Basrah Journal of Date Palm Research
Volume 24 Issue (2) 2025
BJDPR
ISSN: 1816-0379 online ISSN:3005-3722
مجلــة البصـرة لأبحاث نخلــة التمــر
المجلد 24 العدد (2) 2025

دور السيلينيوم النانوي في تخفيف الاثار الضارة للرصاص على نخيل التمر *Phoenix dactylifera* L.

علي شاكر مهدي* **فراس مهدي الحمود**

مركز ابحاث النخيل-جامعة البصرة-العراق

*الباحث المراسل: ali.mahdi@uobasrah.edu.iq

الخلاصة

هدفت هذه الدراسة إلى تقييم دور السيلينيوم النانوي (Se NPs) في تخفيف الاثار الضارة على نخيل التمر الناتجة عن التلوث بالرصاص. نفذت التجربة وفق تصميم القطاعات العشوائية الكاملة، إذ طبقت أربعة تراكيز من الرصاص (0، 50، 100 و150 ملغم.لتر$^{-1}$) وثلاثة تراكيز من السيلينيوم النانوي (0، 100 و200 ملغم.لتر$^{-1}$) رشا على الأوراق فسائل نخيل بذرية من نخيل التمر بعمر ثلاث سنوات ولمدة ستة أشهر. أظهرت النتائج أن زيادة تركيز الرصاص أدت إلى انخفاض معنوي في محتوى الكلوروفيل والبروتينات الكلية، يقابله ارتفاع معنوي في الأحماض الأمينية والمذابات المتوافقة ومؤشرات الإجهاد التأكسدي، بما في ذلك بيروكسيد الهيدروجين ومركب Malondialdehyde(MDA)، فيما انخفض مؤشر ثباتية الاغشية الخلوية Membrane stability index (MSI)، مع زيادة نشاط مضادات الأكسدة الإنزيمية وغير الإنزيمية. في المقابل، أسهم تطبيق السيلينيوم النانوي، ولا سيما عند تركيز 100 ملغم.لتر$^{-1}$، في التخفيف من هذه التأثيرات السلبية من خلال تعزيز آليات الدفاع المضادة للإجهاد التأكسدي، إذ زاد من نشاط إنزيمي الكاتاليز (CAT) والبيروكسيديز(POD) ، وعزز تراكم المذابات المتوافقة مثل البرولين والكلايسين بيتاين والكاروتين، و المحافظة على محتوى البروتينات الكلية والكلوروفيل. كما أظهرت النتائج أن التركيز المعتدل من السيلينيوم النانوي (100 ملغم.لتر$^{-1}$) كان الأكثر كفاءة، في حين تسبب التركيز الأعلى (200 ملغم.لتر$^{-1}$) في إحداث تأثيرات إجهاديه ضارة. تشير نتائج الدراسة إلى أن السيلينيوم النانوي يمثل استراتيجية واعدة لتعزيز مقاومة نخيل التمر لإجهاد المعادن الثقيلة، سيما الرصاص.

الكلمات المفتاحية : المعادن الثقيلة ، التلوث ، الإجهاد البيئي، CAT ، POD.

Introduction المقدمة

يعد نخيل التمر (*Phoenix dactylifera* L.) من أقدم وأهم المحاصيل الزراعية في الشرق الأوسط وشمال إفريقيا. وله قيمة اقتصادية وثقافية كبيرة، حيث توفر ثمار النخيل عناصر غذائية مهمة مثل السكريات والمعادن والألياف والفيتامينات (Rahman et al., 2022; Al-Karmadi and Okoh, 2024). يعد التلوث بالمعادن الثقيلة أحد أبرز التحديات البيئية التي تهدد صحة النباتات ونموها، خاصة في المناطق الصناعية والحضرية حيث تتراكم المعادن في التربة والمياه. ومن بين هذه المعادن، يُعتبر الرصاص (Pb) من العناصر الأكثر سمية للنباتات، إذ يمكن أن يؤثر على العمليات الحيوية الأساسية ويقلل من كفاءتها الفسيولوجية. يؤدي التعرض للرصاص عادة إلى ضعف النمو، تراجع الإنتاجية، واضطراب قدرة النبات على امتصاص الماء والعناصر الغذائية الضرورية، مما يحد من قدرته على التكيف والبقاء (Ur Rahman et al., 2024; Singh and Pandey, 2024). يعد السيلينيوم (Se) عنصرا أساسيا للنباتات بكميات منخفضة، حيث يعزز مقاومة النبات للإجهادات البيئية مثل الملوحة والجفاف والإجهاد التأكسدي، ويزيد من نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة مثل الكلوتاثيون بيروكسيديز (GSH-Px)، مما يقلل مستويات الجذور الحرة في الخلايا النباتية، كما يمكن للسيلينيوم تحسين امتصاص الماء والمواد الغذائية تحت ظروف بيئية قاسية (Liu et al., 2022). تقدم تقنية النانو حلولًا واعدة لمشكلات التلوث البيئي، حيث إن استخدام جسيمات النانو يسمح بزيادة فعالية المواد الكيميائية وتقليل الجرعات اللازمة لتحقيق التأثير المطلوب (Anwar et al., 2025). أظهرت الدراسات أن استخدام السيلينيوم بالحجم النانوي يمكن أن يزيد من تأثيره المضاد للأكسدة بالمقارنة مع الأشكال التقليدية، ما يعزز قدرة النبات على تخفيف أضرار الإجهاد التأكسدي الناتج عن التعرض للمعادن الثقيلة مثل الرصاص (Qin et al., 2025).

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير السيلينيوم النانوي في التخفيف من الإجهاد التأكسدي الناتج عن التلوث بالرصاص على نخيل التمر (*Phoenix dactylifera* L)، مع التركيز على استجابات النبات الفسلجية والكيموحيوية، وذلك لتقييم مدى فعالية السيلينيوم النانوي في تعزيز مقاومة النبات وتحسين نموه تحت ظروف التلوث بالمعادن الثقيلة.

المواد وطرائق العمل Materials and Methods

أجريت هذه الدراسة في البيت البلاستيكي التابع لمركز أبحاث النخيل – جامعة البصرة، على فسائل من نخيل التمر بعمر ثلاث سنوات وارتفاع بين 100–120 سم مزروعة في سنادين بلاستيكية سعة 10 كغم وتربة ذات مواصفات (الرقم الهيدروجيني= 7.54 و الملوحة =3.5 ديسيمنز.م$^{-1}$ والسعة التبادلية للأيونات الموجبة (CEC): 21.5 سنتيمول كغم$^{-1}$ ومحتوى المادة العضوية: 5.48% وكانت نسجة التربة طينية مزيجية وتوزيع جزيئات التربة: الرمل=8.14% والطبن=49.3% والغرين=42.56%). تضمنت التجربة عاملين العامل الأول هو إضافة الرصاص الى التربة عن طريق السقي بأربعة تراكيز هي(0 و 50 و 100 و150) ملغم.لتر$^{-1}$ وذلك باستخدام خلات الرصاص $Pb(CH_3COO)_2.3H_2O$ كمصدر للعنصر. العامل الثاني المتمثل بعنصر السيلينيوم النانوي بثلاث تراكيز (0 و100 و 200) ملغم.لتر$^{-1}$ رشا على الأوراق واستخدم الماء المقطر ليمثل التركيز صفر (المقارنة). استخدم السيلينيوم النانوي (Se) بنقاوة 99.9% ومتوسط حجم جسيمات أقل من 80 نانومتر، وتم توفيره على شكل مسحوق من إنتاج شركة Nanoshell الأميركية، لونه رمادي إلى أسود.

