تقييم كفاءة نبات دوار الشمس في معالجة بعض ترب شمال غرب سوريا الملوثة بالعناصر الثقيلة

محمد تلاوي، د. أحمد فراس علوش، د. عبد الحميد الخالد

قسم الهندسة الكيميائية، كلية الهندسة، جامعة الشام

الملخص

تُعدّ الترب الزراعية في شمال غرب سوريا من أكثر المناطق تعرضًا للتلوث بالمعادن الثقيلة نتيجة الأنشطة البشرية المختلفة، ما يهدد الإنتاج الزراعي والصحة البيئية. هدفت هذه الدراسة إلى تقييم قدرة ثلاثة أصناف من نبات دوار الشمس (*Helianthus annuus* L) (الأمريكي، الإسباني، والمحلي) على تراكم وانتقال العناصر الثقيلة (الكروم، الكوبالت) في ثلاثة مواقع مختلفة في محافظة إدلب (دارة عزة، حارم، سرمدا). جرى تحليل بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية للترب، وزراعة الأصناف ضمن أصص لمدة 45 يومًا، ثم قياس التراكيز المتراكمة في الجذور باستخدام جهاز (ICP-OES) بعد هضم العينات بطريقة الهضم الرطب باستعمال الماء الملكي. حُسبت معامل التراكم الحيوي(BCF) ، معامل الانتقال(TF) ، وكفاءة الإزالة (RE%)من التربة. أظهرت النتائج أن قيم BCF للعنصرين كانت أقل من الواحد في كل المعاملات، مما يشير إلى أن نبات دوار الشمس يسلك سلوك الاستبعاد (Excluder) أكثر من التراكم. كما سجلت قيم TF أغلبها أقل من الواحد، أما كفاءة الإزالة فكانت منخفضة جداً، إذ تراوحت بين 0.166% و1.781% كحد أقصى خلال موسم زراعي واحد، وتفوق موقع حارم بشكل واضح على الموقعين الآخرين في معظم العناصر، كما لوحظ موت الصنف المحلي في تربة دارة عزة وربما يعزى ذلك للارتفاع الشديد في تراكم العناصر الثقيلة بالجذور.

توصلت الدراسة إلى أن دوار الشمس في ظروف الدراسة أكثر ملاءمة لتقنية التثبيت النباتي (Phytostabilization)منه للاستخلاص النباتي(Phytoextraction) ، خاصة لعنصر الكروم. ويُعد الصنف الإسباني والمحلي في موقع حارم الأفضل أداءً في معظم المؤشرات.

الكلمات المفتاحية: دوار الشمس، العناصر الثقيلة، معامل التراكم الحيوي، معامل الانتقال، المعالجة النباتية، Phytostabilization.

تاريخ إيداع البحث :2026/01/21
تاريخ قبوله للنشر :2026/06/10

Assessment of the potential of Sunflower in Treating Some Contaminated Soils with Heavy Metals in Northwest Syria

M. Tellawi, Dr. Alloush, Dr. Al-Khaled

Agricultural soils in Northwestern Syria are among the most affected areas by heavy metal pollution due to various anthropogenic activities, posing significant threats to agricultural productivity and environmental health. This study aimed to evaluate the ability of three sunflower cultivars (*Helianthus annuus* L.) — American, Spanish, and Local — to accumulate and translocate heavy metals (chromium and cobalt) in three different locations in Idlib Governorate (Daraat Azza, Harim, and Sarmada). The physical and chemical properties of the soils were analyzed, and the cultivars were grown under controlled conditions for 45 days. Heavy metal concentrations in the roots were measured using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) following wet digestion with aqua regia. The Bioconcentration Factor (BCF), Translocation Factor (TF), and Removal Efficiency (RE%) from the soil were calculated.

The results revealed that BCF values for both elements were less than one across all treatments, indicating that sunflower exhibits excluder behavior rather than accumulative behavior. Most TF values were also below one. The removal efficiency was very low, ranging from 0.166% to 1.781% as a maximum during a single growing season. The Harim site significantly outperformed the other two sites in most parameters. Additionally, the death of the Local cultivar was observed in Daraat Azza soil, which may be attributed to the high accumulation of heavy metals in its roots.

The study concluded that sunflower, under the conditions of this study, is more suitable for phytostabilization than for phytoextraction, particularly for chromium. The Spanish and Local cultivars at the Harim site demonstrated the best overall performance across most indicators.

Keywords: Sunflower, Heavy metals, Bioconcentration Factor, Translocation Factor, Phytoremediation, Phytostabilization.

1. المقدمة:

تُشكل التربة الزراعية الملوثة بالمعادن الثقيلة تحديًا بيئيًا خطيرًا نظرًا لقدرة هذه العناصر على التراكم الحيوي والاستمرار لفترات طويلة دون تحلل. ويُعد كل من الكادميوم والكروم والكوبالت والنيكل من العناصر السامة الشائعة في التربة، التي ترتبط مصادرها بالأنشطة الصناعية والممارسات الزراعية المختلفة، إضافةً إلى الإدارة غير السليمة للنفايات (Wuana & Okieimen, 2011).

تتميز هذه المعادن بثباتها في البيئة وعدم قابليتها للتحلل الحيوي، ما يؤدي إلى انتقالها عبر السلسلة الغذائية وتفاقم تأثيراتها السامة. (Fulekar et al., 2009) (Rehman et al., 2017)

في هذا السياق، تبرز أهمية المعالجة النباتية كتقنية مستدامة وصديقة للبيئة تعتمد على قدرة النباتات، مثل دوار الشمس، على امتصاص وتثبيت الملوثات. يركز هذا البحث على أثر جذور نبات دوار الشمس في تراكم المعادن الثقيلة، إذ تُظهر الدراسات أن جذور النباتات لها أثر رئيس في امتصاص وتخزين المعادن الثقيلة، ما يدعم فعالية المعالجة النباتية في تقليل التلوث المعدني للترب الزراعية. (Angelova et al., 2013).

2. مبررات وأهمية البحث:

على الرغم من الأهمية الكبيرة للمعالجة النباتية للترب الملوثة بالمعادن الثقيلة، فإن تطبيقاتها الميدانية لا تزال محدودة في البلدان النامية بسبب عدم الإدراك الكامل لفوائدها وقلة التقنيات اللازمة. ومع ذلك، فإن القلق المتزايد من تأثيرات التلوث المعدني على الصحة العامة وجودة الأراضي الزراعية قد دفع الباحثين إلى البحث عن حلول مبتكرة ومنخفضة التكلفة لهذه الأغراض. تُعد المعالجة النباتية باستعمال نبات دوار الشمس (*Helianthus annuus* L.) خيارًا واعدًا، إذ تتميز جذوره بقدرة عالية على امتصاص وتخزين المعادن الثقيلة، ما يسهم في تحسين جودة التربة وإعادة تأهيل الأراضي الملوثة في مناطق الإنتاج الزراعي. يركز هذا البحث على كفاءة جذور دوار الشمس في امتصاص المعادن الثقيلة من خلال التعرف على آليات الامتصاص والتراكم في

تاريخ إيداع البحث :2026/01/21
تاريخ قبوله للنشر :2026/06/10

الجذور، ما يوفر حلاً اقتصاديًا وصديقًا للبيئة يقلل المخاطر الصحية والبيئية ويدعم تطوير حلول اقتصادية وحيوية لحماية البيئة وصحة المجتمعات، ويعزز الأمن الغذائي من خلال زيادة المساحات القابلة للزراعة، مقارنة بالطرق التقليدية المكلفة.

