A Laboratory Study for Alginate Hydrogel Extracted from the Brown Marine Algae (Sargassum vulgare) for the Simultaneous Removal of Lead (Pb^{2+}), Cadmium (Cd^{2+}), and Copper (Cu^{2+}) Ions from Aqueous Solutions

Dr. Abdullah Mohammad Primo *

(Received 10 / 3 / 2026. Accepted 21 / 4 / 2026)

□ ABSTRACT □

This study aims to evaluate the efficiency of alginate hydrogel extracted from the brown marine algae Sargassum vulgare for the simultaneous removal of lead (Pb^{2+}), cadmium (Cd^{2+}), and copper (Cu^{2+}) ions from aqueous solutions using a biosorption approach. Alginate was extracted from the seaweed and subsequently converted into a hydrogel using a calcium chloride solution, which was then employed as a bio sorbent material. The concentrations of metal ions in standard solutions were measured before and after the adsorption process using a spectrophotometer following the formation of suitable colored complexes for each metal ion. The results demonstrated a significant reduction in metal ion concentrations, with removal efficiencies reaching 92.4% for lead, 87.6% for cadmium, and 81.3% for copper under optimal experimental conditions (pH 5–6, contact time 60 minutes, and an alginate hydrogel dose of 0.5 g per 100 mL solution). The study revealed that the hydrogel provides enough binding sites for heavy metal ions and can be regenerated through washing, making it an effective, low-cost, and environmentally friendly material for treating contaminated water. These findings highlight the potential of alginate hydrogel as a sustainable and practical solution for heavy metal removal in both laboratory and industrial applications.

Keywords: Alginate hydrogel; Marine algae; Biosorption; Heavy metals; Water treatment.

Copyright **:**Latakia University Journal (Formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **PhD - Environmental Chemistry, faculty of Science, Latakia University(Formerly Tishreen) Latakia, Syria. abdullah.primo@latakia-univ.edu.sy**

دراسة مخبرية لهيدروجيل الألجينات المستخلص من الطحالب البحرية البنية (Sargassum vulgare) في الإزالة المتزامنة لأيونات الرصاص (Pb^{2+})، الكادميوم (Cd^{2+})، والنحاس (Cu^{2+}) من المحاليل المائية

د. عبدالله محمد بريمو *

(تاريخ الإيداع10 / 3 / 2026. قبل للنشر في 21 / 4 / 2026)

□ ملخّص □

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم كفاءة هيدروجيل الألجينات المستخلص من الطحالب البحرية البنية (Sargassum vulgare) في إزالة أيونات الرصاص (Pb^{2+})، الكادميوم (Cd^{2+})، والنحاس (Cu^{2+}) من المحاليل المائية القياسية باستخدام تقنية الامتزاز الحيوي، تم استخلاص الألجينات من الطحالب البحرية وتحويلها إلى هيدروجيل باستخدام محلول كلوريد الكالسيوم، ثم استخدامه كمادة مازة حيوية، تم قياس تراكيز أيونات المعادن في المحاليل القياسية قبل وبعد الامتزاز باستخدام جهاز السبكتروفوتومتر بعد تكوين معقدات لونية مناسبة لكل أيون معدني حيث أظهرت النتائج انخفاضًا ملحوظًا في تراكيز أيونات المعادن في المحاليل، حيث بلغت كفاءة الإزالة 92.4 % للرصاص،87.6 % للكادميوم و81.3 % للنحاس عند الظروف التجريبية المثلى: pH= 5–6، زمن خلط 60 min، وكمية من هيدروجيل الألجينات 0.5 gr لكل 100 ml محلول، أظهرت الدراسة أن هيدروجيل الألجينات يوفر مواقع كافية للارتباط بالمعادن الثقيلة، ويمكن إعادة استخدامه بعد الغسل، مما يجعله مادة فعالة، منخفضة التكلفة، وصديقة للبيئة لمعالجة المياه الملوثة. هذه النتائج تؤكد إمكانية استخدام هيدروجيل الألجينات كحل مستدام وعملي لإزالة المعادن الثقيلة من المحاليل المائية في التطبيقات المختبرية والصناعية.