سقيت النباتات بالمحاليل الحاوية على الرصاص وحسب السعة الحقلية لمدة ستة أشهر، ثم بدأ رش محلول السيلينيوم النانوي على أوراق النخيل بعد مرور ثلاث أشهر من بداية تطبيق عنصر الرصاص، لضمان الإجهاد، وبواقع رشة واحدة كل شهر وحتى البلل الكامل مع استخدام مادة Tween 20 كمادة ناشرة ومخففة للشد السطحي مع محلول السيلينيوم . طبقت معاملات الرصاص من بداية شهر كانون الثاني والى نهاية شهر حزيران من عام 2024 بينما طبقت رشات السيلينيوم الثلاثة عند بدايات اشهر نيسان وآيار وحزيران. بعد ذلك جمعت عينات من الأوراق في بداية شهر تموز لتقدير الصفات التالية:

تقدير الصفات الكيموحيوية

تقدير الكلوروفيل: قدرت صبغة الكلوروفيل وفق طريقة Arnon (1949) ، بطحن 200 ملغم من الأوراق في 8 مل أسيتون 80%، ثم فصل الراشح بالطرد المركزي (3000 دورة. دقيقة$^{-1}$). قِيست الامتصاصية عند 663 و645 نانوميتر باستخدام الأسيتون كعينة ضابطة، وحسبت تراكيز الصبغات اعتمادًا على معادلات (Asare–boamah et al., 1986) ، وعبر عنها بوحدة ملغم غم$^{-1}$.

تقدير الأحماض الأمينية الحرة : قُدِّرت الأحماض الأمينية الحرة في أنسجة الأوراق وفق طريقة Lee & Takahashi, (1966) ، باستخلاص 0.5 غم من الأوراق المطحونة في إيثانول 70% لمدة 24 ساعة، ثم الطرد المركزي (12000 دورة.

دقيقة$^{-1}$، لمدة 15 دقيقة). خلط 0.1 مل من الراشح مع الغليسرول وكاشف النهيدرين، وسخن المزيج عند 100°م لمدة 20 دقيقة، ثم قِيست الامتصاصية عند 570 نانوميتر باستخدام المطياف الضوئي، مع استخدام الإيثانول كعينة ضابطة.

تقدير البروتين الكلي: استُخلصت البروتينات الذائبة الكلية من الأوراق وفق (Bavei et al., 2011)، بهرس 1 غم من الأنسجة في النتروجين السائل ومزجه في محلول Tris–HCl (0.1 مول، pH 7.5) الحاوي على PMSF، ثم الطرد المركزي (13000 دورة. دقيقة$^{-1}$، لمدة 10 دقائق، وعلى درجة حرارة 4°م). قدرت البروتينات في الراشح بطريقة (Bradford, 1976) بقياس الامتصاصية عند 595 نانوميتر، واعتمد منحنى الألبومين القياسي، مع استخدام الماء المقطر كعينة ضابطة.

تقدير المذابات المتوافقة

السكريات الكلية: قدرت السكريات الكلية بطريقة Plummer (1978)، بسحق 0.5 غم من الأوراق الطرية في إيثانول 80%، ثم فصل الراشح بالطرد المركزي بسرعة 5000 دورة.دقيقة$^{-1}$، لمدة 10 دقائق. خلط 1 مل من الراشح مع 3 مل من كاشف الأنثرون، وسخنت العينات عند 100°م لمدة 10 دقائق، ثم قِيست الامتصاصية عند 620 نانوميتر. حسبت الكربوهيدرات اعتمادًا على منحنى الكلوكوز القياسي، مع استخدام الماء المقطر كعينة ضابطة.

كلايسين بيتاين (GB) : قدر الكلايسين بيتاين في أوراق النخيل وفق طريقة Grieve and Grattan (1983) بطريقة Periodide، بعد تجفيف الأوراق عند 65°م وطحنها، واستخلاص 0.5 غم من المسحوق في 20 مل ماء مقطر لمدة 24 ساعة. خُففت المستخلصات بحامض الكبريتيك، وتفاعل 0.5 مل منها مع كاشف $KI–I_2$ تحت التبريد، ثم عُزل الراسب وأذيب في 1,2–dichloroethane، وقِيست الامتصاصية عند 365 نانوميتر. حسب التركيز اعتمادا على منحنى قياسي للكلايسين بيتاين

البرولين: قدر محتوى البرولين في الأنسجة الورقية وفق طريقة Bates, *et al.* (1973) ، باستخلاص 0.5 غم من الأنسجة في حامض السلفوساليسيليك 3%، ثم الطرد المركزي (6000 دورة.دقيقة$^{-1}$، لمدة 5 دقائق). ثم نقل 2 مل من الراشح واضيف اليه 2 مل من كل من حامض الخليك وكاشف النهيدرين ، وسخن عند 100°م لمدة ساعة، ثم استخلص بالتولوين، وقِيست الامتصاصية للطبقة الملونة عند 520 نانوميتر باستخدام التولوين كعينة ضابطة. حسب تركيز البرولين اعتمادًا على المنحنى القياسي وعبر عنه بوحدة ميكرومول غم$^{-1}$ وزن طري. وحسب المعادلة التالية :

$$\text{محتوى البرولين} = \left(\frac{5}{\text{وزن العينة (غم)}}\right) X \left(\frac{\text{مايكروغرام برولين } X \text{ حجم التولوين (مل)}}{115.5}\right)$$

اذ 115.5 هو الوزن الجزيئي للبرولين.

تقدير مؤشرات الاكسدة

تقدير مركب (MDA): قدر محتوى مركب MDA في الأنسجة وفق طريقة Heath and Packer (1968) ، باستخلاص 0.5 غم من الأنسجة في TCA 0.1%، ثم الطرد المركزي (10000 دورة.دقيقة$^{-1}$، لمدة 5 دقائق). خلط 1 مل من الراشح مع 4 مل من TBA 0.5%المحضّر في TCA 20%، وسخن عند 100°م لمدة 30 دقيقة، ثم برد وطرد مركزيا (10000 دورة.دقيقة$^{-1}$، لمدة 15 دقيقة). قِيست الامتصاصية عند 532 و600 نانوميتر باستخدام محلول TBA كعينة ضابطة، وحُسب محتوى MDA (نانومول غم$^{-1}$ وزن طري) وفق المعادلة:

$$\text{محتوى الانسجة } MDA = \frac{[\text{OD } 600 - \text{OD } 532]1000}{155}$$

حيث إن 155هو معامل الانطفاء (Extinction coefficient) لمادة.MDA

تقدير بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) : قدر محتوى بيروكسيد الهيدروجين في أنسجة الأوراق وفق طريقة Sergiev et al., (1997)، باستخلاص 0.5 غم من الأنسجة في TCA 0.1%، ثم الطرد المركزي (13000 دورة.دقيقة$^{-1}$، لمدة 15 دقيقة). خُلِط 1 مل من الراشح مع محلول فوسفات البوتاسيوم المنظم وKI، وقِيست الامتصاصية عند 390 نانوميتر باستخدام عينة ضابطة خالية من الراشح. حُسب تركيز بيروكسيد الهيدروجين اعتمادا على المنحنى القياسي.