أهداف البحث:

1. تقييم قدرة أصناف مختلفة من نبات دوار الشمس على امتصاص وتراكم ونقل العناصر الثقيلة (Cr, Co) من التربة الملوثة في مناطق مختلفة.
2. تحديد مدى ملاءمة نبات دوار الشمس لتقنيات المعالجة النباتية.ا
3. **الدراسة المرجعية:**

تناولت العديد من الدراسات كفاءة نبات دوار الشمس في معالجة التربة الملوثة بالمعادن الثقيلة، إذ أظهرت قدرته على امتصاص وتراكم عناصر مثل الكادميوم والرصاص والكروم والنيكل والكوبالت في أنسجته النباتية، خاصة في الجذور. فقد بينت دراسة (Alaboudi et al., 2018) أن زيادة تراكيز الرصاص والكادميوم في التربة تؤدي إلى زيادة تراكمهما في الجذور والبراعم، مع استجابة أعلى للكادميوم. كما أوضحت دراسة (Vijayan & Sushama, 2018) انخفاض تراكيز الكروم والكوبالت والنيكل في التربة بعد زراعة دوار الشمس، مما يدل على كفاءته في الاستخلاص النباتي لهذه العناصر.

وفي سياق متصل، أظهرت دراسات لاحقة اختلاف قدرة التراكم تبعًا لنوع التربة والظروف البيئية، إذ يتأثر امتصاص الكادميوم بدرجة حموضة التربة (Zehra et al., 2020)، كما يتزايد التراكم الحيوي بزيادة التركيز الابتدائي للمعادن الثقيلة ومدة التعرض (Zaman et al., 2021; Mathur et al., 2023). كذلك بينت بعض الدراسات أن العوامل البيئية مثل الأمطار الحامضية قد تؤثر سلبًا على الكتلة الحيوية للنبات رغم استمرار قدرته على الامتصاص (Zhong et al., 2024)، في حين أظهر دوار الشمس كفاءة أعلى مقارنة ببعض النباتات الأخرى في إزالة المعادن الثقيلة من التربة (Sharma & Mathur, 2022).

وبشكل عام، تؤكد هذه الدراسات أن دوار الشمس يعد من النباتات الواعدة في تقنيات المعالجة النباتية، نظرًا لقدرته على تحمل التراكيز المرتفعة من الملوثات وتراكمها في أنسجته، مع تأثر كفاءته بعدة عوامل بيئية وزراعية.

ويتضح أيضاً أن معظم الأبحاث ركزت على الكادميوم والرصاص، في حين أن الدراسات التي تناولت عناصر مثل الكوبالت ما تزال محدودة، مما يبرز أهمية الدراسة الحالية في سد هذه الفجوة البحثية.

3. مواد وطرائق البحث:

5-1. المواد:

5-1-1. وصف الموقع:

اختير موقع الدراسة في شمال غرب سوريا، إذ جُمعت عينات التربة الملوثة بالمعادن الثقيلة من ثلاث مدن هي حارم، سرمدا، ودارة عزة. حُددت هذه المواقع بناءً على بيانات التلوث المقدمة من الدراسات المنشورة حول المنطقة (Alhasan et al., 2023). ويبين الجدول (1) الخصائص الفيزيائية والكيميائية للترب المدروسة قبل الزراعة بعد أن حُللت في دولة تايلند كما هو موضح في فقرة طرائق البحث.

الجدول (1): الخصائص الفيزيائية والكيميائية للترب المدروسة قبل الزراعة.

الخاصية	الواحدة	تربة حارم	تربة سرمدا	تربة دارة عزة
pH	_	7.88	7.85	7.77
EC	$dS.m^{-1}$	0.492	0.462	0.295
O.M.	%	5.46	4.41	4.84
Total Cr	$mg.kg^{-1}$	112.48	149.17	172.83
Total Co	$mg.kg^{-1}$	20.601	50.727	29.57

تاريخ إيداع البحث :2026/01/21
تاريخ قبوله للنشر :2026/06/10

5-1-2. المادة النباتية:

استُعملت في هذه الدراسة أصناف عدة من نبات دوار الشمس (*Helianthus annuus* **L.**) نظرًا لقدرتها المعروفة على امتصاص المعادن الثقيلة من التربة، وهي:

- الصنف المحلي (البلدي) المتداول بين المزارعين والمتكيف مع الظروف البيئية السائدة، وهو عبارة عن عشيرة نباتية (Population) خلطية التلقيح.
- صنف أمريكي هجين، حُصل عليه من الإدارة العامة للبحوث العلمية الزراعية بهذا الاسم.
- صنف إسباني، حُصل عليه من الإدارة العامة للبحوث العلمية الزراعية بهذا الاسم.

5-1-3. الأجهزة والمعدات المستخدمة:

جهاز مطيافية الانبعاث البصري البلازمي المقترن بالحث لتحديد تركيز الأيونات المعدنية في العينات، موديل (ICAP 6500 Duo)، إنتاج شركة (Thermo Scientific).

جهاز هضم كلداهل لهضم العينات النباتية واستخلاص المعادن الثقيلة منها،

موديل (KDN – 12D)، إنتاج شركة (Wuhan Bonnin Technology).

الأوعية الزراعية (الأصص) بارتفاع 30 cm وقطر 35 cmلزراعة النباتات، ميزان حساس بدقة 0.0001g لوزن أجزاء النبات الجافة، ميزان حساس بدقة 0.01g لوزن أجزاء النبات الطازجة،

ميزان بحساسية 1g لوزن الأوعية (الأصص) لحساب السعة الحقلية، مجففة لتجفيف أجزاء النبات الطازجة وتُعرّف السعة الحقلية بأنها المحتوى المائي للتربة بعد تشبعها بالماء وتركها لتصريف الماء الحر بفعل الجاذبية حتى يتباطأ الصرف بشكل كبير، بحيث

يبقى الماء محتجزًا في المسامات الدقيقة بفعل القوى الشعرية، وهو ما يمثل الحد الأعلى للماء المتاح للنبات (Brady & Weil, 2016; Hillel, 1998).

