meydana gelmiştir. Özellikle biyosorbent yüzeyindeki gözeneklerin belirgin şekilde azaldığı ve Cu(II) metalinin yüzeye bağlanmasıyla meydana gelen yapısal değişikliklerin, biyosorpsiyon mekanizmasının fiziksel izlerini yansıttığı düşünülmektedir. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda da bu mikrograflar örtüşmekte ve metal alımı sonrası yapıların metal alımına bağlı olarak bozulduğu doğrulanmıştır (Lu vd., 2006; Thongkrua vd., 2023). EDS analizinde ise Cu(II) (%29.6) metalinin biyosorbent tarafından Cu(II) biyosorpsiyonunun gerçekleştiğini doğrulamıştır ve Cu(II) giderimi öncesi biyosorbentinde Cu(II)'ye rastlanmamıştır. Kaur ve arkadaşları (2022), *Pseudomonas* spp. ile gerçekleştirdikleri Cu(II) biyosorpsiyonu çalışmasında EDS analizi ile Cu(II) varlığını doğrulamışlardır. Benzer şekilde, *Bacillus altitudinis* MT422188 ile yapılan çalışmada da Cu(II) iyonlarının hücre yüzeyinde biriktiği EDX analizi ile gösterilmiştir (Khan ve ark., 2022).

Ayrıca, biyosorpsiyon çalışmalarında yalancı ikinci dereceden kinetik modelin deneysel verileri oldukça iyi açıkladığı tespit edilmiştir (Kotrba et al. 2011). Kinetik çalışmalar, biyosorpsiyon sürecinde adsorplananın adsorban yüzeyi ile etkileşim süresi, reaksiyon mekanizması ve hızının anlaşılmasına katkı sağlayarak önemli bilgiler sunmaktadır (Tarhan vd., 2019). *L. adecarboxylata* biyokütlesinin adsorpsiyon kinetiği çalışmasında, yalancı ikinci dereceden kinetik modele ait korelasyon katsayısının (R^2 : 0.9999) yalancı birinci dereceden modele (R^2 : 0.8637) kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu modele ait teorik denge adsorpsiyon kapasitesi (q_e) değeri, yalancı ikinci dereceden denklemde (q_e : 15.9) deneysel olarak elde edilen değerlere (q_e : 16.3) oldukça yakın bulunmuştur. Bu model adsorpsiyon sürecinde hızın, yüzeydeki aktif merkezlerle metal iyonları arasındaki kimyasal bağlanma tarafından belirlendiğini öne sürmektedir (Bueno vd., 2008). Yang ve ark. (2017), bakır dirençli bakteri *Cupriavidus gilardii* CR3 ile yapılan Cu biyosorpsiyonu çalışmalarında yalancı ikinci dereceden kinetik modelin

uygunluğunu ($R^2 = 0.99$) vurgulamışlardır. Chen vd. (2008) yapmış oldukları çalışmada *Undaria pinnatifida* algi kullanılarak Cu(II) ve Ni(II) metal biyosorpsiyonun kinetiği değerlendirilmiş ve yalancı ikinci dereceden denkleme daha iyi uyum gösterdiğini belirtmişlerdir.

Mir ve Rather (2024), *Chara vulgaris* algi kullanarak Cu(II) giderimini inceledikleri çalışmalarında, kinetik analizler sonucunda Cu(II) iyonlarının başlangıçta fiziksel etkileşimle bağlandığını, ardından kemisorpsiyon fazının metal içeren fonksiyonel grupların kompleks oluşumuna yol açtığını ortaya koymuş ve yalancı ikinci dereceden kinetik modelin süreci daha iyi açıkladığını, bu modelin yüksek bir korelasyon katsayısı ($R^2 = 0.999$) ile uyum sağladığını belirtmişlerdir. Khan ve ark. (2022), *Bacillus altitudinis* için Cu kinetik parametrelerini belirlemek amacıyla yalancı birinci ve ikinci dereceden kinetik modelleri incelemiş ve sonuçların yalancı ikinci dereceden kinetik modeliyle daha iyi uyum sağladığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, intrapartikül difüzyon modelinden elde edilen uyum eğrisinin orijinden geçmemesi ve düşük R^2 (0.8884) değerine sahip olması, intrapartikül difüzyonun adsorpsiyon sürecinde rol oynayabileceğini ancak hız belirleyici tek adım olmadığını göstermektedir (Yang vd., 2017). Çalışmamızda bu verilerle uyumludur.

