LJEEST

ISSN 2710-5237
www.srcest.org.ly/jou

المجلة الليبية لعلوم وتكنولوجيا البيئة

Libyan Journal of Ecological & Environmental Sciences and Technology(LJEEST)

DOI: https://doi.org/10.63359/fbw1sc68

قياس نسب امتزاز أيونات النحاس (II) من المحاليل المائية باستخدام مسحوق أوراق النيم *Azadirachta indica* كمادة ماصة حيوية

سامية أحمد الباهي

ARTICLE INFO

Vol. 8 No. 2 Agusust, 2026

Pages (A61- 66)

Article history:
Revised form 07 June 2026
Accepted 00 June 2026

Authors affiliation
Department of public health, Faculty of Health Sciences, Misurata University
samiaahmed7499@gmail.com

Keywords:
Cu (II) ions, Neem Leaf Powder (NLP), adsorption, bioadsorbent.

© 2026
Content on this article is an open access licensed under creative commons CC BY-NC 4.0.

الملخص

توضح هذه الدراسة إمكانية استخدام أوراق شجرة النيم Neem Leaf Powder (NLP) لإزالة أيونات النحاس Cu (II) من المحاليل المائية. أُجريت تجارب امتزاز متقطعة مع تغيير بعض الظروف الخاصة بمعايير التجربة، مثل درجة الحموضة ما بين (2 و6)، وجرعة المادة المازة. جُففت أوراق النيم وطُحنت إلى مسحوق بحجم يتراوح بين 90 و100 مايكرومتر. خُلطت جرعات معروفة من مسحوق أوراق النيم (1.0، 1.5، 2.0، 2.5، 3.0 جم/لتر) مع تركيز ثابت لأيونات النحاس Cu (II) قدره 100 ملجم/لتر لمدة 5 ساعات. في هذه الدراسة، أُزيلت أكبر كمية من أيونات النحاس Cu (II) عند الجرعة المثلى من مسحوق أوراق النيم البالغة 1.5 جم/لتر، والرقم الهيدروجيني 3، عند درجة حرارة الغرفة. في ظل هذه الظروف المعملية، أُزيلت أيونات النحاس Cu (II) بنسبة 73.09 % من المحلول. تهدف هذه الدراسة بشكل أساسي إلى دراسة إمكانية امتزاز النحاس من الماء بواسطة مواد حيوية صديقة للبيئة، حيث تبين النتائج إمكانية استخدام مسحوق أوراق شجرة النيم كمادة ماصة حيوية لإزالة أيونات النحاس Cu (II). وتُعد هذه التقنية فعالة ورخيصة الثمن وصديقة للبيئة، ويمكن تطويرها لاحقًا لإزالة معادن ثقيلة أخرى من مياه الصرف الصحي.

Measuring The Adsorption Rate Of Cu (II) Ions From Aqueous Solutions Using Neem Leaf Powder (*Azadirachta indica*) as a Bioadsorbent

Samia Ahmed Elbahi[1]

This study demonstrates the potential of using Neem Leaf Powder (NLP) to remove Cu (II) ions from aqueous solutions. Intermittent adsorption experiments were conducted, varying the experimental parameters, such as pH (between 2 and 6) and the dosage of the adsorbent. Neem leaves were dried and ground into powder with a particle size ranging from 90 to 100 µm. Known doses of neem leaf powder (1.0, 1.5, 2.0, 2.5, and 3.0 g/L) were mixed with a constant concentration of 100 mg/L of Cu (II) ions for 5 hours. In this study, the greatest amount of Cu (II) ions was removed at the optimal neem leaf powder dose of 1.5 g/L, pH 3, and room temperature. Under these laboratory conditions, 73.09% of Cu (II) ions were removed from the solution. This study primarily aims to investigate the feasibility of copper adsorption from water using environmentally friendly bio-adsorbents. The results demonstrate the potential of using neem leaf powder as a bio-adsorbent for removing Cu (II) ions. This technique is efficient, inexpensive, and environmentally friendly, and can be further developed to remove other heavy metals from wastewater.

