Comprehensive Journal of Science
Volume (10), Issue (39), (March, 2026)
ISSN: 3014-6266

مجلة العلوم الشاملة
المجلد (10) ملحق العدد 39 مارس 2026
ردمد: 3014-6266

مكافحة العناصر الثقيلة في مياه الصرف الصحي باستخدام الطحالب الخضراء(*Spirogyra sp*)

3 هبه الناجي علي[1] ،*حليمة عوض الشلوي[2] ،علي بو غر ارة
1 قسم الهندسة الزراعية، ا كلية الزراعة، البيضاء، ليبيا
2 قسم النبا ت، كلية العلوم، جامعة درنة - درنة، ليبيا
3 قسم الحياة البحرية، كلية الموارد الطبيعية وعلوم البيئة، جامعة عمر المختار البيضاء، ليبيا

Controlling Heavy Metals In Wastewater Using Green Algae (*Spirogyra sp*)

Corresponding author: Heba Al-Naji Ali*
heba.thabet@omu.edu.ly
Department of Agricultural engineering, Faculty of Agriculture, Omer Al-Muhktar University, Al Bayada, Libya
Halima Awad fathalla[2]
1284-3687-0001-0009
Department of Botany, Faculty of Science, University of Derna, Derna, Libya
Ali Bughrara
Department of Wildlife, Faculty of Natural Resources and Environmental Sciences, Omar Al-Mukhtar

تاريخ الاستلام:2026/02/15 –تاريخ المراجعة:2026/03/12– تاريخ القبول: 2026/03/13– تاريخ للنشر2026/04/25

المستخلص: تستهدف هذه الدراسة الي تقييم كفاءة الكتلة الحيوية لطحلب المياه العذبة (***Spirogyra sp***)في إزالة العناصر الثقيلة عالية السمية الرصاص (**pb**) والكادميوم (**cd**)من مياه الصرف الصحي غير المعالجة بمدينة البيضاء الجبل الأخضر. اعتمد التصميم التجريبي علي نظام المكررات الثلاثية علي مدار فترة تلامس استمرت ثمانية أيام تحت الظروف المخبرية(إضاءة دورية **16:8**ساعة ضوء: ظلام). اظهرت نتائج التحليل الكيميائي باستخدام مطياف الامتصاص الذري (**AAS**) انخفاضًا دالاً إحصائياً (**P<0.05**) في تركيز الكادميوم في الوسط المائي بنسبة 42.3% , في حين سجل الرصاص انخفاضاً طفيفاً بنسبة 4.8% وفي المقابل ، أظهرت الأنسجة الطحلبية الخاضعة للهضم الحمضي قدرة فائقة علي التراكم الفائق (**Hyper_ accumulation**) حيث ارتفع تركيز الرصاص من **ppm27.30)** الي **151.60ppm**بمعامل تركيز حيوي **BCF** بلغ **5.5** أضعاف) ، وارتفع الكادميوم من **0.96ppm** الي **6.61**بمعامل **BCF** بلغ **6.8**أضعاف مع دلالة إحصائية قوية جداً **(P<0.01)** . تؤكد هذه النتائج أن الية التخلص من الملوثات تعتمد بشكل متكامل علي الامتصاص السطحي الفيز وكيميائي **(Biosorption)** والامتصاص الخلوي الداخلي **(Intracellular uptake)**، مما يطرح طحلب ***Spirogyra*** المحلي كأداة استراتيجية منخفضة التكلفة ومستدامة للتطبيق في محطات المعالجة الثلاثية لإنتاج مياه ري مطابقة للمواصفات البيئية .

