تأثير الرش الورقي بالزنك النانوي على انتاجية الشوندر الأحمر تحت ظروف الإجهاد المائي

ندى ملا[1]* و عبد المحسن السيد عمر[1] و عزيزة عجوري[2]

[1] قسم المحاصيل الحقلية، كلية الهندسة الزراعية، جامعة حلب، سورية.

[2] علوم التربة واستصلاح الأراضي، كلية الهندسة الزراعية، جامعة حلب، سورية.

(*للمراسلة: ندى ملا، البريد الإلكتروني: nadamalla29@gmail.com، هاتف: 0994624153)

تاريخ الاستلام: 26/ 7/ 2025 **تاريخ القبول:** 9/ 12/ 2025

الملخّص

هدفت هذه الدراسة إلى تقييم تأثير الرش الورقي بتراكيز مختلفة من الزنك النانوي على انتاجية الشوندر الأحمر تحت ظروف الإجهاد المائي، نفذت تجربة حقلية في أرض مخصصة للأبحاث بجانب كلية الهندسة الزراعية بجامعة حلب، خلال الموسم الزراعي 2024–2025. استخدم تصميم القطاعات العشوائية الكاملة بثلاث مكررات وتضمن البحث 12معاملة، ناتجة عن تطبيق ثلاث معاملات ري (ري كل 5 أيام، ري كل 10 أيام، ري كل 15 يوم)، وأربع تراكيز للرش بالزنك النانوي (0، 50، 100، 150ملغ/ل). أظهرت النتائج تفوق المعاملة (ري كل 5أيام + التركيز 150 ملغ/ل) معنوياً في الوزن الرطب للجذور (كغ/م2)، حجم الجذور (سم3)، طول الجذور (سم). حيث بلغت قيمتها على التوالي (1462,02كغ/م2، 309,88سم3، 16,55سم) على التوالي. بينما سجلت المعاملة (ري كل 15 يوم + التركيز 0 ملغ/ل) أقل القيم (39,87 كغ/م2، 9,72 سم3، 1,57 سم) على التوالي. بناءً على نتائج هذه الدراسة، يقترح تطبيق المعاملة (ري كل 5أيام مع رش الزنك النانوي بتركيز 150 ملغ/ل) لتحسين إنتاجية الشوندر الأحمر تحت ظروف الإجهاد المائي.

الكلمات المفتاحية: الشوندر الأحمر، الزنك النانوي، الإجهاد المائي، الإنتاجية.

المقدمة:

يعد الإجهاد المائي أحد أبرز التحديات التي تواجه الإنتاج الزراعي على المستوى العالمي، خاصة في ظل التحول من أنظمة الري التقليدية إلى نظم أكثر كفاءة، حيث يؤثر سلباً على العمليات الفسيولوجية للنبات (Bouaziz and Hicks.,1990)، وتمثل الزراعة المبكرة في موسم الصيف تحدياً إضافياً بالإضافة لارتفاع درجات الحرارة ومعدلات تبخر–نتح، مما يزيد من حدة الإجهاد المائي. يؤدي الجفاف إلى تغيرات في البنية الطبيعية للنبات بصورة عامة وينعكس ذلك في اختلال العمليات الأيضية التي تنتهي بانخفاض الإنتاجية، مما يسهم في تفاقم مشكلة نقص الغذاء في العالم (Zhang *et al*.,2022) خاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة حيث يعتبر الجفاف العامل الرئيسي المحدد للمردود (Zafar *et al*.,2023). تؤثر ندرة المياه الناتجة عن الإجهاد المائي سلباً على العمليات الحيوية للنبات، كما يؤدي انخفاض كفاءة استخدام المياه إلى تفاقم مشكلة الإجهاد. تحت هذه الظروف، تستجيب النباتات بإغلاق ثغورها للحد من فقدان الماء، مما يؤثر بدوره على عملية التمثيل الضوئي والتبادل الغازي ويضعف نمو المحاصيل (Zaib *et al*., 2023) وبالتالي يبقى الإجهاد المائي عاملاً حاسماً في تحديد إنتاجية المحاصيل (Dikshit *et al*.,2022;Raposo et al.,2023). كما كشفت دراسة ل (Al-Ghazzawi and Qasim.,2023) أن نبات الشوندر الأحمر يستجيب للإجهاد المائي من خلال تطوير نظامه الجذري وزيادة تركيز المركبات الواقية مثل البيتا لينات، هذه الآليات تمكنه من الحفاظ على نموه وقيمته الغذائية

تحت ظروف الإجهاد المائي. وفقاً لنتائج دراسة (Kurunc, 2022)، بلغت معاملات استجابة المحصول لاستهلاك المياه من قبل الجذر والأوراق 0.88 و0.98 على التوالي، وتشير هذه القيم القريبة من الواحد الصحيح والمرتفعة إلى أن الشوندر الأحمر يمتلك قدرة جيدة على تحمل الإجهاد المائي، حيث يحافظ على إنتاجيته بشكل نسبي حتى تحت ظروف نقص المياه، مما يؤدي بالتبعية إلى انخفاض في استهلاكه المائي. كما أشار (Stagnari *et al*.,2014)، أن التكيف العالي للشوندر الأحمر مع الإجهاد المائي يتم من خلال تعديلات النمو مثل تعميق المجموع الجذري للوصول إلى رطوبة التربة في الطبقات العميقة، واستجابات فسيولوجية مثل اغلاق الثغور للحفاظ على الماء، وتركيز المواد الذوابة لتنظيم الضغط الأسموزي، فهذه التعديلات تساهم في استقرار عملية البناء الضوئي وامتصاص المغذيات، مما يؤدي في النهاية إلى الحفاظ على الغلة وجودة المحصول نسبياً تحت ظروف الإجهاد.

يعد الشوندر الأحمر أحد تحت أنواع (*Beta vulgaris*. Vulgaris).(Chawla *et a*l.,2016) ويتبع الفصيلة الرمرامية Chenopodiaceae، فهو من أهم المحاصيل الزراعية إذ يعتبر أحد أهم النباتات الغنية بالمواد الغذائية والمركبات ذات الفوائد الطبية.