المقدمة

ازداد معدل تصريف النفايات السائلة في البيئة، وخاصة المسطحات المائية، نتيجةً للتصنيع والتوسع الحضري، حيث تحتوي مياه الصرف الصناعي على أيونات هذه المعادن بسبب استخدامها في العديد من الصناعات، مثل الطلاء الكهربائي، وصناعة البطاريات، والتعدين، وتشطيب المعادن، والمنتجات الصيدلانية (Balali, *et al.*, 2021)، الامر الذي ينتج عنه مجموعةً متزايدة التنوع من المواد الكيميائية والبيولوجية المقاومة للتحلل (Türkmen, *et al.*, 2022) والتي حظيت باهتمام متزايد نظرًا لانتشارها الواسع ومخاطرها المحتملة على البيئة وصحة الإنسان (Li, *et al.*, 2024). تحتوي معظم هذه النفايات السائلة على مواد سامة، وخاصة المعادن الثقيلة مثل الزرنيخ (As) والكادميوم (Cd) والكروم (Cr) والكوبالت (Co)والنحاس (Cu) والرصاص (Pb) والزئبق (Hg) والنيكل (Ni) والزنك(Zn) (Narimani, *et al.*, 2025) وتعرف بأنها ملوثات معدنية في مياه الصرف الصحي،

وتسمى بالنفايات الصناعية، وأيضا بحمأة الصرف الصحي (Staszak, *et al.*, 2023).

يُعدّ التخلص من الملوثات العضوية الثابتة أمرًا ملحًا نظرًا لتأثيراتها الواسعة، إذ يمكنها حتى بتركيزات منخفضة جدًا أن تُخلّ بالتوازن الهرموني، وتُضعف القدرة على التكاثر، وتُعزز مقاومة المضادات الحيوية، أو تُغيّر الاستجابات المناعية لدى الإنسان والحياة البرية (Wang, *et al.*, 2024). وبشكل عام، يُعدّ الإزالة الكاملة أو الجزئية للمعادن الثقيلة السامة من مياه الصرف الصحي والمياه الملوثة أمرًا ضروريًا للوقاية من المشاكل الصحية والبيئية المحتملة وضمان استدامة النظام البيئي (Zlati, *et al.*, 2022؛ Shaker, *et al.*, 2023).

حددت منظمة الصحة العالمية الحدود القصوى المسموح بها لتركيزات الزرنيخ والنحاس والرصاص والكادميوم والكروم والكوبالت والزئبق والنيكل والزنك في مياه الشرب، وهي 0.01 – 2.5 – 0.05 – 0.003 – 0.05 – 0.1 – 0.001 – 2.0 و5.0 ملجم/لتر على التوالي (Karim, *et al.*, 2023). وتعاني الطرق التقليدية لإزالة أيونات المعادن من مياه الصرف، مثل الترسيب الكيميائي والتخثير بالجير والتبادل الأيوني والتناضح العكسي والاستخلاص بالمذيبات، من بعض القيود، كعدم كفاية إزالة المعادن، وارتفاع متطلبات المواد الكيميائية والطاقة، وإنتاج حمأة ضارة أو نفايات تتطلب التخلص منها بطريقة سليمة (Stala, *et al.*, 2022). يُعدّ النحاس من أكثر المعادن سُمّيةً، ويُطلق بشكلٍ غير مسؤول في البيئة من خلال أنشطةٍ مُختلفة، مثل معالجة المعادن، واحتراق الفحم، والطباعة الضوئية على النحاس، وصناعة الإطارات. فقد يُؤدّي استهلاك النحاس بكمياتٍ كبيرة إلى مشاكل في الجهاز الهضمي، وتلف الكبد أو الكلى، واضطرابات في الجهاز العصبي، وفقر الدم الانحلالي الحاد، وتلف الشعيرات الدموية، وفي الحالات الشديدة، قد يُؤدّي إلى الوفاة. وبالنظر إلى هذه الآثار السامة على صحة الإنسان والأنظمة المائية، فإنّ إزالة النحاس من مصادر مياه الشرب ومياه الصرف الصحي قبل تصريفها أمرٌ بالغ الأهمية (Lenka, *et al.*, 2021).