مطحنة لطحن أجزاء النبات الجافة، أوعية لحفظ العينات الجافة والمهضومة.

2-5. طرائق البحث:

1-2-5. تحضير التربة للزراعة:

جُمعت عينات التربة من عمق يتراوح بين cm (20-5)باستعمال أدوات مخصصة لجمع العينات وهي الرفش الخشبي والأوعية الخاصة بالزراعة. تم اعتيان التربة من ثلاث جهات مختلفة في المدينة تبعد عنها مسافة 500 متر على الأقل، اعتُمد أسلوب المسار القطري في جمع العينات إذ أنشئ مسار بطول 500 متر ممثل عن كل اتجاه انطلاقاً من نقطة مرجعية محددة وتقع في منتصف طول ضلع المدينة المأخوذ منها العينات وجُمعت عينات تربة من جانبي المسار على فواصل مكانية منتظمة بهدف تحقيق تمثيل مكاني مناسب لتباين خصائص التربة، بعد جمع العينات (البالغ عددها 20) دُمجت ثم جُففت في الهواء وأخذ عينات ممثلة منها عن كل مدينة لتحديد التركيب الكيميائي الأولي بواسطة جهاز مطيافية الانبعاث البصري البلازمي المقترن بالحث (ICP-OES) وفقا لـ (ISO, 2007) ISO 11885، وتم قياس الناقلية وpH التربة وفقا لـ (Jones, 2001).

وقيست المادة العضوية باستعمال طريقة الفاقد بالحرق وفقاً لـ (Schulte and Hopkins, 1996).

2-2-5. زراعة البذور في الأصص:

زرعت بذور دوار الشمس في الأوعية الزراعية المملوءة بالتربة الملوثة بتاريخ 14/7/2023وذلك في حقل مفتوح للهواء الطلق في مركز البحوث الزراعية في إدلب (محطة بحوث كفريحمول) وتم الحفاظ على مقدار سعة حقلية ثابت عند 70% وذلك بوزن الأصص مرتين أسبوعيا، وزّعت الأوعية الزراعية في الحقل عشوائياً لضمان تقليل تأثير التباين البيئي. وضعت الأوعية في

تاريخ إيداع البحث :2026/01/21
تاريخ قبوله للنشر :2026/06/10

صفوف بمسافات متساوية، مع مراعاة وجود مسافة كافية بين كل وعاء لتمكين النمو الأمثل للنباتات. كما وضعت الأوعية قي صفوف بمسافات متساوية بين كل نباتين بحيث لا تقل عن 35 cm وبين كل صفين بحيث لا تقل عن 40 cm لتمكين النمو الأمثل للنباتات.

3-2-5. تحضير الترب والعينات النباتية وتحليلها:

بعد فترة نمو محددة (45 يوما)، جُمعت عينات من التربة والنباتات لتحليل تركيز المعادن الثقيلة فيها.

تمت إزالة النباتات بلطف من الأصص وقُسم النبات إلى أربعة أجزاء وهي (الجذر – الساق – الأوراق – الزهرة) وغُسل بالماء منزوع الشوارد وشطفه ثم قيست أوزانها وهي رطبة.

جُففت التربة في المجففة لمدة ثلاث ساعات على درجة حرارة 105°C ثم وزنها وهي جافة، وجُفف النبات على درجة حرارة 70°C لمدة 48-72 ساعة حتى الوصول للثبات الوزني.

طُحنت أجزاء النبات المختلفة والتربة ووضعها في أوعية حفظ لهضمها في بعد.

نُخلت التربة عبر منخل 2mm

هُضمت العينات النباتية والترابية في جهاز هضم كلداهل على مرحلتين باستعمال الماء الملكي (بنسبة $HCl:HNO_3 = 3:1$ حجمًا/حجمًا)، بأوزان تراوحت بين 1.0-5.0 g حسب توفر الكتلة الحيوية للنبات، وبوزن 5 g بالنسبة للتربة.

المرحلة الأولى: وهي مرحلة الهضم البارد وذلك بوضع المسحوق النباتي في أنبوب الهضم ثم إضافة الماء الملكي عليه دون أي إضافات أخرى لمدة 16 ساعة في درجة حرارة الغرفة.

المرحلة الثانية: مرحلة الهضم الساخن وذلك برفع درجة الأنبوب إلى 130°C لمدة ساعتين.

حيث عُولج 1 غرام من العينة الصلبة بـ 10 مل من مزيج الأحماض ثم ترشيحها بأقماع الزجاج المسامي (G4) ذات المسامية µm (15-5). وعلى خلاف البروتوكولات التقليدية التي تتضمن خطوة تمديد إضافي بعد الهضم، حُللت المحاليل الناتجة مباشرة باستعمال تقنية ICP-

OES دون أي تمديد إضافي، وذلك بهدف تعزيز حساسية القياس والوصول إلى حدود كشف (LOD) أقل.

وعلى الرغم من أن التمديد يُستعمل عادةً لتقليل التداخلات وتحسين استقرار الجهاز، فإن تجنبه في هذه الحالة يؤدي إلى زيادة تركيز العناصر محل الدراسة في المحلول المُحلَّل، ما يساهم في تحسين القدرة على كشف العناصر النزرة ذات التراكيز المنخفضة. وتُعد هذه المقاربة مفيدة بشكل خاص في الدراسات البيئية، إذ قد يؤثر التمديد سلبًا على حدود الكشف ويحد من القدرة على تحديد التراكيز المنخفضة بدقة.

استعملت طريقة استخلاص العناصر النزرة الذائبة في الماء الملكي وفقا للمعيار الدولي ISO 15587 (ISO, 2002)

أرسلت العينات لتحليل محتوياتها من العناصر الثقيلة باستعمال مطيافية الانبعاث البصري البلازمي المقترن بالحث (ICP-OES) وذلك في جامعة شولالونغكورن في العاصمة التايلندية بانكوك إذ إن الجهاز لم يكن متوفراً في منطقة البحث في ذلك التاريخ.

تاريخ إيداع البحث :2026/01/21
تاريخ قبوله للنشر :2026/06/10

الجدول (2):ظروف تشغيل جهاز مطيافية الانبعاث الذري بالبلازما المقترنة حثياً -ICP) OES).

المعلمة	القيمة
معدل تدفق غاز البلازما	12 L min-1
معدل تدفق الغاز المساعد	0.5 L min-1
معدل تدفق غاز المرذاذ	0.5 L min-1
معدل تدفق غاز التبريد	12 L min-1
استطاعة التردد الراديوي	1150 watts
نمط مشاهدة البلازما	محوري
زمن التأخير للقراءة	30 sec
حجرة الرذاذ	حلزونية (إعصارية)
سرعة المضخة	50 rpm
الحاقن	كوارتز مخروطي بقطر 1.0 mm
المرذاذ	زجاجي متحد المركز
أنبوب العينة	أنبوب مضخة للعينات المائية بقطر داخلي 0.46 mm
أنبوب التصريف	أنبوب مضخة لتصريف السوائل بقطر 1.02 mm
الشعلة	شعلة مزدوجة
عدد المكررات	3

الجدول (3): بيانات المعايرة للعناصر المدروسة.

