HNSJ Humanities & Natural Sciences Journal
ISSN: (e) 2709-0833
www.hnjournal.net

مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية
مجلة علمية محكمة (التصنيف: NSP)
معامل التأثير للعام 2022 = 4.91

المعالجة النّباتيّة لتربة ملوّثة بالكادميوم باستخدام بعض نباتات الفصيلة الصّليبيّة Brassicaceae

ميسون زياده [1] أ.د. محمّد دكّه [2] أ.م. د. فينّا حمّود[3]

[1] طالبة دكتوراه في قسم علوم التّربة والمياه – كليّة الهندسة الزّراعيّة– جامعة تشرين– اللاذقيّة– سوريّة.
الايميل maissounziadeh4@gmail.com

[2] أستاذ في قسم علوم التّربة والمياه – كليّة الهندسة الزّراعيّة– جامعة تشرين– اللاذقيّة– سوريّة.
الايميل dikkeh@gmil.com

[3] أستاذ مساعد في قسم علم الحياة – كليّة العلوم– جامعة طرطوس – طرطوس – سوريّة.
الايميل: Vienna_h@yahoo.com viennahammoud@gmail.com

HNSJ, 2024, 5(9); https://doi.org/10.53796/hnsj59/6

تاريخ النشر: 2024/09/01م تاريخ القبول: 2024/08/07م

المستخلص

تمّ اختيار بيت بلاستيكي، عمر استخدامه 25 عاماً، بهدف تقييم معالجة تربته من الكادميوم، وذلك بزراعة أربع نباتات تابعة للفصيلة الصّليبيّة، وهي الجرجير *Eruca sativa* L.، الخردل الأسود *Brassica nigra* L.، الفجل *Raphanus sativus* L. والمنثور *Matthiola incana*.

أظهرت النّتائج تفوّق نبات الفجل على بقيّة النّباتات من ناحية الكتلة الحيّة، حيث كان الوزن الجافّ للنّباتات يتبع التّرتيب: فجل > جرجير> خردل أسود > منثور، وعلى الرّغم من تفوّق الخردل الأسود على بقيّة النّباتات من حيث تركيز الكادميوم بالجذور والمجموع الخضريّ إلّا أنّ قيمة الكتلة الحيّة المرتفعة للفجل جعلته يتفوّق على الخردل في مردود استخلاص الكادميوم specific extraction yield percentage $\%SEY_{Cd}$ الذي بلغ 9.26% ، وكان ترتيب النّباتات معنوياً حسب $\%SEY_{Cd}$ الفجل > الجرجير= الخردل> المنثور، ولم يتصرّف أي من النّباتات الأربع كنبات فائق المراكمة للكادميوم، وكان معامل التّراكم الحيويّ Bioaccumulation Coefficient BAC < 1 لجميع النّباتات .

كان تركيز الكادميوم المتاح قبل الزّراعة (الذّائب+المتبادل+المرتبط بالمادّة العضويّة) يساوي 30% من الكلي، وعند دراسة الارتباط بين النّسبة المئوية لنقص الكادميوم المرتبط بأجزاء التربة الأكثر إتاحةً للنّبات وتركيز الكادميوم في جذورها خلال فترة الزراعة، حوالي سبعين يوماً، كان معامل الارتباط معدوماً إلى ضعيفاً لجميع النّباتات.

من الممكن اقتراح كل من النّباتات المدروسة كمرشّح جيّد للمعالجة النّباتيّة لترب ملوثّة بالكادميوم، وخصوصاً نبات الفجل.

الكلمات المفتاحية: الاستخلاص النّباتيّ, المعادن الثّقيلة, مردود الاستخلاص SEY%، الكادميوم المتاح.

RESEARCH TITLE

Phytoremediation of Cadmium- Contaminated Soils Using Plants of Brassicaceae Family

Maissoun Ziadeh [1] Mohammad Dikkeh[2] Vienna Hammoud[3]

[1] PhD student in the Department of Graphene Sciences - Faculty of Agricultural Engineering - Tishreen University - Lattakia - Syria. Email: maissounziadeh4@gmail.com
[2] Professor in the Department of Immersive Earth Sciences - Faculty of Agricultural Engineering - Tishreen University - Lattakia - Syria. Email: dikkeh@gmil.com
[3] Assistant Professor in the Department of Biology - Faculty of Science - Tartous University - Tartous - Syria. Email: Vienna_h@yahoo.com viennahammoud@gmail.com

HNSJ, 2024, 5(9); https://doi.org/10.53796/hnsj59/6

Published at 01/09/2024 **Accepted at 07/08/2024**

Abstract

The experiment took place in a 25-year-old green house in order to evaluate the Phytoremediation of cadmium in its soil by planting four plants belonging to the Brassicaceae family, Arugula *Eruca sativa* L., black mustard, *Brassica nigra* L., radish *Raphanus sativus* L. and hoary stock *Matthiola incana*.

The result showed that the radish plant clearly outperformed the rest of the plants in biomass, as the dry weight of the plants followed the order: radish >arugula >black mustard >hoary stock. Although the black mustard plant is superior to the other plants in cadmium concentration in the roots and in the shoots, the high biomass value of the radish made it superior to mustard in the cadmium specific extraction yield percentage SEY_{Cd}%, which reached 9.26% for the radish. The plants took the following order according to their SEY_{Cd}%: radish > Arugula = mustard > hoary stock, and none of the four plants behaved as a Hyper-accumulating plant for cadmium. The Bioaccumulation Coefficient BAC was more than one for all plants. The concentration of available cadmium (soluble + exchangeable + bound to organic matter) before planting was 30% of the total, and the correlation between the percentage of cadmium deficiency with the studied soil poles and the concentration of cadmium in their roots during the planting period, seventy days, was weak to non-existent.

Each of the studied plants can be suggested as a candidate for phytoremediation of cadmium-contaminated soils, especially radish.

Key Words: phytoextraction, Heavy Metals, The specific extraction yield percentage SEY%, Available cadmium.

1- المقدّمة وأهميّة البحث

أدّى النّمو السّريع في عدد السّكان والتّصنيع إلى إضافة كميّات كبيرة من النّفايات السّامّة إلى البيئة, وهذا يؤثّر على صحّة الإنسان في جميع أنحاء العالم، إنّ أكثر أشكال الملوّثات البيئيّة انتشاراً هي المعادن وأشباه المعادن والنّويدات المشعّة وغيرها من الموادّ غير العضويّة، وقد أدّت المخاوف من سمّيتها إلى التّركيز على تطوير تقنيّات فعّالة لتقييم وجود وحركة المعادن في التّربة والمياه والصّرف الصّحيّ, وتعتبر المعالجة بالنّباتات (Phytoremediation) تقنيّة رخيصة وصديقة للبيئة لإزالة أو تقليل الملوّثات السّامّة من مختلف مكوّنات البيئة, في تقنيّة المعالجة النّباتيّة، تُستخدم النباتات المُراكِمة لاستخراج الملوّثات وعزلها (Dar *et al.* 2015).