ثبات الأغشية : حسب مؤشر ثبات الأغشية في الأوراق وفق Lutts et al., (1996) ، باستخلاص 0.25 غم من الأوراق المقطعة في 10 مل ماء مقطر لمدة 24 ساعة مع هزاز ميكانيكي. قيست الإيصالية الكهربائية قبل التسخين (C_1) وبعد تسخين المزيج عند 90°م لمدة ساعتين وتركه ليبرد عند 25°م .(C_2) حسب مؤشر ثبات الأغشية باستخدام المعادلة

$$\text{مؤشر ثبات الاغشية}(\%) = 100\ X \left(\frac{\text{القراءة الاولى}}{\text{القراءة الثانية}}\right)$$

تقدير مضادات الأكسدة

تقدير الكاروتين: قدر محتوى الكاروتين في الأوراق وفق (Ranganna , 1977)، وذلك بسحق 500 ملغم من العينة في ألاسيتون (80%) مع الترشيح المتكرر، ثم قيست الامتصاصية عند الأطوال الموجية 440 و645 و663 نانوميتر. حسب تركيز الكاروتين باستخدام المعادلة القياسية.

تقدير فعالية أنزيم الكتاليز(CAT) : استُخلص إنزيم الكتاليز من أوراق النخيل وفق Luhová *et al.* (2003) بسحق 5 غم من الأوراق في 10 مل محلول فوسفات البوتاسيوم 0.1) مول، (7.8 pH، ثم الطرد المركزي (1200 دورة. دقيقة$^{-1}$). قدرت الفعالية الإنزيمية حسب Góth, (1991) بحضن 0.2 مل من المستخلص مع 1 مل مزيج + (H_2O_2 (65 mM فوسفات البوتاسيوم (60 mM, pH 7.4) عند 25°م لمدة 4 دقائق، ثم أوقف التفاعل بإضافة 1 مل مولبيدات الأمونيوم 32.4) mM). قيست الامتصاصية عند 405 نانومتر.

تقدير فعالية إنزيم البيروكسيديز (POD): استخلص إنزيم البيروكسيديز من 0.5 غم من أوراق نخيل التمر في 8 مل محلول فوسفات البوتاسيوم (100 µM, pH 7) يحتوي على EDTA 0.1 mM، PMSF 1 mM، و3.75% PVP، ثم طرد مركزياً عند 4°م، واستخدم الراشح لتقدير الفعالية حسب Zouari et al., (2016) . قدرت الفعالية وفق Kim & Yoo, (1996) بمزج المستخلص مع مزيج Guaiacol 0.05 M، H_2O_2 0.02 M، و NaOAc0.1 M, pH 5.5 بنسبة 1:1:1:7، ثم قيست الامتصاصية عند 470 نانومتر بعد 3 دقائق. تعرف وحدة الإنزيم بأنها زيادة 0.1 في الامتصاصية، واستخدم المزيج دون مستخلص كعينة ضابطة.

التحليل الإحصائي

تم تحليل البيانات إحصائيا باستخدام تصميم القطاعات العشوائية الكاملة (RCBD) ، اذ عدت معاملات الرصاص والسيلينيوم النانوي عوامل الدراسة، في حين اعتبرت القطاعات مكررات للتجربة. أجري تحليل التباين (ANOVA) لاختبار معنوية تأثير المعاملات والتداخلات بينها عند مستوى احتمال 0.05، واختبرت معنوية الفروق بين المتوسطات باستخدام اختبار أقل فرق معنوي (LSD) للمقارنة بين المتوسطات عند مستوى الاحتمالية نفسه.

النتائج Results

الصفات الكيموحيوية

أظهرت نتائج تأثير التداخل بين الرصاص والسيلينيوم على الصفات الكيموحيوية لنخيل التمر الموضحة في جدول (1)، ان أعلى محتوى للأوراق من للكلوروفيل الكلي بلغ 6.51 ملغم.غم$^{-1}$ في معاملة Pb0_Se100 وبفارق معنوي عن جميع المعاملات الأخرى فيما بلغ اقل معدل له 3.24 ملغم.غم$^{-1}$ في Pb150_Se200 التي لم تختلف عن المعاملة Pb150_Se0 التي بلغت 3.41 ملغم.غم$^{-1}$ معززة التأثير السلبي للرصاص والسيلينيوم عند التركيز 200 ملغم.لتر$^{-1}$ فيما اسهم التركيز 100 ملغم.لتر$^{-1}$ من السيلينيوم في جميع المعاملات في الحفاظ على صبغة الكلوروفيل. أما الأحماض الأمينية الحرة، فقد سجلت المعاملة Pb150_Se200 أعلى محتوى بلغ 4.97 ملغم.غم$^{-1}$ متفوقة معنوياً على جميع المعاملات الأخرى بما فيها المقارنة التي سجلت ادنى معدل بلغ 2.03 ملغم.غم$^{-1}$ في المعاملة Pb0_Se100 ما يشير الى إن السيلينوم بالتركيز 100 ملغم.لتر$^{-1}$ كان له دور إيجابي في خفض محتوى الأحماض الأمينية الحرة في نخيل التمر فيما ساهم التركيز 200 ملغم.لتر$^{-1}$ الى جانب الرصاص في زيادة مستوى الإجهاد وبالتالي زيادة محتوى الأحماض الأمينية. كما أظهرت النتائج إن اعلى معدل للبروتينات الكلية تحقق في المعاملة Pb0_Se100 وقد بلغ 5.39 ملغم.غم$^{-1}$ متفوقة معنوياً على جميع المعاملات الأخرى. فيما أدت المعاملة Pb150_Se200 الى أقل معدل بروتين بلغ 2.01 ملغم.غم$^{-1}$، ما يشير إلى الدور المحفز للسيلينيوم بالتراكيز المعتدلة في تخفيف الإجهاد والضار عند التراكيز العالية.