الكلمات المفتاحية: هيدروجيل الألجينات – الطحالب البحرية – الامتزاز الحيوي – المعادن الثقيلة – معالجة المياه.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY–NC–SA 04

* **دكتوراه – الكيمياء البيئية، كلية العلوم، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) ، اللاذقية، سوريا.**
abdullah.primo@latakia-univ.edu.sy

مقدمة:

تشكل المعادن الثقيلة مثل الرصاص (Pb^{2+})، الكادميوم (Cd^{2+})، والنحاس (Cu^{2+}) أحد أخطر الملوثات البيئية في المياه، نظرًا لسمّيتها العالية وقدرتها على التراكم الحيوي في الكائنات الحية حتى عند التركيزات المنخفضة. يؤدي التعرض الطويل لهذه المعادن إلى العديد من المشاكل الصحية الخطيرة، مثل اضطرابات الجهاز العصبي والكلى والكبد، كما تؤثر سلبًا على النظام البيئي والحياة المائية [1][2]. تنتج هذه المعادن عادةً عن الأنشطة الصناعية المختلفة مثل التعدين، الصناعات الكيميائية، الطلاء الكهربائي، وصناعة المدخرات، وتشكل تهديدًا كبيرًا للبيئة والمجتمعات البشرية إذا لم تتم معالجتها بكفاءة [3].

تتضمن الطرق التقليدية لمعالجة المياه الملوثة بالمعادن الثقيلة الترسيب الكيميائي، التبادل الأيوني، والترشيح بالغشاء، إلا أن هذه الأساليب غالبًا ما تكون مكلفة، تتطلب استهلاكًا عاليًا للمواد الكيميائية، وقد تؤدي إلى تكوين نفايات ثانوية ضارة بالبيئة. لذلك، أصبح البحث عن حلول مستدامة وصديقة للبيئة أولوية علمية وهندسية في مجال معالجة المياه. وفي السنوات الأخيرة، شهدت تقنيات الامتزاز الحيوي باستخدام المواد الطبيعية اهتمامًا متزايدًا، نظرًا لفعاليتها العالية وانخفاض تكلفتها وسهولة الحصول عليها، بالإضافة إلى قدرتها على إزالة المعادن الثقيلة دون إلحاق أضرار بالبيئة [4][5].

من بين المواد الحيوية الواعدة في هذا المجال، تحظى الطحالب البحرية البنية مثل Sargassum vulgare باهتمام كبير، إذ تعد مصدرًا غنيًا بالبوليمرات الطبيعية وخاصة الألجينات. تحتوي الألجينات على مجموعات كربوكسيل وهيدروكسيل نشطة كيميائيًا، والتي يمكنها الارتباط بأيونات المعادن الثقيلة من المحاليل المائية، ما يجعلها وسيلة فعالة لإزالة هذه الملوثات [4][5]. يتميز الألجينات أيضًا بالقدرة على تشكيل هيدروجيل عند التفاعل مع أيونات ثنائية التكافؤ مثل أيونات الكالسيوم (Ca^{2+})، حيث تتشكل شبكة ثلاثية الأبعاد تحتوي على مسام قادرة على احتجاز الأيونات والجزيئات داخلها، مما يزيد من مساحة السطح المتاحة للامتزاز ويعزز كفاءة إزالة المعادن الثقيلة [6][7].

تتمتع هيدروجيلات الألجينات بعدة خصائص تجعلها مناسبة لتطبيقات معالجة المياه، منها الاستقرار الكيميائي، القابلية للتشكيل في أشكال متعددة مثل الكرات أو الأغشية، والقدرة على التفاعل الفعال مع الأيونات المعدنية عبر مجموعات الكربوكسيل والهيدروكسيل. كما أن المرونة الفيزيائية للهيدروجيل تتيح إمكانية إعادة استخدامه بعد عمليات الغسل أو التجديد، مما يقلل من تكاليف التشغيل ويجعل العملية أكثر استدامة وصديقة للبيئة [6][7].

أهمية البحث وأهدافه:

تنبع أهمية هذا البحث من التحديات الكبيرة التي تواجه معالجة المياه الملوثة بالمعادن الثقيلة، والتي تمثل خطرًا صحيًا وبيئيًا عالميًا، حيث تتميز بقدرتها على التراكم في الكائنات الحية، ما يؤدي إلى اضطرابات صحية خطيرة عند الإنسان والحيوان، بالإضافة إلى التأثير السلبي على التوازن البيئي والمصادر المائية، فإن تطوير مواد منخفضة التكلفة وصديقة للبيئة لإزالة هذه المعادن يمثل ضرورة عاجلة، يتيح استخدام هيدروجيل الألجينات المستخلص من الطحالب البحرية البنية (Sargassum vulgare) تقديم حل مستدام لمعالجة المياه، إذ يجمع بين الكفاءة العالية في إزالة المعادن والقدرة على إعادة الاستخدام، مع تقليل الاعتماد على المواد الكيميائية الضارة.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم كفاءة هيدروجيل الألجينات المستخلص من الطحالب البحرية البنية (Sargassum vulgare) في الإزالة المتزامنة لأيونات الرصاص والكادميوم والنحاس من المحاليل المائية، باستخدام