العنصر	الكروم (Cr)	الكوبالت (Co)
معادلة المنحنى المعياري	Y = 0.987x + 0.004	Y = 0.995x + 0.002
معامل الارتباط (R^2)	0.9992	0.9990
حد الكشف LOD (µg/L)	0.01	0.01
حد الكمية LOQ (µg/L)	0.03	0.03
نسبة الاسترجاع %	103 −94	105−95
الانحراف المعياري النسبي RSD%	2.4	2.6

تُحقق من أداء الطريقة التحليلية من خلال إعداد منحنيات معايرة خارجية (External Calibration) للعناصر المدروسة باستعمال محاليل قياسية متعددة التراكيز. أظهرت جميع منحنيات المعايرة علاقة خطية ممتازة، إذ تراوحت قيم معامل الارتباط (R^2) بين 0.9990 و0.9992.

كما حُسب حد الكشف (Method Detection Limit - MDL) وحد الكمية (Limit of Quantification - LOQ) وفق الإجراءات الموضحة في وثيقة وكالة حماية البيئة الأمريكية (U.S. EPA, 2016 - Revision 2). حُضرت سبعة method blanks وسبعة spiked samples منخفضة التركيز (بمستوى إضافة يتراوح بين 2−5 أضعاف التقدير الأولي لـ MDL) في ثلاث دفعات تحليلية منفصلة على أيام مختلفة. وطُبقت كامل خطوات الطريقة على هذه العينات (هضم 1 غرام من العينة بـ 10 مل ماء ملكي بنسبة HCl: HNO_3 = 3:1 حجمًا/حجمًا، تسخين لمدة ساعتين عند 130 درجة مئوية، وترشيح بالقمع الزجاجي المسامي).

حُسبت قيم MDL باستعمال الصيغة: $MDL = t - \{(n-1, 99\%)\} \times S$

حيث t = 3.143 (لعدد التكرارات n = 7)، وS هو الانحراف المعياري للقياسات. واعتُمدت القيمة الأكبر بين MDLs (من العينات المضاف إليها) وMDLb (من الـ blanks). أما LOQ فقد حُسب باستعمال العلاقة LOQ = 3 × MDL لضمان دقة كمية مقبولة.

تاريخ إيداع البحث :2026/01/21
تاريخ قبوله للنشر :2026/06/10

وتراوحت نسب الاسترجاع بين 94% و105%، في حين بلغت قيم الانحراف المعياري النسبي (RSD%) بين 2.4% و2.6%، ما يعكس مستوى عاليًا من الدقة والموثوقية للطريقة التحليلية.

قُيمت قدرة النبات على تراكم وانتقال المعادن الثقيلة باستعمال مؤشرات عدة، وهي عامل التراكم الحيوي (BAF) وعامل الانتقال (TF). كما حُسبت كفاءة إزالة المعادن من التربة (RE) اعتمادًا على تراكيز العناصر في التربة والنبات والكتلة الحيوية الجافة للنبات (Alaboudi et al., 2018)، وباستعمال المعادلات الآتية (Chaney et al., 1997).

- عامل التراكم الحيوي: Bioaccumulation Factor (BcF)

$$\mathrm{BcF} = \frac{C\ plant}{C\ soil}$$

$C\ plant$ = تركيز العنصر في النبات الجاف (mg/kg).

$C\ plant$= تركيز العنصر في التربة قبل الزراعة (mg/kg).

- عامل الانتقال: Translocation Factor (TF)

$$\mathrm{TF} = \frac{C\ shoot}{C\ root}$$

$C\ shoot$ = تركيز العنصر في الأجزاء الهوائية للنبات (mg/kg)

$C\ root$ = تركيز العنصر في الجذور (mg/kg)

- كفاءة إزالة المعدن من التربة: Removal Efficiency (RE)

$$\mathrm{RE}\ (\%) = \frac{C\ initial - C\ final}{C\ initial} \times 100$$

$C\ initial$ = تركيز العنصر في التربة قبل الزراعة.

$C\ final$ = تركيز العنصر في التربة بعد الحصاد

4-2-5. التحليل الإحصائي للبيانات:

نُفّذت التجربة باتباع تصميم القطاعات الكاملة العشوائية(RCBD) ، وتضمّنت التجربة 9 معاملات ناتجة عن ضرب ثلاثة مواقع في ثلاثة أصناف نباتية، باعتماد 3 مكررات لكل معاملة، ليبلغ العدد الكلي للقطع التجريبية 27 وحدة تجريبية. وحُلّلت البيانات باستعمال برنامج GenStat – 12الإحصائي، وأُجري تحليل التباين الثنائي (Two-Way ANOVA) بحيث شكّل العامل الأول الأصنافَ النباتية المستعملة والعامل الثاني المواقعَ. واستُبعدت القراءات الأقل من حد الكشف (N.D) من التحليل الإحصائي وأُشير إليها في الجداول، تجنباً للتحيز الناجم عن الاستبدال بها قيم افتراضية(Helsel, 2012) .

4. النتائج والمناقشة:

بينت نتائج تحليل التربة بعد عملية الزراعة وجود فروق بين التراكيز الابتدائية والنهائية ما يشير إلى أن النبات قد امتص جزءاً من هذه العناصر واختزنها في أنسجته، وتبين الجداول الآتية تراكيز العناصر الثقيلة في الترب الثلاث بعد حصاد نبات دوار الشمس:

الجدول (4): تربة حارم

العنصر	الواحدة	أمريكي	إسباني	محلي
Total Cr	$mg.kg^{-1}$	111.01	110.48	110.806
Total Co	$mg.kg^{-1}$	20.551	20.381	20.3

الجدول (5):تربة سرمدا

العنصر	الواحدة	أمريكي	إسباني	محلي
Total Cr	$mg.kg^{-1}$	148.37	148.39	147.969
Total Co	$mg.kg^{-1}$	50.646	50.60	50.646

الجدول (6): تربة دارة عزة

العنصر	الواحدة	أمريكي	إسباني	محلي
Total Cr	$mg.kg^{-1}$	171.73	171.50	172.83
Total Co	$mg.kg^{-1}$	29.417	29.494	29.57

تاريخ إيداع البحث :2026/01/21
تاريخ قبوله للنشر :2026/06/10

ملاحظة: تجدر الإشارة إلى عدم وجود معاملة ضابطة (Control Treatment) وذلك لأن غرض هذا البحث هو المقارنة بين أصناف دوار الشمس الثلاثة واختيار الصنف الأكثر كفاءة.