الكلمات المفتاحية: المعالجة بالطحالب Phytoremediation، طحلب Spirogyra، العناصر الثقيلة، الامتصاص الحيوي ، الكادميوم ، الرصاص

Controlling Heavy Metals In Wastewater Using Green Algae (*Spirogyra sp*)

Abstract

This study evaluates the efficiency of freshwater green alga Spirogyra sp. biomass in removing highly toxic heavy metals — lead (Pb) and cadmium (Cd) — from raw municipal wastewater collected in Al-Bayda city, Green Mountain region, Libya. A batch system with triplicates was employed over an 8-day contact period under controlled laboratory conditions.(16:8 h light:dark cycle) Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) results revealed a statistically significant reduction ($P < 0.05$) in cadmium concentration in the aqueous medium by 42.3%, while lead showed a modest decrease of 4.8% in water, accompanied by pronounced accumulation within algal tissues. Acid-digested algal biomass demonstrated exceptional hyper-accumulation capacity: lead concentration increased from 27.30 to 151.60 ppm (BCF = 5.5×), and cadmium from 0.96 to 6.61 ppm (BCF = 6.8×; $P < 0.01$). These findings confirm that pollutant removal operates through dual complementary mechanisms: surface biosorption

and intracellular uptake. The results position locally-sourced Spirogyra sp. as a cost-effective and sustainable tool for tertiary wastewater treatment, capable of producing irrigation water that complies with international environmental standards.

Keywords: Phycoremediation; Spirogyra sp.; Heavy metals; Biosorption; Cadmium; Lead; Bioconcentration factor (BCF)

المقدمة:

تعد مشكلة تلوث الموارد المائية بالعناصر الثقيلة من أخطر التحديات البيئية التي تواجه الإستدامة الزراعية والصحة العامة في الوقت الراهن. وتبرز عناصر مثل الرصاص والكادميوم كملوثات شديدة السميه،نظرا لقدرتها علي التراكم الحيوي في الأنسجة النباتية والحيوانيه وانتقالها عبر السلسلة الغذائية الي الإنسان ،مسببة أضراراً صحية جسيمة (Zeraatkar *et al*., 2021)وفي ظل الشح المائي المتزايد،أصبح التوجه نحو إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة ضرورة ملحه،بشرط ضمان خلوها من الملوثات التي تتجاوز الحدود المسموح بها عالمياً (Singh, Kumar Saurabh, *et al*.,2022) تعتبر طرق المعالجة التقليدية (مثل الترسيب الكيميائي و التبادل الأيوني) مكلفه اقتصادياً وغير صديقة للبيئة عند التعامل مع التركيزات المخفضة من المعادن. لذا اتجه البحث العلمي الحديث نحو (المعالجة بالطحالب) (Phycoremediation)كبديل مستدام ومنخفض التكلفة. وتتميز الطحالب الخضراء الخيطية ،ولاسيما جنس السبايروجيرا(*Spirogyra*)،بخصائص فيزيائية وكيميائية فريدة تؤهلها لامتصاص الملوثات بكفاءة . حيث يحتوي جدارها الخلوي علي شبكة معقدة من السليلوز والبكتين الغني بالمجموعات الوظيفية النشطة كيميائياً مثل مجموعات مثل الكربوكسيلCOOH -والهيدروكسيل OH-التي تعمل كمواقع ارتباط قوية للأيونات المعدنية الموجبة(Al-Homaidan, *et al*.,2023). تشير الدراسات الحديثة إلي ان ميكانيكية(الاصطياد الحيويBiosorption)في سبايروجيرا لا تقتصر فقط علي الامتصاص السطحي ، بل تمتد لتشمل التخزين في الفجوات العصارية لتقليل السمية الخلوية ، مما يرفع من كفاءة التخلص من العناصر المعقدة مثل الكادميوم و الرصاص(Varga *et al*.,2024**).** وقد اثبتت التجارب المخبرية أن هذه الطحالب قادرة علي تحقيق توازن بيئي سريع في الأوساط المائية الملوثة مما يجعلها مرشحاً مثالياً للتطبيق في محطات معالجة المياه قبل استخدامها في الري(Hassan *et al*.,2025). وتكتسب هذه الدراسة أهمية بالغة من الناحيتين البيئية والاقتصادية ؛فمن الناحية البيئية تساهم في تقديم تقييم كمي دقيق لقدرة السلالات المحلية من *طحلب Spirogyra sp*علي تفكيك معضلة التلوث المعدني بالرصاص والكادميوم في محطات الصرف الصحي. ومن الناحية التطبيقية، توفر الدراسة حلاً مستداماً للقطاع الزراعي في منطقة الجبل الأخضر في ليبيا ؛ حيث يتيح احتجاز هذه المعادن وعزلها داخل الأنسجة الطحالب إنتاج مياه ري مطابقة للمواصفات البيئية، مما يمنع تراكم السموم داخل التربة والمحاصيل الغذائية ، ويحمي الصحة العامة من مخاطر التضخم الحيوي. علاوة على ذلك، تفتح هذه النتائج آفاقاً جديدة لإمكانية دمج أحواض المعالجة بالطحالب كمنظومة ترشيح حيوية ثلاثية في محطات المعالجة المحلية. وبناء علي ما تقدم تأتي هذه الدراسة لتقييم القدرة التراكمية لطحالب *Spirogyra sp* المحلية المستخلصة من منطقة الجبل الأخضر (ليبيا) في التعامل مع مياه الصرف الصحي مع التركيز علي تحليل الفوارق الكمية والإحصائية لتركيز عناصر الرصاص والكادميوم بين الوسط المائي والأنسجة الطُحلبية ،بهدف تقديم حلول عملية تعزز من جودة المياه المستخدمة في القطاع الزراعي المحلي .

