دراسة علاقات الارتباط بين صفات النمو الفيزيولوجية لنبات دوار الشمس وكمية امتصاص المعادن الثقيلة في ظروف التلوث الحقلي

Study of the Relationships Between Sunflower Growth Traits and Heavy Metal Uptake Under Field Pollution Conditions

عبد الحميد الخالد: وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
عنوان التواصل: dep.educational@mohe.gov.sy
تاريخ التسليم: ١٩ تموز ٢٠٢٦ – **تاريخ القبول:** ١٠أيلول ٢٠٢٦

ABSTRACT

This study aimed to quantitatively evaluate the relationship between two physiological growth traits (stem height and leaf area) and the uptake of three heavy metals (chromium, cobalt, and nickel) from contaminated soils by sunflower (Helianthus annuus L.). A pot experiment was conducted using three sunflower cultivars (local, American, and Spanish) grown in soils collected from three locations in northwestern Syria (Harem, Sarmada, and Darat Izza) for 45 days. The experiment was arranged in a Randomized Complete Block Design (RCBD) with three replicates. Data were analyzed using Two-Way Analysis of Variance (Two-Way ANOVA), Pearson's correlation coefficient (r), and simple linear regression. The results revealed that leaf area was significantly and positively correlated with the uptake of all three heavy metals, with correlation coefficients of (r = ***0.783) for chromium, (r = ***0.691) for cobalt, and (r = ***0.825) for nickel ($p < 0.001$). Regression models based on leaf area explained between 47.8% and 68.0% of the variation in metal uptake ($R^2 = 0.478–0.680$). In contrast, stem height showed significant positive correlations only with chromium (r = **0.615, $p < 0.01$) and nickel (r = *0.470, $p < 0.05$), whereas no significant relationship was observed with cobalt. Although Harem soil contained the lowest total concentrations of the studied metals, it exhibited the highest uptake levels, indicating that metal bioavailability, rather than total soil metal concentration, is the principal determinant of metal uptake. These findings demonstrate the potential for developing preliminary predictive models that can be further refined and validated in future studies. Moreover, they highlight leaf area as a reliable proxy indicator for estimating phytoremediation efficiency prior to laboratory-based metal analysis.
Keywords: Sunflower (Helianthus annuus L.); heavy metals; metal uptake; leaf area; Pearson's correlation; simple linear regression; phytoremediation.

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم العلاقة الكمية بين صفتَي النمو الفيزيولوجيتين (طول الساق ومساحة الورقة) وكمية امتصاص ثلاثة عناصر ثقيلة (الكروم والكوبالت والنيكل) من التربة الملوثة في نبات دوار الشمس.(Helianthus annuus L.) أُجريت التجربة في أصص بثلاثة أصناف (المحلي والأمريكي والإسباني) على ترب مأخوذة من ثلاثة مواقع في شمال غرب سوريا (حارم وسرمدا ودارة عزة) لمدة 45 يوماً، وفق تصميم القطاعات الكاملة العشوائية (RCBD) بثلاثة مكررات. حُللت البيانات بتحليل التباين الثنائي (Two-Way ANOVA) ومعامل ارتباط بيرسون (r) والانحدار الخطي البسيط. أظهرت النتائج أن مساحة الورقة ارتبطت ارتباطاً طردياً دالاً إحصائياً مع كميات امتصاص العناصر الثلاثة جميعها(r=***0.783) للكروم، (r=***0.691)للكوبالت، (r=***0.825)للنيكل، ($p<0.001$)، وفسّرت نماذج الانحدار المبنية عليها ما بين 47.8% و68% من تباين كميات الامتصاص (R^2=0.478–0.680) أما طول الساق فارتبط ارتباطاً دالاً مع الكروم والنيكل فقط (r=**0.615)و(r=*0.470)، ($p<0.05$)، دون دلالة معنوية مع الكوبالت. وقد سجّل موقع حارم أعلى كميات امتصاص رغم امتلاكه أدنى التراكيز الكلية للعناصر، مما يؤكد أن الإتاحة الحيوية هي المحدد الفعلي للامتصاص لا التركيز الكلي للعنصر في النبات. أظهرت النتائج إمكانية بناء نماذج تنبؤية أولية يمكن تطويرها والتحقق من صلاحيتها في دراسات لاحقة، وتُعزز مساحة الورقة موقعها كمعيار استرشادي غير مباشر (Proxy indicator) لتقدير كفاءة المعالجة النباتية قبل إجراء التحليل المخبري.
الكلمات المفتاحية: دوار الشمس، المعادن الثقيلة، كمية الامتصاص، مساحة الورقة، الارتباط الخطي البسيط، الانحدار الخطي البسيط، المعالجة النباتية.

المقدمة

يُعدّ التلوث بالمعادن الثقيلة من أبرز التحديات البيئية التي تواجه القطاع الزراعي على المستويين المحلي والعالمي، إذ تتراكم هذه المعادن