حساب عامل التراكم الحيوي BCF

بينت نتائج التحليل الإحصائي وجود فروق معنوية في عامل التراكم الحيوي للعناصر المدروسة في الأصناف المدروسة.

1. عنصر الكروم: يُظهر جدول عامل التراكم الحيوي للكروم وجود تباين بين المعاملات المختلفة تبعًا لتأثير الموقع والصنف والتداخل بينهما، إذ سجل الصنف الإسباني في موقع حارم أعلى قيمة لعامل التراكم الحيوي، في حين ظهرت أدنى القيم في معاملات موقع سرمدا، مع وجود فروق معنوية بين بعض المعاملات.

الجدول (7): عامل التراكم الحيوي لعنصر الكروم تبعاً للأصناف والمواقع.

المواقع / الأصناف	دارة عزة	حارم	سرمدا
الأمريكي	0.0592^{c}	0.1182^{ab}	0.0461^{c}
الإسباني	0.0700^{bc}	0.1723^{a}	0.0486^{c}
المحلي	–	0.1367^{a}	0.0764^{bc}
Grand mean = 0.0909	L s d $_{0.01}$= 0.058		C.V % = 26.7

حيث:Grand mean المتوسط العام، L s d $_{0.01}$: أقل فرق معنوي، C.V %: معامل الاختلاف

2. عنصر الكوبالت: يُظهر جدول عامل التراكم الحيوي للكوبالت تفوقاً معنوياً لمعاملتي الصنفين الإسباني والمحلي في موقع حارم مقارنة ببقية المعاملات، في حين لم تُظهر بقية المعاملات فروقاً معنوية فيما بينها. الجدول (7)

الجدول (8): عامل التراكم الحيوي لعنصر الكوبالت تبعاً للأصناف والمواقع.

المواقع / الأصناف	دارة عزة	حارم	سرمدا
الأمريكي	0.0372^{b}	0.0220^{b}	0.0126^{b}
الإسباني	0.0226^{b}	0.0878^{a}	0.0179^{b}
المحلي	—	0.1067^{a}	0.0136^{b}
Grand mean = 0.0401	L s d $_{0.01}$= 0.0455		C.V % = 47.6

تُشير نتائج عامل التراكم الحيوي (BCF) لجميع العناصر المدروسة إلى أن جميع القيم المسجلة كانت أقل من الواحد الصحيح في مختلف المواقع والأصناف، ما يشير إلى أن نبات دوار الشمس في ظروف هذه الدراسة يميل إلى سلوك الاستبعاد (Excluder behavior) أكثر من التراكم الحيوي، وهو ما يتوافق مع تصنيف (Baker, 1981) الذي قسّم النباتات إلى نباتات مُراكِمة (Accumulators) ومُستبعِدة (Excluders) ومُؤشِّرة (Indicators) وفق قدرتها على امتصاص العناصر الثقيلة وتنظيم تراكيزها في الأجزاء الهوائية.

وبالنسبة للكروم، فقد أظهرت قيم BCF المسجلة انخفاضًا واضحًا في انتقال العنصر من التربة إلى النبات، وهو ما يتفق مع نتائج دراسة (Zayed et al., 1998) التي بيّنت محدودية انتقال الكروم من الجذور إلى المجموع الخضري نتيجة انخفاض حركيته داخل النبات وتراكم جزء كبير منه في الجذور. كما أشار (Shanker et al., 2005) إلى أن الكروم يُحتجز بدرجة كبيرة في جدار الخلية الجذرية، الأمر الذي يحدّ من انتقاله إلى الأجزاء فوق سطح التربة.

أما الكوبالت فقد أظهر تباينًا بين المواقع، إذ سجل موقع حارم قيماً أعلى مقارنةً بالمواقع الأخرى، ويمكن أن يُعزى ذلك إلى اختلاف خصائص التربة بين المواقع، ولا سيما العوامل المتحكمة في الإتاحة الحيوية للعناصر الثقيلة، مثل الرقم الهيدروجيني والمادة العضوية، وهي عوامل معروفة بتأثيرها المباشر في امتصاص الكوبالت وانتقاله داخل النبات.

تاريخ إيداع البحث :2026/01/21
تاريخ قبوله للنشر :2026/06/10

حساب عامل الانتقال TF

بينت نتائج التحليل الإحصائي وجود فروق معنوية في عامل الانتقال للعناصر المدروسة في الأصناف المدروسة.

1. عنصر الكروم: تفوّقت أربع معاملات معنوياً على بقية المعاملات وهي: الصنف الإسباني والمحلي في موقع حارم (0.1244و0.1489)، والصنف الإسباني في موقع دارة عزة (0.1388)، والصنف المحلي في موقع سرمدا (0.1514). في حين لم تتباين المعاملات الخمس الأخرى تبايناً معنوياً فيما بينها وتراوحت قيمها بين 0.0817 و0.0965.

الجدول (9): عامل الانتقال لعنصر الكروم تبعاً للأصناف والمواقع.

المواقع / الأصناف	دارة عزة	حارم	سرمدا
الأمريكي	0.0980^{ab}	0.0817^{b}	0.0965^{b}
الإسباني	0.1388^{a}	0.1244^{a}	0.0841^{b}
المحلي	—	0.1489^{a}	0.1514^{a}
Grand mean = 0.1155	L s d 0.01= 0.0313		C.V % = 11.4

2. عنصر الكوبالت: أظهرت نتائج التحليل الإحصائي وجود فروق معنوية في عامل الانتقال لعنصر الكوبالت تبعاً للمواقع والأصناف المدروسة، الجدول(9) . تصدّر الصنفان الأمريكي والمحلي في موقع حارم القيمَ العليا (0.4245 و0.3950) دون فروق معنوية بينهما، في حين سجّل الصنف الأمريكي في دارة عزة أدنى قيمة في التجربة .(0.2179) واحتلت بقية المعاملات مواقع وسطية بحروف مركبة تعكس تقاربها مع أكثر من مجموعة، وتراوحت قيمها بين 0.2259و0.3866.

الجدول (10): عامل الانتقال لعنصر الكوبالت تبعاً للأصناف والمواقع.