المواد وطرق البحث: (Material and Methods)

لتحقيق اهداف الدراسة وتقييم كفاءة الكتلة الحيوية لطحلب *Spirogyra* في إزالة المعادن الثقيلة وتراكمها ، تم تصميم المنهجية عبر الخطوات التالية .

1- **جمع العينات وتوصيفها** : تم جمع عينات من مياه الصرف الصحي من محطة معالجة الصرف الصحي بمدينة البيضاء(ليبيا) . كم تم تجميع الكتلة الحيوية لطحالب *Spirogyra sp* من البيئات المائية العذبة بالمنطقة وجُرى تعريفها مورفولوجياً وتجهيزها مخبرياً . قسمت العينات الطحلبية والمائية قبل بدء التجربة لتقدير التركيزات المرجعية الأساسية للمعادن الثقيلة .

شكل:(1). تجهيز الطحالب وضعها في مياه الصرف الصحي

2 -**التصميم التجريبي(Experimental Design)**

لضـمان دقة المقارنة الإحصـائية والتحليلية، اعتمدت الدراسـة علي نظام الدفعات المختبرية Batch system باسـتخدام نظام المكررات الثلاثية Triplicates لفترة تلامس اسـتمرت 8 أيام متواصـلة. صـنفت مجموعات الدراسـة الي أربع مجموعات أساسية :

جدول (1). يوضح تصنيف مجموعات الدراسة.

المجموعة	التسمية	الوصف
الأولى	مياه الصرف الصحي الخام	عينات قبل المعالجة —التركيز المرجعي الأساسي
الثانية	مياه الصرف الصحي المعالجة	عينات بعد انتهاء فترة التماس مع الطحلب
الثالثة	كتلة حيوية نقية	طحالب قبل الاستخدام —مرجع قياسي نقي
الرابعة	كتلة حيوية بعد المعالجة	طحالب بعد انتهاء عملية المعالجة لتقدير العناصر الممتصة داخل الانسجة

3- عملية المعالجة الحيوية (Bioremediation Process)

تم غمر الطحالب الخضراء في مياه الصرف الصحي تحت ظروف مخبرية مضبوطة (عند درجة حرارة ثابته و درجة لحموضـة p^h 6، وبنظام إضـاءة دورية بمعدل 16:8سـاعة ضـوء:ظلام) . اعتمدت التجربة على نظام ثلاث مكررات ،اسـتمرت فترة التماس لمدة 8 أيام لضـمان اكتمال عمليتي الامتصـاص السـطحي (Biosorption) والتراكم الخلوي الداخلي.