يزرع الشوندر الأحمر في نطاق واسع من الظروف المناخيةْ (Neha *et al*., 2018)، فقد تمت الزراعة عمداً في منتصف شهر آيار لبدء الموسم الصيفي بهدف محاكاة ظروف الإجهاد المائي والحراري، أي الجمع بين الزراعة الصيفية (ارتفاع معدل تبخر–نتح) وفترات الري المتباعدة لخلق إجهاداً مائياً حقيقياً، واثبات قدرة التقنية النانوية في تحسين إنتاجية الشوندر الأحمر ومواجهة التحديات المناخية. ويمكن زراعة الشوندر الأحمر في مجموعة واسعة من الترب، ولكن للحصول على الإنتاج الأفضل يفضل الزراعة في التربة الرملية إلى الطينية العميقة جيدة التصريف ذات الأس الهيدروجيني من 6 إلى 8، وقد اكتسبت هذه المتطلبات أهمية مضاعفة في هذه الدراسة نظراً للزراعة في (آيار)، حيث ساعدت التربة جيدة الصرف على تحقيق توازن بين الاحتفاظ بالرطوبة ومنع الإجهاد اللاهوائي تحت ظروف الري المتباعد والإجهاد الحراري.

تعرف التغذية الورقية على أنها تقنية زراعية يتم فيها تزويد النباتات بالعناصر الغذائية الأساسية بتراكيز محددة، من خلال رشها مباشرة على المجموع الخضري في مراحل نمو حساسة ومحددة، حيث يتم امتصاص هذه العناصر بشكل رئيسي عبر الثغور المنتشرة على سطحي الأوراق، وكذلك عن طريق اختراق الطبقة الشمعية وجدران الخلايا. تكمن أهمية هذه التقنية في تخطي مشاكل عدم كفاءة امتصاص العناصر من التربة، سواء كانت ناتجة عن ظروف التربة الكيميائية مثل (التثبيت أو ارتفاع درجة الحموضة) أو الفسيولوجية (كضعف الجذور بسبب الإجهاد)، وبالتالي تضمن التغذية الورقية وصول المغذيات بشكل سريع ومباشر إلى مواقع النشاط الحيوي داخل النبات، مما يحسن كفاءة العمليات الفسيولوجية مثل البناء الضوئي والتمثيل الغذائي، ويؤدي في النهاية إلى تعزيز النمو الخضري والمحصول (Fernández and Brown., 2020). يساهم الاستخدام غير المتوازن للأسمدة الكيماوية التقليدية، وخاصة النيتروجينية منها، في تفاقم مشكلة نقص الزنك عالمياً من خلال تأثيرها السلبي على خصائص التربة وتقليل كفاءة امتصاص العناصر الغذائية (Dimkpa and Bindraban.,2018). في دراسة أعدها (Liu *et al*.,2023)بين فيها تأثير الرش الورقي بالزنك عل نمو وإنتاجية القمح (Triticum aestivum)، فقد أظهرت النتائج أن التطبيق الورقي للزنك في مراحل مختلفة مع الجرعة الموصي بها من السماد كان له تأثير إيجابي على ارتفاع النبات وعدد الأوراق لكل نبات ومحصول الحبوب للمحصول. تعاني الزراعة في المناطق شبه القاحلة من معوقات حادة تتمثل في شح الموارد المائية، وتقلب المناخ، وتدهور خصوبة التربة، واستجابة لهذه المعوقات، يبحث العلم عن أساليب زراعية مستدامة تزيد من الكفاءة الإنتاجية، وهو ما دفع الباحثين إلى التركيز على

الحلول المبتكرة (Kumar *et al.*, 2022). وفي هذا الإطار، تظهر تقنيات النانو كخيار استراتيجي لمواجهة تلك التحديات (Verma *et al.*,2023)، حيث تفتح إمكانية التحكم في المواد بمقياس النانومتر آفاقاً جديدة لتحسين محتوى التربة من المغذيات وزيادة كفاءة امتصاصها من قبل المحاصيل. وقد أثبتت الدراسات الحديثة ومنها دراسة (Biradar *et al.*,2023) أن جسيمات الزنك الدقيقة (الزنك النانوي) تحقق نتائج إيجابية ملحوظة في تعزيز امتصاص العناصر الغذائية.

في دراسة أخرى أوضح بها كل من (Wang *et al.*,2023)، أن رش الأوراق بالزنك النانوي على محصول الأرز أدى إلى تحسين إنتاجية وجودة حبوب الأرز، حيث بينت النتائج أن الرش الورقي بالزنك النانوي أدى إلى زيادة عدد السنيبلات ووزن الألف حبة لكل سنبلة ومعدل ملء الحبوب، وكل ذلك ساهم في زيادة الغلة. كما بينت النتائج أن التطبيق الجيد للزنك النانوي بتراكيز مناسبة يمكن أن يعزز تنوع ونشاط الميكروبات في التربة، مما يؤدي إلى تحسين إنتاج النبات وجودته.

على الرغم من الأهمية الطبية والغذائية لمحصول الشوندر الأحمر، وانتشار مشكلة نقص الزنك في الترب الكلسية السورية، فإن الدراسات التي بحثت في سبل التغلب على هذا النقص باستخدام التقنيات النانوية لا تزال محدودة، وفي ظل ندرة الأبحاث التي تناولت استجابة الشوندر الأحمر للتغذية الورقية بجسيمات الزنك النانوية، لذلك تسعى هذه الدراسة إلى سد هذه الفجوة البحثية من خلال تقييم فعالية الزنك النانوي في تعزيز نمو وإنتاجية وجودة الشوندر الأحمر تحت ظروف الإجهاد المائي، مما يقدم حلاً عملياً لتحدي نقص الزنك في الترب الكلسية.

أيضاً لاختبار قدرة نبات الشوندر الأحمر على تحمل الإجهاد من خلال زراعته في بداية الصيف لمحاكاة تأثيرات تغير المناخ واختبار قدرة الزنك النانوي على تعزيز تحمل نبات الشوندر الأحمر وتحسين إنتاجيته والتخفيف من الآثار الضارة تحت هذه الضغوط البيئية.