المواقع / الأصناف	دارة عزة	حارم	سرمدا
الأمريكي	0.2179^{d}	0.4245^{a}	0.3319^{ab}
الإسباني	0.2811^{bcd}	0.2259^{cd}	0.3866^{ab}
المحلي	—	0.3950^{a}	0.3257^{abc}
Grand mean = 0.3236	L s d 0.01= 0.1055		C.V % = 13.7

تُشير نتائج عامل الانتقال لجميع العناصر المدروسة إلى تبايُن واضح في قدرة نبات دوار الشمس على نقل العناصر الثقيلة من الجذور إلى المجموع الخضري، وقد تدرّجت هذه القدرة على النحو الآتي: الكوبالت (0.3236) > الكروم (0.1155)

ويمكن تفسير هذا التدرج في ضوء الخصائص الكيميائية لكل عنصر؛ إذ يُحتجز الكروم بشكل شبه كامل في جدار الخلية الجذرية ولا يكاد يتحرك نحو الأعضاء الهوائية (Shanker et al., 2005). أما الكوبالت فيتحرك داخل أنسجة النبات عبر الأنسجة الوعائية (Deng et al., 2021)

ُشير العلاقة بين معامل التراكم الحيوي (BCF) ومعامل الانتقال (TF) إلى أهمية محورية في تحديد الاستراتيجية الأنسب للمعالجة النباتية للتربة الملوثة، إذ يُعبّر كلٌّ منهما عن مرحلة مختلفة من مراحل سلوك العنصر داخل النبات. ففي حين يعكس BCF قدرة النبات على استخلاص العنصر من التربة وتركيزه في الجذور، يعكس TF قدرته على نقل العنصر من الجذور إلى المجموع الخضري، وتتحدد على أساس هذين المعاملين ثلاثة سيناريوهات رئيسية وفق ما أكده (Baker, 1981) وطوّره لاحقاً (McGrath & Zhao, 2003)

السيناريو الأول: BCF > 1 و TF > 1، ويمثل نمط النباتات المُراكِمة (Hyperaccumulators) القادرة على استخلاص العنصر من التربة ونقله بكفاءة إلى الأجزاء الهوائية، وهو النمط الأمثل لتقنية الاستخلاص النباتي (Phytoextraction).

تاريخ إيداع البحث :2026/01/21
تاريخ قبوله للنشر :2026/06/10

السيناريو الثاني: BCF > 1 و TF < 1، ويعني أن النبات يُركّز العنصر في الجذور مع محدودية انتقاله إلى المجموع الخضري، وهو نمط يرتبط بتقنية التثبيت النباتي (Phytostabilization).

السيناريو الثالث: BCF < 1 و TF < 1، ويمثل غالباً نمط النباتات المُستبعِدة (Excluders) التي تحدّ من امتصاص العناصر الثقيلة وانتقالها معاً، وهو النمط السائد في كثير من النباتات غير المتخصصة.

وبالنظر إلى نتائج الدراسة الحالية يتبيّن أن نبات دوار الشمس ينتمي في معظمه إلى السيناريو الثالث، إذ جاءت قيم BCF لجميع العناصر المكتشفة أقل من الواحد الصحيح وتراوحت بين 0.046 و0.172للكروم، و0.013 و0.107للكوبالت، كما جاءت قيم TF بدورها أقل من الواحد الصحيح لمعظم المعاملات، إذ تراوحت بين 0.082 و0.151 للكروم، و0.218 و0.424 للكوبالت.

ومن الناحية التطبيقية، تُشير هذه النتائج مجتمعةً إلى أن نبات دوار الشمس في ظروف الدراسة الحالية يبدو أكثر ملاءمةً لتقنية التثبيت النباتي (Phytostabilization) منه للاستخلاص النباتي (Phytoextraction)، لا سيما بالنسبة للكروم الذي أظهر قيماً منخفضة لكلٍّ من BCF وTF. وقد خلص (Ali et al. 2013) في مراجعتهم الشاملة لدراسات المعالجة النباتية إلى أن نجاح الاستخلاص النباتي يتطلب عادةً تحقق كلٍّ من BCF > 1 و TF > 1، وهو شرط لم يتحقق في الدراسة الحالية لأي من العناصر المدروسة. وتشير هذه النتائج إلى أهمية دراسة وسائل تعزيز الإتاحة الحيوية للعناصر الثقيلة في التربة مستقبلًا، مثل استعمال المحسِّنات العضوية أو العوامل المُخلِّبة، بهدف تحسين كفاءة الاستخلاص النباتي.

حساب كفاءة الإزالة (RE%)

1. عنصر الكروم: تراوحت كفاءة الإزالة بين 0.525% و1.781% وقد تفوّق موقع حارم على بقية المواقع في جميع الأصناف إذ سجّل أعلى قيمة عند الصنف الإسباني (1.781%)، في حين جاءت قيم دارة عزة وسرمدا متقاربة ومنخفضة نسبياً.

الجدول (11): كفاءة الإزالة لعنصر الكروم تبعاً للأصناف والمواقع.

المواقع / الأصناف	دارة عزة	حارم	سرمدا
الأمريكي	0.6365	1.304	0.5363
الإسباني	0.7715	1.781	0.5251
المحلي	—	1.482	0.8268

2. عنصر الكوبالت: تراوحت كفاءة الإزالة بين 0.166% و1.458%، وتصدّر موقع حارم القيم العليا لا سيما في الصنفين المحلي والإسباني (1.458% و1.052%)، في حين سجّل الصنف الأمريكي في الموقع ذاته أدنى قيمة له (0.243%) وهو تباين لافت داخل الموقع الواحد. بقيت قيم دارة عزة وسرمدا منخفضة ومتقاربة في معظمها

الجدول (12): كفاءة الإزالة لعنصر الكوبالت تبعاً للأصناف والمواقع.

المواقع / الأصناف	دارة عزة	حارم	سرمدا
الأمريكي	0.5185	0.2427	0.1662
الإسباني	0.2683	1.052	0.2648
المحلي	—	1.458	0.1662

تُشير نتائج كفاءة الإزالة لجميع العناصر المدروسة إلى أن نبات دوار الشمس أظهر قدرة محدودة على إزالة العناصر الثقيلة من التربة خلال موسم زراعي واحد، إذ تراوحت القيم بين 0.166% و1.781% عبر جميع العناصر والمواقع والأصناف.

وعلى صعيد تأثير الموقع، تصدّر موقع حارم كفاءة الإزالة لجميع العناصر المكتشفة وبفارق واضح عن الموقعين الآخرين، وقد انعكس ذلك في ارتفاع قيم BCF لهذا الموقع مقارنةً بدارة عزة وسرمدا، ما يدل على أن إتاحة العناصر الحيوية في تربة حارم كانت أعلى مما أتاح للنبات امتصاص كميات أكبر منها .وعلى صعيد تأثير الصنف، أظهر الكوبالت تبايناً لافتاً داخل موقع حارم بين الأصناف، إذ تراوحت كفاءة إزالته بين 0.243% للصنف الأمريكي و1.458%

تاريخ إيداع البحث :2026/01/21
تاريخ قبوله للنشر :2026/06/10

للصنف المحلي، مما يدل على أن الصنف النباتي يُمثل عاملاً محدداً لكفاءة إزالة الكوبالت وليس الموقع وحده.