تأتي أهميّة البحث من ازدياد تركيز المعادن الثّقيلة في التّربة الزّراعيّة سواء بالمواقع المكشوفة نتيجة قربها من المعامل والصّناعات، أو في البيوت البلاستيكيّة الّتي تعتمد مبدأ الزّراعة المكثّفة وبالتّالي تطبيق كميّات عالية من السّماد، بالإضافة لاستخدام العديد من المبيدات للمحاصيل التي تُنتج في البيوت البلاستيكيّة ليحقق المزارع الربح المرجو، وبما أنّ منتجات البيوت البلاستيكيّة تدخل كل منزل تقريباً شتاءً، لذلك لا بد من تقييم الوضع من حيث تراكم المعادن الثّقيلة في تربتها، ومحاولة إيجاد طريقة فعّالة ورخيصة مثل المعالجة النّباتية، وبسبب قدرة نباتات الفصيلة الصليبية على مراكمة المعادن الثّقيلة بشكل عام حاولنا تقييم أداء بعضها وهي الخردل الأسود، الفجل، الجرجير، والمنثور، ولأنّ معدن الكادميوم من المعادن التي لم يثبت لها أيّة وظيفة حيوية حتى الآن ويعدّ معدناً سامّاً للإنسان، كان لا بدّ من تقييم تواجده بتربة بيت بلاستيكي قديم الاستخدام، ومحاولة إجراء حلّ للمساهمة بالتّخفيف من دخوله في السّلسلة الغذائيّة، ويهدف البحث لإجراء مقارنة بين أربع نباتات تابعة للفصيلة الصّليبيّة وهي الجرجير *Eruca sativa* L.، الخردل الأسود *Brassica nigra* L، الفجل *Raphanus sativus* L ، والمنثور *Matthiola incana*، من حيث كفاءتها بعمليّة الاستخلاص الحيويّ phytoextraction لتربة ملوثّة بالكادميوم.

2- الدّراسات المرجعيّة

تتميّز المعادن الثّقيلة عن غيرها من المعادن والفلزات أنها غير قابلة للتّحلل، فهي تظلّ موجودة في البيئة ولا يمكن إزالتها عن طريق التحوّل الكيميائيّ أو البيولوجي، وقد أدرج برنامج الرصد العالمي التّابع للأمم المتحدة، الذي أنشئ في عام 1973، ثلاثة منها بصفتها من أخطر الملوّثات وهي الرّصاص والزّئبق والكادميوم، تمت إضافة معادن أخرى لاحقاً وهي النحاس، القصدير، الكروم، الموليبدينوم، الكوبالت، والنّيكل (Goncharuk and Zagoskina, 2023).

تستخدم النّباتات آليّات مختلفة في المعالجة النّباتيّة Phytoremediation لتربة ملوّثة بالمعادن الثقيلة، حيث تتكون المعالجة النّباتيّة من أربع تقنيات مختلفة وهي الاستخلاص النّباتيّ phytoextraction ، التثبيت النباتي phytostabilization، وترشيح الجذور rhizofiltration ، والتطاير النباتيphytovolatilization، ويعتبر الاستخلاص النباتيّ الطريقة الأكثر شيوعاً في المعالجة النّباتيّة ، خاصّةً في المناطق التي تحتوي على مستويات منخفضة إلى معتدلة من تركيز المعدن، حيث يتمّ امتصاص الملوّثات المعدنيّة من التّربة من خلال جذور النّباتات ثمّ تخزينها بعد ذلك في المجموع الخضريّ (Setia *et al.*, (2018، تتكيّف العديد من أنواع *Brassica* sp مع الظروف البيئية المجهدة، وتُنتج كتلة حيوية كبيرة وهي سمة مطلوبة في المعالجة النّباتيّة (Anjum *et al.*, 2012).

الكادميوم معدن سام جدّاً قد يسبّب مشاكل خطيرة للإنسان عندما يتمّ استخدام التربة الملوثة به لزراعة المحاصيل، لأنّه ينتقل بسهولة من التّربة إلى السّلسلة الغذائيّة، ويعتبر الرّقم الهيدروجيني للتربة مهمّاً بشكل خاص لأنّه يتحكّم في قابلية

ذوبان الكادميوم وحركته في التّربة، وبالتالي توافره للنّباتات(Chen *et al.*, 2011) ، ويُعدّ التّحكم في تراكم الكادميوم في النباتات معقداً لأنّ معظم ناقلات المغذّيات الأساسيّة مثل النّحاس، المنغنيز، الحديد، والزّنك، تُسهّل أيضاً امتصاص الكادميوم (Raz *et al.*,2020)، إنّ متوسط محتوى الكادميوم في التّربة هو 1 جزء في المليون بينما المعدّل الطّبيعي للنّباتات يتراوح بين 0.005 – 0.2 جزء في المليون مع مستوى سامّ بين 5 إلى 30 جزء في المليون (Anjum *et al.*, 2012).

إنّ صحّة التّربة أمر أساسيّ لإنتاج المحاصيل الغذائية، لأنّ التّربة الملوّثة بالمعادن الثّقيلة تقلّل بشكل كبير من جودة النّباتات وإنتاجيتها، مما يشكّل تهديداً خطيراً للإنسان والحيوان من خلال تضخمها الحيوي في السلسلة الغذائية (Alsherif *et al.*, 2022)، وتُعدّ الفصيلة الصّليبيّة من أهم الفصائل في المعالجة النّباتيّة للترب الملوثة بالمعادن الثقيلة كالكادميوم, الزّرنيخ, الرّصاص, والزّنك (Roy and Mondal, 2020), والمعالجة النّباتيّة طريقة فعالة اقتصادياً بالإضافة لكونها صديقة للبيئة (Raz *et al.*, 2020) 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); Amin *et al.*, (2018)، و يعدّ نبات الجرجير *Eruca sativa* L. من الأنواع المستخدمة في معالجة التّرب الملوّثة لأنّه يمتصّ الزّنك، والرّصاص ، والكادميوم (خاصّةً الزّنك) ويُنتج غلّة عالية من الكتلة الحيويّة (Ghaderian and Nosouhi, 2015) وقد أظهرت دراسة Waheed *et al.*, (2022) تراكم كبير للكادميوم في أوراق *Eruca sativa* عند ارتفاع تراكيز الكادميوم في التّربة، وبالتّالي يعد الجرجير مرشّحاً جيّداً للمعالجة النّباتيّة للتّربة الملوثة بالكادميوم.

يُحدّد الإتاحة البيولوجيّة للمعدن شكله الكيميائيّ ونسب ارتباطه بكل طور من أطوار التّربة المختلفة، وتعتمد درجة ارتباط المعادن بمكوّنات التّربة على الخواصّ الفيزيائيّة والكيميائيّة لها وبشكلٍ رئيسيٍّ درجة الحموضة، التّركيب الأيونيّ لمحلول التربة، تركيز الكلوريد في محلول التربة، السّعة التّبادليّة الكاتيونيّة CEC، محتوى معادن الطّين وأنواعها، محتوى المواد العضويّة، كربونات الكالسيوم، أكاسيد الحديد، المنغنيز، والألمنيوم (Khanmirzaei *et al.*, 2013).

من المعروف أن المعادن الناتجة عن التجوية أو من أصل التّربة عادةً ما تكون بشكل غير متحرك، وبالمقابل غالباً ما تكون المعادن الثّقيلة النّاتجة عن النّشاط البشريّ بأشكال أكثر قدرة على الحركة وتوافراً للنباتات، ويُظهر كل معدن ثقيل سلوكاً فريداً عند إضافته إلى التّربة في شكل أملاح قابلة للذّوبان، وقد لوحظ بقاء الكادميوم والزّنك في الجزء القابل للذّوبان، ممّا يشير إلى عدم تحقيق أي توازن بين مكوّنات التربة (Orroño and Lavado, 2009).