من بين الطرق المختلفة لإزالة أيونات المعادن، تُعتبر عملية الامتزاز الأكثر فعالية نظرًا لسهولة استخدامها، وكفاءتها العالية في الإزالة عبر نطاق واسع من الرقم الهيدروجيني، وتكلفتها المنخفضة (Bello, *et al.*, 2013). مع ذلك، قد يكون إنتاج مواد الامتزاز المناسبة مكلفًا، كما أن بعض المواد، مثل الكربون المنشط التجاري، لا يمكن تجديدها بعد الاستخدام، مما يجعل التطبيقات واسعة النطاق غير مستدامة (Anastopoulos, *et al.*, 2020). ولتعزيز طرق المعالجة المستدامة، من الضروري تطوير وتطبيق مواد امتزاز متوفرة بسهولة، وغير مكلفة، وقابلة للتجديد (Saravanan, *et al.*, 2022). ويتماشى تحويل المخلفات الزراعية إلى مواد امتزاز ذات قيمة مضافة مع مبادئ الاقتصاد الحيوي الدائري والكيمياء الخضراء، مما يوفر نهجًا متجددًا ومفيدًا للبيئة (Fouda-Mbanga, *et al.*, 2021). في هذا السياق، حفز البحث عن مواد امتزاز رخيصة ومتوفرة بسهولة دراسة المنتجات الثانوية الزراعية والبيولوجية والصناعية كمواد امتزاز محتملة للمعادن. تتمتع مواد الامتزاز الحيوي بعدة مزايا مقارنةً بالتقنيات التقليدية. تتميز هذه المواد غير المكلفة المستخدمة في الترشيح الحيوي بقدرة عالية على امتزاز أيونات المعادن، وهي متوفرة بسهولة. تُظهر بعض المواد الحيوية الماصة نطاقًا واسعًا من القدرات على ربط أيونات المعادن، بينما تتميز مواد أخرى بانتقائيتها لأنواع معينة من أيونات المعادن (Etale, *et al.*, 2023). ويُحدّ من استخدام الكائنات الحية كمواد ماصة عدم تحملها لانخفاض درجة الحموضة أو التركيزات العالية لأيونات المعادن السامة (Dey, *et al.*, 2021). في المقابل، تتميز الألياف النباتية بمتانتها الكيميائية والفيزيائية، مما يجعلها مناسبة لتطبيقات الامتزاز (Raji, *et al.*, 2023).

تم دراسة العديد من المواد النباتية غير الحية والرخيصة (Narayanasamy, *et al.*, 2022)، بما في ذلك قشور البطاطس (El-Azazy, *et al.*, 2019)، قشور البذور (Maina, *et al.*, 2016)، قشور حبوب القهوة (Thi Quyen, *et al.*, 2021)، حبوب قشر التفاح (Singh, *et al.*, 2019)، قشور الحمضيات (Šabanović, *et al.*, 2020)، قشور البندق واللوز (Bulut & Tez, 2007)، قشور الدخن (Jibril, *et al.*, 2021)، قشور الفول السوداني (Abdelfattah, *et al.*, 2016)، قشور جوز الهند (Abdulrasaq, *et al.*, 2010)، أوراق شجرة النيم (Maheshwari, *et al.*, 2016)، عصارة قصب السكر (Chao, *et al.*, 2014)، وقشور البطيخ (Bhattacharjee, *et al.*, 2020).

تُشكّل عملية الامتزاز طبقة من المادة الممتزة (أيونات المعادن) على سطح المادة المازة. ويمكن تكرار عملية الامتزاز لتطبيقات متعددة باستخدام طريقة الإزالة (الامتزاز العكسي حيث تُنقل أيونات المادة الممتزة من سطح المادة المازة) لأن الامتزاز عملية قابلة للانعكاس في ظروف معينة (Raghavan, *et al.*, 2025). يتضمن الامتزاز على مادة مازة صلبة ثلاث خطوات رئيسية: نقل الملوث إلى السطح. تتضمن عملية الامتزاز على مادة ماصة صلبة ثلاث خطوات رئيسية: نقل الملوث من المحلول المائي إلى سطح المادة الماصة، والامتزاز على السطح الصلب، والنقل داخل جزيئات المادة الماصة. بشكل عام، يتسبب التجاذب الكهروستاتيكي في امتزاز الملوثات المشحونة على مواد ماصة ذات شحنات مختلفة، وذلك لأن المعادن الثقيلة تتمتع بألفة قوية لأيونات الهيدروكسيل (OH^-) أو غيرها من المجموعات الوظيفية على الأسطح (Suzuki, *et al.*, 2020). يُصنف الامتزاز بشكل أساسي إلى نوعين: الامتزاز الفيزيائي والامتزاز الكيميائي (المعروف أيضًا بالامتزاز المنشط). الامتزاز الفيزيائي هو التصاق مادة ماصة بسطح مادة ممتزة بسبب قوة فان دير فالس غير النوعية (أي المستقلة عن طبيعة المادة)، بينما يحدث الامتزاز الكيميائي عندما تُنشئ الروابط الكيميائية قوى تجاذب قوية، أي أن الامتزاز الكيميائي يُنشئ روابط أيونية أو تساهمية من خلال التفاعلات الكيميائية. ومع ذلك، فإن الامتزاز الفيزيائي عملية قابلة للانعكاس، ولكن يُصنف الامتزاز بشكل أساسي إلى نوعين: الامتزاز الفيزيائي والامتزاز الكيميائي (الذي يُوصف أيضًا بالامتزاز المُنشط). الامتزاز الفيزيائي هو التصاق مادة ماصة بسطح مادة ممتزة بسبب قوة فان دير فالس غير النوعية (أي المستقلة عن طبيعة المادة)، بينما يحدث الامتزاز الكيميائي عندما تُنشئ الروابط الكيميائية قوى تجاذب قوية، أي أن الامتزاز الكيميائي يُنشئ روابط أيونية أو تساهمية من خلال التفاعلات الكيميائية. مع ذلك، يُعدّ الامتزاز الفيزيائي عملية قابلة للانعكاس ولكنها أقل تخصصًا، بينما يُعدّ الامتزاز الكيميائي عملية غير قابلة للانعكاس ولكنها أكثر تخصص (Lou, *et al.*, 2024).