وتتوافق هذه النتائج مجتمعةً مع ما خلص إليه (Ali et al. 2013) من أن كفاءة الإزالة النباتية خلال موسم زراعي واحد نادراً ما تتجاوز 5% في النباتات غير المتخصصة، وأن تحقيق إزالة فعّالة يستلزم مواسم متعددة أو تعزيز الإتاحة الحيوية للعناصر بمحسّنات كيميائية أو بيولوجية تكشف قراءة متكاملة لمؤشرات BCF و TFوكفاءة الإزالة عن صورة متسقة تعكس محدودية الإزالة الحيوية في الظروف الراهنة للتجربة. فمن جهة، ارتبط ارتفاع كفاءة الإزالة ارتباطاً مباشراً بارتفاع BCF لا بارتفاعTF ، إذ إن ما يُزال من التربة يعتمد أساساً على قدرة النبات على استخلاص العنصر وتركيزه في الجذر، وليس على قدرته على نقله للمجموع الخضري. وهذا ما يفسر تصدّر موقع حارم كفاءةَ الإزالة في جميع العناصر، لأنه الموقع ذاته الذي سجّل أعلى قيمBCF .

وفي المحصلة، يتضح أن تحسين كفاءة الإزالة مستقبلاً يستوجب التركيز على رفع BCF أولاً من خلال تعزيز الإتاحة الحيوية للعناصر في التربة، لأن رفع TF وحده دون رفع BCF لن يُفضي إلى تحسين ملموس في كفاءة الإزالة الفعلية من التربة، وهو ما أكده .Ali et al) (2013في مراجعتهم الشاملة لإستراتيجيات الاستخلاص النباتي.

لوحظ موت الصنف المحلي في تربة موقع دارة عزة رغم أنها سجلت أقل قيمة للناقلية الكهربائية ($EC = 0.295\ dS.m^{-1}$)مقارنة بالمواقع الأخرى. ويعزى ذلك بشكل أساسي إلى ارتفاع تركيز عنصر الكروم الكلي في هذا الموقع($172.83\ mg.kg^{-1}$) ، والذي كان الأعلى بين المواقع الثلاثة. يُعد الكروم، ولا سيما في صورته سداسية التكافؤ، من العناصر شديدة السمية للنباتات، إذ يسبب تثبيط نمو الجذور، واضطراب التنفس الخلوي، وزيادة إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS)، ما يؤدي في النهاية إلى موت النبات(Shanker et al., 2005) ؛ (Singh et al., 2020) كما ساهمت نسبة المادة العضوية المنخفضة نسبياً في تربة دارة عزة (4.84%) في زيادة الإتاحة الحيوية للعناصر الثقيلة، نظراً لأثر المادة العضوية في تثبيت هذه العناصر وتقليل حركيتها. ومن المحتمل أن يكون الصنف المحلي أكثر حساسية لهذا الإجهاد المركب (الكروم + انخفاض المادة العضوية) مقارنة بالصنفين الإسباني والأمريكي، ما يشير إلى وجود اختلافات وراثية في التحمل بين الأصناف. ويتوافق هذا التفسير مع نتائج العديد من الدراسات التي أكدت

أن سمية الكروم يمكن أن تتجاوز تأثير الملوحة العامة عندما يكون تركيزه مرتفعاً (Singh et al., 2020).

5. الاستنتاجات:

1. أظهر نبات دوار الشمس في جميع الأصناف والمواقع قيم معامل التراكم الحيوي (BCF)أقل من الواحد الصحيح لكلا العنصرين (الكروم والكوبالت)، ما يؤكد أن النبات يميل إلى سلوك الاستبعاد (Excluder) أكثر من سلوك التراكم.
2. سجل موقع حارم أعلى قيم BCF وكفاءة إزالة لكلا العنصرين مقارنة بموقعي دارة عزة وسرمدا، ويعزى ذلك إلى ارتفاع الإتاحة الحيوية للعناصر الثقيلة في تربة هذا الموقع.
3. تفوق الصنفان الإسباني والمحلي على الصنف الأمريكي في معظم معاملات BCF و TFوكفاءة الإزالة، خاصة في موقع حارم.
4. كان الكوبالت أكثر انتقالاً من الجذور إلى المجموع الخضري مقارنة بالكروم (متوسط TF = 0.3236مقابل 0.1155)، ما يعكس اختلاف الحركية الداخلية بين العنصرين.
5. بقيت كفاءة الإزالة (RE%) منخفضة جداً خلال موسم زراعي واحد، إذ تراوحت بين 0.166% و1.781%، وهو ما يشير إلى محدودية قدرة دوار الشمس على الاستخلاص النباتي في ظروف الدراسة.
6. لوحظ عدم نمو الصنف المحلي في تربة موقع دارة عزة، ويُرجح أن يكون ذلك مرتبطاً بارتفاع تراكم العناصر الثقيلة أو تأثير الخصائص الكيميائية للتربة في هذا الموقع.
7. تؤكد النتائج مجتمعة أن نبات دوار الشمس أكثر ملاءمة لتقنية التثبيت النباتي (Phytostabilization)من تقنية الاستخلاص النباتي (Phytoextraction) تحت ظروف الترب الملوثة في شمال غرب سوريا.

تاريخ إيداع البحث :2026/01/21
تاريخ قبوله للنشر :2026/06/10

6. التوصيات:

1. يُفضل استعمال نبات دوار الشمس في برامج التثبيت النباتي لتقليل حركة العناصر الثقيلة (خاصة الكروم) في التربة، وليس لأغراض الاستخلاص الفعال للمعادن.
2. يُنصح بالتركيز على موقع حارم أو المواقع ذات الخصائص التربية المشابهة عند تنفيذ مشاريع المعالجة النباتية بدوار الشمس.
3. تفضيل زراعة الصنف الإسباني أو المحلي لأغراض المعالجة النباتية نظراً لتفوقهما النسبي على الصنف الأمريكي.
4. تجنب زراعة الصنف المحلي في المواقع ذات التلوث العالي أو الخصائص التربية الشديدة (مثل دارة عزة) حتى إجراء دراسات إضافية حول تحمله.
5. إجراء دراسات مستقبلية لتقييم تأثير إضافة المحسنات العضوية أو العوامل المخلبة لرفع الإتاحة الحيوية للعناصر وزيادة كفاءة الإزالة.
6. تنفيذ تجارب طويلة الأمد (متعددة المواسم) لتقييم التراكم التراكمي للعناصر الثقيلة وكفاءة دوار الشمس على المدى الطويل.
7. دراسة الجوانب الوراثية والفسيولوجية للأصناف المختلفة لتحديد الجينات المسؤولة عن تحمل العناصر الثقيلة وانتقالها.
8. التأكيد على عدم استعمال بذور دوار الشمس المزروعة في الترب الملوثة للاستهلاك البشري أو الحيواني لتجنب انتقال الملوثات في السلسلة الغذائية.
9. إجراء دراسات حقلية وتجارب طويلة الأمد لدعم الدراسة الحالية والتأكد من خاصية التثبيت لنبات دوار الشمس.