في التربة نتيجة الأنشطة الصناعية والزراعية المكثفة والصراعات المسلحة، مُشكِّلةً خطراً متصاعداً على صحة الإنسان والنظم البيئية (Wuana & Okieimen, ٢٠١١). وعلى الرغم من توافر تقنيات معالجة كيميائية وفيزيائية متعددة، فإن تكلفتها المرتفعة وتأثيراتها السلبية على بنية التربة وميكروباتها دفعت الباحثين نحو المعالجة النباتية (Phytoremediation) كبديل مستدام يعتمد على استخدام النباتات واسعة الكتلة الحيوية لاستخلاص المعادن الثقيلة أو تثبيتها. ويتصدر نبات دوار الشمس (Helianthus annuus L.) قائمة النباتات المرشحة لهذه التقنية بفضل جملة من الخصائص الزراعية والفسيولوجية المتميزة؛ فهو سريع النمو، واسع الكتلة الحيوية، مقاوم لطيف واسع من الظروف المناخية والتربوية، وقادر على امتصاص عناصر ثقيلة متعددة كالرصاص والكروم والكادميوم والنيكل والكوبالت وتركيزها في أنسجته (Farid et al., ٢٠١٨; Stoikou et al., ٢٠١٧). وقد أكدت الأبحاث أن دوار الشمس يتميز بكتلة حيوية مرتفعة ونموٍّ سريع وقدرة على تخزين كميات ملحوظة من المعادن الثقيلة في أنسجته الدهنية (Huang et al., ٢٠٢٢)، مما يجعله موضع اهتمام واسع في برامج المعالجة النباتية. غير أن كفاءة الاستخلاص النباتي لا تحددها خصائص التربة فقط، وإنما تتأثر بشكل مباشر بالصفات الفسيولوجية للنبات ذاته. فالكتلة الحيوية الأكبر تعني بالضرورة مساحة امتصاص جذرية أوسع، وتدفقاً وعائياً أعلى عبر نظام الـ xylem يُسهم في نقل أيونات المعادن من الجذور نحو الأجزاء الهوائية Page & Feller (٢٠١٥) وقد أثبتت الدراسات الحديثة وجود ارتباط موجب دال إحصائياً بين الكتلة الحيوية الهوائية (AGB) ومعامل الانتقال (TF)، مما يُشير إلى أن النباتات الأكثر نمواً تُطوّر آليات أكثر كفاءة لنقل المعادن نحو المجموع الخضري(Huang et al., ٢٠٢٢) كما تُشكّل مساحة الورقة مؤشراً فسيولوجياً مزدوج الدلالة؛ إذ تعكس من جهة القدرة التمثيلية الضوئية وإنتاج المادة الجافة، ومن جهة أخرى السحب التبخيري– النتحي الذي يدفع تدفق المحلول الوعائي الحامل لأيونات المعادن الثقيلة صعوداً من الجذور نحو الأوراق. وعلى الرغم من توافر دراسات تقيّم كفاءة دوار الشمس في المعالجة النباتية عبر مؤشرات BAF وTF وكمية الامتصاص، فإن الدراسات التي تربط هذه المؤشرات ربطاً كمياً بصفات النمو الفسيولوجية المقيسة — كطول الساق ومساحة الورقة — تبقى محدودة في الأدبيات، وأكثر ندرةً في السياق السوري والإقليمي. وتأتي أهمية هذه الدراسة من كونها تُقدّم نماذج تنبؤية قابلة للتطبيق الميداني، تمكّن الباحثين والممارسين من تقدير كمية الامتصاص المتوقعة من صفات النمو البسيطة القياس قبل إجراء التحليل المخبري المكلف.

مبررات وأهمية البحث

على الصعيد البيئي، تمثّل الترب الزراعية في شمال غرب سوريا بيئةً ملوثة بالمعادن الثقيلة نتيجة تراكم النشاط الصناعي تاريخياً وتداعيات الصراعات المسلحة في السنوات الأخيرة، في ظل غياب شبه تام لبرامج المعالجة البيئية الممنهجة. ويُشكّل توصيف كفاءة الأصناف النباتية المتاحة في هذه الترب خطوةً لا غنى عنها لتصميم أي برنامج معالجة فعّال وذي جدوى اقتصادية. ومن الناحية المنهجية، تُقدّم هذه الدراسة نهجاً مغايراً للدراسات التقليدية التي تكتفي بقياس مؤشرات BAF وTF بوصفها قيماً مطلقة؛ إذ تسعى إلى ربطها بصفات النمو القابلة للقياس قبل الحصاد وبتكلفة زهيدة، مما يُتيح التنبؤ المبكر بالكفاءة المتوقعة قبل إجراء أي تحليل مخبري. أما تطبيقياً، تتيح نماذج الانحدار الخطي المُستخرجة تقدير الكمية المتوقع استخلاصها من المعادن الثقيلة بمجرد قياس مساحة الورقة أو طول الساق، دون الحاجة إلى تحليل أنسجة نباتية مكلف، مما يُخفّض تكلفة الرصد والتقييم البيئي الميداني بصورة ملموسة ويُيسّر تطبيقها على نطاق واسع.

ومن وجهة نظر أكاديمية، تُسدّ هذه الدراسة فجوةً بحثية في الأدبيات المتعلقة بالمعالجة النباتية في السياق السوري والإقليمي، إذ تربط بين نتائج ميدانية حقيقية ونماذج إحصائية تنبؤية في إطار متكامل يُغني قاعدة البيانات العلمية اللازمة لتطوير استراتيجيات المعالجة في الأراضي الجافة وشبه الجافة.

أهداف البحث

١.دراسة تأثير كل من الموقع والصنف النباتي في صفتَي طول الساق ومساحة الورقة لأصناف دوار الشمس المدروسة المزروعة في ترب ملوثة بالعناصر الثقيلة شمال غرب سوريا
٢.تحديد العلاقة الكمية بين كمية امتصاص المعادن الثقيلة (الكروم والكوبالت والنيكل) من جهة، وصفتَي طول الساق ومساحة الورقة من جهة أخرى، باستخدام معامل ارتباط بيرسون. (r)
٣.بناء نماذج انحدار خطي بسيط (Linear Regression) للأزواج الدالة إحصائياً، وتقييم قدرتها التفسيرية عبر معامل التحديد (R^2)، بهدف التنبؤ بكمية الامتصاص انطلاقاً من صفات النمو المقيسة.
٤.تحديد أي الصفتين (طول الساق أم مساحة الورقة) أقوى ارتباطاً بكفاءة امتصاص المعادن الثقيلة، لتوجيه برامج الانتخاب والتحسين الوراثي المستقبلية نحو الصفات الأكثر تأثيراً في كفاءة المعالجة النباتية.

