Efficiency of black mustard Brassica nigra L. in remediating contaminated soils with lead and cadmium

Dr.Mohammad Dikkeh[*]
Dr.Vienna Hammoud[**]
Maissoun Ziadeh[***]

(Received 20 / 9 / 2023. Accepted 7 / 2 /2024)

□ ABSTRACT □

This study dealt with evaluating the ability of the black mustard plant to accumulate cadmium and lead, with the aim of determining its efficiency for use by phytoremediation.
The results of the study showed that the concentration of lead and cadmium in the soil had a significant effect on the decrease in biomass and on the content of the roots and shoots of the black mustard plant of both metals. When calculating the cadmium efficiency factors of the phytoremediation of the mustard, which are the Bioconcentration Factor (BCF) Bioaccumulation Coefficient (BAC) and Transfer Factor (TF), we found that the black mustard could be considered a potential candidate for use in phytoremediation of cadmium by bio-extraction method in low-contaminated sites, because it had BAC and TF >1 despite the fact that it did not behave as a hyper-accumulating plant, and the specific extraction yield percentage SEY% is low, and that we may need more than 450 cropping cycles for mustard over a period of two months to clean soil contaminated with 3 mg cadmium/kg soil.
Meanwhile, the black mustard plant did not show efficiency in extracting lead, as all plant phytoremediation efficiency coefficients were less than one, and the SEY% lead extraction yield values were very low.

Keywords: phytoremediation, *Brassica nigra*, The specific extraction yield, lead, cadmium.

Copyright **:**Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

[*] **Professor - Department of Soil and Water Sciences - Faculty of Agricultural Engineering - Tishreen University - Lattakia - Syria. dikkeh@gmil.com**
****Associate Professor - Department of Biology - Faculty of Science - University of Tartous - Tartous – Syria. viennahammoud@gmail.com**
*****Postgraduate student - Department of Soil and Water Sciences - Faculty of Agricultural Engineering - Tishreen University - Lattakia - Syria. maissounziadeh@tishreen.edu.sy**

كفاءة الخردل الأسود *Brassica nigra* L. في معالجة ترب ملوّثة بالرّصاص والكادميوم

د. محمّد دكّه*

د. فينّا حمّود**

ميسون زياده ***

(تاريخ الإيداع 20 / 9 / 2023. قبل للنشر في 7 / 2 / 2024)

□ ملخّص □

تناولت هذه الدّراسة تقييم مقدرة نبات الخردل الأسود على مراكمة الكادميوم والرّصاص، وذلك بهدف تحديد كفاءته للاستخدام بالمعالجة النّبتيّة، نُفّذت لهذه الغاية تجربة أصص عوملت تربتها بنترات الكادميوم بتراكيز 3–15–30 مغ كادميوم /كغ تربة ونترات الرّصاص بتراكيز 100–300–700 مغ رصاص/كغ تربة، وبنترات الكادميوم ونترات الرّصاص معاً بتراكيز 3Cd+100Pb – 15Cd +300Pb – 30Cd + 700Pb مغ/كغ تربة.

أوضحت نتائج الدراسة وجود أثر معنوي لتركيز الرّصاص والكادميوم في التّربة على انخفاض الكتلة الحيّة، وعلى محتوى الجذور والمجموع الخضريّ لنبات الخردل الأسود من كلا المعدنين، وعند حساب معاملات كفاءة المعالجة النّباتية لنبات الخردل بالنّسبة للكادميوم، وهي معامل التّركيز الحيويّ Bioconcentration Factor (BCF)، معامل التّراكم الحيويّ Bioaccumulation Coefficient (BAC)، ومعامل الانتقال Transfer Factor (TF)، وجدنا أنّه من الممكن اعتبار نبات الخردل الأسود مرشّحاً محتملاً للاستخدام بالمعالجة النّبتيّة للكادميوم بطريقة الاستخلاص الحيويّ في المواقع ذات التّلوّث المنخفض، لامتلاكه قيم معاملات BAC و TF >1، على الرّغم من كونه لم يتصرّف كنبات فائق المراكمة، وكانت قيم عائديّة الاستخلاص للكادميوم SEY% The specific extraction yield percentage منخفضة، وقد نحتاج لأكثر من 450 زراعة للخردل لمدّة شهرين لتنظيف تربة تركيز الكادميوم الكلّي فيها 3 مغ كادميوم/كغ تربة.

في حين لم يُظهر نبات الخردل الأسود كفاءة باستخلاص الرّصاص حيث كانت كلّ معاملات كفاءة المعالجة النّباتية أقلّ من الواحد، وقيم عائديّة الاستخلاص للرّصاص SEY% منخفضة جداً.

الكلمات المفتاحيّة: المعالجة النّبتيّة، الخردل الأسود، عائديّة الاستخلاص، الرّصاص، الكادميوم.

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

* **أستاذ – قسم علوم التّربة والمياه –كلية الهندسة الزراعية– جامعة تشرين– اللاذقية سورية.**

** **أستاذ مساعد – قسم علم الحياة – جامعة طرطوس– سورية**

*** **طالبة دكتوراه – قسم علوم التّربة والمياه – كلية الهندسة الزراعية– جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**

مقدّمة:

التلوّث بالمعادن الثّقيلة مشكلة بيئيّة خطيرة في العالم حاليّاً، بسبب الانبعاثات الصّناعيّة واستخدام الحمأة أو الرّي بمياه الصّرف الصّحيّ، والاستخدام المفرط للمبيدات الحشريّة والأسمدة، ومخلّفات صناعة صهر المعادن (Chen *et al*., 2011 Gayatri *et al*., 2019) ، وفي العقود الأخيرة اتجه الاهتمام لدراسة المعادن الثّقيلة الخطرة في التّربة مثل الكادميوم (Cd)، الكروم (Cr)، الزّئبق (Hg)، الزّرنيخ (As)، الرّصاص (Pb)، والزّنك (Zn)،لأنّها ليست قابلة للتّحلل الحيويّ، ويمكن أن تستمر في البيئة لفترات طويلة، ممّا يجعل التّربة غير صالحة للزّراعة، بعض هذه المعادن شديدة السّميّة للإنسان، حتى في تراكيز منخفضة، مثل الكادميوم والرّصاص (Bortoloti and Baron, 2022)

يتكوّن المصطلح العامّ للمعالجة النّباتيّة (*Phytoremediation*) من الكلمة اللاتينيّة *phyto* وتعني نبات، المرتبطة بالكلمة اللاتينيّة *remedium* وتعني تصحيح الشّر أو إزالته، حيث يتمّ استخدام قدرات الامتصاص الفريدة والانتقائيّة لأنظمة جذر النّبات، والانتقال الفعّال، والتّراكم البيولوجيّ، وقدرات تحليل الملوّثات من قبل النّباتات المُراكِمة في تقنيّة المعالجة النّباتيّة، وتُعرّف إحدى طرق المعالجة النّباتيّة باسم تقنيّة الاستخلاص الحيويّ (*Phytoextraction*) ويمكن استخدامها لإزالة المعادن الثّقيلة من التّربة ضمن الكتلة الحيّة للنّباتات المزروعة عليها، أو نقل كميّة كبيرة من المعادن من التّربة إلى الأجزاء القابلة للحصد (سواء الجذور تحت الأرض والبراعم الموجودة فوق الأرض)، ثمّ إزالة هذه النّباتات الغنيّة بالمعادن من الموقع والتخلّص منها، كما تمّ التأكيد على تفضيل استعادة العناصر المعدنية المتراكمة وإعادة تدويرها، إن أمكن (Dar *et al.,* 2015) حيث ينتج عن حصاد هذه النّباتات نفايات حيويّة من الممكن أن تصبح مصدراً ثانويّاً للتلوّث ما لم يتمّ التّخلّص منها بالطّرق المناسبة، مثل: التّجفيف ، والتّرميد لاستخدام الرّماد الّذي يتبقى فيه نسب مسموحة من المعادن الثّقيلة في الرّماد(مع ملاحظة كونها أعلى من النّسب المسموحة في النّباتات) كسماد في الغابات، والتّخزين في مكبّ النّفايات، والهضم اللاهوائيّ، والوسائل الميكروبيّة، والفيزيائيّة، وإنتاج الفحم الحيويّ والزّيت الحيويّ النّقي حيث يتمّ الاحتفاظ بالمعادن الثّقيلة في مخلّفات عمليّة استخراج الزّيت عند استخلاصه بطريقة الانحلال الحراريّ Pyrolysis ويتمّ استخدامهما كمصدر طاقة، أو الوسائل الكيميائيّة الأخرى,*et al.* Ginneken) (2007, Mourato *et al*., 2015, Amin *et al*., 2018, Liu and Tran, 2021)

تُعدّ المعالجة النباتيّة طريقة فعالّة من حيث التّكلفة وصديقة للبيئة، ويمكن تطبيقها على مناطق واسعة ولكن لها بعض العيوب منها أنّ معظم النّباتات فائقة المراكمة أعشاب ذات كتلة حيويّة صغيرة ممّا يجعل المعالجة النباتية بطيئة جدّاً، وقد تستغرق عدة سنوات، أو حتّى عقوداً، لخفض مستويات التّلوّث بالمعادن في التّربة إلى النّصف (Chen *et al*., 2011, Raz *et al*., 2020)