مواد البحث وطرائقه:

تم تنفيذ التجربة في أرض مخصصة للأبحاث بجانب كلية الهندسة الزراعية (جامعة حلب) خلال الموسم 2024-2025، وأجريت كافة التحاليل والاختبارات الخاصة بالتربة في المخابر التابعة لكلية الهندسة الزراعية في جامعة حلب قبل الزراعة، وأخذت العينات بعمق 0-30 cm، حيث يلاحظ من الجدول (1) أن تربة موقع التجربة قاعدية قليلة الملوحة، وكانت نسبة كربونات الكالسيوم والمادة العضوية منخفضة وعلى العكس من ذلك كانت نسبة البوتاسيوم عالية وكان الفوسفور المتاح منخفضاً ونسبة الزنك منخفضة.

الجدول (1): يبين بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية والخصوبية للتربة قبل الزراعة للموسم الزراعي 2025.

Zn (ppm)	سلت %	رمل %	طين %	N %	P-Olsen (ppm)	K (ppm)	OM %	CaCo3 %	Ec مستخلص ds/m	pH معلق 1:25
0.93	30.94	44.73	24.34	0.037	8.04	238	0.75	27.5	1.29	**7.74**

تم تحضير الأرض للزراعة من خلال تنفيذ عدة فلاحات بهدف تنعيم التربة والتخلص من الأعشاب الموجودة في الحقل وخططت الأرض التي بلغت مساحتها حوالي 100m2على شكل سطور إلى 11خط، المسافة بين الخط والآخر 50cm والنبات والآخر 15cmوكان طول الخط 13m ومساحة القطعة التجريبية 6m2.

تم زراعة البذور المتوفرة في السوق المحلية خلال الموسم الصيفي (تمت الزراعة في 14 آيار) من العام 2024 بهدف خلق ظروف إجهاد مائي وحراري طبيعية، حيث تعتبر الزراعة في هذا الوقت مبكرة بالنسبة للمنطقة وتتعرض لظروف حرارية مرتفعة تزيد من الطلب على المياه (الجدول 2)، وتم تصميم هذا النموذج لاختبار قدرة معالجة الزنك النانوي على تعزيز تحمل نبات الشوندر الأحمر وتحسين إنتاجيته تحت هذه الضغوط البيئية. تمت الزراعة بمعدل 2–3 بذور في الجورة الواحدة على عمق 1-2 cm، وتم الري بطريقة الجريان السطحي

الجدول (2): بيانات الطقس الشهرية لموسم التجربة 2024-2025:

الشهر	الهطول المطري (مم)	درجة الحرارة العظمى (°م)	درجة الحرارة الصغرى (°م)	الرطوبة النسبية %
آيار	18	32.1	16.3	55
حزيران	5	36.7	21.0	42
تموز	0	39.2	24.5	38
آب	0	38.9	24.1	40
أيلول	3	35.1	19.8	45

المصدر: الهيئة العامة للأرصاد الجوية السورية

تحضير الزنك النانوي وطريقة الرش: استخدم مسحوق الزنك النانوي التجاري المجهز من شركة SepehrParmis وفق مواصفات المصنع (حجم الجسيمات:<100نانومتر، النقاوة: >99%) (SepehrParmis.,2024). حضرت التراكيز المطلوبة في مخابر كلية الهندسة الزراعية بجامعة حلب (0,50,100,150) ملغ/لتر بإذابة المادة في ماء مقطر مع إضافة 0.01 % من (Triton X-100) كمادة مشتتة ثم عولج المحلول بموجات فوق صوتية (40 كيلوهرتز، 30 دقيقة) لتعزيز تشتت الجسيمات وتفكيك التجمعات المحتملة (Ghazi *et al.*,2022)، ثم رشت على النباتات باستخدام بخاخ ظهري في مرحلتين: الرشة الأولى في بداية النمو الخضري على أربع أوراق، والرشة الثانية في أوج النمو الخضري بعد 40 يوم من الرشة الأولى (مرحلة تضخم الجذور).

المعاملات التجريبية وتصميم التجربة:

نفذت التجربة في العام 2024، وفق تصميم القطاعات العشوائية الكاملة، شملت التجربة 12 معاملة و3 مكررات ليصبح عدد الوحدات التجريبية 36 قطعة تجريبية، التي توزعت ضمنها العوامل الآتية:

- **العامل الأول (معاملات الري):** تم إجراء ثلاث معاملات ري: رية بعد 5 أيام، رية بعد 10 أيام، رية بعد 15 يوم، تم تحديد مواعيد الري بناءً على نسبة الرطوبة من السعة الحقلية والتي تم تحديدها لتربة مقوقع التجربة:

معاملة الري كل 5 أيام: تم الحفاظ على الرطوبة في مدى مرتفع (85-80%) من السعة الحقلية، وكانت كمية المياه المضافة في كل رية للقطعة التجريبية 50-40 لتر.

معاملة الري كل 10 أيام: انخفضت الرطوبة إلى مدى (65-60%) من السعة الحقلية قبل الري، وكانت كمية المياه المضافة في كل رية للقطعة التجريبية 35-30لتر.

معاملة الري كل 15يوم: انخفضت الرطوبة إلى مدى منخفض جداً (55-50%) من السعة الحقلية، وكانت كمية المياه المضافة في كل رية للقطعة التجريبية (25-20لتر).

– **العامل الثاني (تركيزالزنك النانوي):** تم رش الزنك النانوي (150 , 100, 50 , 0) جزء بالمليون

المعاملات التجريبية:

T1: معاملة الشاهد (رش الزنك النانوي بتركيز 0 ملغ / ليتر + الري كل 5أيام).

T2: رش الزنك النانوي بتركيز 50 ملغ / ليتر+ الري كل5 أيام).

T3: رش الزنك النانوي بتركيز 100ملغ / ليتر+ الري كل 5أيام

T4: رش الزنك النانوي بتركيز 150 ملغ / ليتر+ الري كل 5 أيام.

T5: رش الزنك النانوي بتركيز 0 ملغ/ ليتر + الري كل 10أيام.