الدراسة المرجعية

أولاً: تلوث التربة بالمعادن الثقيلة وأثره على صفات النمو النباتي

تتراكم المعادن الثقيلة في التربة عبر مصادر متعددة تشمل الصناعة والتعدين ومياه الصرف الصحي والأسمدة الكيميائية، وعند تجاوز تراكيزها العتبات الحرجة فإنها تُحدث تثبيطاً ملحوظاً في صفات النمو النباتي. فقد أظهرت دراسة أُجريت على ثلاثة أصناف من دوار الشمس في تربة ملوثة بالكروم أن أطوال الجذور والمجموع الخضري وأوزانها الرطبة والجافة انخفضت تدريجياً مع ارتفاع تراكيز الكروم في التربة. وبالمثل، أفادت دراسة أخرى بأن تطبيق ٢٠٠ mg/kg من الرصاص والكادميوم في التربة أدى إلى خفض الأوزان الرطبة للمجموع الخضري والجذور بنسبة تصل إلى ٧٦,٦٪ و٨٨,٥٪ على التوالي. هذا التثبيط في النمو له انعكاسات ذات بعدين على المعالجة النباتية: فمن ناحية يُقلل من الكتلة الحيوية المتاحة للامتصاص، أما ناحية أخرى قد يُشير إلى أن النبات يعيد تخصيص موارده الفسيولوجية للتعامل مع الإجهاد المعدني. (Farid et al. ٢٠١٨)
ثانياً: دوار الشمس في المعالجة النباتية يحتل دوار الشمس مكانةً بارزة في أبحاث المعالجة النباتية: فقد أظهرت دراسات مقارنة عدة أن مجموعه الخضري وجذوره سجّلا أعلى كميات امتصاص للكوبالت والكروم مقارنةً بالأنواع النباتية الأخرى المختبرة في الترب الملوثة ذاتها وفي دراسة حديثة أُجريت في ظروف البحر المتوسط وشبه الجافة، أكدت النتائج أن تراكيز النيكل في أنسجة دوار الشمس ارتفعت مع ارتفاع التركيز في التربة، مع تركّز أعلى في الجذور يليه السيقان والأوراق، وهو نمط يتوافق مع سلوك الاستبعاد المشابه لما رصده البحث الحالي. (Stoikou et al. ٢٠١٧) كما استُخدم دوار الشمس في تجارب التخليص المائي (Hydroponic Phytoremediation) لخمسة عناصر في آنٍ واحد. وأبدى قدرة على امتصاص الكادميوم والكروم والنيكل والزرنيخ والحديد بصورة متزامنة، مما يُظهر مرونته كمنظومة معالجة متعددة العناصر.

ثالثاً: الكتلة الحيوية كمؤشر لكفاءة الاستخلاص النباتي

يُجمع الباحثون على أن الكتلة الحيوية المرتفعة شرط أساسي لنجاح الاستخلاص النباتي. فقد أنتج (Nehnevajova et al. ٢٠٠٧) طفرات عملاقة من دوار الشمس أظهرت قدرة استخلاص للكادميوم والزنك والرصاص تفوق الشاهد بمقدار ٧,٥ و٩,٢ و٨,٢ مرة على التوالي مما يُثبت أن تضخيم الكتلة الحيوية يترجم مباشرةً إلى تضخيم الكمية الكلية للمعدن المُستخلَص. وقد استخدم باحثون نموذجاً رياضياً لتقدير تراكم المعادن الثقيلة في دوار الشمس

بوصفه دالةً للكتلة الحيوية عبر الزمن (Zhao et al., ٢٠٢٣)، مُقدِّمين بذلك شاهداً كمياً على الترابط بين نمو النبات وكمية الاستخلاص.ومن المنظور الفسيولوجي، كشفت الدراسات الحديثة أن الارتباط الموجب الدال بين الكتلة الحيوية الهوائية ومعامل الانتقال TF يعكس حقيقة أن النباتات الأكثر نمواً تمتلك طاقة أعلى لنقل المعادن من الجذور نحو المجموع الخضري عبر نظام الـ xylem Page & Feller (٢٠١٥) وهذا يعني أن اختيار صنف نباتي بكتلة حيوية أعلى يُحقق زيادة المساحة الامتصاصية الجذرية، وتعزيز كفاءة النقل الوعائي نحو الأجزاء القابلة للحصاد.

رابعاً: مساحة الورقة وعلاقتها بالنقل الوعائي للمعادن

تُمثل مساحة الورقة مؤشراً فسيولوجياً مركّباً يعكس حجم السطح الضوئي والسحب التبخيري–النتحي. ففي ظروف التربة الملوثة، يمتص النبات الماء من التربة عبر الجذور ويسحبه نحو الأوراق بفعل النتح، وهذا التدفق يحمل معه في محلول الـ xylem أيوناتٍ معدنية مذابة. وبذلك تصبح مساحة الورقة الأكبر مقترنةً بتدفق وعائي أعلى، مما يُفسّر قوة الارتباط بين هذه الصفة وكميات الامتصاص المسجّلة في البحث الحالي. وقد أشار (Deng et al., ٢٠٢١) إلى أن عنصر النيكل تحديداً يُظهر حركية مرتفعة داخل نظام الـ phloem و xylem، مما يجعله أكثر استجابةً للتدفق الوعائي المرتبط بمساحة الورقة مقارنةً بالكروم الأكثر احتجازاً في الجذور.

خامساً: الفجوة البحثية التي تُعالجها هذه الدراسة

على الرغم من غزارة الدراسات التي تُقيّم كفاءة دوار الشمس في المعالجة النباتية عبر مؤشرات BAF و TF، تظل الدراسات التي تربط ربطاً كمياً بين صفات النمو الفسيولوجية السهلة القياس — كطول الساق ومساحة الورقة — وكمية الامتصاص الفعلية للمعادن الثقيلة محدودةً في الأدبيات. وتتميز دراستنا الحالية بالعمل على ترب مُلوَّثة طبيعياً من مناطق شمال غرب سوريا، بثلاثة أصناف وطنية وأجنبية في ظروف بيئية فعلية، مما يجعل من نتائجها ذات قيمةٍ تطبيقية مباشرة لبرامج الانتخاب النباتي وتقييم الكفاءة الميدانية لمشاريع المعالجة النباتية في المنطقة.