و تنتمي الأنواع النّباتية الّتي تُظهر إمكانات المعالجة النباتية إلى عدّة عائلات نباتيّة، مثل Brassicaceae, Asteraceae, Fabaceae, Poaceae, and Chenopodiaceae (Amin *et al*, 2018)، وقد تمّ تصنيف أكثر من 500 نوع نباتي تنتمي لـ 101 فصيلة كنباتات فائقة المراكمة للمعادن الثّقيلة، معظمها ينتمي للفصائل التّالية: المركّبة، الصّليبيّة، البقوليّة، الشّفويّة، والنّجيليّة (Sarma, 2011)، للعديد من أنواع الفصيلة الصّليبيّة القدرة على مراكمة المعادن الثّقيلة كالكادميوم، الزّرنيخ، الرّصاص، والزّنك، مما يجعلها مصدراً محتملاً للتّوسّع بالأبحاث عنها مستقبلاً(Roy and Mondal, 2020) ، وتتحمّل العديد من الأنواع النباتية التي تنتمي إلى جنس Brassica التأثيرات السامة للمعادن الثّقيلة، وبالتالي فهي ذات أهمية للاستخدام في المعالجة النباتية، حيث يمكن لأنواع الفصيلة

الصّليبيّة إجراء المعالجة النباتية للمعادن الثّقيلة من خلال عدّة آليات الفسيولوجية، التّطاير النّباتيّ (*phytovolatilization*)، التثبيت النّباتيّ (*phytostabilization*)، والاستخراج النّباتيّ (*phytoextraction*)، وتنجح عمليّة المعالجة النّباتيّة في المواقع ضعيفة إلى متوسّطة التّلوّث، وتُعدّ غير مناسبة للمواقع عالية التّلوّث، أنواع Brassica أيضًا قادرة على تصنيع بعض المواد الّتي تساعد في نقل الأيونات المعدنيّة إلى الأجزاء الهوائيّة للنّباتات، مثل الميتالوثيونين (MTs)، والجلوتاثيون، والفيتوشيلاتين (PCs) وهي عبارة عن ثيول منخفض الوزن الجزيئيّ مسؤول عن نقل أيونات المعادن من مجمع PC–metal إلى أماكن تخزينها (Thangavel and Subbhuraam, 2004, Bortoloti and Baron,2022).

من الضروريّ أن تكون النّباتات، الّتي يتمّ اختيارها للمعالجة النّباتيّة، مناسبة للممارسات الزّراعيّة وقادرة على إنتاج كتلة حيويّة كافية مع أقصى امتصاص للمركّبات المعدنيّة حتّى تكون فعّالة، الأنواع النّباتيّة ذات التّراكم الفائق المعدنيّ Hyperaccumulator plants لها القدرة على النّمو واستكمال دورة حياتها مهما كان تركيز المعدن في التّربة (Barceló and Poschenrieder,2003) ، وهي قادرة على تجميع ما لا يقلّ عن 0.1٪ من الوزن الجافّ للأوراق من أيّ معدن ثقيل(Pantola *et al.*, 2014)، وتُعدّ النّباتات فائقة المُراكمة عندما يتم مراكمة المعادن في الأوراق بتراكيز أكبر من Cd > 100 ppm ، Co, Cu, Ni, Pb > 1000 ppm، Mn, Zn > 10000 ppm (Kabata–Pendias and Pendias, 2001, Dar *et al.*, 2015) ولا يمكن أن يتمّ التأكيد النّهائي لحالة التّراكم المفرط لنبات ما إلا من خلال تجارب الزّراعة المائيّة حيث تبيّن أنّ النّبات يتحمّل تركيزات عالية للغاية من المعدن المتوفّر حيويّاً، بحيث تتراكم المعادن في المجموع الخضري للنّبات مفرط المراكمة بتركيزات استثنائيّة مقارنةً بالأنواع الأخرى(Baker *et al.*, 2002)، ومن الملاحظ أنّ معظم المعادن الثّقيلة التي تمتصها النّباتات غير شديدة المراكمة يتمّ الاحتفاظ بها في الخلايا الجذريّة، ويتمّ إزالة سمومها في السّيتوبلازم أو تقسيمها وتخزينها ضمن الفجوات، في حين تقوم النّباتات شديدة المراكمة بنقل هذه العناصر بسرعة وكفاءة إلى المجموع الخضريّ عبر نسيج الخشب، وبالتّالي فإنّ الإزاحة من الجذر إلى المجموع الخضري تعمل كقوة دافعة لحالة التّراكم الزّائد لدى الأنواع مفرطة المُراكمة عن طريق خلق استجابة دائمة لنقص المعادن في الجذور(Dar *et al.*, 2015).

من المعروف أنّ الرّصاص معدن ثقيل ذو عدد ذرّي مرتفع، وحركته في التّربة هي الأقلّ بين جميع المعادن الثقيلة، كما تُعدّ حركة الرصاص في النّباتات منخفضة نسبيّاً، ومعظم الرّصاص الّذي تمتصّه النّباتات يقتصر على الجذور ويتم نقل كميّة صغيرة فقط إلى البراعم، حيث يرتبط Phytochelatin بأيونات Pb ممّا يؤدّي إلى عزل أيونات Pb في جذور النباتات، وحتّى ضمن الجذر نفسه فقد لوحظ في نبات الخردل الهنديّ B. juncea امتصاص كبير داخل الخلايا للرّصاص عند طرف الجذر في حين يحدث امتصاص متناثر وفي الغالب خارج الخليّة بعيداً عن أطراف الجذر، بشكلٍ عامّ يوجد الرصاص في التّربة كأملاح في أشكال قابلة للذّوبان وغير قابلة للذّوبان، ومن المعروف أنّ تلوّث التربة بالرّصاص يُخفّض إنبات البذور(Meyers *et al.*, 2008, Anjum *et al.*, 2012)، كما لاحظ Kaur, 2018 انخفاضاً في إنبات بذور الخردل الهنديّ عند نموّه في تربة ملوّثة بالرّصاص وقام بتجميع الرّصاص في الأجزاء الجذريّة والخضريّة.

الكادميوم معدن سامّ قد يسبّب مشاكل خطيرة للإنسان عندما يتمّ استخدام التّربة الملوثة بالكادميوم لزراعة المحاصيل، لأنّه ينتقل بسهولة من التّربة إلى السّلسلة الغذائيّة، ممّا قد يهدّد صحة الإنسان والحيوان، ويعتبر الرّقم الهيدروجيني للتّربة مهمّاً بشكل خاصّ لأنّه يتحكّم في قابليّة ذوبان الكادميوم وحركته في التّربة وبالتّالي توافره للنباتات (Chen *et al.*, 2011) ، ويعتمد

نقل المعادن الثّقيلة من التّربة إلى النّباتات بشكل أساسيّ على الكميّة الإجماليّة المحتملة المتاحة أو التّوافر البيولوجيّ للمعدن، وتدخل أيونات المعادن الثّقيلة مثل الكادميوم إلى الخليّة النّباتيّة عن طريق ناقلات الكاتيونات الأساسيّة مثل + Fe2 (Setia *et al.*, 2018).

أشارت نتائج بحث أجري في مكبّ البصّة إلى تلوّث التّربة بالعناصر المدروسة، الرّصاص، الكادميوم، والنّيكل، بحيث تجاوزت الحدود المسموح بها في الأراضي الزّراعيّة (الجبيلي وآخرون، 2006)، وفي دراسة لوجود الرّصاص في التّربة بأماكن مختلفة من محافظتيّ دمشق وريف دمشق في عام 2014م، لوحظ أن أكثر العيّنات التي أُخذت من مدينة دمشق تجاوزت القيمة الإنذاريّة للرّصاص وفقاً للتّشريعات العالميّة (جحى، 2014)، وفي دراسة تعيين التّلوّث بالرّصاص في معمل بطاريّات السّفيرة/ حلب/ والبيئة المحيطة، عام 2007 كان تركيز الرصاص في التّربة داخل حرم المعمل أكثر من الحدود المسموح بها في التّرب الحراجية بمعدلات تفوق ال ٣٠ مرة ، أمّا في المناطق الزراعيّة المحيطة بالمعمل فكان تركيز الرّصاص في عدد من المواقع أعلى من الحدود المسموح بها. (العودات وآخرون، 2007)

تأتي أهميّة البحث من كونه تتّمة لدراساتٍ سابقة في سوريّة أثبتت وجود عدّة مناطق تتجاوز الحدود المسموحة وتتعدّاها للحدود الإنذاريّة من بعض المعادن الثّقيلة في التّرب وخصوصاً في أراضي زراعيّة قريبة من منشآت صناعيّة كمعامل الدّهانات والدّباغة والبطّاريّات التي تُعدّ صناعات تضيف الكثير من المعادن الثّقيلة للبيئة المحيطة، وفي شوارع أساسيّة في العاصمة دمشق أو حدائق لعب للأطفال، ممّا يستدعي إيجاد طريقة فعّالة ورخيصة التّكلفة لتنظيف التّرب من المعادن الثّقيلة، وهو ما تحقّقه المعالجة النّباتيّة.