تقنية الامتزاز الحيوي. وقد تم استخدام جهاز السبكتروفوتومتر لقياس تراكيز المعادن قبل وبعد عملية الامتزاز بعد تكوين معقدات لونية مناسبة لكل معدن، بهدف تقديم دراسة متكاملة توضح إمكانية استخدام الهيدروجيل كحل منخفض التكلفة وفعال وصديق للبيئة لمعالجة المياه الملوثة بالمعادن الثقيلة.

طرائق البحث ومواده:

المواد الكيميائية والأجهزة:

تم استخدام المواد الكيميائية التالية: أملاح الرصاص ($Pb(NO_3)_2$)، أملاح الكادميوم ($CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$)، وأملاح النحاس ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) جميعها بدرجة نقاء تقارب 99%، ومحلول كلوريد الكالسيوم ($CaCl_2$) لتكوين الهيدروجيل. كما تم استخدام حمض كلور الماء الممدد (HCl 0.1 M) وكربونات الصوديوم (Na_2CO_3) في عملية استخلاص الألجينات، جميع المواد المستخدمة من إنتاج شركة ميرك الألمانية.

الأجهزة المستخدمة شملت: جهاز الأشعة تحت الحمراء FTIR (شيمادزو)، سبكتروفوتومتر لقياس تراكيز أيونات المعادن بعد تكوين المعقدات اللونية (شيمادزو)، ميزان حساس، حاضنة رج (Shaker) للتحريك المستمر للمحاليل، وأدوات مخبرية زجاجية.

تحضير الطحالب واستخلاص الألجينات:

تم جمع الطحالب البحرية البنية (Sargassum vulgare) من سواحل مدينة اللاذقية، وغُسلت جيدًا بالماء المقطر لإزالة الشوائب والأملاح السطحية، ثم جُففت في درجة حرارة الغرفة وطُحنت إلى مسحوق ناعم.

لاستخلاص الألجينات تم اتباع الخطوات التالية:

- معالجة مسحوق الطحالب بحمض كلور الماء الممدد لإزالة الأملاح المعدنية والشوائب العضوية.
- غسلت الطحالب بالماء المقطر حتى وصول الرقم الهيدروجيني إلى المحايد.
- معالجة العينة بمحلول كربونات الصوديوم للحصول على محلول الألجينات.
- ترشيح المحلول وفصل السائل للحصول على الألجينات الذائبة.
- إضافة محلول $CaCl_2$ لتكوين هيدروجيل الألجينات، وغسل الهيدروجيل عدة مرات بالماء المقطر لإزالة أي مواد غير مرغوب فيها.
- تخزين الهيدروجيل في درجة حرارة الغرفة لاستخدامه في تجارب الامتزاز.

دراسة طيف الأشعة تحت الحمراء FTIR لهيدرجيل الألجينات المتشكل:

تم استخدام تقنية مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) لتحديد المجموعات الوظيفية الموجودة في هيدروجيل الألجينات المستخلص من الطحالب البحرية البنية (Sargassum vulgare). تعتمد هذه التقنية على قياس امتصاص العينة للأشعة تحت الحمراء عند أعداد موجية مختلفة، حيث تمثل كل قمة امتصاص اهتزازًا مميزًا لروابط كيميائية معينة داخل البنية الجزيئية للمادة.

لتحضير العينة للتحليل، تم خلط كمية صغيرة من العينة الجافة مع مادة بروميد البوتاسيوم (KBr) ثم تم ضغط الخليط على شكل أقراص باستخدام مكبس خاص للحصول على قرص مناسب للتحليل الطيفي. بعد ذلك تم تسجيل

الطيف في مدى عدد موجي يتراوح بين $500-4000\ cm^{-1}$ باستخدام جهاز FTIR، وذلك بهدف التعرف على المجموعات الوظيفية الرئيسة الموجودة في تركيب الهيدروجيل.

تحضير محاليل الأيونات للمعادن الثقيلة:

تم تحضير محاليل معيارية لكل من أيونات الرصاص والكادميوم والنحاس بتركيز ابتدائي 50 mgr\L باستخدام الأملاح القياسية المذابة في الماء المقطر. ثم تم خلط المحاليل بالتناسب لإجراء تجارب الامتزاز المتزامن لكل الأيونات الثلاثة.