تأثير جرعة المادة الماصة:

تؤثر كمية المادة الماصة الحيوية بشكل كبير على امتصاص المعادن الثقيلة، إذ توفر مواقع امتصاص لأيونات المعادن. وتؤدي زيادة جرعة المادة الماصة الحيوية عند تركيز أولي معين للمعادن إلى زيادة نسبة الامتصاص الحيوي نتيجةً لزيادة مساحة السطح، مما يزيد من عدد مواقع الامتصاص المتاحة، ولكنه يقلل من امتصاص المعدن لكل وحدة كتلة من المادة الماصة الحيوية. لذا، فإن مقارنة المواد الماصة باستخدام نسبة الامتصاص الحيوي طريقة غير دقيقة، ولا تصلح إلا للفحص السريع والتقريبي للمواد الماصة الحيوية. أما الطريقة الأكثر دقة فهي استخدام امتصاص المعدن لكل وحدة كتلة من المادة الماصة (Orji, *et al.*, 2021).

تأثير الرقم الهيدروجيني

تُعدّ درجة حموضة الوسط العاملَ الأكثر أهميةً في عملية الامتزاز الحيوي، حيث يُحسّن النطاق المتعادل إلى القلوي قليلاً (7.0–8.0) من انجذاب أنواع المعادن الكاتيونية نظرًا للشحنة السالبة للمادة المازة الحيوية. كما تؤثر درجة الحموضة على ذوبانية المادة الممتزة ونشاط المجموعات الوظيفية في المواد المازة الحيوية. فعلى سبيل المثال، تُمتز المعادن الأنيونية في الغالب، مثل الكروم والزرنيخ والنحاس، بكفاءة أكبر عند مستويات حموضة منخفضة (2.0–4.0) (Namdeti, 2023).

المواد والطرق

تحضير الأوراق النيم الناضجة

تم جمع أوراق النيم الناضجة من أشجار النيم المحلية في ماليزيا. في البداية، تم قياس كتلة الأوراق الإجمالية وتسجيلها. ثم تم غسل الأوراق بالماء المقطر لإزالة الأوساخ والشوائب الأخرى التي قد تعيق إجراءات وتصنيف أداء الماصة البيولوجية. بعد ذلك، تم تجفيف الأوراق في ضوء الشمس لمدة 10 ساعات ثم تجفيفها أكثر في فرن عند 300 كلفن لمدة تقريبية تبلغ 24

ساعة. تم الحفاظ على درجة حرارة الفرن ثابتة عند 300 كلفن لمنع تغير المجموعات الوظيفية النشطة على سطح الأوراق. بعد مرور 24 ساعة، تم وزن الأوراق الجافة وتم تحديد محتوى الرطوبة فيها. ثم تم تمزيق الأوراق الجافة وطحنها في مطحنة القطع SM100 من ريتش. بعد الطحن، تم غربلة مسحوق الأوراق NLP في مطحنة مركزية فائقة ZM200 من ريتش للحصول على جزيئات ناعمة بمتوسط حجم يتراوح تقريبًا بين 90 و100 مايكرومتر. وأخيرًا، تم تخزين مسحوق NLP الناتج في حاويات بلاستيكية داخل جهاز تجفيف قبل الاستخدام.

تحضير محلول: Cu (II)

تم تحضير محلول مخزني لأيونات Cu (II) عن طريق إذابة أملاح كلوريد Cu (II) في الماء منزوع الأيونات. تم استخدام محلولين من حمض الهيدروكلوريك (HCl) وهيدروكسيد الصوديوم (NaOH) المخفف لضبط الرقم الهيدروجيني للمحلول. تم تحضير المحاليل التجريبية بالتركيز المستخدم في الدراسة (100 ملجم/لتر).