المواد والطرائق

أولاً: المواد

١ .المادة النباتية:

اعتُمدت في هذه الدراسة ثلاثة أصناف من نبات دوار الشمس (Helianthus annuus L.) تتباين في أصولها الجينية:

صنف محلي (بلدي) خلطي التلقيح متكيف مع الظروف البيئية السائدة في المنطقة.

صنف أمريكي هجين، حُصل عليه من الإدارة العامة للبحوث العلمية الزراعية.

صنف إسباني، حُصل عليه من المصدر ذاته.

٢ .الأجهزة المستخدمة:

قِيست تراكيز المعادن الثقيلة في عينات التربة والأنسجة النباتية باستخدام جهاز مطيافية الانبعاث البصري البلازمي المقترن بالحث (ICP–OES)، موديل ICAP ٦٥٠٠ Duo من إنتاج شركة Thermo Scientific. وهُضمت العينات بجهاز هضم كلداهل موديل ١٢D–KDN. وشملت معدات التجربة أصصاً بارتفاع ٣٠ cm وقطر ٣٥cm، وموازين حساسة بدقة ٠,٠٠٠١ g لوزن الأجزاء الجافة و٠,٠١ g للأجزاء الطازجة، فضلاً عن مجففة هوائية ومطحنة للطحن الجاف.

ثانياً: طرائق البحث:

١ .وصف مواقع جمع العينات:

جُمعت عينات التربة المستخدمة في التجربة من ثلاثة مواقع في شمال غرب سوريا هي حارم وسرمدا ودارة عزة، وقد اعتُمد في الاختيار على توافر بيانات تلوث سابقة تُشير إلى تراكم ملحوظ للمعادن الثقيلة في هذه المناطق (Alhasan et al., ٢٠٢٣). ويُبين الجدول (١) الخصائص الفيزيائية والكيميائية للترب المدروسة قبل الزراعة، ويتضح منه تباينا في تراكيز المعادن الثقيلة بين المواقع رغم تقارب قيم pH التي تراوحت بين ٧,٧٧ و٧,٨٨، وهو مدى متعادل إلى قلوي خفيف.

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
Total Ni	$mg.kg^{-1}$	152.5	183.61	183.61

٢ .جمع عينات التربة وتحضيرها:

جُمعت التربة من عمق (٠–٥) cm عبر مسارات قطرية بطول ٥٠٠m انطلاقاً من نقطة مرجعية محددة في كل موقع، مع أخذ عينات فرعية من جانبي كل مسار على فواصل منتظمة لضمان التمثيل المكاني الكافي. دُمجت العينات الفرعية وجُففت في الهواء، ثم نُخلت عبر منخل ٢mm قبل الاستخدام. قِيست الخصائص الفيزيوكيميائية للتربة بما فيها pH والناقلية الكهربائية (EC) والمادة العضوية والتراكيز الكلية للمعادن الثقيلة قبل بدء التجربة.

٣ .تنفيذ التجربة الزراعية:

نُفِّذت التجربة في الحقل المفتوح في محطة بحوث كفريحمول التابعة لإدارة البحوث الزراعية في إدلب. زُرعت البذور في الأصص المملوءة بالتربة الملوثة بتاريخ ٢٠٢٣/٧/١٤، واعتُمد تصميم القطاعات الكاملة العشوائية (RCBD) بثلاثة مكررات لكل معاملة، ليبلغ المجموع الكلي للوحدات التجريبية ٢٧ وحدة. وُزِّعت الأصص عشوائياً بمسافات لا تقل عن ٣٥ cm بين كل نبات واعتُمدت نسبة ٧٠٪ من السعة الحقلية ريّاً محددة بالوزن مرتين أسبوعياً على مدار ٤٥ يوماً هي مدة التجربة.

٤ .قياس الصفات الفيزيولوجية:

عند الحصاد قِيس طول الساق بالسنتيمتر من قاعدة الساق حتى الزهرة، وقُدِّرت مساحة الورقة بالطريقة الوزنية النسبية (Gravimetric method) عبر رسم الورقة على ورقة مصنفرة موحدة الوزن واستنتاج مساحتها من نسبة الوزن. كما قِيس الوزن الرطب والجاف لكل جزء من أجزاء النبات (الجذر والساق والأوراق والأزهار) منفصلاً، وذلك بعد تجفيف العينات على درجة ٧٠°C لمدة ثلاث ساعات.

٥ .تحضير عينات النبات وتحليلها:

قُسِّمت النباتات بعد جمعها إلى أجزائها الأربعة (الجذر،

الساق، الأوراق، الأزهار)، وغُسلت بالماء منزوع الشوارد وجُففت وطُحنت. هُضمت العينات النباتية بطريقة الهضم حجماً/حجماً (HCl:HNO_3 = 3:1) الرطب بالماء الملكي على مرحلتين: هضم بارد لمدة 16 ساعة عند درجة الغرفة، يعقبه هضم ساخن عند 130°C لمدة ساعتين. من المزيج الحمضي، 10 ml من كل عينة بـ 1 g عولجت ، ثم(G4) ورُشِّحت المحاليل الناتجة بأقماع زجاجية مسامية دون تمديد إضافي لتعزيز ICP-OES حُلِّلت مباشرةً بجهاز ISO 15587 (ISO, 2002).حدود الكشف، وفقاً للمعيار أُرسلت العينات للتحليل في جامعة شولالونغكورن في بانكوك، تايلاند.

كما تم حساب كمية امتصاص المعدن (Metal uptake) اعتمادًا على تراكيز العناصر في النبات والكتلة الحيوية الجافة للنبات (Alaboudi et al., ٢٠١٨)، وباستخدام المعادلة التالية (Chaney et al., ١٩٩٧).