ضبط (pH) للمحلول:

قبل إجراء تجارب الامتزاز، تم ضبط الرقم الهيدروجيني (pH) لمحلول أيونات المعادن إلى القيمة المثلى لضمان فعالية الهيدروجيل في إزالة المعادن الثقيلة، تم استخدام حمض كلور الماء الممدد (HCl 0.1 M) لخفض الرقم الهيدروجيني عند الحاجة، وهيدروكسيد الصوديوم الممدد (NaOH 0.1 M) لرفعه عند الضرورة، تم قياس pH باستخدام جهاز قياس الرقم الهيدروجيني للتأكد من وصوله إلى النطاق الأمثل 6-5 لكل من محاليل أيونات الرصاص والكادميوم والنحاس.

الزمن الأمثل للخلط:

تم إجراء تجارب تمهيدية لتحريك المحاليل المحتوية على الهيدروجيل ومحاليل أيونات المعادن عند فترات مختلفة (10، 20، 30، 45، 60، 90 min) لتحديد الزمن اللازم للوصول إلى حالة التوازن.

تأثير كمية الهيدروجيل على الامتزاز:

تمت دراسة تأثير كمية الهيدروجيل على كفاءة إزالة أيونات المعادن الثقيلة عند ظروف ثابتة: تركيز المعادن 50 mgr\L ، زمن التحريك 60 min، و5.5 = pH، حيث تم استخدام كميات مختلفة من الهيدروجيل : 0.2، 0.5، 0.8، 1.0 gr لكل 100 ml محلول.

تجربة الامتزاز:

تم تنفيذ تجارب الامتزاز لتقييم قدرة هيدروجيل الألجينات على إزالة أيونات الرصاص والكادميوم والنحاس من المحاليل المائية وفق الخطوات التالية:

- إضافة 0.5 gr من هيدروجيل الألجينات إلى 100 ml من محلول المعادن القياسي.
- وضع الخليط في حاضنة رج وتحريكه باستمرار لمدة 60 min عند درجة حرارة الغرفة (25 ± 2 °C) لضمان الوصول إلى حالة التوازن بين الهيدروجيل والمحلول.
- ترشيح المحلول باستخدام ورق ترشيح أو قمع لفصل الهيدروجيل عن السائل.
- قياس تركيز أيونات المعادن المتبقية في المحلول بعد الامتزاز باستخدام جهاز السبكتروفوتومتر، بعد تكوين المعقدات اللونية المناسبة لكل معدن وفق البروتوكولات القياسية.

حساب كفاءة الإزالة وتقدير الكمية الممتزة:

بعد الانتهاء من الامتزاز، تم قياس تركيز أيونات المعادن في المحلول باستخدام جهاز السبكتروفوتومتر، عن طريق تكوين معقدات ملونة لكل معدن:

- أيون الرصاص: تم تكوين معقد باستخدام الديتيزون Dithizone (HDz) لإنتاج لون أحمر/وردي يمكن قياس امتصاصه عند الطول الموجي 510–520 nm وفق المعادلة التالية:

$$Pb^{2+} + 2HDz \longrightarrow Pb(Dz)_2 + 2H^+$$

- أيون الكادميوم: تم تكوين معقد مع (Diethyldithiocarbamate DDTC) لإنتاج لون أصفر يمكن قياسه عند طول موجي 440–460 nm وفق المعادلة التالية:

$$Cd^{2+} + 2(C_2H_5)_2NCS_2^- \rightarrow Cd[(C_2H_5)_2NCS_2]_2$$

- أيون النحاس: تم تكوين معقد باستخدام (Pyrrolidinedithiocarbamate APDC) لإنتاج لون أزرق/أخضر يمكن قياسه عند طول موجي 600 nm تقريبًا وفق المعادلة التالية:

$$Cu^{2+} + 2(C_4H_8NCS_2^-) \rightarrow Cu(C_4H_8NCS_2)_2$$

تعتمد شدة اللون على تركيز أيون المعدن في المحلول وفق قانون بير–لامبرت:

حيث: $A = \varepsilon.l.c$

A: الامتصاصية، **ε:** معامل الامتصاص المولي، l: طول المسار الضوئي، **c:** تركيز المادة

وتم تحضير المعقدات في ظروف مناسبة من الرقم الهيدروجيني ودرجة حرارة المخبر لضمان تكوين المعقد الكامل قبل القياس.

تم حساب نسبة إزالة كل أيون معدن ثقيل من المحلول باستخدام المعادلة التالية:

$$\text{كفاءة الازالة } \% = \frac{C0 - Ce}{C0} * 100$$

حيث C0: التركيز الابتدائي لأيون المعدن (mgr\L)، Ce : التركيز النهائي بعد الامتزاز (mgr\L).