ويهدف البحث الحالي إلى دراسة تراكم وتوزّع الرّصاص والكادميوم في الأجزاء النّباتيّة (جذور – مجموع خضريّ) لنبات الخردل الأسود الّذي ينمو فوق ترب ملوّثة، لتحديد أيّ الأجزاء النّباتيّة الأكثر فاعليّة بمراكمة الملوّث، وتقييم كفاءة نبات الخردل الأسود في المعالجة النّباتيّة.

طرائق البحث وموادّه:

- **تجربة الأصص والعمل المخبريّ**

نُفّذ هذا البحث بين أيلول 2021 وتشرين الأوّل 2022م في طرطوس، وأجريت التّحاليل في مخابر كليّة الزّراعة جامعة تشرين، ومخابر كليّة العلوم جامعة طرطوس، والمعهد العالي لبحوث البيئة جامعة تشرين.

-تحضير الأصص وأخذ عيّنات التّربة

تمّ جمع التّربة من الطبقة السطحيّة من أرض زراعيّة على عمق 10 سم، تُركت لتجفّ هوائيّاً لمدة يومين، تمّ تنخيل حوالي 200 كغ بمنخل 2مم، ثمّ خلطها جيّدا وأخذ حوالي لإجراء التحاليل الأساسية على التربة (Al-Zoubi et al., 2013).

الجدول (1) بعض خصائص التّربة المستخدمة في تجربة الأصص

خصائص التّربة	قوام التّربة	نسبة الطّين %	نسبة السّلت %	نسبة الرّمل %	السّعة التّبادليّة الكاتيونيّة م.م/100غ	المادّة العضويّة %	درجة الحموضة 5:1 تربة: ماء	النّاقليّة الكهربائيّة ميلليموس/سم 5:1 تربة: ماء	كربونات الكالسيوم الكليّة%	كربونات الكالسيوم الفعّالة%	تركيز الرّصاص مغ/كغ	تركيز الكادميوم مغ/كغ
	طينيّة رمليّة	40	14	46	36.85	2.72	7.11	0.35	8.41	2.73	0.48	0.035

تمّت معاملة كل أصيص(2كغ تربة) بمحلول يحتوي نترات الرّصاص أو نترات الكادميوم أو الاثنين معاً، كما هو موضّح، حيث كانت معاملات التّجربة:

الشاهد Cd0 + Pb0: بدون معاملة.

Cd1: بتركيز 3 مغ /كغ كادميوم.

Cd2: بتركيز 15مغ /كغ كادميوم.

Cd3: بتركيز 30مغ /كغ كادميوم.

Pb1: بتركيز 100 مغ /كغ رصاص.

Pb2: بتركيز 300 مغ /كغ رصاص.

Pb3: بتركيز 700 مغ /كغ رصاص.

Cd1 + Pb1 بتركيز 3 مغ /كغ كادميوم +100 مغ /كغ رصاص.

Cd2 + Pb2 بتركيز 15مغ /كغ كادميوم +300 مغ /كغ رصاص.

Cd3 + Pb3 بتركيز 30مغ /كغ كادميوم + 700 مغ /كغ رصاص.

ليكون عدد المعاملات عشرة بمعدّل ثلاثة مكرّرات لكل معاملة، أي بمجموع 30 أصيص، تمّ ملء الأصص بـ 2 كغ تربة جافة هوائياً.

تمّ تحضين المعادن مع التّربة لمدّة 15 يوم، تمّ ري الأصص بالماء المقطّر حتّى السّعة الحقلية (حوالي 700 مل ماء لكل أصيص)، ثمّ تم الرّي ب 200 مل من الماء بمعدل مرة كل يوم أو كل يومين حسب جفاف التّربة، وإذا حدث رشح تتمّ إعادة المياه الراشحة للأصيص مرّة ثانية، وفي اليومين التاسع والعاشر من التّحضين تمّ تجفيف التّربة هوائيّاً ثمّ خلط كل 3 أصص تمثّل نفس المكرّر مع بعضها بشكل جيد أي تمّ خلط 6 كغ من 3 أصص تحمل نفس اسم المعاملة والمكرر (معاملة Cd1 مكرر1، 2،3 مثلاً) ثمّ إعادة توزيعها على الأصص الثلاثة بهدف توحيد تربة المكرّرات، ثمّ تمّت زراعة عشرين بذرة من الخردل الأسود في كل أصيص، وبعد الإنبات تمّ تخفيف النّباتات إلى نباتين في كلّ أصيص، استمرّت الزّراعة لمدّة شهرين، وتمّ الحصاد في 2022/1/15م.

-تحضير العيّنات النّباتيّة

تمّ غسل النّباتات بالماء عدّة مرّات بعد الحصاد، ثمّ تمّ فصل الجذور عن المجموع الخضري، وغُسلت النّباتات بالماء المقطّر ثلاث مرّات في المختبر، وبعدها جُفّفت هوائيّاً، ثمّ قيس الوزن الرّطب، جّففت العيّنات بمجفف كهربائي على درجة حرارة 80°م لمدّة 7- 8 ساعات حتّى ثبات الوزن ثمّ قيس الوزن الجّافّ، ثمّ تمّ طحن العيّنات المجفّفة للجذور والمجموع الخضري بمطحنة كهربائيّة، وتنخيلها بمنخل 1مم، والاحتفاظ بها بعبوات بلاستيكيّة محكمة الإغلاق.

تمّ هضم العيّنات النّباتيّة باستخدام حمض الآزوت عالي النّقاوة، تمّ تقدير الكادميوم والرصاص في المستخلصات باستخدام جهاز الامتصاص الذري6800- Shimadzu AA، في المعهد العالي لبحوث البيئة في جامعة تشرين.

- مؤشّر التحمّلTolerence Index (TI)

يُعبَّر مؤشر التحمّل (TI) عن النّسبة بين قياسات النّمو (طول الجذر، طول المجموع الخضريّ أو الأوراق، الوزن الرّطب والجافّ للجذور، الوزن الرّطب والجافّ للأوراق) للنّباتات في التّربة الملوّثة إلى القياسات في تربة الشّاهد غير الملوّثة (Chen *et al.*, 2011, Amin *et al.*, 2018)

- **كفاءة النّبات في استخلاص معدن**
- **معاملات كفاءة المعالجة النّباتيّة**

معامل التّركيز الحيويّ Bioconcentration Factor

BCF = تركيز العنصر في جذور النّبات / تركيز العنصر في التّربة.

معامل التّراكم الحيوي Bioaccumulation Coefficient

BAC = تركيز العنصر في المجموع الخضريّ للّنبات / تركيز العنصر في التّربة.

معامل الانتقال Transfer Factor

TF = تركيز العنصر في المجموع الخضري للنبات / تركيز العنصر في جذور النبات.

(Yoon *et al*., 2006, Malik *et al*., 2010, Amin *et al*., 2018)

- **نسبة عائد الاستخلاص لمعدن** The specific extraction yield percentage (SEY%)

يُحسب عائد الاستخلاص للنّبات من تقسيم مجموع محتوى المعدن في الجذور ومحتوى المعدن في المجموع الخضريّ على تركيز المعدن الكلّي في التربة، ضرب 100، حيث يتمّ حساب:

محتوى المعدن في الجذور = تركيز المعدن بالجذور بال مغ/غ * الوزن الجاف للجذور.

محتوى المعدن في المجموع الخضريّ = تركيز المعدن بالمجموع الخضري بال مغ/غ * الوزن الجاف للمجموع الخضريّ (Audet and Charest, 2006, Audet and Charest, 2007).

- **التّحليل الإحصائيّ**

تمّ إجراء التّحاليل الإحصائيّة باستخدام برنامج SPSS (Statistic program for social science)

النّتائج والمناقشة

- **تأثير تراكيز الرّصاص والكادميوم على المؤشّرات الحيويّة لنبات الخردل الأسود**
- **نسبة الإنبات:**

بينت نتائج التحليل الإحصائي عدم وجود فروق معنوية واضحة لتأثير تراكيز الرّصاص والكادميوم بالتّربة في نسبة إنبات بذور الخردل، ومع ذلك لوحظ تراجع قيمة الإنبات بزيادة تركيز الرّصاص وكانت نسبة الإنبات الأقلّ 85% عند المعاملة بالرّصاص Pb3 بالتّركيز 700 مغ رصاص/كغ تربة؛ وهذا يتوافق مع ما ذكره Anjum وآخرون (2012)، بأنّ تلوّث التّربة بالرّصاص يخفّض من نسبة إنبات البذور، وكانت أعلى قيمة للإنبات 100% عند المعاملة بالكادميوم Cd2 بالتّركيز 15 مغ كادميوم/ كغ تربة، في حين بلغت نسبة الإنبات 97.5% في معاملة الشّاهد (الجدول،2).