يُساعد تحليل التّجزئة Fractionation في تحديد التّوافر البيولوجيّ للمعادن السامّة، ممّا يُساعد في تقييم المخاطر البيئيّة المحتملة وتحديد إمكانية انتقال المعدن إلى الكائنات الحيّة والتّسبّب في آثار صحيّة ضارة، وكذلك تحديد أولويات معالجة التّربة وفقًا لذلك، كما يساعد في فهم سلوك المعادن السّامة في البيئة، ولكن تعدّ دراسة توزع المعدن بين أجزاء التربة أمراً معقداً بسبب التفاعلات المعقدة بين العوامل البيئية المختلفة التي تؤثر على التّوافر البيولوجي وانتقال المعادن بين الأطوار المختلفة، إضافة لصعوبة تفسير توزع المعدن بسبب عدم وجود قيم عتبة ثابتة للمعدن عند ارتباطه بكل جزء من أجزاء التّربة(Ali *et al.*, 2024).

إنّ التّعرض للضغوط البيئيّة، مثل التّراكيز السّامة للمعادن الثّقيلة، يمكن أن يؤثّر على نظم حماية النّباتات ويؤدّي إلى الإجهاد التّأكسديّ (Bernia *et al.*,(2018)، حيث أظهرت النّباتات المزروعة في ترب ملوّثة زيادة كبيرة في الماء الأوكسجينيّ (H_2O_2) (Alsherif *et al.*, (2022)، وعندما يزيد تركيز الكادميوم في الأوراق عن 5–10 مغ/كغ وزن جاف يُعدّ سامّاً ويسبب تغيرات في مورفولوجيا النّبات (Goncharuk and Zagoskina, 2023).

3- موادّ البحث وطرائقه

3-1- جمع العيّنات وتحديد خصائص التّربة

نُفّذ هذا البحث بين تشرين الأول 2023 وآذار 2024م في طرطوس، وأجريت التّحاليل في مخابر كليّة الزّراعة جامعة تشرين، ومخابر كليّة العلوم جامعة طرطوس، والمعهد العالي لبحوث البيئة جامعة تشرين.

3-1-1. جمع عيّنات التّربة وزراعة النّباتات

تمّ اختيار بيت بلاستيكي، عمر استخدامه 25 عاماً في زراعة البندورة، (في قرية عزّيت – ريف طرطوس)، وذلك اعتماداً على تحليل أولّي أُجري لتربته في شهر كانون الأوّل 2023م، حيث تمّ أخذ عيّنة مركّبة من الطبقة السّطحيّة (0-15سم)، وعيّنة من الطبقة تحت السّطحيّة (15-30سم)، تُركت العيّنتان لتجفّا هوائيّاً, وبعد ذلك خلطت عينتا التّربة جيّداً ونُخِّلتا بمنخل 2مم, وأخذ حوالي 1كغ من الطبقة السّطحيّة ووضعت في كيس بلاستيكي مغلق لإجراء التحاليل الأساسية على التربة.

في حين تمّ تقدير الكادميوم الكليّ في كلتا الطبقتين من أجل حساب معامل تعزيز التربة السّطحيّة النّسبي RTE (Relative Topsoil Enhancement):

$$RTE = \frac{\text{تركيز المعدن في الطبقة السطحية للتربة أقل من 15 سم}}{\text{تركيز المعدن في التربة تحت السطحية أكثر من 15 سم}} \quad (1)$$

وتُحدِّد قيمة هذا المعامل مدى التلوث الذي طرأ على التربة ومصدره، فإذا كانت قيمة المعامل أصغر من واحد فهذا يدلّ على أنّ الطبقة تحت السّطحيّة هي المسؤولة عن تركيز المعدن في الطبقة السّطحية وبالتّالي لا يوجد تلوث، أمّا إذا كانت قيمة حساب معامل تعزيز التربة السّطحيّة النّسبي RTE أكبر من واحد دلّ ذلك على تلقّي الطبقة السّطحيّة لكميّات إضافيّة من المعدن من الخارج (Prasad *et al.*, 2006).

وقد أثبتت نتائج التّحليل الأولي لتربة البيت البلاستيكي الّذي أجري في في شهر كانون الأوّل 2023م، أنّ تركيز الكادميوم في الطبقة السّطحية يساوي 1.81 مغ/ كغ، وفي الطبقة تحت السّطحيّة 0.37 مغ/كغ، أي أنّ معامل تعزيز التربة السّطحية للكادميوم 4.89، وهو أكبر من الواحد.

تَعدّ بعض التّصنيفات تركيز 1.81 مغ كادميوم/كغ تربة متجاوزاً للحدّ المسموح بالتّرب الزّراعيّة وهو 1 مغ كادميوم/كغ تربة، وهناك تصنيفات أخرى تعتمد قيمة 3 مغ كادميوم/كغ تربة كعتبة مسموحة للتّربة الزّراعيّة Kabata-Pendias and Pendias, (2001)، ومع ذلك بالاعتماد على قيم معامل تعزيز التربة السطحية المرتفع، وعلى كون محاصيل البيوت البلاستيكي تدخل إلى كل منزل شتاءً، كان لابدّ من إجراء دراسة على إمكانية معالجة تربة البيوت البلاستيكية من المعادن الثقيلة بالمعالجة النباتية.

بعد تقييم وضع التلوث في البيت البلاستيكي، قمنا بزراعة أربع نباتات تابعة للفصيلة الصّليبيّة وهي الجرجير *Eruca sativa* L. ، الخردل الأسود *Brassica nigra* L. ، والفجل *Raphanus sativus* L. والمنثور *Matthiola incana*، وذلك مع بداية الموسم الخريفي بتاريخ 20 /2023/10، وتمّ أخذ عيّنة تربة من الطبقة السّطحية والطبقة تحت السّطحية يوم الزراعة، لتكون تراكيز الكادميوم عند الزراعة مختلفة عن التحليل الأولي نتيجة الحراثة التي تمّت في أيلول عند تجهيز البيت البلاستيكي للموسم الجديد، وهكذا كان تركيز الكادميوم في الطبقة السّطحية 0.8 مغ/ كغ، وفي الطبقة تحت السّطحيّة 0.57 مغ/كغ، أي أنّ معامل تعزيز التربة السّطحية للكادميوم 1.4 عند الزراعة.

تمّت زراعة ستّة مكررات لكل نبات بالشكل التّالي بذرتين جرجير- 20 سم – بذرتين فجل-20 سم – بذرتين خردل

أسود –20سم– بذرتين منثور (حيث 20 سم هي المسافة بين كل فتحة تنقيط وأخرى في شبكة التنقيط، بحيث نضع تحت كلّ فتحة تنقيط نباتين من نفس النّوع)، وتعاد الزّراعة ثلاث مرات لتأمين 3 مكررات، عند الحصاد في 2023/12/30م، تمّ اعتماد نبات واحد من النباتين تحت فتحة التنقيط الواحدة كمكرر.

تمّ إجراء تجربة موازية لنفس التربة ونفس النباتات في الأصص، حيث تمّ وضع تربة مأخوذة من الطبقة السّطحيّة 0–15 سم في 12 أصيص سعة الأصيص 2كغ، وتمّت زراعة 3 مكرّرات لكل نبات من النّباتات قيد الدّراسة.

3-1-2 . خصائص التربة

يوضح الجدول رقم (1) بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة المدروسة, حيث تمّ تحديد قوام التّربة بطريقة الهيدروميتر Bouyoucos (1962) , وتقدير المادّة العضويّة باستخدام طريقة الهضم الرّطب والتي تقوم على أساس أكسدة الكربون العضوي باستخدام كمية زائدة من ثاني كرومات البوتاسيوم وبوجود حمض الكبريت Walkly and Black (1934) , والسّعة التّبادليّة الكاتيونيّة بطريقة خلّات الأمونيوم باستخدام جهاز اللهب (فلام فوتوميتر) Chapman (1965), وتقدير كربونات الكالسيوم الكليّة بطريقة المعايرة الحجميّة Gupta (2000), كما تمّ قياس درجة الحموضة والنّاقلية الكهربائيّة ضمن مستخلص 5:1 (تربة: ماء مقطّر).