كما تم حساب الكمية الممتزة على الهيدروجيل باستخدام العلاقة:

$$qe = \frac{(C0 - Ce) \times V}{m}$$

حيث qe: كمية الامتزاز عند التوازن (mgr/gr)، C0: التركيز الابتدائي لأيون المعدن في المحلول (mgr/L)، Ce: التركيز النهائي بعد الامتزاز (mgr/L)، V: حجم المحلول المستخدم في التجربة (L)، m: كتلة المادة الممتزة (الهيدروجيل) المستخدمة (gr).

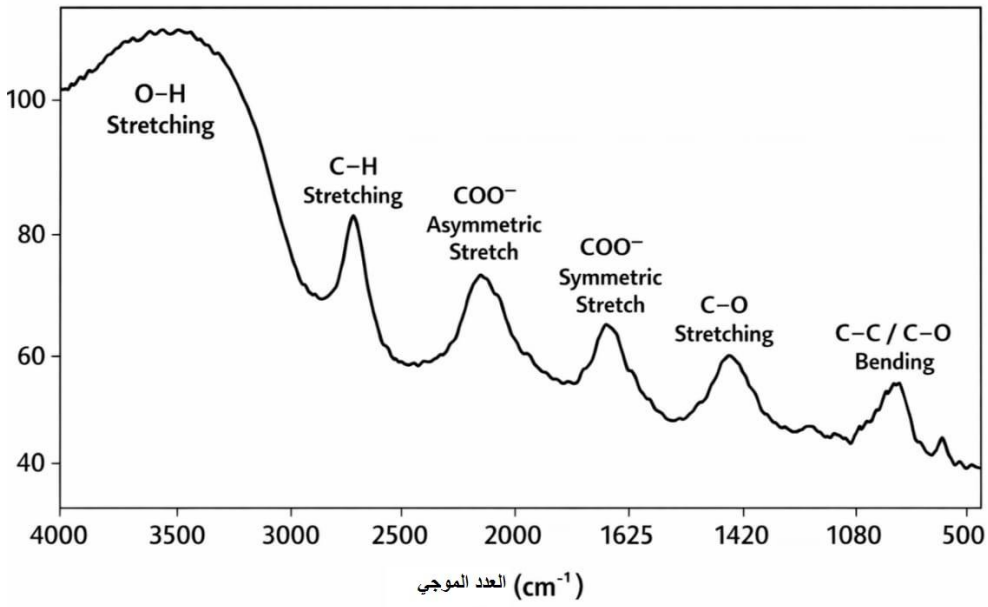
النتائج والمناقشة:

دراسة طيف الأشعة تحت الحمراء FTIR لهيدروجيل الألجينات:

يوضح الشكل (1) طيف الأشعة تحت الحمراء لهيدروجيل الألجينات المستخلص من الطحالب البحرية البنية (Sargassum vulgare). يظهر الطيف نطاق امتصاص واسع عند حوالي $3400\ cm^{-1}$ ويعزى ذلك إلى اهتزازات التمدد لمجموعة الهيدروكسيل (O–H stretching)، والتي تعد من المجموعات الوظيفية الشائعة في البوليمرات الطبيعية مثل الألجينات، وتلعب دورًا مهمًا في تكوين الروابط الهيدروجينية والتفاعل مع أيونات المعادن.

كما تظهر قمة امتصاص عند حوالي $2920\ cm^{-1}$ تعود إلى اهتزازات التمدد لمجموعة C–H في السلاسل الكربونية للمركب. ويلاحظ أيضًا وجود قمة مميزة عند حوالي $1625\ cm^{-1}$ تعزى إلى اهتزازات التمدد غير المتماثلة لمجموعة الكربوكسيلات (COO^-)، بينما تظهر قمة أخرى عند حوالي $1420\ cm^{-1}$ تعود إلى اهتزازات التمدد المتماثلة لنفس المجموعة، بالإضافة إلى ذلك، يظهر نطاق امتصاص عند حوالي $1080\ cm^{-1}$ والذي يعزى إلى اهتزازات C–O stretching في الروابط السكرية المكونة لسلاسل الألجينات. وتشير هذه القمم الطيفية إلى وجود مجموعات وظيفية نشطة مثل الهيدروكسيل والكربوكسيل في بنية الهيدروجيل، وهي المجموعات المسؤولة عن قدرة الألجينات على الارتباط بأيونات المعادن الثقيلة من خلال تكوين روابط تساندية أو تفاعلات كهروستاتيكية، وبناءً على ذلك، يؤكد

تحليل FTIR الطبيعة الكيميائية لهيدروجيل الألجينات ووجود المجموعات الوظيفية الفعالة التي تسهم في عملية الامتزاز الحيوي لأيونات الرصاص والكادميوم والنحاس من المحاليل المائية.