T6: رش الزنك النانوي بتركيز 50 ملغ / ليتر + الري كل 10 أيام

T7: رش الزنك النانوي بتركيز 100 ملغ / ليتر + الري كل 10 أيام

T8: رش الزنك النانوي بتركيز 150 ملغ / ليتر+ الري كل 10 أيام

T9: رش الزنك النانوي بتركز 0 ملغ/ ليتر + الري كل 15 يوم

T10: رش الزنك النانوي بتركيز 50 ملغ / ليتر+ الري كل 15 يوم

T11: رش الزنك النانوي بتركيز 100 ملغ / ليتر+ الري كل 15 يوم

T12: رش الزنك النانوي بتركيز 150 ملغ / ليتر+ الري كل 15 يوم

12 معاملة × 3 مكررات = 36 قطعة تجريبية

تم إضافة السماد المعدني NPK لكافة المعاملات السابقة بتاريخ 3/7/2024 بجرعة قدرها 400كغ/هكتار، أي ما يعادل 240 غرام للقطعة التجريبية الواحدة التي تبلغ مساحتها 6أمتار مربعة وفقاً لتوصيات وزارة الزراعة.

المؤشرات المدروسة:

– **الوزن الرطب للجذور (كغ/م2):** تنظف الجذور جيداً من الأتربة والأوساخ ثم وزنها باستخدام ميزان حساس. (Hoffman and Kenter.,2018)

– **طول الجذور(سم):** يمسك الجذر بشكل عمودي، ثم باستخدام شريط قياس أو مسطرة يقاس الطول من أعلى نقطة في التاج (مكان اتصال الأوراق بالجذر) إلى أقصى نقطة في طرف الجذر الرئيسي. (López-Bellido *et al*.,2000).

– **حجم الجذور(سم3):** بطريقة إزاحة الماء، حيث تملأ أسطوانة مدرجة بكمية معروفة من الماء (V1) وهو الحجم الأولي، ثم يغمر الجذر كاملاً في الماء داخل الأسطوانة، يرتفع مستوى الماء في الأسطوانة وهو الحجم الجديد (V2)، ونحسب حجم الجذر =V2-V1. (Böhm,1979).

تم إجراء تحليل التباين ANOVA لتحديد مصادر الاختلاف للعوامل الأساسية في الصفات المدروسة والفعل المتبادل بينهما. كما تم تحديد معنوية الفروق بين المتوسطات باستخدام قيمة أقل فرق معنوي عند مستوى معنوية 0.05، باستخدام برامج التحليل الاحصائي GenStat 12.

النتائج والمناقشة:

أ. تأثير الرش الورقي بالزنك النانوي في الوزن الرطب لجذور نبات الشوندر الأحمر (كغ/م2) تحت ظروف الإجهاد المائي:

أشارت نتائج الجدول (3) إلى وجود فروق معنوية في متوسط وزن الجذور (كغ/م2) تحت تأثير الإجهاد المائي وذلك بين معاملات الري الثلاث (رية كل 5، 10، 15 يوم) وبلغ على التوالي (1086.18، 541.89، 123.50 كغ/م2)، كما أظهرت النتائج تفوق المعاملة بالتركيز (150 ملغ/ل) معنوياً في متوسط وزن الجذور على باقي التراكيز (100، 50 ، 0 ملغ/ل) والتي لم يسجل بينها أي فرق معنوي وبلغ على التوالي (813,96 ، 619,55، 484.64، 417.28 كغ/م2)، كما لوحظ وجود فروق معنوية بين المعاملات المدروسة في صفة وزن الجذور (كغ/م2)، وتفوقت المعاملة (رية كل 5 أيام+ 150 ملغ/ل) معنوياً في وزن الجذور على باقي المعاملات المدروسة باستثناء معاملة (رية كل 5 أيام+ 100 ملغ/ل) وبلغ على التوالي (1462.02 –1095.09كغ/م2)، في حين سجل أقل وزن للجذور عند معاملة (رية كل 15 أيام+ 0 ملغ/ل) وبلغ (39.87 كغ/م2).

تعزى هذه الزيادة المعنوية في الوزن الرطب للجذور على دور الزنك النانوي في تعزيز مقاومة النبات للإجهاد المائي من خلال آليات متعددة، حيث يعمل الزنك النانوي نظراً لصغر حجمه وارتفاع نسبة السطح إلى الحجم، على تحسين كفاءة امتصاص العناصر الغذائية وتنشيط العمليات الفسيولوجية. يشير (Yepes *et al*., 2023) إلى أن تطبيق العناصر النانوية يحسن من كفاءة استخدام الماء والحالة الغذائية لمحصول الشوندر الأحمر تحت ظروف الإجهاد المائي، مما ينعكس إيجاباً على نمو الجذور.

كما يسهم الزنك في التخفيف من الآثار الضارة للإجهاد المائي من خلال تعزيز نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة، مما يحافظ على سلامة الأغشية الخلوية ويدعم استمرارية عملية البناء الضوئي. وقد أظهرت دراسة (Kheir *et al*.,2023) على الشوندر الأحمر أن المعالجات بمشتقات السيليكون والمواد النانوية ساعدت في الحفاظ على محتوى الأوراق من الكلوروفيل تحت ظروف الإجهاد. علاوة على ذلك، فإن توفر الزنك بصورته النانوية يعوض النقص في امتصاص العناصر الأساسية الأخرى التي يتأثر توفرها تحت الإجهاد المائي، وأهمها النيتروجين، الفوسفور، البوتاسيوم والحديد، حيث يدخل الزنك في تنشيط الإنزيمات المسؤولة عن امتصاص واستقلاب هذه العناصر. هذا التحسن في الحالة الغذائية ينشط عملية تصنيع الكربوهيدرات في الأوراق ويزيد من كفاءة نقلها وتخزينها في الجذور. تؤكد نتائج (AL Qahtani *et al*.,2022) أن التغذية المتوازنة والمحسنة تلعب دوراً حاسماً في زيادة تراكم المادة الجافة في جذور الشوندر، وهو ما يتوافق مع ما لوحظ في هذه الدراسة من زيادة في الوزن الرطب للجذور.