- **الوزن الرّطب والجافّ للمجموع الخضريّ**

أظهرت نتائج التحليل الإحصائي (جدول، 2) وجود تأثير لتراكيز الرصاص والكادميوم في الوزن الرطب للمجموع الخضري؛ حيث بلغت أدنى قيمة 14.71 غ في معاملة الخليط بين الرصاص والكادميوم (بالتركيزين 300 مغ رصاص + 15مغ كادميوم / كغ تربة) مقارنةً مع معاملة الشاهد الذي سجل أعلى قيمة للوزن الرطب (23.52غ)، في حين تراوحت قيم الوزن الجافّ للمجموع الخضريّ بين 1.48 و1.1 غ/ نبات، (الشّكل 3)، وتوافقت هذه القيم مع معاملة الشّاهد والتّركيز الأعلى للكادميوم 30 مغ كادميوم /كغ تربة على التّوالي، (الجدول2)،

وقد لوحظ انخفاض كل من الوزن الرّطب والوزن الجافّ للمجموع الخضري في جميع المعاملات مقارنةً مع الشّاهد، (الجدول2)، وكان التّناقص واضحاً بزيادة تركيز الكادميوم، إلّا أنّه لم يتناقص بزيادة تركيز الرّصاص، ربّما يعود ذلك لعدم نقل الرّصاص للمجموع الخضريّ في نبات الخردل بكميّات ذات أهميّة (الجدول 5).

- **الوزن الرّطب والجافّ للجذور**

لوحظ تراجع للوزن الرّطب والجافّ للجذور بزيادة تراكيز الكادميوم والرّصاص في التّربة بشكل أكبر من تراجع الوزن الجافّ والرطب للمجموع الخضري، حيث تراوحت قيم الوزن الرّطب للجذور بين 0.59 و 2.1 غ/ نبات، وتوافقت هذه القيم مع معاملة التّركيز الأعلى للكادميوم 30 مغ كادميوم /كغ تربة والشّاهد، على التّوالي، في حين تراوحت قيم الوزن الجافّ لجذور نبات بين0.1 0.24 غ/ نبات، وتوافقت هذه القيم مع معاملة التّركيز الأعلى للكادميوم 30 مغ كادميوم /كغ تربة والشّاهد، على التّوالي، وعلى الرّغم من عدم وجود فروق معنويّة واضحة بين معظم المعاملات بالنّسبة للوزن الرّطب للجذور، إلّا أنّ تأثير زيادة تركيز الكادميوم سلباً على الوزن الجافّ للجذور كان واضحاً عند المقارنة بين معاملات الكادميوم الثّلاث (الجدول2)، وقد ذكر Raz *et al.*, 2020 أنّ إجهاد الكادميوم يؤدي إلى انخفاض إنتاجيّة المادّة الجّافة للنّبات.

الجدول (2): تأثير التّلوّث بالرّصاص والكادميوم على مؤشّرات نبات الخردل الأسود الحيويّة

معاملات الأصص	نسبة الإنبات	الوزن الرّطب للمجموع الخضري غ/نبات	الوزن الجافّ للمجموع الخضري غ/نبات	الوزن الرّطب للجذور غ/نبات	الوزن الجافّ للجذور غ/نبات
	Mean±STD	Mean±STD	Mean±STD	Mean±STD	Mean±STD
شاهد	97.5±3.53	23.52 ±0.1^{e}	1.475±0.05 ^{c}	2.1±0.21^{c}	0.24±0.014^{d}
Cd1	97.5±3.53	19.34 ±0.3^{d}	1.295±0.021 ^{b}	1.195±0.007^{b}	0.175±0.007^{c}
Cd2	100±0.0	18.15 ±1.34^{cd}	1.265±0.064 ^{b}	0.65±0.14^{a}	0.145±0.021^{b}
Cd3	97.5±3.53	15.55 ±1.49^{ab}	1.1±0.099 ^{a}	0.59±0.11^{a}	0.10±0.014^{a}
Pb1	92.5±3.53	15.14 ±0.53^{ab}	1.195±0.092 ^{ab}	0.68±0.057^{a}	0.115±0.007^{ab}
Pb2	95±7.07	15.15 ±0.78^{ab}	1.115±0.035 ^{a}	0.63±0.057^{a}	0.105±0.021^{ab}
Pb3	85±7.07	17.11 ±0.3^{bc}	1.31±0.09 ^{b}	0.695±0.035^{a}	0.115±0.007^{ab}
Cd1+Pb1	97.5±3.53	16.12 ±0.64^{abc}	1.275±0.007 ^{b}	0.83±0.057^{a}	0.125±0.021^{ab}
Cd2+Pb2	97.5±3.53	14.71 ±0.86^{a}	1.24±0.028 ^{ab}	0.815±0.13^{a}	0.115±0.007^{ab}
Cd3+Pb3	95±7.07	16.63 ±1.03^{abc}	1.27±0.057 ^{b}	0.77±0.17^{a}	0.11±0.028^{ab}
P	0.234	0.00	0.006	0.00	0.00

- **a,b.c.d.e سويات الفروق المعنوية بين المتوسطات عند درجة ثقة95%.**

- **تحديد مؤشر التحمّل Tolerance Index (TI)**

وفقًا لـ Audet and Charest, 2007 ، إذا كانت قيم TI أقل من 1، فهذا يشير إلى أن النّبات عانى من الإجهاد بسبب التلوث المعدني مع انخفاض صاف في الكتلة الحيوية، على النّقيض من ذلك ، إذا كانت قيم TI أكبر من 1 ، فاقترح أنّ النّباتات قد طوّرت تحمّل مع زيادة صافية في الكتلة الحيوية (تراكم مفرط)، وإذا كانت قيم TI تساوي 1 ، فإنّ النّبات لا يتأثّر بالتلوّث المعدنيّ، حيث لا يوجد فرق بين وجود الملوّث ومعاملة الشّاهد.

في هذه الدّراسة، وجدنا انخفاض في الكتلة الحيويّة لنبات الخردل الأسود، حيث كل قيم مؤشّر التحمّل كانت أقلّ من واحد، ممّا يشير إلى تعرّض نبات الخردل الأسود للإجهاد، وأظهرت الجذور تأثّراً أكبر من المجموع الخضريّ عند تعرّضها لتراكيز مختلفة من معدني الرّصاص والكادميوم، سواء كل معدن لوحده أو بوجود كلا المعدنين معاً، حيث نلاحظ انخفاض الوزن الرّطب للمجموع الخضريّ في كلّ المعاملات مقارنةً بالشّاهد بحوالي 4–37%، في حين انخفض الوزن الرّطب للجذور بين 34– 72%، أمّا الانخفاض بالوزن الجافّ فقد كان بالنسبة للمجموع الخضريّ يتراوح بين 11– 25%، وبالنّسبة للجذور بين 27– 58% (الجدول 3)، وتؤكّد العديد من الدّراسات انخفاض الكتلة الحيّة للنّبات عند النّمو في تربة ملوّثة بالمعادن الثّقيلة (Anjum *et al.*,2012, Kaur, 2018)

الجدول (3): مؤشر التحمّل TI لمؤشّرات النّمو في نبات الخردل الأسود

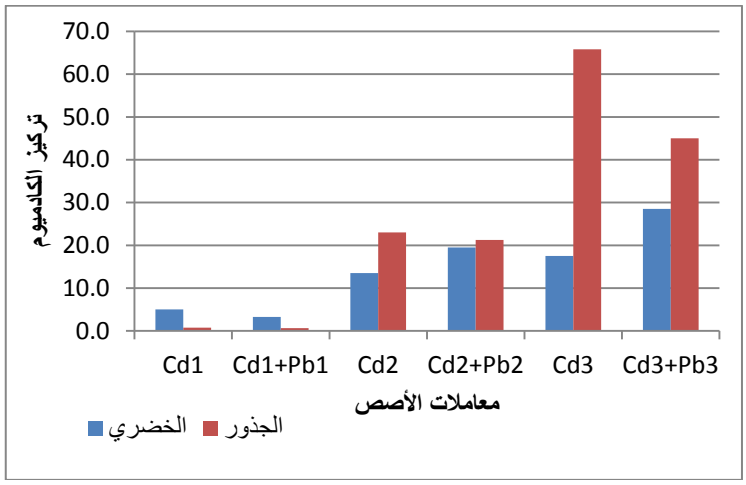
معاملات الأصص	الوزن الرّطب غ		الوزن الجّاف غ	
	المجموع الخضري	الجذور	المجموع الخضري	الجذور
Cd1	0.82	0.57	0.88	0.73
Cd2	0.77	0.31	0.86	0.6
Cd3	0.66	0.28	0.75	0.42
Pb1	0.64	0.32	0.81	0.48
Pb2	0.64	0.3	0.76	0.44
Pb3	0.73	0.33	0.89	0.48
Cd1 + Pb1	0.96	0.4	0.86	0.52
Cd2 + Pb2	0.63	0.39	0.84	0.48
Cd3 + Pb3	0.71	0.37	0.86	0.46