امتصاص المعدن بواسطة النبات: Metal Uptake
× Biomass Metal Uptake = C plant
(mg/kg) تركيز العنصر في النبات = C plant
Biomass = الكتلة الحيوية الجافة للنبات.

٦. *التحليل الإحصائي:*

حُلِّلت البيانات باستخدام برنامج GenStat–١٢ الإحصائي وفق تصميم القطاعات الكاملة العشوائية (RCBD)، وأُجري تحليل التباين الثنائي (Two–Way ANOVA) مع الموقع والصنف عاملَين مستقلَّين، وفُرِّق بين المتوسطات باستخدام اختبار الفروق المعنوية الأقل (LSD) عند مستوى ٠,٠١ كما حُسبت معاملات ارتباط بيرسون (r) ومعادلات الانحدار الخطي البسيط ومعاملات التحديد (R^2) لتحديد العلاقة الكمية بين صفات النمو الفيزيولوجية (طول الساق ومساحة الورقة) وكميات امتصاص المعادن الثقيلة.

النتائج

أولاً: صفتا طول الساق ومساحة الورقة:

الجدول (2): صفة طول الساق تبعاً للأصناف والمواقع.

المواقع / الأصناف	دارة عزة	حارم	سرمدا
الأمريكي	35.7333[a]	42.2333[a]	39.7333[a]
الإسباني	41.1333[a]	46.7667[a]	32.6333[a]
المحلي	—	46.4000[a]	42.7000[a]
Grand mean = 40.917	$L s d_{0.01}$ = 22.1335		C.V % = 22.7

الجدول (3): صفة مساحة الورقة تبعاً للأصناف والمواقع.

المواقع / الأصناف	دارة عزة	حارم	سرمدا
الأمريكي	795.0000[a]	1412.6667[a]	1212.6667[a]
الإسباني	684.0000[a]	1103.0000[a]	287.3333[a]
المحلي	—	1799.3333[a]	789.0000[a]
Grand mean = 1010.4	$L s d_{0.01}$ = 1073.2330		C.V % = 44.5

ثانياً: كمية امتصاص المعدن من قبل النبات: (MU)

الجدول (4): كمية الامتصاص لعنصر الكروم تبعاً للأصناف والمواقع.

المواقع / الأصناف	دارة عزة	حارم	سرمدا
الأمريكي	18.68	40.55	16.76
الإسباني	27.38	65.19	7.18
المحلي	—	73.99	20.80

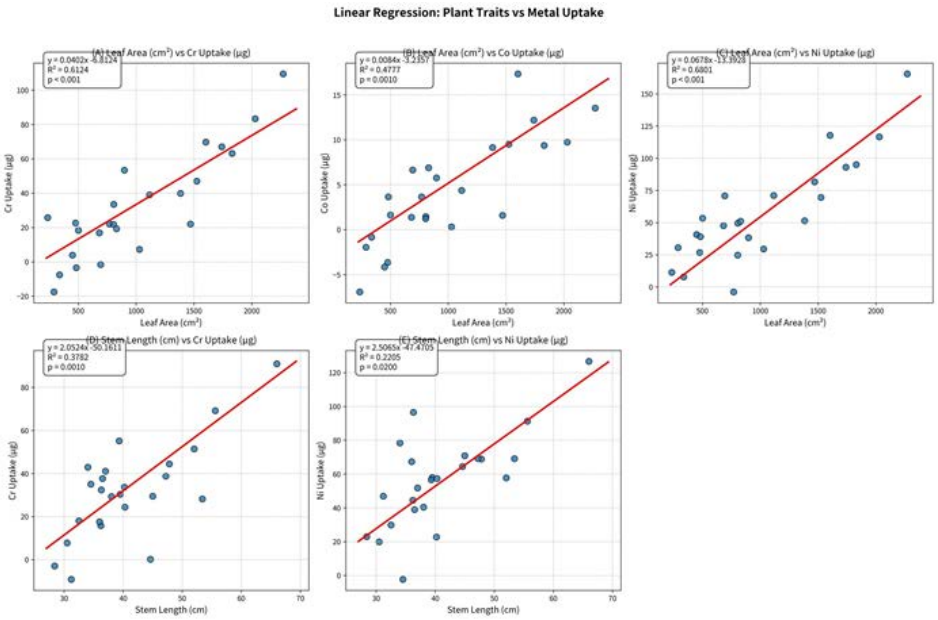
الجدول (5): كمية الامتصاص لعنصر الكوبالت تبعاً للأصناف والمواقع.			
المواقع / الأصناف	دارة عزة	حارم	سرمدا
الأمريكي	2.9995	1.883	2.647
الإسباني	2.13	6.91	1.69
المحلي	—	19.73	1.629

الجدول (6): كمية الامتصاص لعنصر النيكل تبعاً للأصناف والمواقع.			
المواقع / الأصناف	دارة عزة	حارم	سرمدا
الأمريكي	12.21	74.34	59.27
الإسباني	37.36	77.00	11.45
المحلي	—	145.77	23.29

ثالثاً: معامل ارتباط بيرسون والانحدار الخطي البسيط ومعامل التحديد

الجدول (7): معامل ارتباط بيرسون:(r)			
المتغير	الكروم	الكوبالت	النيكل
طول الساق	r= **0.615	r= 0.283 (NS)	r= *0.470
مساحة الورقة	r= ***0.783	r= ***0.691	r= ***0.825

الجدول (8): نماذج الانحدار الخطي				
المتغير	العنصر	معادلة الانحدار	R^2	P
مساحة الورقة	Cr	Cr_{uptake} (µg) = 0.0402 × LA (cm^2) – 6.812	0.612	0.001>
مساحة الورقة	Co	Co_{uptake} (µg) = 0.0084 × LA (cm^2) – 3.236	0.478	0.001>
مساحة الورقة	Ni	Ni_{uptake} (µg) = 0.0678 × LA (cm^2) – 13.393	0.680	0.001>
طول الساق	Cr	Cr_{uptake} (µg) = 2.052 × H (cm) – 50.161	0.378	0.01>
طول الساق	Ni	Ni_{uptake} (µg) = 2.507 × H (cm) – 47.471	0.221	0.05>