حساب سعة الامتزاز والنسبة المئوية % لإزالة الملوثات للمواد الماصة:

أُجريت اختبارات امتزاز دفعية باستخدام تصميم التجارب المركزية المركبة (CCD)، ودُرست تأثيرات عوامل الامتزاز على إزالة أيونات النحاس الثنائي Cu (II) من المحلول المائي. حُضّرت محاليل نحاس بتراكيز مختلفة، وأُضيف مقدار معلوم من المواد المازة إلى قوارير سعة 50 مل تحتوي على محلول النحاس عند درجة حموضة 3. ضُبطت درجة حموضة محاليل النحاس باستخدام محلولين من حمض الهيدروكلوريك (HCl) وهيدروكسيد الصوديوم (NaOH). وُضعت القوارير بعد ذلك على جهاز هزاز مداري بسرعة 200 دورة في الدقيقة لفترة زمنية محددة. أُجريت جميع التجارب في درجة حرارة الغرفة. رُشّح الخليط وحُلل باستخدام مقياس الامتصاص الذري الضوئي (Perkin Elmer A Analyst 200).

تم حساب كفاءة الامتزاز أو النسبة المئوية لإزالة الملوثات وسعة الامتزاز للمواد الماصة باستخدام المعادلتين (1) و (2) على التوالي:

$$\% \, Adsorption = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times \ 100 \qquad (1)$$

$$q_t = (C_0 - \ C_t)\, V/m \qquad (2)$$

حيث:

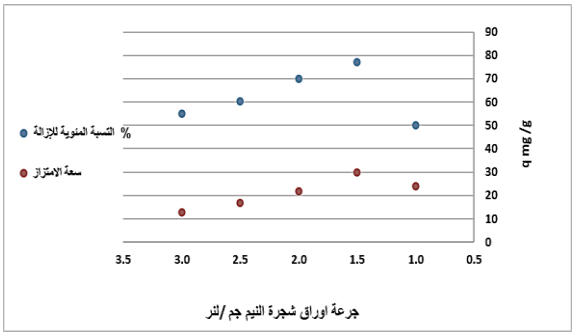
- C_0 وC_t هما التركيزات الأولية والنهائية (عند الزمن t) لأيونات المعدن على التوالي.
- q_t (ملجم/جم) وq_e (ملجم/جم) هي كتلة المادة الممتزة لكل كتلة من المادة المازة عند الزمن t.
- V هو حجم المحلول (لتر).
- m هي كتلة المادة المازة (جم) (Vunain & Biswick, 2017).

النتائج والمناقشة

تأثير جرعة المادة الماصة الحيوية على امتصاص المعادن:

تم تحديد الجرعة المثلى المادة الماصة الحيوية من خلال رسم يوضح نسبة إزالة المعدن مقابل جرعة المادة الماصة الحيوية من 1.0 إلى 3.0 جم/ل ودرجة حموضة 3. تم أيضًا رسم سعة الامتزاز مقابل جرعة المادة الماصة الحيوية لدراسة التأثيرات. في الشكل 1، يمكن ملاحظة أن أقصى نسبة إزالة كانت 77.08% عند 1.5 جم/ل، وأن أقصى سعة للامتزاز كانت 29.87 ملجم/جم بعد 5 ساعات تعرض للمعدن.

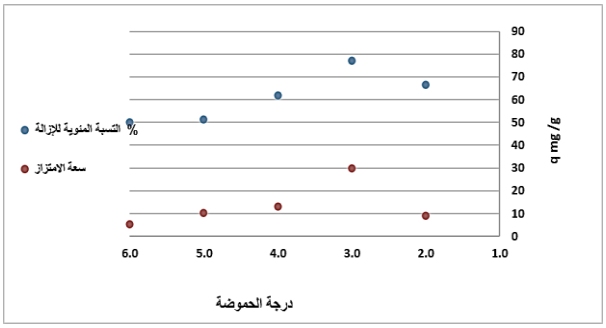
نظريًا، زيادة كمية المادة الممتزة المضافة إلى محلول يحتوي على تركيز ثابت من الأيونات ستزيد من توافر المواقع النشطة في المادة الممتزة، مما يزيد بدوره من سعة الامتزاز أو نسبة إزالة أيونات المعادن. ومع ذلك، يحدث العكس في هذه الدراسة، لأن الـ NLP عبارة عن جزيئات عضوية دقيقة جدًا تتجمع عند الجرعات العالية، مما يسبب انسداد المواقع أو المجموعات النشطة المتاحة. وهذا يؤدي إلى انخفاض امتصاص المعادن وتراجع إزالة النحاس عند الجرعات العالية (Orji, *et al.*, 2021).



شكل رقم (1): تأثير جرعة NLP على سعة الامتزاز ونسبة إزالة أيون النحاس (II) بعد خمس ساعات في درجة حرارة الغرفة

تأثير الرقم الهيدروجيني

بالإشارة إلى الشكل 2 تم تحديد الرقم الهيدروجيني الأمثل للمحلول من خلال رسم نسبة الإزالة لـ NLP مقابل الرقم الهيدروجيني 3 في درجة حرارة الغرفة، وجرعة NLP بمقدار 1.5 جم/ل. كما تم رسم سعة امتصاص NLP مقابل الرقم الهيدروجيني لدراسة التأثير.