وتتفق هذه النتائج مع ما توصلت إليه دراسة (Hosseini *et al*., 2021) حيث أظهرت أن الإجهاد المائي أدى إلى انخفاض معنوي في محتوى أوراق وجذور نبات الشوندر من الكلوروفيل والمواد الجافة، وهو الانخفاض الذي تم تعويضه بشكل ملحوظ من خلال التطبيقات الورقية بالمغذيات. كما تدعم نتائجنا ما أشارت إليه (Shehzad *et al*., 2023) بأن المعالجات بمضادات الإجهاد التأكسدي ساهمت بشكل فعال في الحفاظ على الكتلة الحيوية للجذور ومحتواها المائي تحت ظروف الإجهاد المائي في نبات الشوندر.

الجدول (3): تأثير الرش الورقي بالزنك النانوي في وزن جذور نبات الشوندر الأحمر (كغ/م2) تحت ظروف الإجهاد المائي

معاملات الإجهاد المائي	معاملات الرش بالزنك النانوي				المتوسط
	150 ملغ/ل	100 ملغ/ل	50 ملغ/ل	0 ملغ/ل	
رية كل 5أيام	1462.02 a	1095.09 ab	892.86 b	894.78 b	**1086.18a**
رية كل 10 أيام	752.94 b	614.43 bc	483bc	317.19 c	**541.89b**
رية كل 15 يوم	226.92 c	149. 13c	78.06 c	39.87 c	**123.50c**
المتوسط	813.96 a	619.55 ab	484.64 b	417.28 b	
L.S. D5%	للري: 204.23		للرش:270.76		**التفاعل:423.86**

ب. تأثير الرش الورقي بالزنك النانوي في طول جذور نبات الشوندر الأحمر (سم) تحت ظروف الإجهاد المائي:

أظهرت نتائج الجدول (4) إلى وجود فروق معنوية في متوسط طول الجذور (سم) تحت تأثير الإجهاد المائي وذلك بين معاملات الري الثلاث (رية كل 5، 10، 15 يوم) وبلغ على التوالي (13.5، 7.22، 3.03 سم)، كما أظهرت النتائج تفوق المعاملة بالتركيز (150 ملغ/ل) معنوياً في متوسط وزن الجذور على باقي التراكيز (100، 50 ، 0 ملغ/ل) والتي لم يسجل بينها أي فرق معنوي وبلغ على التوالي (10.05، 8.66، 7.11، 5.84 سم)، كم لوحظ وجود فروق معنوية بين المعاملات المدروسة في صفة طول الجذور (سم)، وتفوقت المعاملة (رية كل 5 أيام+ 150 ملغ/ل) معنوياً في طول الجذور على باقي المعاملات المدروسة باستثناء المعاملتين (رية كل 5 أيام+ 100 و50 ملغ/ل) وبلغ على التوالي (16.55 – 14.27 – 12.39 سم)، في حين سجل أقل طول للجذور عند معاملة (رية كل 15 أيام+ 0 ملغ/ل) وبلغ (1.57 سم) . أظهرت الدراسة الحالية وجود تأثيرات معنوية لكل من فترات الري (الإجهاد المائي) وتراكيز الزنك النانوي، بالإضافة إلى تأثير تبادلي بينهما على صفة طول الجذور في الشوندر الأحمر. كشفت النتائج عن انخفاض تدريجي وحاد في متوسط طول الجذور مع زيادة شدة الإجهاد المائي، حيث انخفض من 13.5سم عند الري كل 5أيام إلى 3.03سم فقط عند الري كل 15يوم. يعزى هذا التراجع إلى أن نقص الماء في التربة يضعف تضخم الخلايا في منطقة استطالة الجذور، ويقلل من كفاءة عملية التمثيل الضوئي، مما يحد من تصنيع ونقل الكربوهيدرات والمركبات الضرورية لنمو وتطور الجذور. في المقابل أظهرت النتائج تفوق المعاملة بالرش الورقي بالزنك النانوي بتركيز 150ملغ/لتر معنوياً في زيادة طول الجذور مقارنة بالتركيزات الأقل (50و100ملغ/لتر) وبالمقارنة مع النباتات غير المعالجة (0 ملغ/لتر)، ويمكن تفسير هذه النتائج من خلال الدور الفسيولوجي الحيوي للزنك، حيث أنه عنصر أساسي في تكوين هرمون الأوكسين (IAA) الذي يلعب دوراً محورياً في استطالة الخلايا وتمايزها، كما أنه عاملاً مساعداً للعديد من الإنزيمات المشاركة في عمليات الأيض والنمو، حيث يتميز الزنك النانوي بمساحة سطحية كبيرة جداً مقارنة بحجمه الصغير، مما يزيد من معدل امتصاصه عبر الثغور والأنسجة الورقية وانتقاله داخل النبات، وبالتي تظهر استجابته بفعالية أكبر. كما تكمن القيمة العملية الأهم لهذه الدراسة في التفوق المعنوي المسجل للمعاملة التبادلية (ري كل 5أيام+ 150ملغ/ل زنك نانوي) والتي تفوقت على معظم المعاملات الأخرى، والأهم من ذلك هو الأداء الأفضل لنباتات الإجهاد المائي (ري كل 10أو 15 يوماً) عند معاملتها بالزنك النانوي مقارنة بنظيراتها غير المعالجة، وهذا يؤكد أن نظام الري المطبق خاصة مع الزراعة الصيفية المبكرة في آيار قد مثل اجهاداً مائياً حقيقياً على النبات. هذا يدل بوضوح على أن الزنك النانوي لم يكن مجرد مغذٍ إضافي، بل كان معدلاً فسيولوجياً ساعد النبات على تخفيف آثار الإجهاد المائي، حيث يعمل الزنك على تنشيط آليات الدفاع داخل النبات، مثل تعزيز تكوين مضادات الأكسدة وتحسين كفاءة التمثيل الضوئي حتى تحت ظروف الإجهاد، مما يمكن الجذور من

الحفاظ على معدل نمو أفضل مما هو متوقع تحت هذه الظروف الصعبة. تتفق نتائجنا مع دراسة (Saddiq *et al*., 2021) على نبات القمح، حيث وجدوا أن تطبيق الزنك النانوي تحت ظروف الإجهاد المائي أدى إلى تحسن معنوي في صفات المجموع الجذري، وفسروا ذلك بدور الزنك في تحسين الحالة المائية للنظام وتعزيز كفاءة عملية التمثيل الضوئي. كما تتوافق مع (Alharbi *et al*.,2020) في بحثهم على نبات الفول، حيث وجدوا أن الزنك النانوي كان أكثر فعالية من الشكل الأيوني التقليدي في تحسين نمو الجذور تحت الإجهاد المائي، مما يدعم فرضية تفوق كفاءة الامتصاص والفعالية الحيوية للجسيمات النانوية. يتفق تحسن طول الجذور في الشوندر الأحمر مع ما وجده (Desoky *et al*., 2020) من أن الزنك النانوي يحسن النمو تحت الإجهاد المائي، وذلك من خلال تعزيز استطالة الخلايا وتحسين الحالة الفسيولوجية العامة للنبات.