الجدول (1) بعض خصائص تربة البيت البلاستيكي المدروس

خصائص التّربة	
قوام التّربة	لوميّة طينيّة رمليّة
نسبة الطّين %	20
نسبة السّلت %	18
نسبة الرّمل %	62
السّعة التّبادليّة الكاتيونيّة ميللمكافئ /100غ	93.7
المادّة العضويّة %	5.95
درجة الحموضة 5:1 (تربة: ماء)	7.43
النّاقلية الكهربائيّة ميلليموس/سم 5:1 (تربة: ماء)	0.61
كربونات الكالسيوم الكليّة%	10.15
كربونات الكالسيوم الفعّالة%	2.25

3-1-3. تحضير العيّنات النّباتيّة

تمّ الحصاد في 2023/12/30، لكلتا التجربتين (البيت البلاستيكي والأصص) بعد حوالي 70 يوم من زراعة البذور، تمّ غسل النّباتات بعد الحصاد مباشرة بالماء الجاري عدّة مرّات, ثمّ فصلت الجذور عن المجموع الخضري, وغُسلت النّباتات بالماء المقطّر ثلاث مرّات في المختبر, ثمّ قيس الوزن الرّطب, جّففت العيّنات بمجفف كهربائي على درجة حرارة 80°م لمدّة 7– 8 ساعات وأكثر حتّى ثبات الوزن ثمّ قيس الوزن الجّافّ, ثمّ تمّ طحن العيّنات المجفّفة للجذور والمجموع الخضري بمطحنة كهربائيّة, ونخلها بمنخل 1مم, والاحتفاظ بها بعبوات بلاستيكيّة محكمة الإغلاق.

تمّ قياس طول المجموع الخضري وعمق الجذور بالمسطرة أمّا حجم جذور الفجل فقد تمّ قياسه بقياس حجم الماء المزاح عند غمر الجذر ضمن بيشر فيه كميّة ماء معلومة.

تمّ هضم العيّنات النّباتيّة باستخدام حمض الآزوت عالي النّقاوة, وذلك بوضع 0.5 غ من العيّنة النباتيّة المطحونة والمجفّفة في أنبوب اختبار, وأضيف لها 5 مل HNO_3 65%, وتُركت حتّى اليوم التّالي, ثمّ وضعت في حمام مائي لمدّة ساعتين, وبعد أن تبرد نقلت إلى أرلنماير, وتمّ إكمال الحجم حتّى 50 مل بالماء المقطّر, ثمّ تمّ تقدير الكادميوم في المستخلصات باستخدام جهاز الامتصاص الذري Shimadzu AA -6800.(Gupta, 2000)

3-2. حساب معاملات تحديد كفاءة النّبات في استخلاص معدن ما

3-2-1. معاملات كفاءة المعالجة النّباتيّة

تمّ حساب كل من معامل التّركيز الحيويّ Bioconcentration Factor (BCF)، معامل التّراكم الحيوي Bioaccumulation Coefficient (BAC)، ومعامل الانتقال Transfer Factor (TF) لتقييم كفاءة نبات ما بالمعالجة النّباتيّة، وفق المعادلات الموضّحة: (AMIN et al, 2018, Malik et al, 2010, Yoon et al, 2006)

$$BCF = \frac{\text{تركيز المعدن في الجذور}}{\text{تركيز المعدن الكلي في التربة}} \quad (2)$$

$$BAC = \frac{\text{تركيز المعدن في المجموع الخضري}}{\text{تركيز المعدن الكلي في التربة}} \quad (3)$$

$$TF = \frac{\text{تركيز المعدن في المجموع الخضري}}{\text{تركيز المعدن في الجذور}} \quad (4)$$

3-2-2. نسبة عائد الاستخلاص لمعدن The specific extraction yield percentage (SEY%)

يُحسب مردود استخلاص النّبات لمعدن ما من حساب النسبة المئويّة لمحتوى المعدن في النّبات إلى تركيز المعدن الكلّي في التربة: (Audet and Charest, 2006, Audet and Charest, 2007)

$$SEY\% = \frac{\text{محتوى المعدن في الجذور +محتوى المعدن في المجموع الخضري}}{\text{تركيز المعدن الكلّي في التربة}} * 100 \quad (5)$$

حيث يتمّ حساب محتوى المعدن في النّبات = (تركيز المعدن بالجذور مغ/غ * الوزن الجاف للجذور) + (تركيز المعدن بالمجموع الخضري مغ/غ * الوزن الجاف للمجموع الخضري)

3-3. تقدير بعض الأشكال الكيميائيّة للكادميوم في التربة (Soltanpour and Workman, 1979)

تمّ اعتماد تحليل التجزئة على التوازي Parallel fractionation، أي كل مرة نستخدم عينة جديدة لتقدير الذائب والمتبادل والمرتبط بالمادة العضوية من الكادميوم.

3-3-1. الذائب: وضعنا 20 غ من التّربة الجافّة هوائيّاً في دورق ثمّ أضفنا 100 مل من الماء المقطّر، ووضعنا الدورق على خضّاض ميكانيكي لمدّة ست ساعات، وبعد التّرشيح أكملنا الحجم بالماء المقطّر حتى 100 مل.

3-3-2. المتبادل: وضعنا 10 غ من التّربة الجافّة هوائيّاً في دورق ثمّ أضفنا 50 مل من نترات المغنزيوم $Mg(NO_3)_2$ (1N)، بعد الخضّ لمدّة ساعتين قمنا بالتّرشيح وأكملنا الحجم بالماء المقطّر حتى 50 مل.

3-3-3. المرتبط بالمادة العضوية: وضعنا 10 غ من التّربة الجافّة هوائيّاً في دورق ثمّ أضفنا 50 مل من ماءات الصّوديوم NaOH (1N)، بعد الخضّ لمدّة نصف ساعة قمنا بالتّرشيح وأكملنا الحجم بالماء المقطّر حتى 50 مل.

تمّت إضافة 0.3 مل من حمض الآزوت (1n) لكل عيّنة بعد ترشيحها لمنع إعادة ارتباط العناصر بالمركبات العضويّة الذّائبة.

3-3-4. تقدير الكلّي للكادميوم قبل الزّراعة: تمّ هضم 1غ تربة بالماء الملكي(7مل HCl37% + 2.5 مل HNO3 65%)، حيث تمّ نقع العيّنة بالماء الملكي لمدة 24 ساعة، وبعد ترك المزيج لليوم الثاني يتم تسخين العينات ورفع حرارتها حتّى 175°م خلال ساعة ونصف، وتترك على هذه الحرارة لمدّة ساعتين، وبعد أن تبرد يُكمل الحجم إلى 50 مل بالماء المقطر.

تمّ تقدير الكادميوم في المستخلصات باستخدام جهاز الامتصاص الذري Shimadzu AA -6800، وتُحسب قيمة المتبادل بطرح الذّائب من قراءة الجهاز لمستخلص نترات المغنزيوم، وتُحسب قيمة المرتبط بالمادّة العضوية من طرح قراءة الجهاز للمتبادل والذائب معاً (أي قراءة مستخلص نترات المغنزيوم) من قراءة مستخلص ماءات الصّوديوم.