شكل رقم (2): تأثير درجة الحموضة على سعة الامتزاز ونسبة الإزالة لامتزاز أيون النحاس (II) بعد خمس ساعات في درجة حرارة الغرفة

من المعروف جيدًا أن قيمة الرقم الهيدروجيني (pH) للمحلول تؤثر على شحنة سطح المواد الممتزة ودرجة التأين وأنواع المواد الممتزة وذلك بسبب كثافة شحنة سطح الممتز وشحنة الأنواع المعدنية الموجودة حسب الرقم الهيدروجيني، فلقد أظهرت العديد من الدراسات أن الرقم الهيدروجيني الأمثل للامتزاز الحيوي للنحاس من المحاليل المائية يتراوح من 2 إلى 4 (Namdeti, 2023).

الرقم الهيدروجيني الأمثل في هذه التجربة كان عند الرقم الهيدروجيني 3. ويعود ذلك إلى أنه عند خفض الرقم الهيدروجيني، تصبح شحنة السطح الكلية على خلايا الكتلة الحيوية موجبة، مما سيعيق اقتراب الكاتيونات المعدنية الموجبة الشحنة (Torres, 2020).

يلخص الجدول 1 و2، نسب الإزالة وسعة الامتصاص، حيث يتضح ان هناك انخفاض يتدرج بشكل طفيف مع زيادة الرقم الهيدروجيني. وذلك بسبب تنافس البروتونات مع أيونات المعدن على أماكن الاستقبال السطحية للمادة الماصة، وبالتالي تقلل التفاعل بين أيونات المعدن والخلايا، ويعزى ذلك إلى الامتزاز التنافسي بين البروتونات ($H3O^+$) وأيونات النحاس (II) لمواقع الارتباط على سطح NLP. مع ارتفاع الرقم الهيدروجيني، تزداد القوة الطاردة الكهربائية بين أيون النحاس (II) وعدد المجموعات السالبة الإجمالية المتاحة لارتباط أيونات المعدن، كما تقل تأثيرات التنافس من البروتونات، مما يثبت أنه أكثر فائدة لاحتجاز أيونات النحاس ((Torres, 2020).

جدول رقم (1): تأثير جرعة NLP على سعة الامتزاز ونسبة إزالة أيون النحاس (II) بعد خمس ساعات في درجة حرارة الغرفة

درجة الحموضة	جرعة NLP	تركيز اولي للنحاس (100 ملجم/لتر) النسبة المئوية لإمتزاز النحاس	سعة الامتزاز
3	1.0	% 50.13	24.12
	1.5	% 77.08	29.87
	2.0	% 70.02	21.77
	2.5	% 60.43	16.92
	3.0	% 55.03	12.85

جدول رقم (2): تأثير درجة الحموضة على سعة الامتزاز ونسبة الإزالة لامتزاز أيون النحاس (II) بعد خمس ساعات في درجة حرارة الغرفة

جرعة NLP	درجة الحموضة	تركيز اولي للنحاس (100 ملجم/لتر) النسبة المئوية لإمتزاز النحاس	سعة الامتزاز
1.5	2	% 66.54	9.08
	3	% 77.08	29.87
	4	% 61.87	12.99
	5	% 51.39	10.42
	6	% 50.45	5.45

الخلاصة

بناءً على النتائج المستخلصة من هذا العمل، يمكن الاستنتاج أن مادة NLP تُعد مادة حيوية امتصاصية محتملة ويمكن أن تكون فعالة جداً في إزالة أيونات النحاس ثنائي التكافؤ Cu (II) من المحلول المائي. حجم جزيئات المادة البيولوجية الممتصة المستخدم وهو 90 مايكرومتر لامتصاص أيونات النحاس على NLP ليس الأكثر فعالية. وُجد أن الامتصاص باستخدام جرعات أقل من NLP يعطي قيم سعة امتصاص أكبر. في هذه الدراسة، وُجد أن الجرعة الأمثل من NLP هي 1.5 جم/لتر، والتي كانت قادرة على إزالة 77.08% من أيونات النحاس (II) من المحلول عند درجة حرارة الغرفة.

وُجد أن الرقم الهيدروجيني الأمثل لعملية الامتزاز الحيوي هو 3 مما أزال 73.09% من أيونات النحاس (II) من المحلول. يمكن تحسين سعة الامتصاص عن طريق تغيير الظروف التجريبية مثل التركيز والرقم الهيدروجيني ودرجة الحرارة. بالإضافة إلى ذلك، يحتاج NLP إلى التثبيت على سطح مستقر ليكون أكثر فعالية. استخدامه في شكل جزيئي يؤدي إلى التكتل عند الجرعات العالية، وهو أمر غير مرغوب فيه. ومع ذلك، فإن هذه التقنية فعالة جدا ويمكن تطويرها أكثر لإزالة المعادن الثقيلة الأخرى من مياه الصرف الصحي.