جدول (1) تأثير التداخل بين الرصاص والسيلينيوم في بعض الصفات الكيموحيوية في نخيل التمر

المعاملات		الصفات الكيموحيوية		
Pb (ملغم.لتر$^{-1}$)	Se (ملغم.لتر$^{-1}$)	الكلوروفيل (ملغم.غم$^{-1}$)	الأحماض الأمينية الحرة (ملغم.غم$^{-1}$)	البروتين الكلي (ملغم.غم$^{-1}$)
0	0	5.75 b	2.30 def	4.37 bcd
0	100	6.51 a	2.03 g	5.39 a
0	200	5.55 bc	2.49 de	4.18 cd
50	0	5.40 bc	2.48 de	4.26 bcd
50	100	5.76 b	2.10 fg	4.32 bcd
50	200	5.34 c	2.55 d	4.07 cd
100	0	4.51 e	2.25 ef	4.55 bc
100	100	4.90 d	2.16 fg	4.76 b
100	200	4.13 f	3.2 c	3.20 e
150	0	3.41 g	4.45 b	2.22 f
150	100	4.23 ef	3.47 c	3.93 d
150	200	3.24 g	4.97 a	2.01 f
LSD 0.05		0.37	0.25	0.51

المذابات المتوافقة

أظهرت النتائج في الجدول (2) تأثير التداخل بين الرصاص والسيلينوم على محتوى نخيل التمر من المذابات المتوافقة، وقد بينت أن أعلى محتوى للسكريات الكلية 17.28 ملغم.غم$^{-1}$ سُجل عند المعاملة Pb150_Se100 ، متفوقة معنوياً على جميع المعاملات الأخرى ، فيما بلغ اقل متوسط من السكريات 7.21 ملغم.غم$^{-1}$ في Pb150_Se200 ما يعكس تسبب التركيز 200 ملغم.لتر$^{-1}$ من السيلينيوم بإجهاد تآزري مع إجهاد الرصاص عطل قدرة نخيل التمر على انتاج السكريات . كما بينت النتائج ان التركيز 100 ملغم.لتر$^{-1}$ كان له تأثير ايجابي في زيادة انتاج السكريات في جميع المعاملات مع الرصاص او بدونه. وبنت النتائج ايضاً ان المعاملة Pb150_Se100 حققت أعلى تراكم 6.16 مايكروغرام غرام$^{-1}$ من الكلايسين بيتاين، متفوقةً معنوياً على جميع المعاملات بينما كان أقل تراكم 1.20 مايكروغرام.غرام$^{-1}$ في معاملة المقارنة، مؤكدةً دور هذا

المركب كأسموليت واق يتراكم تحت الإجهاد. كما أظهرت النتائج إن اعلى معدل للبرولين كان في المعاملة Pb150_Se100 بلغ 10.22 ملغم.غم$^{-1}$ متفوقةً معنوياً على جميع المعاملات الأخرى فيما بلغ أقل معدل 2.19 ملغم.غم$^{-1}$ في Pb0_Se0، مما يعكس استجابة تكيفية واضحة للإجهاد التأكسدي . وبينت النتائج إن التركيز 100 ملغم.لتر$^{-1}$ من السيلينيوم قد حسن من تراكم المذابات المتوافقة في جميع المعاملات التي استخدم فيها ومع الرصاص أو بدونه ما يؤكد دوره المحفز في تشجيع إنتاج هذه المركبات.

جدول (2) تأثير التداخل بين الرصاص والسيلينيوم النانوي في بعض المذابات المتوافقة في نخيل التمر

المعاملات		المذابات المتوافقة		
Pb (ملغم.لتر$^{-1}$)	Se (ملغم.لتر$^{-1}$)	السكريات الكلية (ملغم.غم$^{-1}$)	كلايسين بيتاين (مايكروغرام.غرام$^{-1}$)	البرولين (ميكرومول غم$^{-1}$)
0	0	9.01 d	1.20 f	2.19 i
0	100	9.26 d	1.40 f	2.76 fg
0	200	8.06 ef	1.03 f	2.19 i
50	0	9.23 d	1.51 f	2.64 gh
50	100	9.35 d	1.59 f	3.31 e
50	200	7.75 fg	1.28 f	2.46 ghi
100	0	8.46 e	4.01 d	2.94 f
100	100	10.46 c	5.77 b	4.23 d
100	200	7.41 gh	3.84 e	2.31 hi
150	0	15.56 b	5.04 c	7.41 b
150	100	17.28 a	6.16 a	10.22 a
150	200	7.21 h	3.60 e	6.90 c
LSD 0.05		0.51	0.66	0.33

مؤشرات الاكسدة

توضح النتائج في جدول (3) زيادة طردية في تركيز مركب MDA بزيادة تركيز الرصاص فبلغ أعلى معدل تراكم له 5.98 نانومول.غم$^{-1}$ في المعاملة Pb150_Se200 متفوقة معنوياً على معاملة أقل تركيز (Pb0_Se100) والتي بلغت 1.12 نانومول.غم$^{-1}$ ، كما إن التركيز 200 ملغم.لتر$^{-1}$ من السيلينيوم قد أثر إيجابا في زيادة تركيز MDA وهذه إشارة واضحة على

دوره الضار بالتركيز العالي، مع ملاحظة أن السيلينيوم بالتركيز الادنى (100 ملغم.لتر$^{-1}$) خفف بشكل ملحوظ من ارتفاع MDA عند الرصاص 150 ملغم.كغم$^{-1}$. كما سجلت المعاملة Pb150_Se200 أعلى تركيز لبيروكسيد الهيدروجين 4.75 ميكرومول.غم$^{-1}$ متفوقةً معنوياً على جميع المعاملات الأخرى بما فيه معاملة المقارنة التي أعطت أقل تركيز منه بلغ 0.78 ميكرومول.غم$^{-1}$. Pb0_Se0، مما يعكس تراكماً كبيرا للجذور الحرة تحت الإجهاد الشديد الناجم عن الرصاص والتركيز المرتفع من السيلينيوم وهذا ما أكدته نتائج محتوى النخيل من مركب MDA (جدول، 2). أما استقرار الغشاء، فقد حققت المقارنة Pb0_Se100 أعلى نسبة مئوية بلغت 76.45 % متفوقةً معنوياً على جميع المعاملات الأخرى بما فيها المعاملة Pb150_Se200 على التي حققت أقل نسبة مئوية لاستقرار الغشاء بلغت 57.13 % ، مؤكدةً التلف الغشائي التدريجي مع زيادة تركيز الرصاص.

جدول(3) تأثير التداخل بين الرصاص والسيلينيوم في بعض مؤشرات الاكسدة في نخيل التمر

المعاملات		مؤشرات الاكسدة		
Pb (ملغم.لتر$^{-1}$)	Se (ملغم.لتر$^{-1}$)	MDA (نانومول.غم$^{-1}$)	H_2O_2 (ميكرومول.غم$^{-1}$)	مؤشر ثباتية الاغشية (%)
0	0	1.25 gh	0.98 gh	73.52 bc
0	100	1.12 h	0.70 h	76.45 a
0	200	1.54 f	1.34 ef	71.81 cd
50	0	1.47 fg	1.10 fg	71.70 cd
50	100	1.21 h	0.79 gh	74.75 ab
50	200	2.34 e	1.58 e	69.74 de
100	0	2.75 d	2.70 c	69.13 ef
100	100	1.66 f	2.0 d	73.15 bc
100	200	4.56 b	3.41 b	67.10 fg
150	0	4.22 c	3.28 b	59.85 h
150	100	2.22 e	2.43 c	66.42 g
150	200	5.987 a	4.75 a	57.13 i
LSD 0.05		0.22	0.31	2.07