3-4. التّحليل الإحصائيّ

تمّ إجراء التّحاليل الإحصائيّة باستخدام برنامج SPSS (Statistic program for social science)، باستخدام ANOVA، ومعامل Duncan لحساب الفروق بين المتوسطات، وتمّ حساب معامل الارتباط بواسطة Excel.

4- النّتائج والمناقشة

4-1. المؤشّرات الحيويّة للنّباتات المدروسة

من الجدير بالذكر بدايةً أنّه تمت ملاحظة نمو خضري كبير لنباتي الفجل والجرجير في البيت البلاستيكي، وعند المقارنة بين المؤشرات الحيويّة للنبّاتات عند زراعتها في البيت البلاستيكيّ وفي الأصص نجد أنّ نمو نبات المنثور كان متقارباً في الحالتين، قد يكون قد نما بشكلٍ أفضل في البيت البلاستيكي ولكن تفوقّ الطول لا يتجاوز المرة ونصف عمّا هو عليه في الأصص، والأهمّ بالنسبة للمعالجة النّباتيّة هو الوزن الجافّ الذّي كان متقارباً بالنّسبة للمجموع الخضريّ ومتفوّقاً بأكثر من مرة ونصف بالنّسبة للجذور في نبات المنثور، في حين كان نمو الخردل أكبر من نموّه في الأصص بشكل واضح حيث الوزن الجاف للمجموع الخضريّ بالبيت البلاستيكي كان أكبر من ضعفه في الأصص والوزن الجافّ للجذور كان حوالي مرّة ونصف ما هو عليه بالأصص، أمّا نباتي الجرجير والفجل فقد كان الوزن الجاف لمجموعهما الخضري في البيت البلاستيكي يتجاوز حوالي 7 أضعاف ما هو عليه بالأصص بالنّسبة للجرجير، و11 ضعف بالنسبة للفجل، والوزن الجاف للجذور كان بالنسبة للجرجير ضعفي ما هو عليه بالأصص، وللفجل تسعة أضعاف الأصص، مع ملاحظة عدم نمو تفرعات جانبية لجذور الفجل الدرنية في الأصص في حين نمت للفجل المزروع بالبيت البلاستيكي، وكان طول الجذور للجرجير والخردل مع التفرعات في الأصص أكبر وذلك قد يعود لكون تفرعات الجذور انتشرت بتربة البيت البلاستيكي بعيداً عن الجذر الرئيسي فلم نحصل على كامل كتلة الجذور عند أخذ عينات التربة المحيطة بالجذر وعلى عمقه فقط، الجدولين (2 و3) و الشكل (1).

الجدول (2): بعض المؤشّرات الحيويّة للنباتات المدروسة المزروعة في الأصص

	طول المجموع الخضري سم	طول الجذور مع التّفرعات سم	عمق الجذور سم	حجم الجذور مل	الوزن الرّطب للمجموع الخضري/غ	الوزن الجاف للمجموع الخضري/غ	الوزن الرّطب للجذور/غ	الوزن الجاف للجذور/غ
الجرجير	32.17± 3.33	253.33± 85.49	11.73 ±0.87	-	37.44±6.2	2.14±0.38	1.98±0.32	0.41±0.07
الخردل	30.33± 3.06	130±27.84	8.23± 0.75	-	47.92±7.8	2.18±0.25	1.37±0.22	0.51±0.06
الفجل	30.67± 3.51	-	6.5±0.5	41.67±2.89	45.16±3.73	2.1±0.15	29.92±3.3	2.9±0.23
المنثور	18.33± 2.52	28±4.58	5.53± 0.75	-	6.77±1.62	0.97±0.13	0.53±0.09	0.12±0.02

الشكل (1) الفرق في الحجم بين نباتي منثور مزروعين بالبيت البلاستيكي(المحاطين بإطار)، ونبات الفجل المزروع بالقرب منهما(يبدو القليل من أوراقه بزاوية الصورة)، بعد 20 يوم فقط من الزراعة.

نلاحظ من الجدول (3) تفوّق نباتي الجرجير والفجل المزروعين في البيت البلاستيكي من حيث طول المجموع الخضري، وهو أمر تمّت ملاحظته تماماً يوم الحصاد، حيث تداخل المجموع الخضري للنباتين وكان كبيراً بشكل ملفت كما هو موضّح بالشكلين (2،3)، وكذلك من حيث عمق الجذور استطاع نباتي الجرجير والفجل أيضاً تغطية عمق الطبقة السّطحيّة كاملةً وهي 15 سم، وتفوّق نبات الفجل بوضوح على بقيّة النّباتات من ناحية الكتلة الحيّة حيث كان الوزن الجافّ للمجموع الخضري للفجل > الجرجير> الخردل الأسود > المنثور، أمّا جذور الفجل فقد وصل الوزن الرّطب لإحدى عيّنات الفجل أكثر من نصف كيلوغرام، وكان ترتيب الوزن الجاف للجذور بالنباتات الأربعة المدروسة نفس ترتيب الوزن الجاف للمجموع الخضري.

الجدول (3): بعض المؤشّرات الحيويّة للنباتات المدروسة المزروعة في البيت البلاستيكي

	طول المجموع الخضري / سم	طول الجذور مع التّفرعات/ سم	عمق الجذور سم	حجم الجذور مل	الوزن الرّطب للمجموع الخضري/غ	الوزن الجاف للمجموع الخضري/غ	الوزن الرّطب للجذور/غ	الوزن الجاف للجذور/غ
الجرجير	60.0±3.0	82±10.54	14.67±2.52	-	168.85±22.59	14.19±2.63	5.72±1.0	0.95±0.16
الخردل	50.33±7.57	81.33±14.47	7.83±1.04	-	60.53±6.23	5.23±0.5	4.55±0.73	0.72±0.21
الفجل	63.67±5.03	28±5.57	16±4.36	466.67	254.64±37.93	23.48±3.39	473±95.98	25.33±5.33
المنثور	25.33±3.05	67.67±9.07	6.17±0.76	-	6.38±0.53	1.03±0.15	0.67±0.07	0.21±0.012

الشكل (2): صورة لنباتي الفجل والجرجير يوم الحصاد 2024/1/30

الشكل (3) صورة لنباتي فجل في التربة يوم الحصاد (أحد المكررات الثلاثة)

(تمت زراعة بذرتين تحت كل فتحة تنقيط من شبكة التنقيط، وتمّ اعتماد أحد النباتين في الصورة كأحد المكرّرات)

4-2. المقارنة بين النّباتات المدروسة، تركيز الكادميوم في الجذور والمجموع الخضري، وتقييم كفاءة المعالجة النّباتيّة