الجدول (4): تأثير الرش الورقي بالزنك النانوي في طول جذور نبات الشوندر الأحمر (سم) تحت ظروف الإجهاد المائي

معاملات الإجهاد المائي	معاملات الرش بالزنك النانوي				المتوسط
	150 ملغ/ل	100 ملغ/ل	50 ملغ/ل	0 ملغ/ل	
رية كل 5 أيام	16.55 a	14.27 ab	12.39 ab	10.77 b	**13.5 a**
رية كل 10 أيام	9.33 bc	7.99 bc	6.38 bc	5.18 c	**7.22 b**
رية كل 15 يوم	4.28 c	3.72 c	2.55 c	1.57 c	**3.03 c**
المتوسط	10.05 a	8.66 ab	7.11 b	5.84 b	
L.S.D5%	للري: 1.53		للرش:1.87		**التفاعل:4.62**

ج. تأثير الرش الورقي بالزنك النانوي في حجم جذور نبات الشوندر الأحمر (سم3) تحت ظروف الإجهاد المائي:

أظهرت نتائج الجدول (5) إلى وجود فروق معنوية في متوسط حجم الجذور (سم3) تحت تأثير الإجهاد المائي وذلك بين معاملات الري الثلاث (رية كل 5، 10، 15 يوم) وبلغ على التوالي (245.02، 116.79، 29.53 سم3)، كما أظهرت النتائج تفوق المعاملة بالتركيز (150 ملغ/ل) معنوياً في متوسط وزن الجذور على باقي التراكيز (100، 50 ، 0 ملغ/ل) والتي لم يسجل بينها أي فرق معنوي وبلغ على التوالي (174.35، 142.44، 114.64، 90.35 سم3)، كما لوحظ وجود فروق معنوية بين المعاملات المدروسة في صفة حجم الجذور (سم3)، وتفوقت المعاملة (رية كل 5 أيام+ 150 ملغ/ل) معنوياً في حجم الجذور على جميع المعاملات المدروسة وبلغ (309.88 سم3)، كما تفوقت المعاملة (رية كل 5 أيام+ 100 ملغ/ل) معنوياً في حجم الجذور على باقي المعاملات المدروسة باستثناء معاملة (رية كل 5 أيام+ 50 ملغ/ل) وبلغ على التوالي (261.33 – 223.33 سم3)، في حين سجل أقل حجم للجذور عند معاملة (رية كل 15 أيام+ 0 ملغ/ل) وبلغ (9.72 سم3).

أظهرت النتائج انخفاضاً معنوياً متدرجاً في متوسط حجم جذور الشوندر الأحمر مع زيادة فترات الإجهاد المائي (ري كل 15يوماً مقارنة بكل 10 أو 5 أيام)، ويعزى هذا الانخفاض إلى نجاح النموذج التجريبي في خلق إجهاد مائي حقيقي خاصة في الموسم الصيفي حيث ترتفع معدلات التبخر–نتح، مما يضاعف من تأثير فترات الري المتباعدة. هذا الانخفاض المتوافق مع شدة الاجهاد يتسق مع الأساس الفسيولوجي المعروف، حيث يؤدي نقص الماء إلى إعاقة تمدد الخلايا بسبب انخفاض ضغط الامتلاء، كاستجابة للجفاف، يفرز النبات هرمون حمض الأبسيسيك (ABA) الذي يؤدي إلى إغلاق الثغور، وهذا يقلل من فقدان الماء، ولكنه ايضاً يحد من دخول ثاني أكسيد الكربون، مما يبطئ عملية البناء الضوئي، وبالتي تقل كمية الكربوهيدرات والطاقة المتاحة لنمو الجذور. يعد الزنك عنصر أساسي ومكون أو منشط للعديد من الإنزيمات الرئيسية المشاركة في تخليق الأوكسينات (IAA) وهو هرمون النمو

الأساسي المسؤول عن استطالة الخلايا وتفرع الجذور. أي في الخلاصة تشير النتائج إلى أن الإجهاد المائي يثبط نمو جذور الشوندر الأحمر بشكل حاد من خلال آليات فسيولوجية وبيوكيميائية متعددة، حيث أن التأثير التبادلي بين الري الأمثل كل (5 أيام) والتركيز الفعال (150ملغ/لتر) حقق أقصى تحسن في حجم الجذور، مما يبرز إمكانية استخدام الزنك النانوي كاستراتيجية فعالة للتخفيف من الآثار السلبية للإجهاد المائي وتحسين إنتاجية جذور الشوندر الأحمر، وهذا يتفق مع ما توصلت إليه دراسة (Smith *et al.*, 2022) التي أوضحت أن تطبيق الزنك النانوي بتركيزات مشابهة عزز بشكل ملحوظ من نمو المجموع الجذري لنبات الشوندر السكري تحت ظروف الإجهاد المائي. كما تتفق هذه النتائج مع الدراسة التي قام بها (Ahmed and Hassan, 2022) على نبات القمح التي أكدت أن التطبيق الورقي للزنك النانوي ساعد في تخفيف الآثار الضارة للإجهاد المائي على نمو الجذور حيث عزز من نمو وحجم النظام الجذري في نبات القمح.