مضادات الاكسدة

بينت النتائج في جدول (4) تأثير التداخل بين تركيز الرصاص والسيلينوم النانوي على محتوى نخيل التمر من مضادات الأكسدة الإنزيمية وغير الإنزيمية للتخفيف من آثار الإجهاد الناجم عن الرصاص. إذ سجلت المعاملة Pb100_Se100 أعلى محتوى للكاروتين 1.97 ملغم.غم$^{-1}$ متفوقةً معنوياً على أقل محتوى البالغ 1.28 ملغم.غم$^{-1}$ في معاملة المقارنة Pb0_Se0، مما يشير إلى تحفيز تكوين الكاروتينويدات كآلية دفاعية تحت تأثير الإجهاد وكذلك انخفاض قدرة النخيل على تخليق Pb150_Se200 الكاروتين تحت التركيز العالية من السيلينيوم. أما نشاط إنزيم الكاتاليز، فقد سجلت المعاملة Pb150_Se100 أعلى نشاط له بلغ 40.07 (وحدة.مايكرومول$^{-1}$.دقيقة$^{-1}$) متفوقةً معنوياً على جميع المعاملات الأخرى بما فيها معاملة المقارنة Pb0_Se0 التي أعطت أقل نشاط للكتاليز بلغ 19.58 (وحدة.مايكرومول$^{-1}$.دقيقة$^{-1}$. أما إنزيم البيروكسيديز، فبلغ أعلى نشاط 27.07 (وحدة.مايكرومول$^{-1}$.دقيقة$^{-1}$) في Pb100_Se100 متفوقاً معنوياً على أقل نشاط 17.48 (وحدة.مايكرومول$^{-1}$.دقيقة$^{-1}$) في معاملة المقارنة Pb0_Se0، مع ملاحظة أن السيلينيوم وحده بالتركيز 100 ملغم.لتر$^{-1}$ مع الرصاص أو بدونه حفز نشاط البيروكسيديز.

جدول(4) تأثير التداخل بين الرصاص والسيلينيوم في بعض مضادات الأكسدة في نخيل التمر

المعاملات		مضادات الاكسدة		
Pb (ملغم.لتر$^{-1}$)	Se (ملغم.لتر$^{-1}$)	الكاروتين (ملغم.غم$^{-1}$)	CAT (وحدة.مايكرومول$^{-1}$.دقيقة$^{-1}$ بروتين)	POD (وحدة.مايكرومول$^{-1}$.دقيقة$^{-1}$)
0	0	1.28 de	19.58 f	17.48 ef
0	100	1.56 cd	20.61 f	21.87 c
0	200	1.62 bcd	20.70 f	21.73 c
50	0	1.51 d	21.06 f	16.24 f
50	100	1.82 ab	21.83 ef	16.41 f
50	200	1.57 cd	21.75 ef	17.48 ef
100	0	1.68 bcd	21.07 f	18.21 e
100	100	1.97 a	28.16 c	27.07 a
100	200	1.66 bcd	22.74 e	19.34 d
150	0	1.47 d	30.51 b	24.05 b
150	100	1.76 abc	40.07 a	19.34 d

21.73 c	26.25 d	1.66 bcd	200	150
1.59	1.60	0.22	LSD 0.05	

المناقشة **Discussion**

تشير نتائج الدراسة الحالية إلى وجود شبكة معقدة ومتكاملة من الاستجابات الفسلجية والكيموحيوية في أشجار نخيل التمر المعرضة لإجهاد الرصاص والمعاملة بالسيلينيوم النانوي. يبدو أن التأثيرات التي أظهرتها النتائج ليست منعزلة عن بعضها بل تشكل نظاماً متكاملاً من التكيف والدفاع، حيث تتفاعل مسارات أيضية متعددة للتخفيف من الآثار الضارة للرصاص. إن مما أظهرته النتائج هي العلاقة العكسية بين تركيز الرصاص ومحتوى نخيل التمر من الكلوروفيل (جدول، 1). إذ إن إجهاد الرصاص اثر سلبا على عملية تخليق الكلوروفيل ، وقد أشارت الدراسات الى أن الرصاص يثبط تخليق حامض δ− Aminolevulinic acid (ALA) الذي يعد ثاني مركب في سلسلة تخليق الكلوروفيل بعد المركب البادئ حامض الكلوتاميك (Burzyński, 2014) . تتوافق هذه النتائج مع ما توصل اليه Souahi, (2021) على القمح والشعير والشوفان (نباتات الفلقة الواحدة) . إن انخفاض محتوى البروتينات الكلية وزيادة الأحماض الأمينية الحرة، خاصة عند التركيزات العالية من الرصاص. يمكن تفسيره من خلال عدة آليات، منها تثبيط تخليق البروتين وزيادة تحلل البروتين واضطراب دمج الأحماض الأمينية في السلاسل الببتيدية (Meng et al., 2022). الرصاص يرتبط بمجموعات السلفهيدريل (SH) في الإنزيمات الحيوية ويرتبط بالمواقع النشطة في الأنزيمات بدلا من المعادن الضرورية ما يضعف قدرة الخلية على تصنيع مكونات وأنزيمات النسخ والترجمة و RNA الرسول (mRNA) والأنواع الأخرى من RNA ، مما يقطع العملية عند أول خطوة. ويمكن للرصاص أن يغير بنية الرايبوسومات (المصنع البروتيني) ويضعف ارتباط الـ tRNA والـ mRNA بها (Dalyan et al., 2020; Pourrut et al., 2011) . وقد لعب السيلينيوم النانوي دوراً مخففاً، حيث حافظت المعاملة Pb0_Se100 على محتوى بروتيني مرتفع (5.39 ملغم غم$^{-1}$) مقارنة بالمعاملات الأخرى وهذه النتيجة تعزز نتائج الدراسات السابقة التي أشارت الى قدرة السيلينوم على تعزيز العمليات الأيضية وإنتاج البروتين (Schiavon et al., 2017). بينت النتائج في جدول (2) حدوث زيادة كبيرة في تركيز السكريات الكلية والبرولين والكلايسين بيتاين تحت إجهاد الرصاص. فقد أوضحت النتائج وجود زيادة كبيرة في السكريات الكلية تحت إجهاد الرصاص وصلت إلى 17.28 ملغم.غم$^{-1}$ فيPb150_Se100 تعكس إعادة توجيه مسارات أيض الكربون نحو إنتاج السكريات الذاتية التي تعمل كمضادات أكسدة ومنظمات أسموزية (Gautam et al., 2022). فيما

وصل تركيز البرولين والكلايسين بيتاين إلى 10.22 و 6.16 (مايكرومول غرام$^{-1}$) على التتابع في المعاملة Pb150_Se100 إذ يعتبر تراكم هذه المركبات استراتيجية دفاعية معروفة في النباتات تحت الإجهاد سيما الإجهاد الناجم عن تراكم عنصر الرصاص ، حيث تساعد النباتات على تخفيف الإجهاد التأكسدي عن طريق تثبيت الهياكل الخلوية وتحييد أنواع الأكسجين التفاعلية وتعمل كمضادات للأكسدة ومنظمات أزموزية تحافظ على التوازن الأيوني وتحمي البروتينات والإنزيمات (Ejaz et al., 2020; Vettore et al., 2021) . تتفق هذه النتائج مع العديد من الدراسات الأخرى التي توصلت الى نتائج مشابه كدراسة Schiavon et al., (2017) على نبات الشعير و دراسة Jabeen et al., (2025) على القمح. فيما كان للسيلينيوم بالتركيز 100 ملغم.لتر$^{-1}$ دور إيجابي في تعزيز إنتاج المركبات المتوافقة في جميع المعاملات مع الرصاص او بدونه ويعود ذلك الى دور السيلينيوم المفيد في عندما يكون بتراكيز منخفضة أو معتدلة (Liu et al., 2022).