المراجع

Abdelfattah, I., Ismail, A. A., Al Sayed, F., Almedolab, A., & Aboelghait, K. (2016). Biosorption of heavy metals ions in real industrial wastewater using peanut husk as efficient and cost-effective adsorbent. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *6*, 176–183.

Abdulrasaq, O. O., & Basiru, O. G. (2010). Removal of copper (II), iron (III) and lead (II) ions from mono-component simulated waste effluent by adsorption on coconut husk. *African Journal of Environmental Science and Technology*, *4*(6), 382–387.

Anastopoulos, I., & Pashalidis, I. (2020). Environmental applications of *Luffa cylindrica*-based adsorbents. *Journal of Molecular Liquids*, *319*, Article 114127.

Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M. (2021). Toxic mechanisms of five heavy metals: Mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Frontiers in Pharmacology*, *12*, Article 227.

Bello, O. S., Bello, I. A., & Adegoke, K. A. (2013). Adsorption of dyes using different types of sand: A review. *South African Journal of Chemistry*, *66*, 117–129.

Bhattacharjee, C., Dutta, S., & Saxena, V. K. (2020). A review on biosorptive removal of dyes and heavy metals from wastewater using watermelon rind as biosorbent. *Environmental Advances*, *2*, Article 100007.

Bulut, Y., & Tez, Z. (2007). Adsorption studies on ground shells of hazelnut and almond. *Journal of Hazardous Materials*, *149*(1), 35–41.

Chao, H.-P., Chang, C.-C., & Nieva, A. (2014). Biosorption of heavy metals on *Citrus maxima* peel, passion fruit shell, and sugarcane bagasse in a fixed-bed column. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *20*(5), 3408–3414.

Dey, T., Bhattacharjee, T., Nag, P., Ghati, A., & Kuila, A. (2021). Valorization of agro-waste into value added products for sustainable development. *Bioresource Technology Reports*, *16*, Article 100834.

El-Azazy, M., El-Shafie, A. S., Issa, A. A., Al-Sulaiti, M., Al-Yafie, J., Shomar, B., & Al-Saad, K. (2019). Potato peels as an adsorbent for heavy metals from aqueous solutions: Eco-structuring of a green adsorbent operating Plackett–Burman design. *Journal of Chemistry*, *2019*, Article 4926240.

Etale, A., Onyianta, A. J., Turner, S. R., & Eichhorn, S. J. (2023). Cellulose: A review of water interactions, applications in composites, and water treatment. *Chemical Reviews*, *123*(5), 2016–2048.

Fouda-Mbanga, B., Prabakaran, E., & Pillay, K. (2021). Carbohydrate biopolymers, lignin-based adsorbents for removal of heavy metals (Cd2+, Pb2+, Zn2+) from wastewater, regeneration and reuse for spent adsorbents including latent fingerprint detection: A review. *Biotechnology Reports*, *30*, Article e00609.

Karim, A., Raji, Z., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). Valorization of fibrous plant-based food waste as biosorbents for remediation of heavy metals from wastewater—A review. *Molecules*, *28*(10), Article 4205.

Saravanan, A., Kumar, P. S., Hemavathy, R., Jeevanantham, S., Harikumar, P., Priyanka, G., & Devakirubai, D. R. A. (2022). A comprehensive review on sources, analysis and toxicity of environmental pollutants and its removal methods from water environment. *Science of The Total Environment*, *812*, Article 152456.

Shaker, O. A., Safwat, S. M., & Matta, M. E. (2023). Nickel removal from wastewater using electrocoagulation process with zinc electrodes under various operating conditions: Performance investigation, mechanism exploration, and cost analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(10), 26650–26662.

Singh, R., Martin, C., Barr, D., & Rosengren, R. (2019). Immobilised apple peel bead biosorbent for the simultaneous removal of heavy metals from cocktail solution. *Cogent Environmental Science*, *5*(1), Article 1673116.

Stala, Ł., Ulatowska, J., & Polowczyk, I. (2022). Copper (II) ions removal from model galvanic wastewater by green one-pot synthesised amino-hypophosphite polyampholyte. *Journal of Hazardous Materials*, *436*, Article 129047.

Staszak, K., & Wieszczycka, K. (2023). Recovery of metals from wastewater—State-of-the-art solutions with the support of membrane technology. *Membranes*, *13*(2), Article 114.