Adsorpsiyon izotermi analizinde, literatürde en yaygın kullanılan üç temel modelin (Freundlich, Langmuir ve Temkin) analizi yapılmıştır. Yapılan modelleme çalışmaları sonucunda, Freundlich izotermine diğer iki modele kıyasla deneysel verilere daha iyi uyum sağladığı ve yüksek korelasyon katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir ($R^2=0.983$). Freundlich izotermi, yüzeyin heterojen olduğunu, adsorpsiyon ısısının yüzey boyunca düzgün dağılmadığını (farklı bağlanma bölgeleri) ve çok katmanlı adsorpsiyonun gerçekleştiğini anlatan bir izoterm modelidir (Hegazy vd., 2023). Ayrıca, katı adsorbanlar ile çözültide yapılan adsorpsiyon çalışmalarından elde edilen izoterm verileri, genellikle Freundlich ve Temkin modellerine daha uygunluk göstermektedir (Lu ve Na, 2022). Buna ek olarak çalışmamızda elde ettiğimiz veriler, literatürde çeşitli biyosorbentlerle yapılan Cu(II) biyosorpsiyonundaki izoterm sonuçlarıyla paralellik göstermektedir (Danesh vd.,2021). Örneğin, Bashir vd. (2020), yaptıkları çalışmada tarımsal adsorbanlar kullanarak Cu(II) biyosorpsiyonunun izotermine incelemiş ve izoterm çalışmalarının Freundlich modeli ile uyumlu çok katmanlı adsorpsiyonu ortaya koymuşlardır. Bir başka çalışmada, *Bacillus altitudinis* MT422188 biyosorbenti kullanılarak bakır (II) adsorpsiyon izotermi incelenmiş ve en uygun modelin Freundlich olduğu belirlenmiştir; bu sonuç, heterojen yüzey yapısı ve çok katmanlı adsorpsiyonun yaygın olduğunu desteklemektedir (Khan

vd., 2022). Çalışmada, toksik bir ağır metal olan Cu(II)'nin sulu ortamdan giderimi amacıyla *Leclercia adecarboxylata* bakterisinin kuru biyokütlesi biyosorbent olarak kullanılmış ve süreçle ilgili kapsamlı deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, biyosorpsiyonun optimum koşullarda (%66,5 giderim verimi; pH 5; 2 g/L biyosorbent dozu; 120 dakika temas süresi) etkili bir şekilde gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Tüm başlangıç Cu(II) konsantrasyonlarında gözlemlenen başarılı performans, biyosorbent geniş bir konsantrasyon aralığında işlevselliğini koruyabildiğini göstermiştir. SEM ve EDX analizleri, biyosorbent yüzeyinde metal tutunma bölgelerinin varlığını doğrularak biyosorpsiyon mekanizmasının fiziksel ve kimyasal yönlerini desteklemiştir. Kinetik analizler, sürecin yalancı ikinci derece kinetiğe uyduğunu; izoterm analizleri ise biyosorpsiyonun Freundlich izotermine uygun çok katmanlı bir yapıda gerçekleştiğini göstermiştir. Bu kapsamda, kuru *L. adecarboxylata* biyokütlesi, özgün yüzey özellikleri ve yüksek biyosorpsiyon kapasitesi sayesinde, özellikle Cu(II) gibi toksik ağır metallerin gideriminde sürdürülebilir, ekonomik ve çevre dostu bir biyosorbent alternatifi olarak değerlendirilebilir. Bu çalışmanın sonuçları, biyosorpsiyon temelli arıtım teknolojilerinin geliştirilmesinde *L. adecarboxylata*'nın potansiyelini ortaya koymaktadır.