الشكل (1) طيف الأشعة تحت الحمراء FTIR لهيدروجيل الألجينات

تأثير كمية الهيدروجيل على إزالة أيونات المعادن:

تمت دراسة تأثير كمية الهيدروجيل على كفاءة إزالة أيونات الرصاص، الكادميوم والنحاس عند تركيز 50 mg/L، زمن تحريك 60 min، و5.5 = pH. أظهرت النتائج زيادة كفاءة الإزالة مع زيادة كمية الهيدروجيل، حتى الوصول إلى تشبع مواقع الامتزاز وفق الجدول (1):

الجدول (1) تغير كفاءة الإزالة بتغير كمية الهيدروجيل

كمية الهيدروجيل (gr\100 ml)	كفاءة إزالة أيون الرصاص	كفاءة إزالة أيون الكادميوم	كفاءة إزالة أيون النحاس
0.2	% 65	% 58	% 52
0.5	% 92.4	% 87.6	% 81.3
0.8	% 92.6	% 87.8	% 81.5
1	% 92.7	% 87.9	% 81.6

نلاحظ مما سبق أن:

- زيادة الهيدروجيل توفر مزيدًا من مجموعات الكربوكسيل والهيدروكسيل للارتباط بأيونات المعادن.
- من كمية gr 0.5–1، نلاحظ ثبات نسبي للكفاءة، ما يشير إلى تشبع مواقع الامتزاز.

تأثير (pH) على كفاءة الإزالة:

تم الحفاظ على pH المحلول ضمن النطاق الأمثل (6–5) لضمان فعالية الامتزاز:

- عند هذه القيم، تظل مجموعات الكربوكسيل مشحونة بما يكفي لتكوين روابط قوية مع أيونات المعادن.

- انخفاض pH يقلل من شحنة المجموعات الكربوكسيلية، مما يقلل من الامتزاز، بينما ارتفاع pH يؤدي إلى ترسيب المعادن في صورة هيدروكسيدات.

تأثير زمن الخلط على إزالة أيونات المعادن:

أظهرت التجارب أن كمية المعادن الممتزة تزداد تدريجيًا مع الزمن حتى تصل إلى حالة التوازن وفق الجدول (2):

الجدول (2) تغير كفاءة الإزالة بتغير زمن الخلط

الزمن (دقيقة)	تركيز أيون الرصاص	كفاءة إزالة أيون الرصاص	تركيز أيون الكادميوم	كفاءة إزالة أيون الكادميوم	تركيز أيون النحاس	كفاءة إزالة أيون النحاس
10	25	% 50	28	% 44	30.5	% 39
20	15.8	% 68.4	18.5	% 63	21	% 58
30	9.8	% 80.4	12.5	% 75	14.5	% 71
45	5.2	% 89.6	8	% 84	10.2	% 79.6
60	3.8	% 92.4	6.2	% 87.6	9.4	% 81.3
90	3.8	% 92.4	6.2	% 87.6	9.4	% 81.3
120	3.8	% 92.4	6.2	% 87.6	9.4	% 81.3
240	3.8	% 92.4	6.2	% 87.6	9.4	% 81.3

- بعد 60 min، يصل النظام إلى حالة التوازن، حيث لا يزيد الامتزاز بشكل ملحوظ مع الزمن الإضافي.
- أيون الرصاص: كفاءة ثابتة تقريبًا% 92–93 بعد 60 min.
- أيون الكادميوم: يستقر عند % 87–88 بعد 60 min.
- أيون النحاس: يستقر عند حوالي% 81–82 بعد 60 min.

النتائج تؤكد أن زمن التحريك 60 min كافٍ للوصول إلى أقصى كفاءة إزالة، وأن الاستمرار لفترات أطول (120، 240 min) لا يزيد من الامتزاز بشكل ملحوظ، مما يوفر الوقت والطاقة في التجارب العملية وبالتالي نستنتج أن:

- معظم أيونات المعادن تصل إلى الامتزاز الأقصى عند فترة الخلط المبدئية (حوالي 60 min).
- هذا يؤكد أهمية اختيار الزمن المناسب لتحقيق كفاءة عالية بدون هدر في الوقت والطاقة.