<u>خصائص طحلب السبايروجيرا (*Spirogyra sp.*) المستخدم في الدراسة</u>

يعتبر طحلب السـبايروجيرا من الطحالب الخضـراء الخيطية (Filamentous Green Algae) الواسـعة الانتشـار في البيئات المائية العذبة، وتم اختياره في هذا البحث كعامل معالجة حيوي نظراً لخصائصه المتميزة:

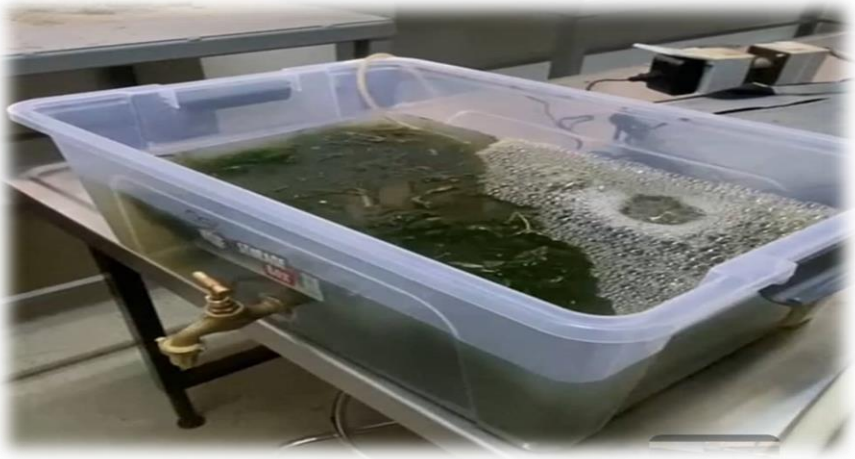
التركيب الهيكلي: يتميز الطحلب ببنية هيكلية فريدة تجعله عاملاً حيوياً فائق الكفاءة في تنقية المياه ؛ حيث يتكون غشـاؤه من جدران خلوية غنية بمركبات السـليلوز والبكتين، والتي تحتوي على مجموعات وظيفية نشـطة (مثل الكربوكسـيل والهيدروكسيل). هذه المجموعات تعمل كـــ مواقع ارتباط قوية تجذب أيونات العناصر الثقيلة ذات الشحنة الموجبة مثل الرصاص (Pb^{+2}) والكادميوم.(Cd^{+2}) .

بناءً علي هذا التركيب ، تتكامل آليتان أساسيتان داخل الطحلب للتخلص من السمية:

آلية العمل: يعتمد الطحلب في المعالجة على آلية الامتصـــاص الحيوي الســـطحي (Biosorption)وهي عملية ارتباط فيزيائي-كيميائي ســـريعة غير معتمد على الطاقة الايضـــية Non-metabolic ، وتتمثل في الارتباط المباشـــر لأيونات الرصاص والكادميوم بالمجموعات الوظيفية والمذكورة والمتاحة علي السطح الخارجي للجدار الخلوي ، مما يجعله فعالاً في خفض التراكيز العالية من المعادن الحرة في الوســـط المائي بشـــكل عاجل . كما له دور في عملية التراكم الحيوي (Bioaccumulation) وهي عملية حيوية تلي عملية الامتزاز الســـطحي ؛ معتمدة علي الايض حيث يتم فيها نقل الايونات عبر الغشـــاء البلازمي وتخزينها داخل الفجوات العصـــارية كآلية دفاعية خلوية لتقليل ســـمية المعادن داخل السيتوبلازم .مما يمنحه قدرة عالية علي التراكم الفائق دون ان يتعرض للموت السريع .

جدول (2). المواصفات الفنية والتصنيفية للطحلب الدراسة *Spirogyra sp* **.**

الوصف لعلمي	الخاصية
الاسم العلمي	*Spirogyra sp.*
التصنيف	طحلب أخضر خيطي (Filamentous Green Alga)
الآلية الرئيسية	الامتزاز الحيوي السطحي +التراكم الخلوي الداخلي
المجموعات الوظيفية	) COOH–كربوكسيل(،) OH–هيدروكسيل(
العناصر المستهدفة	الرصاص (Pb^{2+})، الكادميوم (Cd^{2+})



شكل (2) يبين الطحالب (*Spirogyra*) في مياه الصرف الصحي.

4-التحليل الكيميائي والقياسات

تم قياس تركيزات العناصـــر الثقيلة (الرصـــاص والكادميوم) في كافة المجموعات(المياه و الأنســـجة) بإســـتخدام جهاز مطياف الامتصاص الذري(Atomic Absorption Spectroscopt-AAS).

بالنسبه لعينات المياه: تم إجراء عملية ترشيح وتقدير مباشر للتراكيزات.