تبيّن من نتائج التحليل الإحصائي تفوّق نبات الخردل على بقيّة النّباتات في تركيز الكادميوم في جذوره أو بنقله نحو المجموع الخضري، سواء من خلال قيم تركيز المعدن بالجذور وبالمجموع الخضري، أو من خلال قيم معاملات تقييم كفاءة المعالجة النّباتية وهي معامل التّركيز الحيويّ BCF، معامل التّراكم الحيوي BAC، ومعامل الانتقال TF، وكانت قيم هذه المعاملات لكلّ النّباتات أكبر من واحد (باستثناء معامل التركيز الحيوي لنبات المنثور، مع أنّه كان قريباً من الواحد، ومعاملي الانتقال لنباتي الجرجير والفجل ، وقد يعود ذلك للكتلة الخضرية المفرطة لهما التي أدّت إلى توزع المعدن على كميّة كبيرة من الوزن)، ويفسر معامل الانتقال الأكبر من واحد لدى النّباتات شديدة المراكمة بنقل المعدن بسرعة وكفاءة إلى المجموع الخضريّ عبر نسيج الخشب، هذه 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)، وهذه القدرة العالية لنباتات الفصيلة الصليبية على تركيز ونقل ومراكمة المعادن الثقيلة تمّت الإشارة لها في العديد من الدراسات(Bortoloti and Baron., (2022 ; Roy and Mondal, (2020); Sarma., (2011) ، وكان ترتيب النباتات من حيث تركيز الكادميوم بالجذور: الخردل> الجرجير = الفجل> المنثور، وبشكل منطقي كان للنباتات نفس الترتيب بالنسبة لمعامل التركيز الحيوي، أمّا ترتيب النباتات من حيث تركيز الكادميوم بالمجموع الخضري: الخردل الأسود > الجرجير = الفجل= المنثور، وبشكل منطقي كان للنباتات نفس الترتيب بالنسبة لمعامل التراكم الحيوي، ومن الملفت ترتيب النباتات بالنسبة لمعامل الانتقال حيث كان الخردل الأسود = المنثور> الجرجير = الفجل، أي أنّ نباتي الخردل والمنثور استطاعا نقل كل ما يتم مراكمته بجذورهما بكفاءة عالية نحو المجموع الخضري، وتفوقا بذلك على كل من نباتي الجرجير والفجل، الجدول(4).

كان تركيز الكادميوم في نبات الخردل الأسود أعلى من النّطاق الطبيعي في النّباتات 0.1 -2.4 مغ/كغ حسب (Qunshan Wei *et al.*, 2020)، في حين بقيت النّباتات الثّلاث المدروسة الأخرى ضمن النّطاق الطّبيعي، ولكنّه تجاوز الحدّ الطّبيعي في جميع النّباتات وفق Anjum *et al.*, (2012) لأنّه أكبر من 0.2 مغ/كغ، ولم يصل إلى حدود سميّة النّبات 5-30مغ /كغ، ومع ذلك لم يتصرّف أي من النّباتات الأربع كنبات فائق المراكمة للكادميوم ضمن شروط البحث الحاليّ وخصائص التّربة المستخدمة فيه, حيث لم تتجاوز قيم الكادميوم 100 مغ كادميوم/كغ وزن جافّ نبات Kabata Pendias and Pendias, (2001)وهذا يتشابه مع تقييم نبات الخردل الهندي *Brassica juncea* فهو قادر على تجميع الكادميوم والزّنك والسّيلينيوم والرّصاص بكميّات أكبر من نباتات أخرى على الرغم من أنه ليس مفرط التّراكم Pantola *et al.*, (2014)، كما يستطيع مراكمة الكادميوم والرّصاص ضمن جذوره ومجموعه الخضريّ Qunshan Wei *et al.*, (2020).

تُعدّ النباتات التي تمتلك على قيم معامل BCF وBAC و TF >1 مستخرجاً نباتيّاً واعداً ومناسباً لاستخراج المعادن الثّقيلة Amin *et al.*,(2018)، وتعدّ النّباتات التي تملك BAC > 1أو TF >1 مستخرِجاً مرشّحاً محتملاً للاستخدام بالمعالجة النّبتيّة بطريقة الاستخلاص الحيويّ Mendez *et al.*, (2008); Cruzado-Tafur *et al.*, (2021)، وبتطبيق ما سبق على نتائج دراستنا هذه نجد أنّ الخردل الأسود مستخرِج نباتي مناسب لاستخلاص الكادميوم من تربة ضعيفة التّلوث به، في حين لأنّ كل من الجرجير والفجل والمنثور هي مستخرِجات كادميوم محتملة، هذا قبل أن تدخل الكتلة الحّية في التقييم.

أمّا بالنسبة لمردود الاستخلاصSEY % الذي يتداخل فيه العاملين الأساسيين لتقييم كفاءة المعالجة النّباتية وهما تركيز المعدن والوزن الجاف للنّبات، المعادلة (5)، فقد كان ترتيب النباتات معنوياً كالتّالي: الفجل > الجرجير= الخردل> المنثور، وهو أمر منطقيّ، لأنّه بمتابعة النّتائج السابقة نجد أنّ الفجل تفوّق على كلّ النباتات بالكتلة الحيّة، حيث أنّ جذور الفجل الدرنية الكبيرة الحجم أي الوزن الجاف الكلي المرتفع للفجل ساعد على تفوّقه على الجرجير رغم نموّه الخضريّ العالي، وتفوّقه على الخردل رغم كون الخردل قام بمراكمة تركيز أكبر من الكادميوم في أنسجته، في حين تساوى الخردل والجرجير من حيث مردود الاستخلاص، أي أنّ نبات الجرجير استطاع من خلال النّمو الخضريّ العالي وبالتّالي زيادة الوزن الجاف أن يخفّف من تفوّق الخردل عليه من حيث تركيز الكادميوم فتعادلا بالمردود، وبقي نبات المنثور بالمرتبة الأخيرة بين النّباتات المدروسة من حيث مردود الاستخلاص لصغر كتلته الحيّة وانخفاض تركيز الكادميوم فيه مقارنة بكل النّباتات، ومن الضروري لفت النظر لكون كل هذه الاختلافات المدروسة آنفاً كانت ذات أهميّة إحصائيّاً، وذات دلالة معنويّة، حيث كانت قيم P بكل المقارنات أصغر من 0.05، الجدول (4).

الجدول (4): تركيز الكادميوم في الجذور والمجموع الخضري للنباتات المدروسة مغ/كغ مادة جافّة، وبعض مؤشّرات كفاءة المعالجة النّباتيّة

	تركيز الكادميوم بالجذور	تركيز الكادميوم بالمجموع الخضري	BCF	BAC	TF	SEY%
الجرجير	1.62 ± 0.55^{b}	1.28 ± 0.16^{b}	2.02 ± 0.69^{b}	1.6 ± 0.2^{b}	0.84 ± 0.22^{b}	2.45 ± 0.5^{b}
الخردل	2.81 ± 0.44^{a}	4.22 ± 0.3^{a}	3.52 ± 0.55^{a}	5.27 ± 0.38^{a}	1.51 ± 0.14^{a}	3 ± 0.09^{b}
الفجل	1.91 ± 0.45^{b}	1.47 ± 0.15^{b}	2.39 ± 0.56^{b}	1.43 ± 0.19^{b}	0.63 ± 0.19^{b}	9.26 ± 0.6^{a}
المنثور	0.71 ± 0.12^{c}	1.02 ± 0.06^{b}	0.88 ± 0.15^{c}	1.28 ± 0.08^{b}	1.48 ± 0.34^{a}	0.15 ± 0.013^{c}
P	0.002	P<0.001	0.002	P<0.001	0.003	P<0.001

4-3. تجزئة الكادميوم في التّربة

كان تركيز الذائب من الكادميوم في الطبقة السّطحيّة قبل الزراعة 0.005 مغ كادميوم/ كغ تربة جافّة وهو ما يعادل 0.65% من الكلي، في حين كان المتبادل حوالي 0.059 مغ/كغ، أي حوالي 7.38%، أمّا المرتبط بالمادة العضوية فكان تركيزه قبل الزراعة0.17 مغ/كغ أي 21.25 % من الكلي، وبالتّالي مجموعهم 0.24 مغ /كغ هو كامل المستخلص بماءات الصوديوم (ويُعبّر عن الذائب + المتبادل+المرتبط بالمادّة العضويّة)،ويعادل 30% من الكلي، وهو ما يُعدّ الجزء المرتبط من المعدن بأجزاء التربة الأكثر إتاحةً للنّبات، ويعتمد نقل المعادن الثّقيلة من التّربة إلى النّباتات بشكل أساسيّ على الكميّة الإجماليّة المحتملة المتاحة أو التّوافر البيولوجيّ للمعدن (Setia *et al.*, 2018).