أظهرت النتائج في جدول(3) زيادة معنوية في تركيز بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) و MDA مع زيادة تركيز الرصاص، خاصة عند التركيز 150 ملغم.كغم$^{-1}$.وهذا يتوافق مع ما أشارت إليه عدد من الدراسات السابقة إذ يعمل الرصاص على زيادة إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) مما يؤدي إلى اكسدة الدهون وتلف الأغشية الخلوية. وقد انعكس هذا التلف بشكل واضح في انخفاض استقرار الغشاء الخلوي (MSI) الذي تراوح من 76.45% في معاملة المقارنة إلى 57.13 % في المعاملة ذات التركيز الأعلى للرصاص. بينما كان للسيلينوم بالتركيز 100 ملغم.لتر$^{-1}$ دور إيجابي في التخيف من بيروكسدة الدهون وتلف الأغشية الخلوية ومحتوى H_2O_2 و MDA و نتيجة لتعزيزه إنتاج مضادات الأكسدة (Qin et al., 2025) كما موضح في جدول (4). حدوث زيادة كبيرة في إنتاج مضادات الأكسدة الأنزيمية وغير الأنزيمية مع زيادة تركيز عنصر الرصاص يشير الى اتخاذ النخيل استراتيجية دفاع ضد الإجهاد عبر زيادة إنتاج هذه المركبات (Danaeipour et al., 2024). إن محتوى الكاروتين في المعاملة Pb100_Se100 البالغ 1.97 ملغم غم$^{-1}$ التي تفوقت على المقارنة بنسبة 54 % يشير هذا إلى احتمال قيام السيلينيوم النانوي بتحفيز مسارات التخليق الحيوي للكاروتينويدات كاستجابة دفاعية ، تدعم هذه النتيجة ما ورد في دراسة Li et al., (2020) التي أظهرت أن المعادن النانوية يمكن أن تنشط التعبير الجيني للإنزيمات المشاركة في تخليق الكاروتينويدات. سجل نشاط إنزيم الكتاليز أعلى قيمة له في المعاملة Pb150_Se100 (40.07 وحدة.مايكرومول$^{-1}$.دقيقة$^{-1}$)، مما يشير إلى تنشيط قوي لنظام الدفاع المضاد للأكسدة من قبل نخيل التمر لمواجهة إجهاد الرصاص معززاً بالتركيز 100 ملغم.لتر$^{-1}$ من السيلينيوم الذي يحفز إنتاج مضادات الأكسدة (Feng et al., 2021). يعمل الكتاليز على تحليل H_2O_2 إلى

ماء وأكسجين، ويعد زيادة نشاطه استجابة طبيعية لتراكم بيروكسيد الهيدروجين(Rajput et al., 2021) . وقد أوضحت دراسة Jomova et al., (2024) أن تحفيز نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة يمثل خط الدفاع الأول ضد الإجهاد التأكسدي، حيث سجل أعلى نشاط في المعاملة Pb100_Se100 (27.07 وحدة.مايكرومول$^{-1}$.دقيقة$^{-1}$) . تتفق هذه النتائج مع العديد من الدراسات السابقة التي أشارت الى الدور المفيد للسيلينيوم في تنشيط مضادات الأكسدة تحت إجهاد الرصاص في الرز (Yao et al., 2010) والقمح (Iqbal et al., 2015) و الشعير (Sajedi & Madani, 2018). بينت نتائج هذه الدراسة أن السيلينيوم النانوي وحده قادر على تحفيز العمليات الأيضية في نخيل التمر ما يشجع تخليق المركبات الهامة لصحة ونمو النبات كالكلوروفيل والبروتين والسكريات والبرولين ومضادات الأكسدة الإنزيمية وغير الإنزيمية ، ولكن وجود الرصاص يمكن أن يكون له دور في هذه الاستجابة. يتوافق هذا مع نتائج Wang et al., (2021) التي أظهرت تفاعلات معقدة بين العناصر الثقيلة والمغذيات الدقيقة في تنظيم الإنزيمات المضادة للأكسدة. يمكن تفسير التأثير الإيجابي للسيلينيوم النانوي من خلال عدة آليات وهي تعزيز نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة و تحفيز تخليق المركبات الواقية غير الإنزيمية وتنظيم نقل الإشارة الخلوية المرتبطة باستجابات الإجهاد وتحسين امتصاص العناصر الغذائية واستخدامها (Qin et al., 2025). كما يمكن أن تعمل الجسيمات النانوية للسيلينيوم كعوامل مضادة للأكسدة مباشرة بالإضافة إلى دورها في تنشيط أنظمة الدفاع الذاتية للنبات (Samynathan et al., 2023). أشارت دراسة إلى أن السيلينيوم يمكن أن يقلل من تراكم الرصاص في الأنسجة النباتية من خلال آليات تشمل تكوين معقدات غير قابلة للامتصاص (Feng et al., 2021). يبدو أن الرصاص والسيلينيوم يتفاعلان في تنظيم أنظمة الدفاع المضادة للأكسدة. بينما يحفز الرصاص الإجهاد التأكسدي، يعمل السيلينيوم على تنشيط آليات التخلص من الجذور الحرة، مما يؤدي إلى حالة توازن جديدة. هذا التفسير يتوافق مع ما ذكره Kovács–Bogdán et al., (2010) من ان المستويات المنخفضة من الإجهاد تحفز آليات الدفاع دون التسبب في تلف خلوي كبير. تلفت نتائج هذه الدراسة النظر الى التأثير المفيد للسيلينيوم النانوي بشكل واضح عند التركيز 100 ملغ.لتر$^{-1}$ على نخيل التمر من خلال زيادة تخليق الكلوروفيل والبروتين وخفض الأحماض الأمينية الحرة وحفز إنتاج مضادات الأكسدة الإنزيمية وغير الأنزيمية كما قلل من اكسده دهون الأغشية الخلوية وتضررها وإنتاج MDA (Qin et al., 2025). بينما كانت استجابته سلبية عند التركيز 200 ملغم لتر$^{-1}$ خصوصا عندما تتآزر سمية هذا التركيز مع سمية الرصاص في جميع المعاملات سيما المعاملة Pb150_Se200 ، وقد يعود السبب في ذلك الى سمية السيلينيوم بالتراكيز المرتفعة وأضراره بعمليات الأيض ما يقلل

قدرة النبات على انتتاج المركبات الضرورية للنمو كالكلوروفيل والبروتين والمركبات المتوافقة ومضادات الأكسدة ،وهذا يدل على إن الحدود التي يكون فيها السيلينيوم فعالا هي حدود ضيقة تتراوح من القليلة الى المتوسطة ، بينما تصبح الجرعات العالية سامة (Saleem & Fariduddin, 2022) . وقد أوضحت دراسة (Chen et al., 2023) أن السيلينيوم النانوي يتميز بفعالية أكبر مقارنة بالصور التقليدية بسبب زيادة مساحة السطح والنفاذية.