الشكل (١): مخططات التشتت

CC BY

المناقشة

أولاً: صفتا طول الساق ومساحة الورقة:

١.طول الساق: يُبين الجدول (٢) متوسطات طول الساق لأصناف دوار الشمس الثلاثة في المواقع المدروسة. بلغ المتوسط العام ٤٠,٩٢ cm بمعامل اختلاف CV=٢٢,٧٪، وبلغت قيمة LSD٠,٠١=٢٢,١٣ cm. ويُلاحظ أن هذه القيمة الكبيرة نسبياً لـ LSD تُشير إلى عدم وجود فروق معنوية دالة إحصائياً بين معظم المعاملات المدروسة في هذه الصفة، إذ تراوحت الأطوال بين ٣٢,٦٣ cm (الإسباني/سرمدا) و٤٦,٧٧ cm (الإسباني/حارم) دون أن يتجاوز الفرق بينهما حد الدلالة الإحصائية في أغلب المقارنات. ويُعزى هذا التباين المحدود إلى التجانس النسبي في ظروف الزراعة بين المواقع من حيث موعد الزراعة والري والمدة الزراعية الثابتة (٤٥ يوماً).

٢.مساحة الورقة: أما مساحة الورقة، الجدول (٣)، فقد سجّلت تبايناً واسعاً بين المعاملات إذ تراوحت بين ٢٨٧,٣٣ cm² (الإسباني/سرمدا) و١٧٩٩,٣٣ cm² (المحلي/حارم)، بمتوسط عام ١٠١٠,٤ cm² ومعامل اختلاف CV=٤٤,٥٪، وبلغت LSD٠,٠١=١٠٧٣,٢٣ cm². وبالنظر إلى قيمة LSD المرتفعة مقارنةً بالفروق المطلقة بين المعاملات، تبيّن أن الفروق لم تبلغ مستوى الدلالة الإحصائية في أغلب المقارنات، وإن أشارت القيم المطلقة إلى نمط واضح يتمثل في تفوّق موقع حارم في جميع الأصناف لا سيما الصنف المحلي. ويُعزى ارتفاع CV٪ في هذه الصفة إلى التباين الكبير في الوزن الجاف بين المكررات داخل المعاملة الواحدة، وهو نمط متوقع في تجارب التربة الملوثة حيث يختلف استجابة الأفراد النباتية للإجهاد المعدني (Farid et al., ٢٠١٨)

ثانياً: كمية امتصاص المعدن من قبل النبات: (MU)

١.عنصر الكروم: تراوحت كمية الامتصاص لعنصر الكروم بين (٧,١٨–٧٣,٩٩ µg/plant)، يُلاحظ أن جميع الأصناف في موقع حارم حققت أكبر كميات امتصاص وعلى وجه الخصوص الصنف المحلي الذي بلغت كميته ٧٣,٩٩ µg،أما في موقع سرمدا فقد تفوّق الصنف المحلي بكمية امتصاص بلغت ٢٠,٨٠ µg، في حين سجّل الصنف الإسباني في دارة عزة أكبر كمية في موقعه إذ بلغت ٢٧,٣٨ µg، بينما لم ينبت الصنف المحلي في هذا الموقع.

٢.عنصر الكوبالت: تراوحت كمية الامتصاص لعنصر الكوبالت بين (١,٦٢٩–١٩,٧٣ µg/plant)، الجدول (٥) تفوّق الصنف المحلي في موقع حارم تفوقاً لافتاً إذ بلغت كميته ١٩,٧٣ µg، يليه الصنف الإسباني في الموقع ذاته بـ ٦,٩١ µg أما الصنف الأمريكي في حارم فقد سجّل كمية امتصاص أقل ١,٨٨٣ µg مقارنةً بالصنف الأمريكي في دارة عزة ٢,٩٩٩٥ µg، بينما لم ينبت الصنف المحلي في موقع دارة عزة.

٣.عنصر النيكل: تراوحت كمية الامتصاص لعنصر النيكل بين (١١,٤٥–١٤٥,٧٧ µg/plant)، الجدول (٦) سجّل الصنف المحلي في موقع حارم أعلى قيمة في التجربة كلها إذ بلغت ١٤٥,٧٧ µg، مما يجعله الصنف الأكثر امتصاصاً للنيكل. وفي موقع سرمدا تفوّق الصنف الأمريكي بكمية ٥٩,٢٧ µg، في حين حقق الصنف الإسباني في دارة عزة أكبر كمية في موقعه بـ ٣٧,٣٦ µg بينما لم ينبت الصنف المحلي في موقع دارة عزة.

ثالثاً: معامل ارتباط بيرسون والانحدار الخطي البسيط ومعامل التحديد:

يوضح الجدول (٧) أن مساحة الورقة ارتبطت ارتباطاً موجباً ومعنوياً مع امتصاص العناصر الثلاثة، بينما كان ارتباط طول الساق معنوياً للكروم والنيكل فقط. كما يبين الجدول (٨) أن نماذج الانحدار المعتمدة على مساحة الورقة حققت أعلى قيم R^2 لدراسة طبيعة العلاقة بين صفات النمو الفيزيولوجية وكمية امتصاص المعادن الثقيلة، حُسب معامل ارتباط بيرسون (r) لصفتَي طول الساق ومساحة الورقة مع كميات امتصاص الكروم والكوبالت والنيكل عند مستوى دلالة ٠,٠١ أظهرت مساحة الورقة ارتباطات طردية دالة إحصائياً مع كميات امتصاص العناصر الثلاثة جميعها، إذ بلغت معاملات الارتباط (r=٠,٧٨٣*** ,p<٠,٠٠١) للكروم، و(r=٠,٦٩١*** ,p<٠,٠٠١) للكوبالت، و(r=٠,٨٢٥*** ,p<٠,٠٠١) للنيكل. ويعكس هذا الارتباط القوي العلاقةَ الفسيولوجية بين حجم السطح الهوائي الضوئي وكفاءة النقل الوعائي للعناصر؛ إذ تستلزم الورقة الأوسع تدفقاً مائياً أعلى عبر نظام الـ xylem يحمل معه كميات أكبر من أيونات المعادن الثقيلة من الجذور نحو الأجزاء الهوائية. أما طول الساق فقد أظهر ارتباطاً دالاً مع كمية امتصاص الكروم (r=٠,٦١٥** ,p<٠,٠١) والنيكل (r=٠,٤٧٠* ,p<٠,٠٥)، في حين لم يبلغ ارتباطه مع الكوبالت مستوى الدلالة الإحصائية (r=٠,٢٨٣ ,p=٠,١٨١)، وهو ما يُشير إلى أن طول الساق يرتبط بالامتصاص ارتباطاً غير مباشر، كونه يعكس حجم النبات الكلي لا آلية محددة لنقل عنصر بعينه. وقد جاءت جميع معاملات الارتباط الدالة موجبة الاتجاه، مما يؤكد أن تطور النمو الخضري لنبات دوار الشمس يُفضي إلى زيادة متوازية في كميات امتصاص المعادن الثقيلة، بمعزل عن تركيزها الكلي في التربة.

ثالثاً: الانحدار الخطي البسيط ومعامل التحديد (R^2)

بنيت نماذج تنبؤية للأزواج ذات الدلالة الإحصائية، وقد أعطت مساحة الورقة أفضل نماذج الانحدار للعناصر الثلاثة:

$$Cr_{uptake}\ (\mu g) = 0.0402 \times LA\ (cm^2) - 6.812$$
$$(R^2=0.612,\ p<0.001)$$

$$Co_{uptake}\ (\mu g) = 0.0084 \times LA\ (cm^2) - 3.236$$
$$(R^2=0.478,\ p<0.001)$$

$$Ni_{uptake}\ (\mu g) = 0.0678 \times LA\ (cm^2) - 13.393$$
$$(R^2=0.680,\ p<0.001)$$

تُشير معاملات التحديد إلى أن مساحة الورقة وحدها تُفسّر ٦١,٢٪ من تباين كمية امتصاص الكروم، و٤٧,٨٪ للكوبالت، و٦٨,٠٪ للنيكل. ويتصدر النيكل في هذه النماذج كونه الأكثر حركية داخل أنسجة النبات (Deng et al., ٢٠٢١)، مما يجعل حجم المجموع الخضري مؤشراً تفسيرياً أقوى لامتصاصه مقارنةً بالكروم الأكثر احتجازاً في الجذور. كما أعطى طول الساق نموذجاً دالاً للكروم والنيكل:

$$Cr_{uptake}\ (\mu g) = 2.052 \times H\ (cm) - 50.161\ (R^2=0.378,\ p<0.01)$$

$$Ni_{uptake}\ (\mu g) = 2.507 \times H\ (cm) - 47.471\ (R^2=0.221,\ p<0.05)$$

غير أن قيم R^2 لنماذج الطول أدنى بشكل ملحوظ من نظيراتها لمساحة الورقة، مما يُرجّح أن مساحة الورقة تُمثل المؤشر النباتي الأكثر ارتباطاً بكفاءة امتصاص المعادن الثقيلة في ظروف هذه الدراسة. وتُشير هذه النتائج مجتمعةً إلى أن صفات النمو الخضري — ولا سيما مساحة الورقة — نستطيع اعتبارها أداة تقدير أولية لكفاءة المعالجة النباتية، مما يفتح الباب أمام اختيار الأصناف النباتية بناءً على معاملات نموها قبل الزراعة في الترب الملوثة.

رابعاً: مخططات التشتت:

يظهر الشكل (١) تحليل الانحدار الخطي بين صفات النمو النباتية وكمية امتصاص المعادن الثقيلة (الكروم، الكوبالت، والنيكل) في أصناف دوار الشمس المزروعة في مواقع مختلفة.
١.العلاقة بين مساحة الورقة وامتصاص المعادن (A–C)
٢. العلاقة بين طول الساق وامتصاص المعادن. (D–E)
٣.كل نقطة تمثل مكرر فردي (n=٢٤) والخط الأحمر يمثل خط الانحدار الخطي.
٤. معادلات الانحدار، ومعامل التحديد (R^2)،

وقيم الدلالة الإحصائية موضحة داخل كل لوحة.

الاستنتاجات

١.أظهرت مساحة الورقة ارتباطاً طردياً دالاً إحصائياً مع كميات امتصاص العناصر الثقيلة الثلاثة جميعها (الكروم والكوبالت والنيكل)، مما يُقوي موقعها بوصفها أكثر صفة نباتية مرتبطة بكفاءة امتصاص المعادن الثقيلة في ظروف هذه الدراسة.

٢.فسّرت نماذج الانحدار المبنية على مساحة الورقة ما بين ٤٧,٨٪ و٦٨,٠٪ من تباين كميات الامتصاص (R^2=٠,٤٧٨– ٠,٦٨٠)، وهي نسب تفسير مرتفعة تُثبت إمكانية التنبؤ بكمية الامتصاص من صفة نباتية واحدة سهلة القياس.

٣.ارتبط طول الساق ارتباطاً دالاً مع امتصاص الكروم (r=٠,٦١٥ ,p<٠,٠١) والنيكل (r=٠,٤٧٠ ,p<٠,٠٥) فقط، دون دلالة معنوية مع الكوبالت، مما يُشير إلى أن هذه الصفة تعكس حجم النبات الكلي دون ارتباطها بآلية نقل عنصر بعينه.