تراوح تركيز الذائب من الكادميوم بين0.002- 0.0028 مغ/كغ بعد زراعة النباتات، بينما كان قبل الزراعة 0.005 مغ /كغ، وبناءً عليه كان النقص في الكادميوم كنسبة مئوية بعد زراعة التربة بالنباتات لمدّة سبعين يوم يتراوح بين 43.33% و 56.67% بما يتوافق مع بعد زراعة الفجل و بعد زراعة المنثور على التوالي، وبم أنّه لم يكن هناك دلالة معنوية

للفروقات بين تركيز الذائب بعد زراعة النباتات باختلاف أنواعها، نستطيع القول بشكل عام بأنّ الذائب من الكادميوم يتراجع إلى النصف تقريباً عند المقارنة بين تربة غير مزروعة وتربة مزروعة، وتراوح تركيز المتبادل بين 0.012 و 0.02 مغ/كغ بعد زراعة النباتات لمدّة سبعين يوم، وهو ما يقابله نقص بالنسبة المئوية للمتبادل بين 65.17- 79.02% بما يتوافق مع بعد زراعة الجرجير وبعد زراعة المنثور على التوالي،كذلك لم يكن هناك دلالة معنوية للفروقات بين تركيز المتبادل بعد زراعة النباتات باختلاف أنواعها، حيث P>0.05، ومنه نستطيع القول بأنّ تناقص المتبادل بعد زراعة تربة ما حوالي ثلاثة أرباع قيمته قبل الزراعة، أمّا تركيز المرتبط بالمادّة العضويّة فكان بعد زراعة الأربع نباتات بين 0.083- 0.117 مغ/كغ، والنقص من المرتبط بالمادة العضويّة خلال سبعين يوم بين 29.74-50.1% وهو ما يتوافق مع بعد زراعة المنثور والفجل على التوالي، الجدول (5).

الجدول (5): تجزئة الكادميوم وتوزّعه على كسور التّربة قبل وبعد زراعة النّباتات (الكادميوم مغ/كغ)، و النسبة المئوية لنقص الكادميوم من التّربة خلال فترة الزراعة

	تركيز الذائب من الكادميوم	% نقص من الذائب	تركيز المتبادل من الكادميوم	% نقص من المتبادل	المرتبط بالمادة العضوية من الكادميوم	% نقص من المرتبط بالمادة العضوية
قبل الزراعة	0.005±0.00045	-	0.059±0.0087	-	0.17±0.032	-
بعد زراعة الجرجير	0.0028±0.00046	44±9.17	0.02±0.0074	65.17±12.77	0.113±0.017	32.14±10.1
بعد زراعة الخردل	0.0025±0.00025	49.33±5.03	0.016±0.0014	72.18±2.42	0.109±0.011	34.33±6.62
بعد زراعة الفجل	0.0028±0.00095	43.33±18.9	0.012±0.0017	79.02±2.93	0.083±0.006	50.1±3.61
بعد زراعة المنثور	0.0022±0.00065	56.67±13.01	0.012±0.0014	79.02±2.33	0.117±0.024	29,74±14.38
P	-	0.568	-	0.103	-	0.11

عند دراسة الارتباط بين النّسبة المئويّة لنقص الكادميوم من التّربة خلال فترة الزّراعة في جميع النباتات وتركيز الكادميوم في جذورها لوحظ وجود ارتباط ضعيف مع النّقص الحاصل في الجزء المرتبط بالمادّة العضويّة، وعدم وجود علاقة ارتباط مع النّقص الحاصل في الجزء المتبادل من الكادميوم وهذا يؤكد المناقشة السابقة بالجدول (5) حيث التغيرات بين النباتات باعتمادها بالحصول على الكادميوم من جزء معيّن من التّربة لم تكن ذات دلالة معنويّة، ومن الملفت وجود علاقة ارتباط سلبية بين نقص الذّائب من الكادميوم بسبب زراعة النّباتات ومحتوى جذور النّباتات من الكادميوم حتّى وإن كان الارتباط ضعيف، قد نفسّر ذلك بأنّ وجود النّباتات يؤدّي إلى مواصفات خاصّة بمنطقة الريزوسفير المحيطة بالجذور مثل إفراز مواد عضوية معينة تؤدّي لدرجة حموضة أقل كنتيجة لذلك، كل ما سبق يُشجّع على زيادة الذّائب من الكادميوم أي انتقاله من أقطاب التربة المختلفة إلى محلول التربة، وهذا ما يفسر زيادة تركيز الكادميوم الذّائب في تربة مزروعة بالنّباتات، ومن جهة أخرى يُعتبر معدن الكادميوم من المعادن التي لا تميل إلى تحقيق أي توازن، وتبقى بالجزء الذّائب (Orroño and Lavado, 2009)، الجدول(6).

وأخيراً من البديهي ألّا يكون هناك ارتباط بين أشكال الكادميوم المختلفة في التّربة وتركيز الكادميوم في المجموع الخضري،

الجدول (6)، لأنّ حركة الكادميوم بعد دخوله إلى النّبات تعتمد على فيزيولوجيّة النّبات نفسه والمعادن الأخرى المُحتمل وجودها بالتّربة المزروع فيها والتي قد تملك تأثيراً تآزريّاً أو تضاداً مع انتقال الكادميوم وحركته ضمن النّبات، كالرّصاص الذّي يملك خاصيّة تآزرية مع الكادميوم ضمن النّبات Kabata Pendias and Pendias, (2001) ، وكانت نتيجة تحليله في التّربة السّطحيّة قبل الزّراعة 71.4 مغ/ كغ، وفي الطبقة تحت السّطحيّة 53.5 مغ/كغ، أي معامل تعزيز التّربة السّطحيّة النّسبي 1.34.

الجدول (6): الارتباط بين النسبة المئوية لنقص الكادميوم من التّربة خلال فترة الزراعة وتركيز الكادميوم في جذور النباتات وفي المجموع الخضري

R	النقص من الذائب	النقص من المتبادل	النقص من المرتبط بالمادة العضوية
مع تركيز الكادميوم في جذور النباتات	−0.49	0.24	0.31
مع تركيز الكادميوم في المجموع الخضري	−0.007	0.065	−0.055

5- الاستنتاجات والتّوصيات

1- تفوّق نبات الفجل بوضوح على بقيّة النّباتات من ناحية الكتلة الحيّة، حيث كان الوزن الجافّ للمجموع الخضري والوزن الجاف للجذور يتبع الترتيب فجل > جرجير> خردل أسود > منثور.

2- على الرّغم من تفوّق نبات الخردل الأسود على بقيّة النّباتات سواء من خلال قيم تركيز الكادميوم بالجذور وبالمجموع الخضري، أو من خلال قيم معاملات تقييم كفاءة المعالجة النّباتية وهي معامل التّركيز الحيويّ BCF، معامل التّراكم الحيوي BAC، ومعامل الانتقال TF، إلّا أنّ قيمة الكتلة الحيّة المرتفعة للفجل جعلته يتفوّق على الخردل في مردود استخلاص الكادميومSEY% الذي وصل حتّى 9.26% لنبات الفجل، يليه الخردل 3%، ثمّ الجرجير 2.45%، مع عدم وجود فرق معنوي بين مردود استخلاص كل من الخردل والجرجير، وأخيراً المنثور بقيمة مردود استخلاص كادميوم 0.15% فقط.