بالنسـبه للأنسـجة الطُحلبية: خضـعت العينات لعملية هضـم حمضـي (Acid Digestion) لتحويل العناصـر المرتبطة بالكتلة الحيوية إلى صورة سائلة قابلة للقياس بواسطة جهاز(AAS)، لضمان استخلاص النتائج بدقة عالية.

5 -التحليل الإحصائي

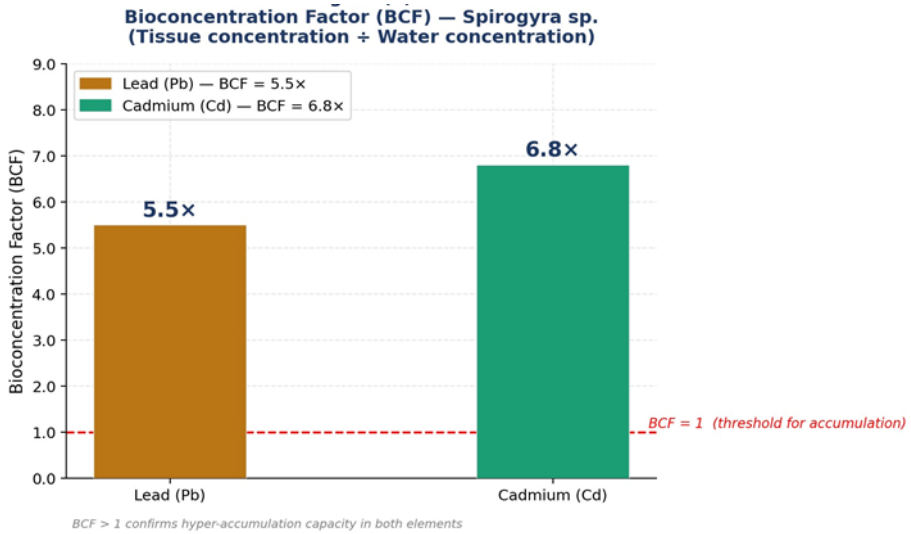
تمت معالجة البيانات الناتجة إحصـــائياً لمقارنة الفروق بين المجموعات الأربع وتحديد مدي كفاءة الطحالب في خفض نســـب الملوثات في الوســـط المائي. باســـتخدام Paired Sample T-test، في حالتين مختلفين(قبل المعالجة بالـ *Spirogyra* وبعدها).

النتائج والمناقشة:

أولا : تحليل عينات المياه جزء في المليون(ppm): أظهرت النتائج قدرة الطحالب علي خفض نسب الملوثات في الوسط المائي.

جدول(3). يوضح كفاءة الإزالة والتراكم (Calculated Efficiency).

العنصر	نسبة الانخفاض في المياه (%)	معامل التركيز الحيوي في الطحالب (BCF)
الرصاص (Pb)	4.8%	زيادة بمقدار 5.5 أضعاف
الكادميوم(Cd)	42.3%	زيادة بمقدار 6.8 أضعاف



الشكل (3). مقارنةً بين معاملَي التركيز الحيوي (BCF) لعنصري الرصاص والكادميوم

يعرض الشكل (3) مقارنةً بين معاملَي التركيز الحيوي (BCF) لعنصري الرصاص والكادميوم المحسوبَين بقسمة تركيز العنصر في الأنسجة الطحلبية على تركيزه في الوسط المائي. حيث بلغ BCF الرصاص 5.5 أضعاف وBCF الكادميوم 6.8 أضعاف. تتوافق هذه القيم مع ما وثّقه (Gupta *et al.*, 2008) من قدرة *Spirogyra* على تركيز الرصاص بمعدلات تفوق المواد الممتزة التقليدية. يُشير الارتفاع النسبي لـBCF الكادميوم مقارنةً بالرصاص إلى ألفية أعلى لأيونات Cd^{2+} مع مواقع الارتباط على الجدار الخلوي في ظروف التجربة.