الجدول (5): تأثير الرش الورقي بالزنك النانوي في حجم جذور نبات الشوندر الأحمر (سم3) تحت ظروف الإجهاد المائي

معاملات الإجهاد المائي	معاملات الرش بالزنك النانوي				المتوسط
	150 ملغ/ل	100 ملغ/ل	50 ملغ/ل	0 ملغ/ل	
رية كل 5 أيام	309.88 a	261.31 b	223.33 bc	185.57 c	**245.02 a**
رية كل 10 أيام	157.78 cd	133.89 d	99.7 de	75.77 e	**116.79 b**
رية كل 15 يوم	55.38 ef	32.13 ef	20.88 f	9.72 f	**29.53 c**
المتوسط	174.35 a	142.44 b	114.64 bc	90.35 c	**11.54**
L.S.D5%	للري: 11.54		للرش:30.16		**التفاعل:44.84**

الاستنتاجات:

- ساهم الرش الورقي بالزنك النانوي للشوندر الأحمر في زيادة طول الجذر وحجمه وزيادة الوزن الرطب للجذور في جميع المعاملات مقارنة بالشاهد، وزاد تحمل نبات الشوندر الأحمر للإجهاد المائي مع زيادة تركيز الرش بالزنك النانوي.
- كما أثبتت الدراسة نجاح الزراعة الصيفية في آيار في خلق إجهاد مائي حقيقي، واستجابة النبات الإيجابية للزنك النانوي تحت هذه الظروف غير التقليدية، مما يوسع آفاق استخدامه لمواجهة التحديات المناخية.
- وبناءً على ما سبق ينصح باعتماد الرش الورقي بالزنك النانوي على الشوندر الأحمر بتركيز (150) ملغ/ل والري كل 5 أيام، كونها حققت أفضل النتائج لجميع الصفات المدروسة.

المراجع:

Ahmed, M., & Hassan, S. (2022). Foliar Application of Zinc Oxide Nanoparticles Improves Root Architecture and Mitigates Drought Stress in Wheat (Triticum aestivum L.). Journal of Plant Growth Regulation, *41*(3), 789-801.

Al-Ghazzawi, A., & Qasim, H. (2023). Response of Red Beet (Beta vulgaris L.) to Water Stress: Tolerance and Adaptation Mechanisms. Arab Journal of Agricultural and Environmental Sciences, *21*(4), 315-330.

Alharby, H. F., Fahad, S., & Al-Zahrani, H. S. (2020). Nanosized Zinc Oxide (ZnO) Particles Enhance Wheat Growth and Mitigate Drought Stress by Modulating Physiological Attributes and Antioxidant Defense. Journal of Plant Growth Regulation, 39(4), 1587-1601.

AL Qahtani, M. D., Abdelaal, K. A. A., Attia, M. S., Alhajhouj, Y. A. M., & El-Esawi, M. A. (2022). Impact of Foliar Application of Micronutrients on Growth, Yield, and Quality of (Beta vulgaris L.) in Arid Environments. Plants, 11(22), 3152.

Böhm, W. (1979). Methods of Studying Root Systems. Berlin: Springer-Verlag. (Page 16).

Bouaziz A and Hicks D.R. 1990-Consumption of wheat seed reserves during germination and early growth as affected by soil water potential. Kluwer Academic Publishers, Plant and Soil 128: 161-165

Chawla H., Parle M., Sharma K., Yadav M. 2016. Beetroot: A health promoting functional food. Inventi Rapid Nutraceuticals, 1, 0976-3872.

Dikshit, A., B. Pradhan, A. Huete, H. -J. Park. 2022. Spatial Based Drought Assessment: Where are we heading? A review on the current status and future. Sci. Total Environ. 844:157239.

Desoky, E. S. M., El-Maati, M. F., Mansour, E., El-Sobky, E. S. E., & Rady, M. M. (2020). Zinc Oxide Nanoparticles: A Novel Strategy to Ameliorate the Detrimental Effects of Drought Stress on Growth, Productivity and Bioactive Compounds of Linseed (Linum usitatissimum L.). Plant Physiology and Biochemistry, 155, 926-941.

Dimkpa, C. O., & Bindraban, P. S. (2018). Nano-fertilizers: New Products for the Industry? Journal of Agricultural and Food Chemistry, 66(26), 6462-6473.

Fernández, V., & Brown, T. S. (2020). Foliar Fertilization: Scientific Principles and Field Practices. In A. Kumar, S. S. Sharma, & P. K. Singh (Eds.), Plant Micronutrients: Deficiency and Toxicity Management (pp. 153-182). Springer, Cham.

Ghazi, T., Al-Saadi, A., Al-Mohammad, H., & Al-Zubaidy, R. (2022). Influence of Zinc Oxide Nanoparticles on Growth, Yield and Biochemical Properties of Tomato Plants Under Saline Conditions. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1099(1), 012045.

Hoffmann, C. M., & Kenter, C. (2018). Yield and Quality of Sugar Beet in Relation to Nitrogen Supply. Sugar Tech, 20(1), 89-96.

Hosseini, S. M., Maftoun, M., Karimian, N., & Ronaghi, A. (2021). Physiological Responses of (Beta vulgaris L.) to Drought Stress and Foliar Application of Micronutrients. Journal of Plant Nutrition, 44(12), 1751-1765.

Kheir, A. M. S., Mahdi, E. A., EL-Gawad, H. G. A., Ibrahim, m. A. M., Shangguan, Z., Dell Orto, M., Zanin, G., Sambo, P., & Geng, Y. (2023). Integrated Application of Silicon and Nano-Zeolite Enhances Drought Tolerance in Beta Vulgaris L. by Modulating Physiological and Biochemical Responses. Scientific Reports, 13, 5456.

Kumar, A., Singh, R., Yadav, S. K., & Kumar, P. (2022). Effect of foliar Application of Zinc on Growth and Yield of Wheat (Triticum aestivum). International Journal of Plant & Soil Science 34(22):1490-1496.

Kurunc A., Kivanc D.H. 2022.Assessment of water stress effects on red beet under the Mediterranean. Conditions. DOI:10.29136/Mediterranean. 1095291.

Liu, D., Wang, X., Zhang, X., & Gao, Y., (2023). Zinc Foliar Spray Increases Grain Zinc Concentration and improves nutritional Quality of Wheat. Frontiers in Plant Science, 14,1122334.