– تأثير التلوّث بالرّصاص والكادميوم في التّربة على محتوى الجذور والمجموع الخضري لنبات الخردل الأسود من الكادميوم، وعلى كفاءة المعالجة النّباتيّة

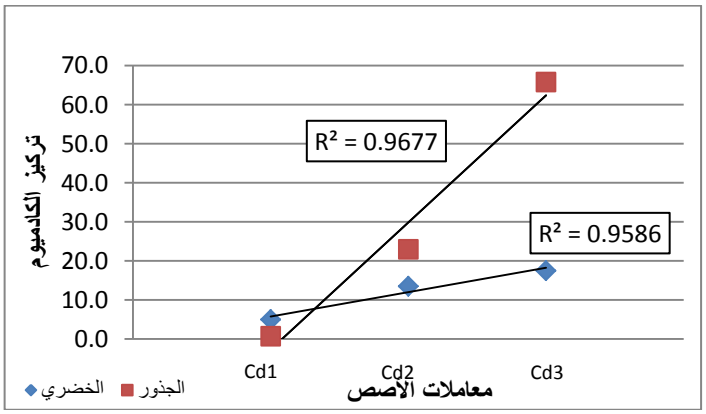
بيّنت نتائج التّحليل الإحصائيّ (الجدول 3) وجود فروق معنويّة واضحة لتركيز الكادميوم في الجذور بين المعاملات المطبّقة؛ إذ لوحظ زيادة بمحتوى الجذور من الكادميوم بزيادة تركيزه في التّربة بمفرده أو مع الرّصاص؛ حيث بلغ أدنى تركيز للكادميوم في الجذور 0.65 مغ / كغ عند المعاملة Cd1+Pb1 (3مغ كادميوم+ 100مغ رصاص /كغ تربة) في حين سُجّلت أعلى قيمة في معاملة Cd3(30 مغ كادميوم /كغ تربة)، ولم يكن هناك فروق معنويّة في تركيز الكادميوم بجذور الخردل عند التّركيزين 3مغ كادميوم/كغ تربة و 15 مغ كادميوم/كغ تربة سواء تواجد الكادميوم لوحده في التّربة أم تواجد مع الرّصاص، في حين ظهر فرق معنوي عند تركيز 30 مغ كادميوم/كغ تربة، حيث تفوّق تركيز الكادميوم في الجذور عند وجوده لوحده في التّربة عمّا هو عليه عند مشاركة الرّصاص معه، ممّا قد يدلّ على إجهاد نبات الخردل عند التّراكيز العالية من الرّصاص والكادميوم معاً(الشّكل1)، وبالمقابل تراوح محتوى المجموع الخضري في نبات الخردل من الكادميوم بين 3,25 – 28,5 مغ / كغ بالمادّة جافّة في كلّ المعاملات، وبالمقارنة بين الأصص الّتي تحتوي عنصر الكادميوم فقط والأصص الّتي تحتوي عنصري الكادميوم والرّصاص، لوحظ أنّ نبات الخردل استطاع مراكمة كميّات أكبر من الكادميوم في مجموعه الخضريّ بوجود تلوث بالرّصاص والكادميوم معاً، مقارنةً مع وجود عنصر الكادميوم لوحده في التّربة وبفروق معنويّة واضحة (الشّكل 1)، قد يُعزى ذلك للتّأثير التآزريّ بين معدني الرّصاص والكادميوم(Kabata Pendias and Pendias, 2001)، باستثناء المعاملة بالحدّ الأدنى من الكادميوم حيث لوحظ أنّ المجموع الخضري للخردل استطاع احتجاز كميّات أكبر من الكادميوم عندما كان الملوث لوحده في

التّربة ممّا استطاع احتجازه عند مشاركته مع معدن الرّصاص، علماً أنّ هذا الفرق لم يملك دلالة إحصائيّة عند المقارنة بين المتوسطات، ونفسّر ذلك باحتمال ترسّب معدن الكادميوم عند تواجده ضمن قيم منخفضة بسبب نسبة الطّين المرتفعة نسبيّاً، ونسبة المادّة العضويّة المرتفعة أيضاً. (Dede *et al.*,2012) (الجدول 4)

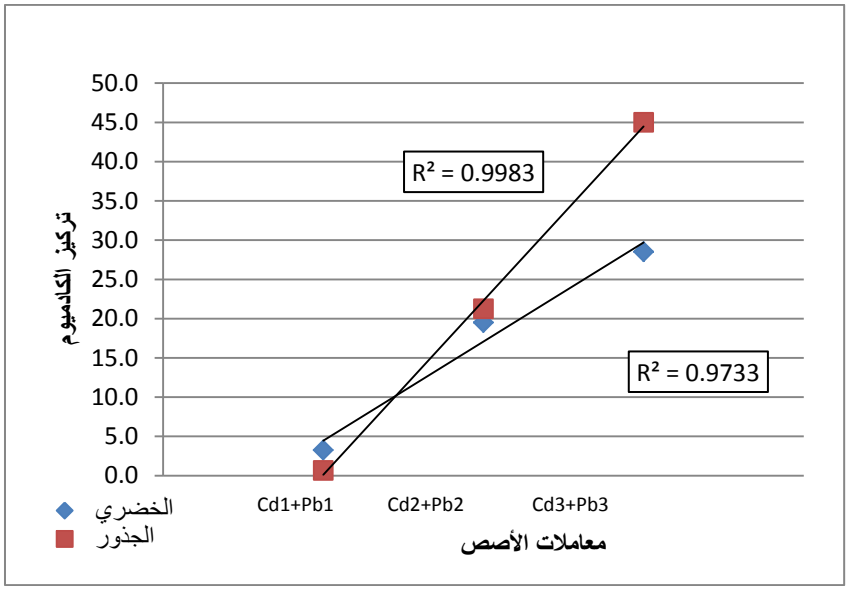
كانت تركيزات الكادميوم في نبات الخردل الأسود أعلى من النّطاق الطبيعي في النّباتات 0.1 –2.4 مغ/كغ (Qunshan Wei *et al.*, 2020)، ومع ذلك لم يتصرّف نبات الخردل كنبات فائق المراكمة للكادميوم ضمن شروط البحث الحاليّ وخصائص التّربة المستخدمة فيه، حيث لم تتجاوز قيم الكادميوم 100 مغ كادميوم/كغ وزن جافّ نبات عند أيّة معاملة من المعاملات (Kabata Pendias and Pendias, 2001) ، وهو ما تمّ ملاحظته من قبل (Pantola *et al.*, 2014) على نبات الخردل الهندي *Brassica juncea* فعلى الرغم من أنه ليس مفرط التّراكم، ولكنّه قادر على تجميع الكادميوم والزّنك والسّيلينيوم والرّصاص بكميّات أكبر من نباتات أخرى مع كتلة حيويّة كبيرة ممّا يجعله مرشّحاً محتملاً للاستخدام بالمعالجة النّباتيّة، ومن (الشّكلين 2،3) نجد أنّ معامل الارتباط كان قويّاً بين تراكيز الكادميوم في التّربة وتركيزه في نبات الخردل الأسود في كل المعاملات، ممّا يؤكّد على الدّور الكبير الذّي يلعبه تركيز المعدن الكلّيّ في التّربة في عمليّة التّراكم (Yildirim *et al.*, 2019)



الشّكل (1) مقارنة تراكيز الكادميوم في أجزاء الخردل عند إضافة الكادميوم فقط وعند إضافة الكادميوم والرصاص معاً



الشّكل (2) الارتباط بين تركيز الكادميوم في الجذور والمجموع الخضري لنبات الخردل الأسود وتركيز الكادميوم في التّربة/ أصص معاملة بالكادميوم فقط



الشّكل (3) الارتباط بين تركيز الكادميوم في الجذور والمجموع الخضريّ لنبات الخردل الأسود وتركيز الكادميوم في التّربة /أصص معاملة بالكادميوم والرّصاص معاً

تبيّن من معاملات تقييم كفاءة المعالجة النّباتيّة أنّه عندما كان تركيز الكادميوم منخفضاً أي عند المعاملة بالحدّ الأدنى (3مغ كادميوم /كغ تربة سواء الكادميوم لوحده أو مع الرّصاص)، كان معامل التّركيز الحيوي BCF أقل من واحد، في حين معامل التّراكم الحيويّ BAC، و معامل الانتقال TF أكبر من واحد، وهنا نستطيع أن نقول أنّه عندما تكون الكميّة المتوفرّة في الوسط من الكادميوم منخفضة نسبيّاً، يكون ما يتمّ تركيزه في الجذور منخفض بسبب إزاحة الكادميوم نحو المجموع الخضريّ بسرعة تفوق استخلاصه من قبل الجذور من التّربة (Dar *et al.*, 2015)، ولكن في تراكيز أعلى من الكادميوم (عند 15مغ كادميوم /كغ تربة) أصبح ما تحصل عليه جذور نبات الخردل من التّربة أكبر من تركيزه في الوسط مع قيم BCF <1، وتراجعت قيم BAC لتصبح أقل من واحد عندما الكادميوم في التّربة لوحده ، وبقيت أكبر من واحد عند وجود الكادميوم مع الرّصاص بسبب التآزر بين الرّصاص والكادميوم، وعند تراكيز تفوق 15مغ كادميوم /كغ تربة تراجعت كفاءة عمليّة المعالجة النّباتيّة، حيث تمّ احتجاز الكادميوم ضمن الجذور بشكل أكبر من انتقاله للمجموع الخضريّ (الجدول 4)