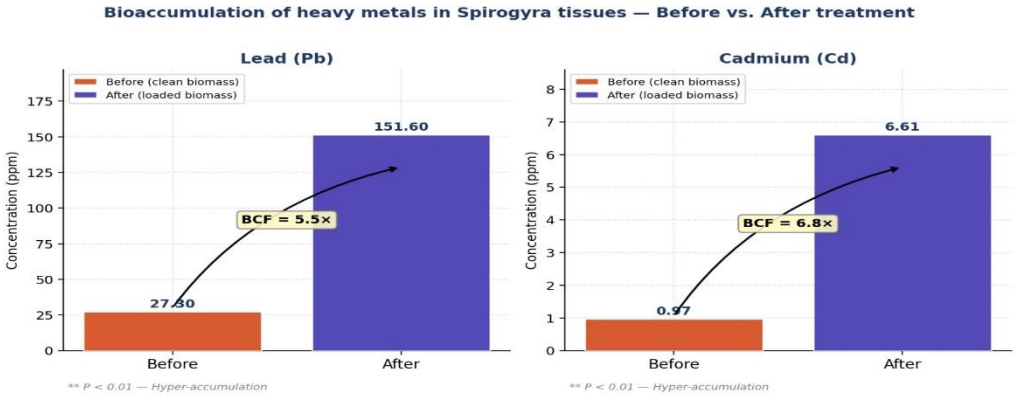
ثانياً: التراكم الحيوي في الطحالب (Bioaccumulation) **:**تشير إلي طفرة كبيرة في تركيز العناصر داخل الأنسجة الطُحلبية،ممايفسر آلية(التنظيف) التي تقوم بها الطحالب:

الرصاص **(Pb):** ارتفع من متوسط (27.3ppm)الي (151.6ppm)بعد المعالجة.
الكادميوم **(Cd)**: ارتفع من متوسط (0.96ppm) الي (6.61ppm)بعد المعالجة.

جدول(4). التراكم الحيوي في الطحالب

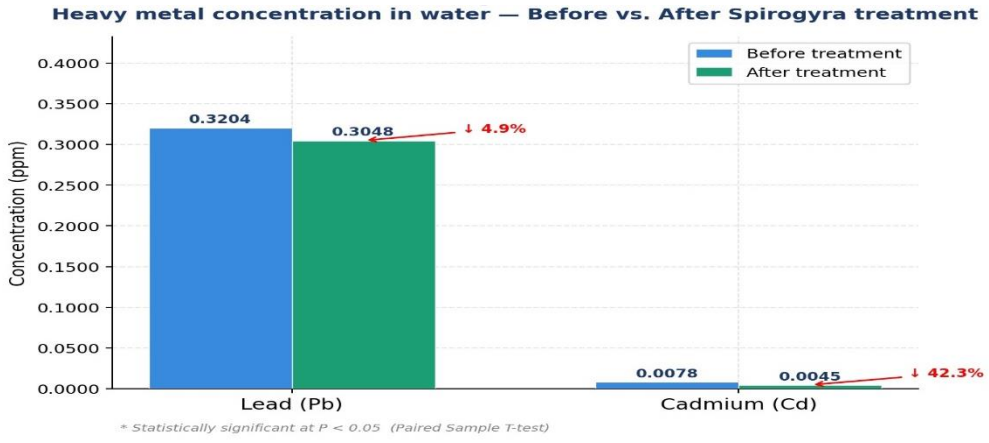
العنصر	الحالة	المتوسط الحسابي (Mean)	الانحراف المعياري(SD)	القيمة الاحتمالية P-(VALUE)
الرصاص في الماء	قبل/بعد	انخفض من 0.3204الي0.3048	0.0001	P < 0.05 (دالة إحصائياً)

الرصاص في قبل/بعد الطحالب	ارتفع من27.30 الي151.60	0.0005	P < 0.01 (دلالة قوية جدا)
الكادميوم في الماء قبل/بعد	انخفض من0.0078 الي0.0045	0.0001	P < 0.05 (دالة إحصائياً)
الكادميوم في قبل/بعد الطحالب	ارتفع من 0.9674الي6.6120	0.0001	P < 0.01 (دلالة قوية جدا)



الشكل (4). يُبيّن التغيّر في تركيز الرصاص والكادميوم داخل الكتلة الحيوية لطحلب *Spirogyra sp*.