٤.تصدّر النيكل نماذج الانحدار من حيث قوة العلاقة مع مساحة الورقة (R^2=٠,٦٨٠)، وهو ما يتوافق مع طبيعته الكيميائية الأكثر حركية داخل الأنسجة الوعائية مقارنةً بالكروم.

٥.تفوّق موقع حارم في كميات الامتصاص لجميع العناصر الثلاثة رغم امتلاكه أدنى التراكيز الكلية، مما يُؤكد أن الإتاحة الحيوية للعناصر في التربة – لا تركيزها الكلي – هي المحدد الفعلي لكمية الامتصاص.

٦.أعطى الصنف المحلي في موقع حارم أعلى كميات امتصاص للعناصر الثلاثة، ولا سيما للنيكل (١٤٥,٧٧ µg/ plant) والكروم (٧٣,٩٩ µg/plant)، مما يُشير إلى ملاءمته النسبية كصنف واعد في برامج المعالجة النباتية لترب المنطقة.

٧.تُثبت نتائج هذه الدراسة مجتمعةً أن صفات النمو الفيزيولوجية – وخاصة مساحة الورقة – يمكن اعتبارها مقياس مساعداً (Proxy indicators) للتنبؤ المبكر بكفاءة المعالجة النباتية، مما يفتح آفاقاً واسعة أمام برامج انتخاب الأصناف النباتية وتقييم كفاءتها بأساليب ميدانية بسيطة وغير مكلفة.

التوصيات:

١.اعتماد مساحة الورقة معياراً انتخابياً مبكراً في برامج تحسين أصناف دوار الشمس الموجهة للمعالجة النباتية، نظراً لقوة ارتباطها بكميات امتصاص المعادن الثقيلة الثلاثة المدروسة.

٢.إيلاء الصنف المحلي (البلدي) اهتماماً بحثياً خاصاً في الدراسات اللاحقة، كونه أظهر كميات امتصاص مرتفعة في أكثر من موقع، مع توصيف جيني ووراثي أعمق لفهم أسس هذا التفوق.

٣.إجراء دراسات مماثلة لأصناف أخرى من دوار الشمس والنباتات ذات الكتلة الحيوية المرتفعة، مع قياس صفات نمو إضافية كمساحة الجذر والوزن الجاف، في ترب مختلفة في درجة التلوث لبناء نماذج تنبؤية أكثر شمولاً وقدرةً تفسيرية.

٤.استخدام نماذج الانحدار الخطي المُستخرجة في هذه الدراسة كأداة تقييم ميدانية أولية في مشاريع المعالجة النباتية بشمال غرب سوريا، مع التحقق من صلاحيتها في مواقع وترب مختلفة قبل تعميمها.

٥.دراسة تأثير عوامل التحسين الكيميائي للتربة كـ (EDTAوحمض الستريك (على العلاقة بين مساحة الورقة وكمية الامتصاص، للتحقق من إمكانية تعزيز هذه العلاقة عبر رفع الإتاحة الحيوية للعناصر.

٦.تنفيذ تجارب متعددة المواسم لدراسة تطور العلاقة بين صفات النمو وكمية الامتصاص عبر الزمن، مما يُتيح تقدير الحاجة إلى عدد المواسم الزراعية اللازمة لتحقيق إزالة بيئية فعّالة.

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]1. 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

[4] Deng, T. H. B., van der Ent, A., Tang, Y. T., Sterckeman, T., Echevarria, G., Morel, J. L., & Qiu, R. L. (2021). Quantification of nickel and cobalt mobility and accumulation via the phloem in the hyperaccumulator Noccaea caerulescens.Metallomics,13(4),mfab012. https://doi.org/10.1093/mtomcs/mfab012

[5] Bhatti, M. S. H. (2018). Morphological, physiological and biochemical responses of different plant species to Cd stress. International Journal of Environmental Research and Public Health, 13(6), 1320. https://doi.org/10.3390/ijerph13060596

[6] Huang, Y., Zhao, L., Chen, X., Xu, X., & Li, T. (2022). Systematic evaluation of plant metals/metalloids accumulation efficiency: A global synthesis of bioaccumulation and translocation factors. Frontiers in Plant Science, 13, 906463. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.906463

[7]ISO.(2002).Water quality — Dissolution for the determination of selected elements in water (ISO Standard No. 15587-1). International Organization for Standardization.

[8] Nehnevajova, E., Herzig, R., Federer, G., Erismann, K. H., & Schwitzguébel, J. P. (2007). Chemical mutagenesis — a promising technique to increase metal concentration and extraction in sunflowers. International Journal of Phytoremediation, 9(2), 149–165. https://doi.org/10.1080/15226510701232880

[9] Page, V., & Feller, U. (2015). Heavy Metals in Crop Plants: Transport and Redistribution Processes on the Whole Plant Level. Agronomy, 5(3), 447–463. https://doi.org/10.3390/agronomy5030447

[10]Stoikou, V., Andrianos, V., Stasinos, S., Kostakis, M. G., Attiti, S., Thomaidis, N. S., & Zabetakis, I. (2017). Metal uptake by sunflower (Helianthus annuus) irrigated with water polluted with chromium and nickel. Foods, 6(7), 51. https://doi.org/10.3390/foods6070051

[11] Zhao, H., Xia, B., Fan, C., Zhao, P., & Shen, S. (2023). Modelling heavy-metal phytoextraction capacities of Helianthus annuus L. and Brassica napus L. Chemosphere, 338, 139500. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139500

[12]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, 402647.https://doi.org/10.5402/2011/402647

مساهمات المؤلفين:أ.د. عبد الحميد الخالد

تضارب المصالح:يعلن المؤلفون أنه ليس لديهم أي مصالح متضاربة.

توافر البيانات والمواد:جميع البيانات متوفرة في النص الرئيس عدا الأشكال والمراجع.