إزالة أيونات المعادن الثقيلة باستخدام هيدروجيل الألجينات:

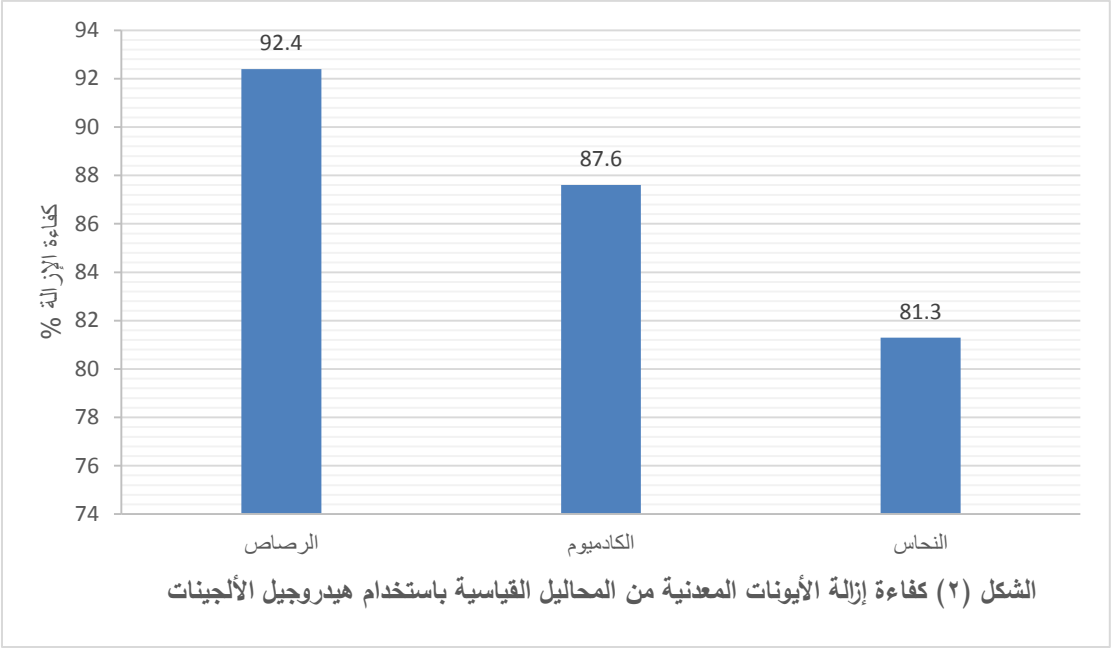
تمت متابعة إزالة أيونات الرصاص، الكادميوم والنحاس من المحاليل المائية باستخدام هيدروجيل الألجينات تحت ظروف تجريبية موحدة:

- تركيز ابتدائي لكل أيون معدن: 50 mg/L.
- كمية الهيدروجيل: 0.5 gr لكل 100 ml محلول.
- pH للمحلول: 6–5.
- درجة حرارة المخبر: 25 ± 2 ºC.
- زمن الخلط الأمثل: 60 min.

أظهرت النتائج انخفاض تراكيز المعادن بعد الامتزاز كما يلي وفق الجدول (3) والشكل (2):

الجدول (3) كفاءة إزالة الأيونات المعدنية من المحاليل القياسية باستخدام هيدروجيل الألجينات

أيون المعدن	التركيز الابتدائي (mg/L)	التركيز النهائي(mg/L)	الكمية الممتزة(mg/g)	كفاءة الازالة %
الرصاص	50	3.8	46.2	92.4
الكادميوم	50	6.2	43.8	87.6
النحاس	50	9.4	40.6	81.3



الشكل (٢) كفاءة إزالة الأيونات المعدنية من المحاليل القياسية باستخدام هيدروجيل الألجينات

يظهر أيون الرصاص أعلى كفاءة إزالة بين المعادن الثلاثة (92.4 %)، ويعزى ذلك إلى التفاعل القوي بين أيونات الرصاص ومجموعات الكربوكسيل في الألجينات، بالإضافة إلى حجم الأيون المناسب للتغلغل داخل شبكة الهيدروجيل، بينما أيون الكادميوم وصلت كفاءة إزالة إلى 87.6 %، مما يشير إلى قدرة جيدة للهيدروجيل على الامتزاز، لكن أقل من الرصاص بسبب انخفاض قوة الترابط النسبي وحجم الأيون أكبر نسبيًا مقارنة بالرابطة المثالية لمجموعات الهيدروجيل، أما أيون النحاس حقق كفاءة إزالة 81.3 %، الأقل بين الأيونات الثلاثة، ويرجع ذلك إلى حجم الأيون والقدرة المحدودة على تكوين روابط مستقرة مع مجموعات الكربوكسيل والهيدروكسيل مقارنة بالرصاص والكادميوم.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

أظهرت نتائج هذه الدراسة أن هيدروجيل الألجينات المستخلص من الطحالب البحرية البنية (Sargassum vulgare) يمثل مادة ممتزة حيوية فعالة لإزالة أيونات الرصاص، الكادميوم، والنحاس من المحاليل المائية.