الاستنتاجات Conclusions

تشير نتائج هذه الدراسة إلى أن السيلينيوم النانوي، وخاصة عند التركيز 100 ملغم.لتر$^{-1}$، يمكن أن يكون استراتيجية فعالة للتخفيف من الآثار الضارة للرصاص في أشجار نخيل التمر بينما كان التركيز 200 ملغم.لتر$^{-1}$ تركيزا ضارا. يعمل السيلينيوم من خلال تنشيط متعدد المسارات يشمل أنظمة الدفاع الإنزيمية وغير الإنزيمية، مما يحسن قدرة النبات على تحمل الإجهاد. هذه النتائج لها آثار تطبيقية مهمة في المناطق الملوثة بالمعادن الثقيلة.

المصادر References

Anwar, A., S, N. R., & Baker, S. (2025). Environmental Applications of Nanoparticles: Water Purification and Pollution Control. Nanoscale Reports, 8(2), 1–4. https://doi.org/10.26524/nr.8.4

Arnon, D. I. (2017). Copper Enzymes in Isolated Chloroplasts. Polyphenoloxidase in Beta Vulgaris. Plant Physiology, 24(1), 1–15. https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1

Asare-boamah, N. K., Hofstra, G., Fletcher, R. A., & Dumbroff, E. B. (1986). Triadimefon protects bean plants from water stress through its effects on abscisic acid. Plant and Cell Physiology, 27(3), 383–390. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a077114

Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil, 39(1), 205–207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Bavei, V., Shiran, B., Khodambashi, M., & Ranjbar, A. (2011). Protein electrophoretic profiles and physicochemical indicators of salinity tolerance in sorghum (Sorghum bicolor l.). African Journal of Biotechnology, 10(14), 2683–2697. https://doi.org/10.5897/ajb09.754

Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein–dye binding. Anal Biochem, 72(1–2), 248–254. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3

Burzyński, M. (2014). Influence of lead on the chlorophyll content and on initial steps of its synthesis in greening cucumber seedlings. Acta Societatis Botanicorum Poloniae, 54(1), 95–105. https://doi.org/10.5586/asbp.1985.009

Chen, N., Yao, P., Zhang, W., Zhang, Y., Xin, N., Wei, H., Zhang, T., & Zhao, C. (2023). Selenium nanoparticles: Enhanced nutrition and beyond. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 63(33), 12360–12371. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2101093

Dalyan, E., Yüzbaşıoğlu, E., & Akpınar, I. (2020). Physiological and Biochemical Changes in Plant Growth and Different Plant Enzymes in Response to Lead Stress. 129–147. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21638-2_8

Danaeipour, R., Sharifi, M., & Noori, A. (2024). Responses to lead stress in Scrophularia striata: insights into antioxidative defence mechanisms and changes in flavonoids profile. Functional Plant Biology, 51(5). https://doi.org/10.1071/FP23236

Ejaz, S., Fahad, S., Anjum, M. A., Nawaz, A., Naz, S., Hussain, S., & Ahmad, S. (2020). Role of Osmolytes in the Mechanisms of Antioxidant Defense of Plants. In: Lichtfouse, E. (eds) Sustainable Agriculture Reviews 39. Sustainable Agriculture Reviews, vol 39. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38881-2_4

Feng, R. W., Zhao, P. P., Zhu, Y. M., Yang, J. G., Wei, X. Q., Yang, L., Liu, H., Rensing, C., & Ding, Y. Z. (2021). Application of inorganic selenium to reduce accumulation and toxicity of heavy metals (metalloids) in plants: The main mechanisms, concerns, and risks. Science of the Total Environment, 771. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144776

Gautam, T., Dutta, M., Jaiswal, V., Zinta, G., Gahlaut, V., & Kumar, S. (2022). Emerging Roles of SWEET Sugar Transporters in Plant Development and Abiotic Stress Responses. Cells, 11(8), 1303. https://doi.org/10.3390/cells11081303

Góth, L. (1991). A simple method for determination of serum catalase activity and revision of reference range. Clinica Chimica Acta, 196(2–3), 143–151. https://doi.org/10.1016/0009-8981(91)90067-M

Grieve, C. M., & Grattan, S. R. (1983). Rapid assay for determination of water soluble quaternary ammonium compounds. Plant and Soil, 70(2), 303–307. https://doi.org/10.1007/BF02374789

Heath, R. L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Archives of Biochemistry and Biophysics, 125(1), 189–198. https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1

Iqbal, M., Hussain, I., Liaqat, H., Ashraf, M. A., Rasheed, R., & Rehman, A. U. (2015). Exogenously applied selenium reduces oxidative stress and induces heat tolerance in spring wheat. Plant Physiology and Biochemistry, 94, 95–103. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.05.012

Jabeen, Z., Javaid, S., Javaid, S., Abbas, G., Rehman, S., & Farooq, A. (2025). Application of glycine betaine loaded chitosan nanoparticles mitigates lead toxicity and promotes plant growth in wheat. International Journal of Phytoremediation, 27(10), 1365‑1376. https://doi.org/10.1080/15226514.2025.2497900

Jomova, K., Alomar, S. Y., Alwasel, S. H., Nepovimova, E., Kuca, K., & Valko, M. (2024). Several lines of antioxidant defense against oxidative stress: antioxidant enzymes, nanomaterials with multiple enzyme-mimicking activities, and low-molecular-weight antioxidants. Archives of Toxicology, 98(5), 1323–1367. https://doi.org/10.1007/s00204-024-03696-4

Kim, Y. H., & Yoo, Y. J. (1996). Peroxidase production from carrot hairy root cell culture. Enzyme and Microbial Technology, 18(7), 531–535. https://doi.org/10.1016/0141-0229(95)00168-9

Kovács-Bogdán, E., Nyitrai, P., & Keresztes, Á. (2010). How does a little stress stimulate a plant? Plant Signaling and Behavior, 5(4), 354–358. https://doi.org/10.4161/psb.5.4.10870

Lee, Y. P., & Takahashi, T. (1966). An improved colorimetric determination of amino acids with the use of ninhydrin. Analytical Biochemistry, 14(1), 71–77. https://doi.org/10.1016/0003-2697(66)90057-1

Li, D., Zhou, C., Zhang, J., An, Q., Wu, Y., Li, J. Q., & Pan, C. (2020). Nanoselenium Foliar Applications Enhance the Nutrient Quality of Pepper by Activating the Capsaicinoid Synthetic Pathway. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 68(37), 9888–9895. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c03044