İleriye dönük çalışmalarda, bu biyosorbent farklı ağır metaller (örneğin Pb, Cd, Ni) üzerindeki giderim performansı da incelenmeli; ayrıca biyosorpsiyon süreçlerinin gerçek endüstriyel atıksularla ve sürekli akışlı sistemlerde test edilmesi önerilmektedir. Bunun yanı sıra, biyosorbent yeniden kullanım kapasitesinin ve rejenerasyon etkinliğinin araştırılması, sürecin endüstriyel uygulamaya taşınabilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Metodoloji/Çalışma, Araştırma, Kaynak sağlama, Yazma – orijinal taslak, Görselleştirme, Deneysel Tasarım

Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak, Denetleme/danışmanlık, Proje yönetim

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Yazarlar, bu çalışmanın bulgularını destekleyen ana verilerin makale içerisinde mevcut olduğunu beyan ederler.

Veri kümeleri istek üzerine mevcuttur. Bu makalenin sonuçlarını destekleyen ham veriler, yazarlar tarafından herhangi bir çekince olmaksızın sunulacaktır.

Teşekkür

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK ve TÜBİTAK-BİDEB 2209-A; Proje Numarası: 1919B012317853) ile Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu tarafından sağlanan mali destek için teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

- Abbas, S.H., Ismail, I.M., Mostafa, T.M. and Sulaymon, A.H., 2014. Biosorption of heavy metals: A review. *Journal of Chemical Sciences and Technology*, 3, 74–102.
- Abed El Aziz, M., Ashour, A., Madbouly, H., Melad, A.S. and El Kerikshi, K., 2017. Investigations on green preparation of heavy metal saponin complexes. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, 2(2), 103–111. <https://doi.org/10.22090/jwent.2017.02.005>
- Aksu, Z. and Dönmez, G., 2000. The use of molasses in copper(II)-containing wastewaters: effects on growth and copper(II) bioaccumulation properties of *Kluyveromyces marxianus*. *Process Biochemistry*, 36(5), 451–458. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(00\)00234-X](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(00)00234-X)
- Ang, X.W., Sethu, V.S., Andresen, J.M. and Sivakumar, M.J.C.T., 2013. Copper (II) ion removal from aqueous solutions using biosorption technology: thermodynamic and SEM–EDX studies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15, 401–407. <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0523-0>
- Aryal, M. and Liakopoulou-Kyriakides, M., 2015. Bioremoval of heavy metals by bacterial biomass. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 1–26. <http://doi.org/10.1007/s10661-014-4173-z>
- Baran, M.F., Düz, Z., Baran, A., Keskin, C. and Aktepe, N., 2022. Removal of heavy metals in water by biosorption method using three different *Bacillus* sp.-derived biosorbents. 25,3, 449 - 458 <https://doi.org/10.18016/ksutarimdogva.vi.941201>
- Bashir, M., Tyagi, S. and Annachhatre, A.P., 2020. Adsorption of copper from aqueous solution onto agricultural adsorbents: kinetics and isotherm studies. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1833–1840. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.287>
- Boddu, S., Chandra, A. and Khan, A.A., 2022. Biosorption of Cu(II), Pb(II) from electroplating industry effluents by treated shrimp shell. *Materials Today: Proceedings*, 57, 1520–1527. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.052>
- Bueno, B.Y.M., Torem, M.L., Molina, F.A.L.M.S. and De Mesquita, L.M.S., 2008. Biosorption of lead (II), chromium (III) and copper (II) by *Rhodococcus*