أهم الاستنتاجات هي:

- وصلت كفاءة إزالة المعادن عند الظروف التجريبية المثلى إلى 92.4 % للرصاص، 87.6 % للكادميوم، و81.3 % للنحاس، مما يدل على فعالية الهيدروجيل في الامتزاز المتزامن للمعادن الثقيلة.
- زيادة كمية الهيدروجيل تؤدي إلى زيادة كفاءة الإزالة بسبب توافر مزيد من مواقع الامتزاز، لكن بعد كمية معينة (~0.5–1 غرام/100 مل)، يلاحظ ثبات نسبي للكفاءة نتيجة تشبع المواقع.
- الزمن الأمثل للوصول إلى حالة التوازن هو حوالي 60 min، حيث لا يحدث تحسن كبير في الامتزاز عند الاستمرار لفترات أطول.
- الرقم الهيدروجيني المثالي (pH = 5–6) يحافظ على شحنة المجموعات الكربوكسيلية والهيدروكسيلية للهيدروجيل، مما يعزز تكوين الروابط مع أيونات المعادن ويمنع ترسيبها في صورة هيدروكسيدات.

- الهيدروجيل يتميز بالقدرة على إعادة الاستخدام بعد الغسل، مما يجعله حلًا مستدامًا واقتصاديًا لمعالجة المياه الملوثة بالمعادن الثقيلة.

التوصيات:

بناءً على النتائج المستخلصة، يمكن تقديم التوصيات التالية:

- استخدام هيدروجيل الألجينات كخيار منخفض التكلفة وصديق للبيئة لمعالجة المياه الملوثة بالمعادن الثقيلة في المختبرات والتطبيقات الصناعية.
- ضبط كمية الهيدروجيل والرقم الهيدروجيني والزمن في كل تجربة للحصول على أعلى كفاءة إزالة مع توفير المواد والوقت والطاقة.
- إعادة استخدام الهيدروجيل بعد الغسل لإطالة العمر التشغيلي وتقليل التكاليف التشغيلية.
- توسيع الدراسات المستقبلية لتشمل محاليل مختلطة تحتوي على معادن أخرى، أو ظروف صناعية حقيقية مثل المياه الصناعية والمياه العادمة، لتقييم فعالية الهيدروجيل في تطبيقات واقعية.
- إمكانية دمج الهيدروجيل مع تقنيات معالجة أخرى مثل الترشيح بالغشاء أو المعالجة الكيميائية للحصول على كفاءة أعلى وإزالة المعادن في نطاق واسع من الظروف.

References:

[1] A. Sulaymon, A. Mohammed & T. Al‑Musawi, "Competitive biosorption of lead, cadmium, copper, and arsenic ions using algae". *Environmental Science and Pollution Research*, 20(5), 3011–3023, 2013.

[2] J. I. Ordóñez, S. Cortés, P. Maluenda & I. Soto, "Biosorption of heavy metals with algae: critical review of its application in real effluents". *Sustainability*, 15(6), 5521, 2023.

[3] "Algae Biomass Hydrogels for Enhanced Removal of Heavy Metal Ions." *Biomolecules*, 2025.

[4] Y. N. Mata, M. L. Blázquez, A. Ballester, F. González & J. A. Muñoz, "Biosorption of cadmium, lead and copper with calcium alginate xerogels and immobilized Fucus vesiculosus". *Journal of Hazardous Materials*, 163(2–3), 555–562, 2023.

[5] "Sorption of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel by marine algal biomass" *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004.

[6] B. S. Farhoud, A. M. Younis & E. M. Ali, "Evaluation of the Marine Algae Sargassum latifolium and Sargassum crassifolium for the Biosorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions". *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 28(1), 1075–1092, 2024.

[7] A. Mohammadi & F. Mahmoudnia, *Biological Treatment of Heavy Metals with Algae*. In Intech Open, 2023.

[8] S. Wang, T. Vincent, C. Faur & E. Guibal, "Alginate and algal‑based beads for the sorption of metal cations: Cu (II) and Pb (II)". *International Journal of Molecular Sciences*, 2016.