3- تجاوز الكادميوم الحدّ الطّبيعي في جميع النّباتات، وفق بعض التّصنيفات، وتجاوز الكادميوم الحدّ الطّبيعي في الخردل الأسود فقط، ولكن لم يصل إلى حدود سميّة النّبات 5-30مغ /كغ .

4- لم يتصرّف أي من النّباتات الأربع كنبات فائق المراكمة للكادميوم ضمن شروط البحث الحاليّ وخصائص التّربة المستخدمة فيه, حيث لم تتجاوز قيم الكادميوم 100 مغ كادميوم/كغ وزن جافّ نبات.

5- بلغ الكادميوم في مستخلص ماءات الصوديوم 0.24 مغ كادميوم /كغ تربة جافة، ويعادل 30% من الكلي، وهو ما يُعدّ الجزء المرتبط من المعدن بأجزاء التربة الأكثر إتاحةً للنّبات.

6- تراجع تركيز الذائب من الكادميوم إلى النصف تقريباً عند المقارنة بين تربة غير مزروعة وتربة مزروعة، وتراجع حوالي ثلاثة أرباع المتبادل بعد زراعة النّباتات، في حين تراوحت النسبة المئوية لنقص المرتبط بالمادّة العضوية بين الثلث والنّصف، وكان الارتباط معدوماً إلى ضعيفاً بين النسبة المئوية لنقص الكادميوم من التّربة خلال فترة الزراعة، وهي حوالي سبعين يوماً، في جميع النباتات وتركيز الكادميوم في جذورها.

7- ننصح المزارعين بتقييم تلوّث تربة البيوت البلاستيكيّة -القديمة منها خاصّة- بالمعادن الثّقيلة، وبحال تلوث التربة

بالكادميوم ننصح بزراعة الفجل خلال فترة استراحتها صيفاً، والتخلّص من النّباتات النّاتجة والتّعامل معها كنفايات خطيرة.

8- نوصي بمتابعة الأبحاث على النّباتات المدروسة في حال كانت تراكيز لكادميوم أعلى بكثير من تركيز الكادميوم بتربة البحث الحالي، لنعرف أيّاً منها تستمر فاعليته باستخلاص الكادميوم تحت ضغط زيادة التركيز.

9- نوصي بمتابعة الأبحاث حول المعالجة النّباتية على نباتات أخرى قد تكون فائقة المُراكمة، وعلى معادن أخرى أخرى تُشكّل زيادتها عن حدودها الطّبيعيّة خطورة بيئيّة غير الرّصاص والكادميوم, كالزنك والنيكل وغيرهما.

5- المراجع

Ali, J., Tuzen, M., Shaikh, Q., Jatoi, W., Feng, X., Sun, G., Tawfik A. Saleh, T.A. 2024. A review of sequential extraction methods for fractionation analysis of toxic metals in solid environmental matrices, *Trends in Analytical Chemistry*, 3 (4) 117639.

Alsherif, E.A., AL-shaikh, T. M., and Abdelgawad, H.(2022). Heavy Metal Effects on Biodiversity and Stress Responses of Plants Inhabiting Contaminated Soil in Khulais, Saudi Arabia, Biology, 11, 164.

Amin, H., Arain, B.A., Jahangir, T.M., Abbasi, M. S., and Amin, F.(2018). 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*, 2(1), 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., and Charest, C. (2006). Effects of AM colonization on "wild tobacco" plants grown in zinc contaminated soil. Mycorrhiza, 16, 277-283.

Audet, P., and Charest, C. (2007). Heavy metal phytoremediation from a meta-analytical perspective, *Environmental Pollution*, 147(1), 231–237.

Bernia,R., Luyckxc,M., Xud, X., Legayd, S., Sergeantd, K., Hausmand, J., Luttsc, S., Caia,G., Guerrierod,G. (2018). Reactive oxygen species and heavy metal stress in plants: Impact on the cell wall and secondary metabolism, Environmental and Experimental Botany,

Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. Agronomy journal, 54(5), 464-465.

Bortoloti, G. A., and Baron, D. (2022). Phytoremediation of toxic heavy metals by Brassica plants: A biochemical and physiological approach, *Environmental Advances*, 8.

Chapman, H.D.(1965). Cation exchange. In: C. A. Black (Ed.) Methods of soil analysis - Chemical and microbiological properties. Agronomy, 9(2), 891-901.

Dar, M.I, Khan, F.A., Rehman, F., Masoodi,A., Ansari, A.A., Varshney,D , Naushin,F., Naikoo, M.I. (2015). Roles of Brassicaceae in Phytoremediation of Metals and Metalloids, Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants, Springer, Switzerland, 1: 201-213.

Ghaderian,M, and Nosouhi,S.(2015). The capability of uptake and removal of toxic heavy metals from the industrial discharge of Mobarakeh Steel Complex by some metal accumulating plants, Journal of Plant Process and Function Iranin Society Of Plant Physiology, 4(12),43- 49.

Phytotoxicity, and the Role of Phenolic Antioxidants in Plant Stress Responses with Focus on Cadmium: Review, Molecules , 28, 3921.

Gupta, P.K.(2000).Soil, plant, water and fertilizer analysis, Agrobios, Second Edition, New Dehli, India, 438.

Kabata-Pendias, A., Pendias.H. (2001).*Trace Elements in Soils* and Plant, Third Edition, London:CRC Press.

Khanmirzaei, A., Bazargan, K., Moezzi, A.A., Richards, B. K., Shahbazi, K. (2013).Single and Sequential Extraction of Cadmium in Some Highly Calcareous Soils of Southwestern Iran, Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 13(1), 153-164.

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

Orroño D. I, Lavado, R. S. (2009). Distribution of extractable heavy metals in different soil fractions, Chemical Speciation and Bioavailability, 21(3).

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

Prasad, M.N.V., Sajwan, K. S., and Naido, R. (2006). Trace elements in the environment. Biogeochemestry, Biotechnology, and Bioremediation. CRC. Taylor and Francis.726.

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. (2020). Phytoremediation of contaminated soil Lead and Cadmium by Brassica júncea (L.) Czern plant, Journal of Earth Sciences & Environmental Studies, 5(4), 110-120.

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

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

Sarma, H. (2011). Metal Hyperaccumulation in Plants: A Review Focusing on Phytoremediation Technology, Journal of Environmental Science and Technology, 4(2), 118-138.

Setia, R.C, Kaur,N, Setia,N, Nayyar, H.(2018) Heavy Metal Toxicity in Plants and Phytoremediation, Crop Improvement: Strategies and Applications,, 206-218.

Soltanpour. P. N and Workman. S. (1979). Modification of the NaHCO3 DTPA soil test to omit carbon black. Soil Sci. Plant Anal, Vol. 10, PP: (1411-1420).

Waheed, A., Haxim, Y., Islam, W., Ahmad, M., Ali, S., Wen, X., Ali Khan, Kh., Ghramh, H.A., Zhang , Z., and Zhang, D.(2022). Impact of Cadmium Stress on Growth and Physio-Biochemical Attributes of *Eruca sativa*, Plants, 11(2981).

Walkley, A. and Black, I. A. (1934). An examination of degtjareff method for determination soil organic matter and a propsed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, 37(1)29-38.

Yildirim , E., Ekinci,M., Turan,M. , Aiar,G. , Örs, S., Dursun,A., KUL,R., Balci, T. (2019). Impact of Cadmium and Lead Heavy Metal Stress on Plant Growth and Physiology of Rocket (*Eruca sativa* L.), KSU J. Agric Nat 22(6): 843-850

Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q. and MA, L.Q. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in Native Plants Growing on a Contaminated Florida Site. Science of The Total Environment, 368(2-3), 456–464.