- opacus: Equilibrium and kinetic studies. *Minerals Engineering*, 21(1), 65–75.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.08.013>
- Chen, Z., Ma, W. and Han, M., 2008. Biosorption of nickel and copper onto treated alga (*Undaria pinnatifida*): application of isotherm and kinetic models. *Journal of Hazardous Materials*, 155(1-2), 327–333.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.064>
- Danesh, N., Ghorbani, M. and Marjani, A., 2021. Separation of copper ions by nanocomposites using adsorption process. *Scientific Reports*, 11(1), 1676. |
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-80914-w>
- Dhaliwal, S.S., Singh, J., Taneja, P.K. and Mandal, A., 2020. Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 1319–1333.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-06967-1>
- Gabr, R.M., Hassan, S.H.A. and Shoreit, A.A.M., 2008. Biosorption of lead and nickel by living and non-living cells of *Pseudomonas aeruginosa* ASU 6a. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 62, 195–203.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.01.008>
- Haque, M.M., Mosharaf, M.K., Haque, M.A., Tanvir, M.Z.H. and Alam, M.K., 2021. Biofilm formation, production of matrix compounds and biosorption of copper, nickel and lead by different bacterial strains. *Frontiers in Microbiology*, 12, 615113.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.615113>
- Hegazy, G.E., Soliman, N.A., Ossman, M.E., Abdel-Fattah, Y.R. and Moawad, M.N., 2023. Isotherm and kinetic studies of cadmium biosorption and its adsorption behaviour in multi-metals solution using dead and immobilized archaeal cells. *Scientific Reports*, 13(1), 2550.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-29456-5>
- Kamarudzaman, A.N., Adan, S.N.A.C., Hassan, Z., Wahab, M.A., Makhtar, S.M.Z., Seman, N.A.A., et al., 2022. Biosorption of copper (II) and iron (II) using spent mushroom compost as biosorbent. *Biointerface Research on Applied Chemistry*, 12, 7775–7786.
<https://doi.org/10.33263/BRIAC126.77757786>
- Kaur, P., Sharma, S., Albarakaty, F. M., Kalia, A., Hassan, M. M., & Abd-Elsalam, K. A. (2022). Biosorption and bioleaching of heavy metals from electronic waste varied with microbial genera. *Sustainability*, 14(2), 935.
<https://doi.org/10.3390/su14020935>
- Khan, M., Kamran, M., Kadi, R. H., Hassan, M. M., Elhakem, A., Sakit ALHaithloul, H. A., ... & Shamim, S. (2022). Harnessing the potential of *Bacillus altitudinis* MT422188 for copper bioremediation. *Frontiers in Microbiology*, 13, 878000.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.878000>
- Kivanç, M. and Okus, F.G., 2022. Biosorption of copper (II) ions from aqueous solution onto *Pantoea agglomerans* isolated from water containing high amount of boron element. *Acta Brasiliensis*, 6(3), 89–94.
<https://doi.org/10.22571/2526-4338619>
- Kurniawan, T.A., Lo, W., Othman, M.H.D., Goh, H.H. and Chong, K.K., 2022. Biosorption of heavy metals from aqueous solutions using activated sludge, *Aeromonas hydrophila*, and *Branhamella* spp based on modeling with GEOCHEM. *Environmental Research*, 214, 114070.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114070>
- Kotrba, P., Mackova, M. and Macek, T., 2011. *Microbial Biosorption of Metals*. 1st ed. Heidelberg: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0443-5>
- Lee, M.S., Ahn, J.G. and Ahn, J.W., 2003. Recovery of copper, tin and lead from the spent nitric etching solutions of printed circuit board and regeneration of the etching solution. *Hydrometallurgy*, 70(1-3), 23–29.
[https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00045-8](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00045-8)
- Li, Y., Xin, M., Xie, D., Fan, S., Ma, J., Liu, K., & Yu, F. (2021). Variation in extracellular polymeric substances from *Enterobacter* sp. and their Pb²⁺ adsorption behaviors. *ACS omega*, 6(14), 9617-9628.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00185>
- Lu, W. B., Shi, J. J., Wang, C. H., & Chang, J. S. (2006). Biosorption of lead, copper and cadmium by an indigenous isolate *Enterobacter* sp. J1 possessing high heavy-metal resistance. *Journal of hazardous materials*, 134(1-3), 80-86.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.10.036>
- Lu, L. and Na, C., 2022. Gibbsian interpretation of Langmuir, Freundlich and Temkin isotherms for adsorption in solution. *Philosophical Magazine Letters*, 102(7), 239–253.
<https://doi.org/10.1080/09500839.2022.2084571>
- Merino, N., Aronson, H.S., Bojanova, D.P., Feyhl-Buska, J., Wong, M.L., Zhang, S. and Giovannelli, D., 2019. Living at the extremes: extremophiles and the limits of life in a planetary context. *Frontiers in Microbiology*, 10, 780.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00780>
- Milosavljević, N.B., Ristić, M.Đ., Perić-Grujić, A.A., Filipović, J.M., Štrbac, S.B., Rakočević, Z.L. and Krušić, M.T.K., 2011. Removal of Cu²⁺ ions using hydrogels of chitosan, itaconic and methacrylic acid: FTIR, SEM/EDX, AFM, kinetic and equilibrium study. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 388(1-3), 59–69.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.08.011>
- Mir, D.H. and Rather, M.A., 2024. Kinetic and thermodynamic investigations of copper (II) biosorption by green algae *Chara vulgaris* obtained