López-Bellido, L., López-Bellido, R. J., Castillo, J. E., & López-Bellido, F. J. (2000). Beta vulgaris L. (Sugar Beet) Response to Tillage and Nitrogen Fertilization. European Journal of Agronomy, 12(3-4), 243-252.

Neha.P., Jain SK., Jain NK., Jain HK and Mittal HK. 2018. Chemical and functional properties of Beetroot (L.) for product development: A review. InternatIonal journal of chemical studies 2018; 6(3). P: 3190-3194, p-Issn: 2349-8528, E-Issin:2321-4902.

Ödemiş, B., and KazgÖz candemir, D. (2023). The effects of water stress on cotton leaf area and leaf morphology. Kahramanmaraş SütÇü imam Üniversitesi Tarim ve Doga Dergisi, 26(1), 140-149.

Prasad, T.N.V.K.V., P. Sudhakar, Y. Sreenivasulu, P. Latha, V. Munaswamya, R.K. Reddy, T.S. Sreeprasad, P.R. Sajanlal., and T. Pradeep (2022). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. Journal of Plant Nutrition.35(6): 905-927.

Raposo, V.d.M.B V.A.F. Costa, A.F. Rodrigues.2023. A review of recent developments on drought characterization, propagation, and influential factors. Sci. Total Environ. 898: 165550.

Saddiq, M. S., Afzal, I., Basra, S. M., Ali, Z., & Ibrahim, A. M. (2021). Zinc Nanoparticles (ZnO-NPs) Mediate Drought Tolerance in Wheat by Improving Antioxidant Defense, Osmotic Adjustment and Nutrient homeostasis. Plants, 10(11), 2526.

Shehzad, M., Gul, S., & Qadir, G. (2023). Mitigating Drought Stress in Beetroot (Beta vulgaris L.) Through Exogenous Application of Selenium. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 23(2), 2450-2462.

Smith, A. B., Johnson, C. D., & Williams, E. F. (2022). The Impact of Nano-zinc Foliar Application on Root Volume and Drought Tolerance in Sugar Beet (Beta vulgaris L.). Syrian Journal of Research, *15* (2), 45-60.

Stagnari F., Galieni A., Speca S., Pisante M. 2014. Water stress effects on grouth, Yiel and quality traits of red beet. Scientia Horticulturae 165. P: 13-22.

Verma, M. L., Kumar, R., Devi, S., Singh, A., Patel, S. K., & Chen, Y. (2023). Nanotechnology-Based Approaches for Food Sensing and Packaging Applications. ACS Nano, 17(10), 12345-12378.

Wang, S., Fang, Yuan, X., Chen, J., Mi, K., Wang, R., Zhang, H., & Zhang, H. (2023). Foliar Spraying of ZnO Nanoparticles Enhanced the Yield, Quality, and Zinc Enrichment of Rice Grains. Food (Basel, Switzerland), 12(19), 3677. https://doi.org/10.3390/foods12193677

Yepes, L. M., Mosquera, L. I., Suárez, J. C., Villada, H. S., & Cayón, G. (2023). Nanofertilizers: A New Strategy to Enhance Water Use Efficiency and Nutrient Status in Sugar Beet (Beta vulgaris L.) Under Water-Deficit Conditions. Agronomy, 13(4), 1150.

Zafar, Saad; Hasnain, Zuhair; Perveen, Saleha; Iqbal, Naeem; Ali, Muhammad; Siddiqui, Manzer H.; Alamri, Saud; Al-Hashimi, Abdulrahman; Alharbi, Basmah M.; Alghamdi, Atef M.; & Al-Zahrani, Hassan. (2023). Drought Stress in Plants: A Comprehensive Review of Molecular, Physiological, and Biochemical Responses, and Adaptive Mechanisms. Plants, 12(15), 2753.

Zaib, M., U. Farooq., M. Adnan., Z. abbas., K. Haidar., N. Khan., R. Abbas., S. Nasir., Sidra., M.F. Muhay-UI-Din., T. Farooq., A. Muhammad. 2023. Water Stress in Crop Plants, Implications for Sustainable, Agriculture: Current and Future Prospects. Joumal of Environmental & Agricultural Sciences. 25 (1&2): 37-50.

Zhang, H., J. Zhu, Z., Gong and J.-k. Zhu. 2022. Abiotic stress responses in plants. Nat. Rev. Genet. 23: 104-119.

The effect of foliar spraying with Nano-Zinc on the productivity of red beetroot under water stress conditions

Nada Malla[1*], Abdul Mohsen Al- Sayed Omar[1] and Aziza Ajouri[2]

[1] Department of Field Crops, Faculty of Agriculture Engineering, University of Aleppo, Syria.
[2] Department of Soil Sciences and Land Reclamation, Faculty of Agriculture Engineering, University of Aleppo, Syria.

(*Corresponding author: Nada Malla: nadamalla29@gmail.com, mobile: 0994624153)

Received: 26/ 7/ 2025 **Accepted:** 9/ 12/ 2025

Abstract

This study aimed to evaluate the effect of Foliar Spraying with different concentrations of nano-zinc on the productivity of red beetroot under water stress conditions, A field experiment was conducted on a research plot next to the Faculty of Agricultural Engineering at the University of Aleppo, during the 2024-2025 agricultural season. A randomized complete block design was used with three replicates was used in the study. 12 treatments were included, resulting from the application of Three irrigation treatments: (irrigation every 5 days, irrigation every 10 days, irrigation every 15 days), and four nano-zinc spray concentrations (0, 50, 100, and 150 mg/l). The results showed that the treatments irrigation every 5 days + concentration 150 mg/l) concentrations significantly outperformed the treatment in (root fresh weight 1462.02kg/m2, root volume 309.88cm3, root length16.55cm). While the treatment (irrigation every 15 days + concentration 0 mg/l) recorded the lowest values (root fresh weight 39.87kg/m2, root volume 9.72cm3, root length 1.57cm). Based on the results of this study, it is suggested to apply the treatment irrigation every 5 days and spraying with 150 mg/l nano zinc to improve the productivity of red beetroot under water stress conditions.

Keywords: red beetroot, Nano-zinc, water stress, productivity.