أظهر عنصر الرصاص ارتفاعاً ملحوظاً في تركيزه من 27.30إلى 151.60جزء/مليون، بما يعادل معامل تركيز حيوي (BCF) مقداره 5.5 أضعاف، في حين ارتفع الكادميوم من 0.9674إلى 6.6120جزء/مليون بمعامل BCF بلغ 6.8 أضعاف، وكلاهما أظهر دلالة إحصائية عالية جداً ($P < 0.01$). تشير هذه النتائج إلى أن طحالب ***Spirogyra sp*** يوظّف آليتين متكاملتين في التعامل مع الأيونات المعدنية :الأولى الامتزاز الحيوي السطحي (Biosorption)، حيث يتم الارتباط السريع للأيونات على جدار الخلية، والثانية التراكم الداخلي (Intracellular Accumulation) عبر نقل الأيونات إلى الفجوات العصارية وتخزينها كآلية دفاعية لتقليل السمية الخلوية .ويُصنف هذا المستوى من التراكم ضمن إطار الظاهرة المعروفة بالتراكم الفائق (Hyper-accumulation)، مما يعزز القيمة التطبيقية لي طحلب ***Spirogyra sp*** كوسيلة فعّالة في تقنيات المعالجة الحيوية وتنقية المياه الملوثة بالمعادن الثقيلة.



الشكل (5). يوضح مقارنةً بين تركيزَي الرصاص (Pb) والكادميوم (Cd) في مياه الصرف الصحي قبل وبعد فترة التماس مع الكتلة الحيوية لطحلب *Spirogyra sp*.

أظهر الكادميوم انخفاضاً ذا دلالة إحصائية ($P < 0.05$) بنسبة 42.3%، حيث تراجع تركيزه من 0.0078 إلى 0.0045 جزء/مليون، مما يعكس ألفةً كيميائيةً مرتفعةً لأيونات Cd^{2+}مع المجموعات الوظيفية النشطة على جدار الخلية الطحلبية. في المقابل، سجّل الرصاص انخفاضاً محدوداً في الوسط المائي لم يتجاوز 4.8% (من 0.3204 إلى 0.3048

جزء/مليون). هذا الانخفاض الطفيف لا يُعزى إلى قصور في قدرة الطحلب، بل يُفسَّر بانتقال معظم أيونات Pb^{2+} مباشرةً إلى الأنسجة الطحلبية عبر آلية التراكم الداخلي (Intracellular Accumulation).

المناقشة

1- كفاءة إزالة العناصر من الوسط المائي:أظهرت النتائج قدرة *Spirogyra* علي خفض تركيز الكادميوم بنسبة تقارب 42%، أكدت الطحالب الخضراء انها تمتلك ألفة عالية لأيونات الكادميوم حتي في التراكيز المخفضة. أما بالنسبة للرصاص ، فقد لوحظ انخفاض طفيف في الماء يقابلة تراكم ضخم في الأنسجة، ممايشير إلي أن الطحالب عمِلت(كمغناطيس حيوي) سحب معظم الأيونات المتاحه في الوسط.

2- التراكم الحيوي في الأنسجة الطُحلبية: حيث سجلت الأنسجة الطُحلبية زيادة هائلة في محتوي الرصاص(455)، والكادميوم(583).هذا التراكم الفائق (Hyper-accumulation) حيث تعزي هذه الزيادة الي ظاهرتين.

1- الامتصاص السطحي (Adsorption): الإرتباط السريع للأيونات بجدار الخلية.

2- الامتصاص الداخلي (Absorption): انتقال الأيونات عبر الغشاء الخلوي وتخزينها في الفجوات العصارية، وهي آلية دفاعية تلجأ إليها *Spirogyra sp* لتقليل سُمية المعادن في السيتوبلازم.