نلاحظ بشكل عام تناقص قيم عائديّة استخلاص الكادميوم SEY% بزيادة تراكيز الكادميوم في التّربة، ممّا يشير إلى أنّ تراجع وزن المادّة الجافّة لنبات الخردل تحت إجهاد الكادميوم لا يعوّضه ما يحصل من زيادة في تراكم الكادميوم بنبات الخردل بزيادة تركيزه في التّربة، ومنه كانت عائديّة الاستخلاص أفضل ما يمكن عندما كان تركيز الكادميوم 3مغ كادميوم /كغ تربة، وهي حوالي 0.22%، وهي نسبة منخفضة جدّاً، لأنّها تدلّ على أنّنا نحتاج لزراعة الخردل أكثر من 450 مرّة كلّ مرّة لمدّة شهرين لتنظيف التّربة من الكادميوم تماماً، وهنا يجب لفت النّظر إلى أنّ عائديّة الاستخلاص تقدّر نسبةً إلى التّركيز الكلّي للمعدن في التّربة، وبما أنّ الكادميوم المتاح للنّبات هو الجزء الأهمّ عند معالجة التّربة، فمن الممكن أن تحتاج التّربة المدروسة لعدد مرّات زراعة خردل أقل بكثير لو كان الهدف من المعالجة التّخلّص من الكادميوم المتاح فقط.

وفق ما ذكره (Amin *et al.*,2018) تُعدّ النّباتات التي تملك قيم معامل BCF وBAC و TF >1 مستخرجاً نباتيّاً واعداً ومناسباً لاستخراج وتثبيت المعادن الثّقيلة، بينما النّباتات التي تحتوي على معامل التّركيز الحيويّ ومعامل انتقال

<1 ليست مناسبة للاستخراج النّباتيّ أو التّثبيت النّباتيّ، في حين تُعدّ النباتات التي تملك على قيم معامل BCF >1، و TF<1، مناسبة للتّثبيت فقط، وتعدّ النّباتات الّتي تملك نسبة تركيز المعدن في المجموع الخضري إلى نسبة تركيز المعدن الكلّيّ في التّربة أي BAC أكبر من واحد، أو معامل انتقال أكبر من واحد، مرشّح محتمل للاستخدام بالمعالجة النّبتيّة بطريقة الاستخلاص الحيويّ (Mendez *et al.*, 2008, Cruzado-Tafur *et al.*, 2021)، وبتطبيق ما سبق على نتائج دراستنا هذه نجد أنّ نبات الخردل الأسود يعدّ مرشّحاً محتملاً للاستخدام بالمعالجة النّبتيّة للكادميوم بطريقة الاستخلاص الحيويّ في المواقع ذات التّلوّث المنخفض، لامتلاكه قيم معاملات BAC و TF >1 ، وخصوصاً عند تركيز 3 مغ كادميوم / كغ تربة، سواء كان الكادميوم لوحده في التّربة أو مع وجود الرّصاص.

الجدول (4) تأثير التلوّث بالرّصاص والكادميوم في التّربة على محتوى الجذور والمجموع الخضري لنبات الخردل الأسود من الكادميوم، وعلى كفاءة المعالجة النّباتيّة

المعدن	معاملات الأصص	تركيز الكادميوم بالجذور مغ/كغ مادّة جافّة	تركيز الكادميوم بالمجموع الخضري مغ/كغ مادّة جافّة	BCF	BAC	TF	SEY%
		Mean±STD	Mean±STD	Mean±STD	Mean±STD	Mean±STD	Mean±STD
Cd	Cd1	0.75±0.035a	5.0±0.42b	0.25±0.012a	1.67±0.14d	6.69±0.88c	0.22±0.022d
	Cd2	23.0±0.35b	13.5±0.5c	1.53±0.024c	0.9±0.033b	0.59±0.013a	0.14±0.0045b
	Cd3	65.83±1.94d	17.5±0.35d	2.19±0.065d	0.58±0.012a	0.27±0.013a	0.09±0.0095a
	Cd1+Pb1	0.65±0.071a	3.25±0.42a	0.22±0.024a	1.08±0.14b	4.99±0.11b	0.14±0.017b
	Cd2+Pb2	21.25±0.64b	19.50±0.18e	1.42±0.042b	1.30±0.012c	0.92±0.2a	0.18±0.0066c
	Cd3+Pb3	45.0±1.70c	28.50±0.28f	1.50±0.057bc	0.95±0.01b	0.63±0.03a	0.15±0.044b
P		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.001

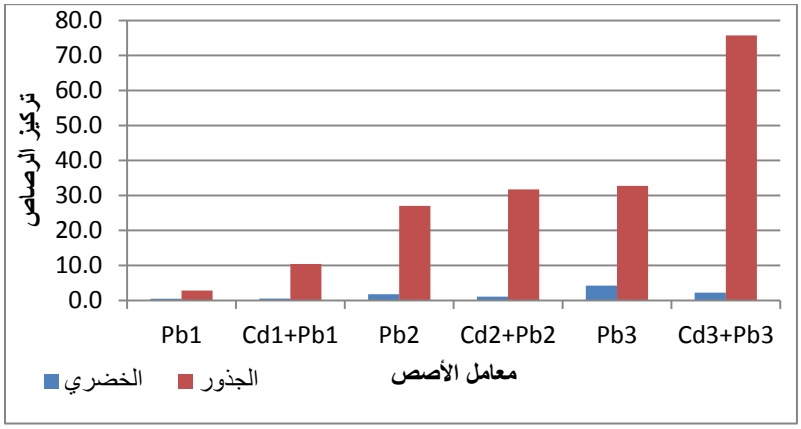
- **a,b.c.d.e,f سويات الفروق المعنوية بين المتوسطات عند درجة ثقة95%.**

- **تأثير التلوّث بالرّصاص والكادميوم في التّربة على محتوى الجذور والمجموع الخضري لنبات الخردل الأسود من الرّصاص، وعلى كفاءة المعالجة النّباتيّة**

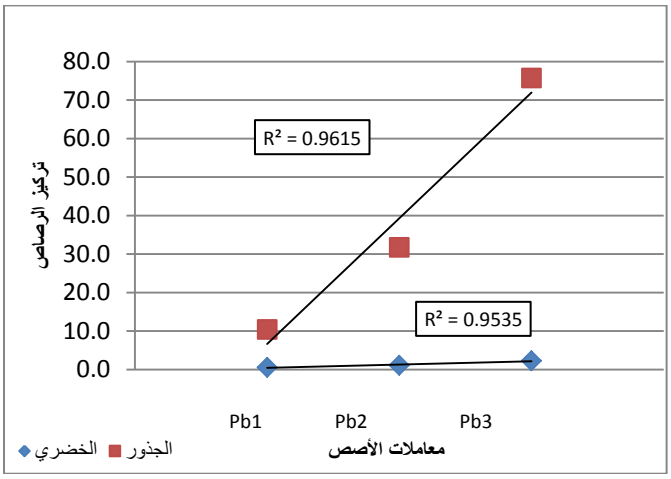
تراوحت قيم الرّصاص في جذور نبات الخردل بين 2,83– 75.75 مغ / كغ بالمادّة جافّة في كلّ المعاملات ، وقد تجاوزت النّطاق الطبيعي للرصاص بالنباتات 0.2 – 20 مغ/كغ (Qunshan Wei *et al.*, 2020) في المعاملات التي كان تركيز الرّصاص فيها 300 و 700 مغ /كغ، وبالمقارنة بين الأصص الّتي تحتوي عنصر الرّصاص فقط والأصص الّتي تحتوي عنصري الكادميوم والرّصاص، لوحظ أنّ نبات الخردل استطاع مراكمة كميّات أكبر من الرّصاص في جذوره بوجود تلوث بالرّصاص والكادميوم معاً بفروق معنويّة واضحة بين جميع المعاملات، مقارنةً بوجود عنصر الرّصاص لوحده في التّربة.