10. المراجع:

1. Alaboudi, K. A., Ahmed, B., & Brodie, G. (2018). Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant. *Annals of Agricultural Sciences, 63*(1), 123-127. https://doi.org/10.1016/j.aoas.2018.05.007
2. Alhasan, M., Lakmes, A., Alobaidy, M. G., AlHaeek, S., Assaf, M., Dawson, L., Pirrie, D., Abdeldayem, Z., & Bridge, J. (2023). A baseline survey of potentially toxic elements in the soil of north-west Syria following a decade of conflict. Environmental Science: Advances, 2(6), 886–897. https://doi.org/10.1039/D2VA00333C
3. Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. Chemosphere, 91(7), 869–881. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075
4. Angelova, V., Ivanova, R., Todorov, Z., & Ivanov, K. (2013). Heavy metals accumulation and distribution in durum wheat and pea grown in two different contaminated soils and effect on nutritional element uptake. Italian Journal of Agronomy, 8(4), e9. https://doi.org/10.4081/ija.2013.e9
5. Baker, A. J. M. (1981). Accumulators and excluders—Strategies in the response of plants to heavy metals. Journal of Plant Nutrition, 3(1–4), 643–654. https://doi.org/10.1080/01904168109362867
6. Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). The nature and properties of soils (15th ed.). Pearson.
7. Chaney, R. L., Malik, M., Li, Y. M., Brown, S. L., Brewer, E. P., Angle, J. S., & Baker, A. J. M. (1997). Phytoremediation of soil metals. Current Opinion in Biotechnology, 8(3), 279–284. https://doi.org/10.1016/S0958-1669(97)80004-3
8. Fulekar, M., Singh, A., & Bhaduri, A. M. (2009). Genetic engineering strategies for enhancing phytoremediation of heavy metals. *African Journal of Biotechnology, 8*(3), 529–535.
9. Helsel, D. R. (2012). Statistics for censored environmental data using Minitab and R (2nd ed.). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781118162729
10. Hillel, D. (1998). Environmental soil physics. Academic Press.
11. International Organization for Standardization. (2002). ISO 15587-1:2002. Water quality—Digestion for the determination of selected elements in water—Part 1: Aqua regia digestion. ISO.
12. International Organization for Standardization. (2007). ISO 11885:2007. Water quality—Determination of selected elements by

تاريخ إيداع البحث: 2026/01/21
تاريخ قبوله للنشر: 2026/06/10

inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). ISO.

13. Jones, J. B. (2001). Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. CRC Press.
14. Mathur, J., Chauhan, P., & Srivastava, S. (2023). Comparative evaluation of cadmium phytoremediation potential of five varieties of Helianthus annuus L. International Journal of Phytoremediation, 25(6), 799-810. https://doi.org/10.1080/15226514.2022.211
15. McGrath, S. P., & Zhao, F. J. (2003). Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. Current Opinion in Biotechnology, 14(3), 277–282. https://doi.org/10.1016/S0958-1669(03)00060-0
16. Qadir, A., Ahmad, R., Malik, R. N., Anwar, S., & Riaz, M. (2024). Effect of arsenic stress on growth, physiology, and phytoremediation potential of sunflower (Helianthus annuus L.). *Heliyon, 10*(12), e33078. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33078
17. Rehman, M. Z. U., Rizwan, M., Ali, S., Ok, Y. S., Ishaque, W., Saifullah, ..., & Hua, Y. (2017). Remediation of heavy metal contaminated soils by using *Solanum nigrum*: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 143*, 236–248. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.05.038
18. Schulte, E. E., & Hopkins, B. G. (1996). Estimation of organic matter by weight loss-on-ignition. In F. R. Magdoff (Ed.), *Soil organic matter: Analysis and interpretation (SSSA Spec. Publ. 46) * (pp. 21–31). SSSA.
19. Shanker, A. K., Cervantes, C., Loza-Tavera, H., & Avudainayagam, S. (2005). Chromium toxicity in plants. Environment International, 31(5), 739–753. https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.02.003
20. Sharma, M., & Mathur, J. (2022). Phytoaccumulation of zinc from contaminated soil using ornamental plants species Helianthus annuus L. and Tagetes erecta L. International Journal of Phytoremediation, 25(10), 1289-1305. https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2149692
21. Singh, S., Singh, A., Kumar, S., Singh, P. K., Singh, R., & Singh, N. (2020). Chromium toxicity in plants: Physiological, biochemical and molecular mechanisms. Ecotoxicology and Environmental Safety, 192, Article 110289. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110289
22. U.S. Environmental Protection Agency. (2016). Definition and procedure for the determination of the method detection limit, Revision 2. EPA 821-R-16-006.

23. Vijayan, V. D., & Sushama, P. K. (2018). Phytoremediation as an effective technology for the removal of heavy metals from dump yard soils. Nature Environment and Pollution Technology, 17(4), 13531358.www.neptjournal.com(http:4//www.neptjournal.com/)
24. Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks, and best available strategies for remediation. *ISRN Ecology, 2011*, 1–20.
25. Zaman, Q. U., Nazir, B., Mahmood, F., Al-Mijalli, S. H., Iqbal, M., Younes, I., & Nazir, A. (2021). Versatility and effectiveness of the commercial composts for ecological restoration of heavy metal contaminated soil for sunflower crop. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 34, 102025. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102025
26. Zayed, A., Lytle, C. M., Qian, J.-H., & Terry, N. (1998). Chromium accumulation, translocation and chemical speciation in vegetable crops. Planta, 206(2), 293–299. https://doi.org/10.1007/s004250050403
27. Zehra, A., Sahito, Z. A., Tong, W., Tang, L., Hamid, Y., Wang, Q., Cao, X., Khan, M. B., Hussain, B., Jatoi, S. A., He, Z., & Yang, X. (2020). Identification of high cadmium-accumulating oilseed sunflower (Helianthus annuus) cultivars for phytoremediation of an Oxisol and an Inceptisol. *Ecotoxicology and Environmental Safety*,187,109-857.https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109857
28. Zhong, J., Liu, Y., Chen, X., Ye, Z., Li, Y., & Li, W. (2024). The impact of acid rain on cadmium phytoremediation in sunflower (Helianthus annuus L.). *Environmental Pollution, 340*(Pt 2), 122-778. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122778

تاريخ إيداع البحث :2026/01/21
تاريخ قبوله للنشر :2026/06/10