Liu, H., Xiao, C., Qiu, T., Deng, J., Cheng, H., Cong, X., Cheng, S., Rao, S., & Zhang, Y. (2022). Selenium Regulates Antioxidant, Photosynthesis, and Cell Permeability in Plants under Various Abiotic Stresses: A Review. Plants, 12(1), 44. https://doi.org/10.3390/plants12010044

Luhová, L., Lebeda, A., Hedererová, D., & Peč, P. (2003). Activities of amine oxidase, peroxidase and catalase in seedlings of Pisum sativum L. under different light conditions. Plant, Soil and Environment, 49(4), 151–157. https://doi.org/10.17221/4106-pse

Lutts, S., Kinet, J. M., & Bouharmont, J. (1996). NaCl-induced senescence in leaves of rice (Oryza sativa L.) cultivars differing in salinity resistance. Annals of Botany, 78(3), 389–398. https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0134

Meng, L., Yang, Y., Ma, Z., Jiang, J., Zhang, X., Chen, Z., Cui, G., & Yin, X. (2022). Integrated physiological, transcriptomic and metabolomic analysis of the response of Trifolium pratense L. to Pb toxicity. Journal of Hazardous Materials, 436, 129128. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129128

Plummer, D. T. (1978). An Introduction to Practical Biochemistry (Second Edition). Biochemical Society Transactions, 6(6), 1412–1415. https://doi.org/10.1042/bst0061412b

Pourrut, B., Shahid, M., Dumat, C., Winterton, P., & Pinelli, E. (2011). Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 213, 113–136. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9860-6_4

Qin, X., Wang, Z., Lai, J., Liang, Y., & Qian, K. (2025). The Synthesis of Selenium Nanoparticles and Their Applications in Enhancing Plant Stress Resistance: A Review. Nanomaterials, 15(4), 301. https://doi.org/10.3390/nano15040301

Rahman, H., Vikram, P., Hammami, Z., & Singh, R. K. (2022). Recent advances in date palm genomics: A comprehensive review. Frontiers in Genetics, 13. https://doi.org/10.3389/fgene.2022.959266

Rajput, V. D., Harish, Singh, R. K., Verma, K. K., Sharma, L., Quiroz-Figueroa, F. R., Meena, M., Gour, V. S., Minkina, T., Sushkova, S., & Mandzhieva, S. (2021). Recent Developments in Enzymatic Antioxidant Defence Mechanism in Plants with Special Reference to Abiotic Stress. Biology, 10(4), 267. https://doi.org/10.3390/biology10040267

Ranganna S. (1992). Hand Book of Analysis of Fruit and Vegetable Products. 30.

Sajedi, N. A., & Madani, H. (2018). Comparison of physiological and biochemical responses of wheat and barley to Selenium by spraying application under rain fed conditions. Iranian Journal of Plant Physiology, 8(2), 2381–2389. https://doi.org/10.22034/ijpp.2018.539178

Saleem, M., & Fariduddin, Q. (2022). Novel mechanistic insights of selenium induced microscopic, histochemical and physio-biochemical changes in tomato (Solanum lycopersicum L.) plant. An account of beneficiality or toxicity. Journal of Hazardous Materials, 434, 128830. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128830

Samynathan, R., Venkidasamy, B., Ramya, K., Muthuramalingam, P., Shin, H., Kumari, P. S., Thangavel, S., & Sivanesan, I. (2023). A Recent Update on the Impact of Nano-

Selenium on Plant Growth, Metabolism, and Stress Tolerance. Plants, 12(4). https://doi.org/10.3390/plants12040853

Schiavon, M., Lima, L. W., Jiang, Y., & Hawkesford, M. J. (2017). Effects of Selenium on Plant Metabolism and Implications for Crops and Consumers. 257–275. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56249-0_15

Sergiev, I., Alexieva, V., & Karanov, E. (1997). Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective systems and stress markers in plants. Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences, 51(2), 121–124.

Souahi, H. (2021). Impact of lead on the amount of chlorophyll and carotenoids in the leaves of Triticum durum and T. aestivum, Hordeum vulgare and Avena sativa. Biosystems Diversity, 29(3), 207–210. https://doi.org/10.15421/012125

Vettore, L. A., Westbrook, R. L., & Tennant, D. A. (2021). Proline metabolism and redox; maintaining a balance in health and disease. Amino Acids, 53(12), 1779–1788. https://doi.org/10.1007/s00726-021-03051-2

Wang, C., Cheng, T., Liu, H., Zhou, F., Zhang, J., Zhang, M., Liu, X., Shi, W., & Cao, T. (2021). Nano-selenium controlled cadmium accumulation and improved photosynthesis in indica rice cultivated in lead and cadmium combined paddy soils. Journal of Environmental Sciences, 103, 336–346. https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.11.005

Yao, X., Chu, J., & Ba, C. (2010). Antioxidant responses of wheat seedlings to exogenous selenium supply under enhanced ultraviolet-B. Biological Trace Element Research, 136(1), 96–105. https://doi.org/10.1007/s12011-009-8520-9

Zouari, M., Elloumi, N., Ahmed, C. Ben, Delmail, D., Rouina, B. Ben, Abdallah, F. Ben, & Labrousse, P. (2016). Exogenous proline enhances growth, mineral uptake, antioxidant defense, and reduces cadmium-induced oxidative damage in young date palm (Phoenix dactylifera L.). Ecological Engineering, 86, 202–209. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.016

The effect of nano-selenium in mitigating the oxidative effects of lead on date palms (*Phoenix dactylifera* L.)

Ali S.Mahdi* **Firas M Al-Hamoud**

Date palm Research Center-University of Basrah-Iraq

*Corresponding author: ali.mahdi@uobasrah.edu.iq

Abstract

This study aimed to evaluate the role of nano-selenium (Se NPs) in alleviating oxidative stress induced by lead contamination in date palm (*Phoenix dactylifera* L.). The experiment was conducted using a randomised complete block design, in which four lead concentrations (0, 50, 100 and 150 mg L^{-1}) and three concentrations of Se NPs (0, 100 and 200 mg L^{-1}) were applied as foliar sprays to three-year-old date palm trees over a six-month period. The results demonstrated that increasing lead concentration caused a significant reduction in chlorophyll content and total proteins, accompanied by a significant increase in amino acids, compatible solutes, and oxidative stress indicators, including hydrogen peroxide and malondialdehyde (MDA). In addition, the membrane stability index (MSI) declined, while the activities of enzymatic and non-enzymatic antioxidants increased. In contrast, the application of Se NPs, particularly at 100 mg L^{-1}, markedly mitigated these adverse effects by enhancing antioxidative defence mechanisms. This was evidenced by increased activities of catalase (CAT) and peroxidase (POD), enhanced accumulation of compatible solutes such as proline, glycine betaine and carotenoids, and the maintenance of total protein and chlorophyll contents. Furthermore, the results indicated that the moderate concentration of Se NPs (100 mg L^{-1}) was the most effective, whereas the higher concentration (200 mg L^{-1}) exerted detrimental stress effects. Overall, the findings suggest that nano-selenium represents a promising strategy for enhancing the tolerance of date palm to heavy metal stress, particularly lead.

Keywords: Heavy metals, pollution, environmental stress, CAT, POD

.