وبالمقابل تراوح محتوى المجموع الخضري في نبات الخردل من الرّصاص بين0,51 – 4,25 مغ / كغ بالمادّة جافّة في كلّ المعاملات، أي ضمن النّطاق الطبيعي للرصاص بالنباتات، وبالمقارنة بين الأصص الّتي تحتوي عنصر الرّصاص فقط والأصص الّتي تحتوي عنصري الكادميوم والرّصاص، لم تكن هناك فروق معنويّة لإضافة الكادميوم على امتصاص الرّصاص عند المعاملة بالحدّ الأدنى، وفي المعاملات الأعلى لم يقوم نبات الخردل الأسود بنقل الرّصاص إلى مجموعه الخضري بما يتوافق مع تركيز الرّصاص في الجذور، (الشّكل 4)، وخصوصاً عند إضافة الكادميوم، ممّا يدلّ على انخفاض كفاءته في عمليّة الاستخلاص الحيويّ بزيادة التّلوّث (الجدول5)، ويرجع التّراكم

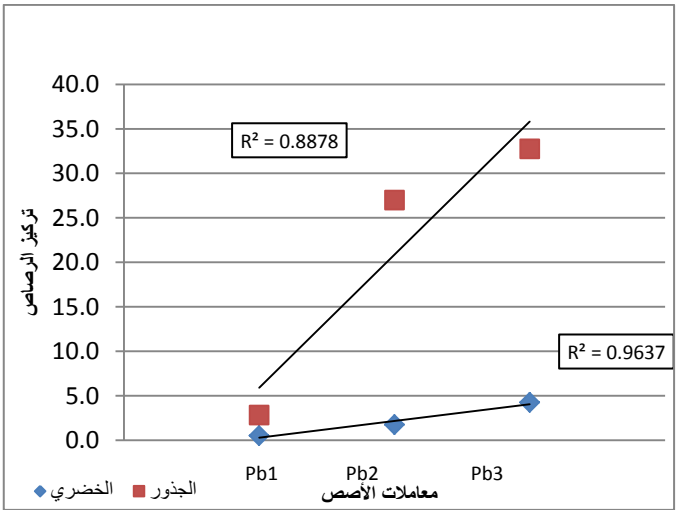
الحيويّ المنخفض للرّصاص إلى عدم قابليته الشّديدة للذّوبان وعدم توفّره للنّبات بشكل عام في النّطاق الطّبيعيّ لدرجة حموضة التّربة (Szczygowska *et al.*, 2011) وحتّى عند امتصاص الرّصاص من قبل النّبات تعدّ حركة الرّصاص في النّباتات منخفضة نسبيّاً، ومعظم الرّصاص الذي تمتصّه النّباتات يقتصر على الجذور ويتمّ نقل كميّة صغيرة فقط إلى المجموع الخضريّ.(Gupta *et al* , 2013)



الشّكل (4) مقارنة تراكيز الرّصاص في أجزاء الخردل عند إضافة الرّصاص فقط وعند إضافة الكادميوم والرصاص معاً كان معامل الارتباط قويّاً بين تراكيز الرّصاص في الجذور والمجموع الخضريّ للخردل الأسود وبين تركيز المعدن الكليّ في التّربة، سواء بحال وجود الرّصاص لوحده (Yildirim *et al.*, 2019)، أو بحال مشاركته مع الكادميوم. (الشّكلين 5، 6)



الشّكل (5) الارتباط بين تركيز الرصاص في الجذور والمجموع الخضري لنبات الخردل الأسود وتركيز الرّصاص في التّربة /أصص معاملة بالرصاص فقط



الشّكل (6) الارتباط بين تركيز الرصاص في الجذور والمجموع الخضري لنبات الخردل الأسود وتركيز الرّصاص في التّربة /أصص معاملة بالرصاص والكادميوم معاً.

من قراءة معاملات الانتقال نلاحظ عدم وجود تركيز للرّصاص في أنسجة الجذور بالمقارنة مع محتوى التّربة منه، مع قيم BCF أقل من واحد بكثير، وعدم مراكمته ضمن الأنسجة الخضريّة فوق سطح التّربة حيث قيم BAC أقل من واحد بكثير(الجدول 5)، وحتّى القيم الّتي تراكمت ضمن الجذور تمّ احتجازها فيها وعدم نقلها للمجموع الخضري، ويُعزى ذلك إلى حركيّة معدن الرّصاص الضّعيفة مقارنةً بالكادميوم، (Kabata Pendias and Pendias,2001)، بالإضافة إلى مواصفات التربة الّتي شجّعت على ترسيب كلا المعدنين (نسبة طين عالية نسبياً، قلوية التّربة، ونسبة مادّة عضويّة مرتفعة)، وبالتّالي كانت عائديّة استخلاص الرّصاص SEY% منخفضة جدّاً.

الجدول (5) تأثير التلوّث بالرّصاص والكادميوم في التّربة على محتوى الجذور والمجموع الخضري لنبات الخردل الأسود من الرّصاص، وعلى كفاءة المعالجة النّباتيّة

المعدن	معاملات الأصص	تركيز الرّصاص بالجذور مغ/كغ مادّة جافّة	تركيز الرّصاص بالمجموع الخضري مغ/كغ مادّة جافّة	BCF	BAC	TF	SEY %
		Mean±STD	Mean±STD	Mean±STD	Mean±STD	Mean±STD	Mean±STD
Pb	Pb1	2.83±0.098^{a}	0.51±0.003^{a}	0.028±0.001^{a}	0.0051±0.00004^{b}	0.18±0.005^{d}	0.0009±0.00001^{a}
	Pb2	27.00±0.56^{c}	1.75±0.212^{c}	0.09±0.002^{c}	0.0058±0.0007^{b}	0.065±0.009^{b}	0.0016±0.00027^{bc}
	Pb3	32.75±0.71^{d}	4.2±0.07^{e}	0.047±0.001^{b}	0.006±0.0001^{b}	0.13±0.0006^{c}	0.0013±0.00009^{ab}
	Cd1+Pb1	10.4±0.71^{b}	0.55±0.05^{a}	0.104±0.007^{d}	0.0055±0.0006^{b}	0.053±0.002^{b}	0.002±0.0002^{c}
	Cd2+Pb2	31.75±1.41^{d}	1.07±0.13^{b}	0.106±0.005^{d}	0.0036±0.0005^{a}	0.034±0.006^{a}	0.0017±0.00008^{bc}
	Cd3+Pb3	75.75±1.76^{e}	2.25±0.28^{d}	0.108±0.002^{d}	0.0032±0.0004^{a}	0.03±0.004^{a}	0.0016±0.00037^{bc}
P		0.0	0.0	0.0	0.003	0.0	0.027

- a,b.c.d.e سويات الفروق المعنوية بين المتوسطات عند درجة ثقة95%.

الاستنتاجات والتوصيات:

1- لم يُلاحظ أي تأثير معنوي لتركيز الرّصاص والكادميوم في التّربة على نسبة الإنبات لنبات الخردل الأسود، في حين تأثّر الوزن الجافّ والرّطب للجذور والوزن الجافّ والرّطب للمجموع الخضريّ بتزايد تراكيز الرّصاص والكادميوم في التّربة معنوياً.

2- تنخفض الكتلة الحيويّة لنبات الخردل الأسود عند تعرّضه لتراكيز متزايدة من الرّصاص والكادميوم، حيث كانت كل قيم مؤشّر التحمّل TI أقلّ من واحد، ممّا يشير إلى تعرّض نبات الخردل الأسود للإجهاد، وأظهرت الجذور تأثّراً أكبر من المجموع الخضريّ.

3- استطاع نبات الخردل الأسود أن ينقل الكادميوم إلى المجموع الخضريّ بكفاءة فقط عند المعاملة بالحدّ الأدنى سواء كان الكادميوم لوحده في التّربة أم تشارك مع الرّصاص، بمعامل انتقال أكبر من واحد في المعاملتين.

4- لم يُظهر نبات الخردل الأسود مقدرة على تركيز الرّصاص في الجذور أو مراكمته في المجموع الخضريّ أو نقله من الجذور إلى المجموع الخضريّ، حيث كانت كلّ معاملات كفاءة المعالجة النباتيّة أقلّ من الواحد، وعائديّة استخلاص الرّصاص منخفضة.

5- لوحظ تناقص قيم عائديّة استخلاص الكادميوم SEY% بزيادة تراكيز الكادميوم في التّربة، ممّا يشير إلى أنّ تراجع وزن المادّة الجافّة لنبات الخردل تحت إجهاد الكادميوم لا يعوّضه ما يحصل من زيادة في تراكم الكادميوم بنبات الخردل بزيادة تركيزه في التّربة.

6- نحتاج لزراعة الخردل أكثر من 450 مرّة كلّ مرّة لمدّة شهرين لتنظيف التّربة من الكادميوم تماماً من تربة مواصفاتها تشبه مواصفات التّربة المدروسة، وتحتوي 3 مغ كادميوم/كغ تربة.

7- من الممكن اعتبار نبات الخردل الأسود مرشّحاً محتملاً للاستخدام بالمعالجة النّبتيّة للكادميوم بطريقة الاستخلاص الحيويّ في المواقع ذات التّلوّث المنخفض، لامتلاكه قيم معاملات BAC و TF >1 .