الاستنتاج:

تؤكد النتائج التي توصلت إليها هذه الدراسة أن استخدام طحلب *Spirogyra sp* لا يقتصر كونه مجرد وسيله لتنقية المياه،بل يمثل نظاماً حيوياً متكاملاًلإدارة الملوثات المعدنية، وذلك للأسباب التالية:-

أولاً.قدرة هذا الطحلب علي رفع تركيز الرصاص داخل أنسجته إلي مستويات قياسية. وقد أظهرت الدراسات السابقة أن *Spirogyra* قادر علي امتصاص مايصل الي 140 مجم من الرصاص لكل جرام من كتلته الحيوية(Gupta et al., 2008)،مما يجعله خياراًفائق الكفاءة مقارنة بالعديد من المواد الممتزة التقليدية.

ثانياً.تسمح هذه القدرة العالية علي الامتصاص بإستخدام *Spirogyra sp* كحل استراتيجي في محطات المعالجة الثلاثية (Shah et al., 2022)،حيث يعمل كطبقة ترشيح حيوية نهائية لضمان خلو المياه من المعادن الثقيلة المتبقية بعد المعالجة الثانوية.

ثالثاً.تؤكد القياسات الميدانية أن تركيز الرصاص داخل أنسجة *Spirogya sp* يكون اعلي بعشرة أضعاف من تركيزه في الماء المحيط(Kaonga et al., 2008)،مما يضمن الحصول علي مياه ري مطابقة للمواصفات القياسية، ويقلل بشكل كبير من المخاطر البيئية المرتبطة بتراكم المعادن السامه في التربة الزراعية والأنظمة الغذائية.

التوصيات

1. التطبيق الميداني: نوصي بالبدء بتجارب ريادية (pilot Projects)في محطات معالجة مياه الصرف الصحي في منطقة الجبل الأخضر، بإستخدام أحواض طُحلبية كرحلة معالجة نهائية قبل صرف المياه للري.

2. إدارة الكتلة الحيوية: ضرورة التخلص الآمن من الطحالب المشبعة بالعناصر الثقيلة بعد إنتهاء دورة المعالجة، أو دراسة إمكانية استخلاص المعادن منها لإعادة تدويرها.(Bio-recovery)

3. توسيع النطاق: إجراء دراسات إضافية لاختبار كفاءة السبايروجيرا علي ملوثات أخري مثل الزئبق والنيكل ، وتحديد درجة الحموضة المثلي التي تعطي أعلي معدل امتصاص.

4. التوعية الزراعية: تشجيع المزارعين علي استخدام تقنيات المعالجة الحيوية البسيطة لضمان جودة المحاصيل الورقية وحمايتها من التراكم المعدني السام.

المراجع:

Ameen, F., & Al-Homaidan, A. A. (2023). Oily bilge water treatment using indigenous soil bacteria: Implications for recycling the treated sludge in vegetable farming. Chemosphere, 334, 139040.

Gupta, V. K., & Rastogi, A. (2008). Biosorption of lead from aqueous solutions by green algae Spirogyra species: kinetics and equilibrium studies. Journal of hazardous materials, 152(1), 407-414.

Hassan, M. R., Khan, M. F., Mahmud, M. S., & Samad, A. (2025). Potential factors affecting watershed deterioration: a critical review. Water, Air, & Soil Pollution, 236(9), 607.

Kaonga, C. C., Chiotha, S. S., Monjerezi, M., Fabiano, E., & Henry, E. M. (2008). Levels of cadmium, manganese and lead in water and algae; Spirogyra aequinoctialis. International Journal of Environmental Science & Technology, 5(4), 471-478.

Kumar, M., & Singh, R. P. (2022). Bioresource Technology Reports.

Shah, N., Sohani, S., Thakkar, S., Doshi, H., & Gupta, G. (2022). Potential of live Spirogyra sp. in the bioaccumulation of copper and nickel ions: A study on suitability and sustainability. Journal of Applied Microbiology, 132(1), 331-339.

Vargas, A., López, J. E., Jaimes, A., & Saldarriaga, J. F. (2024). Phytoremediation of Hg and chlorpyrifos contaminated soils using Phaseolus vulgaris L. with biochar, mycorrhizae, and compost amendments. Environmental Geochemistry and Health, 46(11), 478.

Zeraatkar, Z., Siuki, A. K., & Shahidi, A. (2021). Delineation of the Areas with Potential Land Subsidence Using the Analytic Network Process (Case Study: Birjand Aquifer, Iran). Geography and Natural Resources, 42(3), 290-295.