Suzuki, T., Hidaka, T., Kumagai, Y., & Yamamoto, M. (2020). Environmental pollutants and the immune response. *Nature Immunology*, *21*(12), 1486–1495.

Šabanović, E., Memić, M., Sulejmanović, J., & Selović, A. (2020). Simultaneous adsorption of heavy metals from water by novel lemon-peel based biomaterial. *Polish Journal of Chemical Technology*, *22*(2), 46–53.

Thi Quyen, V., Pham, T.-H., Kim, J., Thanh, D. M., Thang, P. Q., Van Le, Q., Jung, S. H., & Kim, T. (2021). Biosorbent derived from coffee husk for efficient removal of toxic heavy metals from wastewater. *Chemosphere*, *284Trace*, Article 131312.

Torres, E. (2020). Biosorption: A review of the latest advances. *Processes*, *8*(12), Article 1584.

Türkmen, D., Bakhshpour, M., Akgönüllü, S., Aşır, S., & Denizli, A. (2022). Heavy metal ions removal from wastewater using cryogels: A review. *Frontiers in Sustainability*, *3*, Article 765592.

Umeh, T. C., Nduka, J. K., & Akpomie, K. G. (2021). Kinetics and isotherm modeling of Pb (II) and Cd (II) sequestration from polluted water onto tropical ultisol obtained from Enugu Nigeria. *Applied Water Science*, *11*(4), Article 65.

Vunain, E., Kenneth, D., & Biswick, T. (2017). Synthesis and characterization of low-cost activated carbon prepared from Malawian baobab fruit shells by

Lenka, S. P., Shaikh, W. A., Owens, G., Padhye, L. P., Chakraborty, S., & Bhattacharya, T. (2021). Removal of copper from water and wastewater using dolochar. *Water, Air, & Soil Pollution*, *232*(12), Article 492.

Li, X., Shen, X., Jiang, W., Xi, Y., & Li, S. (2024). Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *278*, Article 116420.

Lou, H., Yang, J., Liu, Q., & Yang, Q. (2024). Hazards of trichloroethylene on the liver in animals: A systematic review and meta-analysis. *Emerging Contaminants*, *10*, Article 100338.

Maheshwari, U., & Gupta, S. (2016). Removal of Cr (VI) from wastewater using activated neem bark in a fixed-bed column: Interference of other ions and kinetic modelling studies. *Desalination and Water Treatment*, *57*(18), 8514–8525.

Maina, I. W., Obuseng, V., & Nareetsile, F. (2016). Use of *Moringa oleifera* (Moringa) seed pods and *Sclerocarya birrea* (Morula) nut shells for removal of heavy metals from wastewater and borehole water. *Journal of Chemistry*, *2016*, Article 9312952.

Namdeti, R. (2023). A review on removal of heavy metals by biosorption: A green technology. *International Journal of Research and Review*, *10*(3), 531–543.

Narimani, R., Murgulet, I., & Murgulet, D. (2025). Emerging contaminants in groundwater: Challenges, management, and policy perspectives. In *Emerging pollutants: Protecting water quality for the health of people and the environment* (pp. 189–226).

Narayanasamy, S., Sundaram, V., Sundaram, T., & Vo, D.-V. N. (2022). Biosorptive ascendency of plant based biosorbents in removing hexavalent chromium from aqueous solutions—Insights into isotherm and kinetic studies. *Environmental Research*, *210*, Article 112902.

Orji, O. U., Awoke, J. N., Aja, P. M., Aloke, C., Obasi, O. D., Alum, E. U., Udu-Ibiam, O. E., & Oka, G. O. (2021). Halotolerant and metalotolerant bacteria strains with heavy metals biorestoration possibilities isolated from Uburu Salt Lake, Southeastern, Nigeria. *Heliyon*, *7*(9), Article e07944.

Raghavan, R. (Ed.). (2025). *Environmental factors in carcinogenesis: Exposome-driven insights into cancer risk and prevention*. IGI Global.

Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). A review on the heavy metal adsorption capacity of dietary fibers derived from agro-based wastes: Opportunities and challenges for practical applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, *137*, 74–91.

16(13), Article 1837.

Zlati, M. L., Georgescu, L. P., Iticescu, C., Ionescu, R. V., & Antohi, V. M. (2022). New approach to modelling the impact of heavy metals on the European Union's water resources. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(1), Article 45.

H3PO4 activation for removal of Cu (II) ions: Equilibrium and kinetics studies. *Applied Water Science*, *7*(8), 4301–4319.

Wang, H., Gao, X., & Zuo, Y. (2024). Research and application of water treatment technologies for emerging contaminants (ECs): A pathway to solving water environment challenges. *Water*,