References:

- ريم نديم الجبيلي، محمد منهل الزعبي، إبراهيم نيصافي، دراسة بعض الخصائص الكيميائية وأشكال العناصر الثقيلة في أتربة مكب البصة، جامعة تشرين 2006م.

AL-JUBAILI, R.N., AL-ZOUBI, M.M., NISAFI, I., Study of some chemical properties and forms of heavy elements in the soil of the Al-Bassa landfill, Tishreen University 2006.

- زياد جحى، دراسة وجود الرصاص في التربة في أماكن مختلفة من محافظتي دمشق وريف دمشق كأحد مؤشرات التلوث البيئي، جامعة دمشق 2014م.

JUHA, Z., Study of the presence of lead in the soil in various places in the governorates of Damascus and rural Damascus as one of the indicators of environmental pollution, University of Damascus 2014.

- محمد العودات، كامل الخرفان، كمال الشمالي، تعيين التلوث بالرصاص في معمل بطاريات السفيرة/ حلب/ والبيئة المحيطة، هيئة الطاقة الذرية، 2007م.

AL-AWDAT, M., AL-KHARFAN, K., AL-SHEMALI, K., Determination of lead contamination in the Al-Safira battery factory / Aleppo / and the surrounding environment, Atomic Energy Commission, 2007.

– محمد منهل الزّعبي، أنس الحصني، حسّان درغام، طرائق تحليل التّربة والنّبات والمياه والأسمدة، الهيئة العامة للبحوث العلميّة الزّراعيّة السّوريّة، دمشق 2013م.

-Al-Zoubi, M.M., Al-Hosni, A., Dergham, H., Methods of Analysis of Soil, Plants, Water and Fertilizers, Syrian General Authority for Scientific Agricultural Research, Damascus,2013.

AMIN, H., ARIAN, B.A., JAHANGIR, T.M., ABBASI, M. S., AMIN, F., Accumulation and distribution of lead (Pb) in plant tissues of guar (Cyamopsis tetragonoloba L.) and sesame (Sesamum indicum L.): profitable phytoremediation with biofuel crops, Geology, Ecology, and Landscapes, VOL. 2, NO . 1, Taylor & Francis, 2018, 51-60,

ANJUM, N.A., AHMAD, I., PEREIRA, M.E., DUARTE A.C., UMAR, Sh, KHAN N.A., The Plant Family Brassicaceae - Contribution Towards Phytoremediation , ENVIRONMENTAL POLLUTION, Springer, 2012, VOLUME 21.

AUDET, P., CHAREST,C. (2006). Effects of AM colonization on "wild tobacco" plants grown in zinc contaminated soil. Mycorrhiza, 16, 277-283.

AUDET, P., CHAREST, C., Heavy metal phytoremediation from a meta-analytical perspective. Environmental Pollution, Canada, 2007, 147, 231–237.

BAKER, A.J.M., WHITING, S.M., In Search for the Holy Grail-another step in understanding metal hyper-accumulation?, New Phytologist, 2002, 155:1-7

BARCELO, j., POSCHENRIEDER, CH., Phytoremediation: principles and perspectives, CONTRIBUTIONS to SCIENCE, 2 (3), Barcelona, jan 2003, 333-344

BORTOLOTI, G. A., and BARON, D., Phytoremediation of toxic heavy metals by Brassica plants: A biochemical and physiological approach, Environmental Advances, 2022, 8.

CHEN, L., LONG, X.H., ZHANG, Z.H., ZHENG, X.T., RENGELl, Z., LIU, Z.P, Cadmium accumulation and translocation in two Jerusalem artichoke (Helianthus tuberosus L.) cultivars. Pedosphere21(5), Elsevier B.V. and Science Press, China, 2011, 573–580.

CRUZADO-TAFUR, E., BIERLA, K., TORRO, L., SZPUNAR, J., Accumulation of As, Ag, Cd, Cu, Pb, and Zn by Native Plants Growing in Soils Contaminated by Mining Environmental Liabilities in the Peruvian Andes, Journal Plants, MDPI, Switzerland 2021, 10, 241.

DAR, M.I, KHAN, F.A., REHMAN, F., MASOODI,A., ANSARI, A.A., VARSHNEY,D , NAUSHIN,F., NAIKOO, M.I., Roles of Brassicaceae in Phytoremediation of Metals and Metalloids, Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants, Volume 1, Springer, Switzerland, 2015, 201-213.

DEDE, G., OZDEMIR, S., DEDE, O.H, Effect of soil amendments on phytoextraction potential of Brassica juncea growing on sewage sludge. International Journal of Environmental Science and Technology, CEERS, IAU, 2012, 9, 559–564.

GAYATRI, N., A. SAILESH, R., SRINIVAS, N., Phytoremediation Potential of Brassica juncea for removal of selected heavy metals in urban soil amended with cow dung, Journal of Materials and Environmental Sciences, India, 2019 , Volume 10, Issue 5, Page 463-469.

GINNEKEN, L.V., MEERS, E., GUISSON, R., RUTTENS, A., ELST, K., TACK, F.M.G., VANGRONSVELD,J., DIELS, L., DEJONGHE, W., Phytoremediation for heavy metal contaminated soils combined with energy production. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management , 2007, 15, 227–236.

GUPTA, D. K., HUANG, H. G. and CORPAS, F. J., Lead tolerance in plants: Strategies for phytoremediation, *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20,2150–2161.

KABATA PENDIAS, A., Trace Elements in Soils and Plant, Third Edition, CRC Press, Poland,2001, P 403.

KAUR, L., Accumulation potential of Indian mustard (Brassica juncea var. arawali) and fenugreek (Trigonella foenum-graecum L.) planted on Lead and Nickel contaminated soil, TROPICAL PLANT RESEARCH, 2018, 5(2), p: 217–223.

LIU, Z., TRAN, Kh., A review on disposal and utilization of phytoremediation plants containing heavy metals, Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 226.

MALIK, R. N., HUSAIN,S. Z., and NAZIR, I., Heavy metal contamination and accumulation in soil and wild plant species from industrial area of Islamabad, Pakistan Journal of Botany, 2010, 42(1), 291-301.

MENDEZ, M.O., and MAIER, R.M., Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments—an emerging remediation technology, Environment Health Perspective, 2008,116(3), 278–283.

MOURATO,M.P., MOREIRA, I.N, LEITÃO, I., PINTO, F.R, SALES, J.R, MARTINS, L.L.Effect of Heavy Metals in Plants of the Genus Brassica, International Journal of Molecular Sciences, 2015,16, P: 17975-17998

THANGAVEL, P., SUBBHURAAM, C.V., Phytoextraction: Role of the Hyperaccumulator in Metal Contaminated Soils, Indian natn.Sci. Acad,B70, India, 2004, P: 109-130.

PANTOLA, R., ALAM, A., Potential of Brassicaceae Burnett (Mustard family; Angiosperms) in Phytoremediation of Heavy Metals, International Journal of Scientific Research in Environmental Sciences, 2014,2(4), p: 120-138.

QUNSHAN WEI,B., NOMAN,M, SHEN ,Z, SABA A. K, ULLAH,S, KHAN,F, Panhwar,K, Emiliy, H, Tasleem,R, Ahmad,J, Ul Haq,I, SubhHanullah h,M, ULLAH,Z., Phytoremediation of contaminated soil Lead and Cadmium by Brassica júncea (L.) Czern plant, Journal of Earth Sciences & Environmental Studies, 2020, 5(4), 110-120.

Raz,A, Habib,M , Kakavand, Sh , Zahid, Z, Zahr, N, Sharif,R, Hasanuzzaman, ,M.Phytoremediation of Cadmium: Physiological, Biochemical, and Molecular Mechanisms, Biology, 2020, 9, 177.

Roy, Sh., and Mondal, S., Brassicaceae plants response and tolerance to metal/metalloid toxicity-The Plant Family Brassicaceae, Hasanuzzaman, Singapore :Springer,2020.

SARMA, H., Metal Hyperaccumulation in Plants: A Review Focusing on Phytoremediation Technology, Journal of Environmental Science and Technology, 2011, 118,138.

SETIA, R.C, KAUR,N, SETIA,N, NAYYAR, H., Heavy Metal Toxicity in Plants and Phytoremediation, Crop Improvement: Strategies and Applications, 2018, 206-218.

SZCZYGOWSKA, M., PIEKARSKA, A., KONIECZKA P., and NAMIESNIK, J. Use of Brassica Plants in the Phytoremediation and Biofumigation Processes, International Journal of Molecular Sciences, 2011, 12, P:7760-7771.

YILDIRIM ,E., EKINCI, M., TURAN, M., AGAR, G., Örs, S., DURSUN, A., KUL, R., and BALCI, T, Impact of Cadmium and Lead Heavy Metal Stress on Plant Growth and Physiology of Rocket (Eruca sativa L.), KSU J. Agric Nat, 2019, 22(6), 843-850

YOON, J.; CAO, X.; ZHOU, Q.; MA, L.Q. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in Native Plants Growing on a Contaminated Florida Site. Sci. Total Environ. 2006, 368, 456–464.