- from the waters of Dal Lake in Srinagar (India). *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104850. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104850>
- Ofomaja, A.E., Naidoo, E.B. and Modise, S.H., 2009. Removal of copper(II) from aqueous solution by pine and base modified pine cone powder as biosorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 168, 909–917. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.106>
- Ordóñez, J.I., Cortés, S., Maluenda, P. and Soto, I., 2023. Biosorption of heavy metals with algae: critical review of its application in real effluents. *Sustainability*, 15(6), 5521. <https://doi.org/10.3390/su15065521>
- Orozco, C.I., Freire, M.S., Gómez-Díaz, D. and González-Álvarez, J., 2023. Removal of copper from aqueous solutions by biosorption onto pine sawdust. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 32, 101016. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101016>
- Priyadarshane, M. and Das, S., 2021. Biosorption and removal of toxic heavy metals by metal tolerating bacteria for bioremediation of metal contamination: A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104686. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104686>
- Rajendran, V., Yashwanth, C.P., Krishnamoorthy, S., Anandaraj, A., Rawson, A., Nagarathinam, B. and Sivanandham, V., 2025. Copper resistant bacterial biosorbents from food waste origin: efficiency, isothermal and kinetic studies. *International Journal of Food Engineering*, 21(1), 15–27. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2024-0116>
- Ramachandran, G., Chackaravarthi, G., Rajivgandhi, G.N., Quero, F., Maruthupandy, M., Alharbi, N.S. and Li, W.J., 2022. Biosorption and adsorption isotherm of chromium (VI) ions in aqueous solution using soil bacteria *Bacillus amyloliquefaciens*. *Environmental Research*, 212, 113310. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113310>
- Rizvi, A., Ahmed, B., Zaidi, A. and Khan, M.S., 2020. Biosorption of heavy metals by dry biomass of metal tolerant bacterial biosorbents: an efficient metal clean-up strategy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08758-5>
- Shankar, S., Joshi, S. and Srivastava, R.K., 2023. A review on heavy metal biosorption utilizing modified chitosan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(11), 1350. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11963-7>
- Snell, F.D. and Snell, C.T., 1959. *Colorimetric Methods of Analysis*. Vol. 2, 3rd ed. New York: D. Van Nostrand Company.
- Su, C., Wang, J., Chen, Z., Meng, J., Yin, G., Zhou, Y. and Wang, T., 2023. Sources and health risks of heavy metals in soils and vegetables from intensive human intervention areas in South China. *Science of the Total Environment*, 857, 159389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159389>
- Sulaiman, S., Azis, R.A.S., Ismail, I., Man, H.C., Yusof, K.F.M., Abba, M.U. and Katibi, K.K., 2021. Adsorptive removal of copper (II) ions from aqueous solution using a magnetite nano-adsorbent from mill scale waste: synthesis, characterization, adsorption and kinetic modelling studies. *Nanoscale Research Letters*, 16, 1–17. <https://doi.org/10.1186/s11671-021-03622-y>
- Tarhan, T., Tural, B., Boga, K. and Tural, S., 2019. Adsorptive performance of magnetic nano-biosorbent for binary dyes and investigation of comparative biosorption. *SN Applied Sciences*, 1, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0011-1>
- Thongkrua, S. and Kasuya, A., 2023. Utilization of *Enterobacter cloacae* WW1 biomass for biosorption of lead (II) from aqueous solution. *Nature Environment and Pollution Technology*, 22(1), 261–268. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2023.v22i01.025>
- Uma, M., Nagpal, K., Bankar, A.V., Pawar, N.J., Kapadnis, B.P. and Zinjarde, S.S., 2011. Equilibrium and kinetic studies on biosorption of heavy metals by leaf powder of paper mulberry (*Broussonetia papyrifera*). *Water, Air, and Soil Pollution*, 215(1-4), 177. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0468-z>
- Wang, M., Yaakop, A.S. and Ng, S.L., 2025. A comparative study of Cu(II) biosorption onto dried activated sludge of different sludge ages. *Pure and Applied Chemistry*. <https://doi.org/10.1515/pac-2024-0360>