تأثير تراكيز حمض الساليسيليك على تحمل شتلات الطماطم لنقص الري

Effect of Salicylic Acid Concentration On Tomato Seeding Tolerance to Irrigations

عادل عمر سعيد الشعلالي[1] ، حسن عمران الرقيعي[2]

[1] قسم الاحياء كلية التربية.الزاوية، جامعة الزاوية.

[2] قسم الإنتاج النباتي كلية الطب البيطري والزراعة، جامعة الزاوية.

a.saeed@zd.edu.ly [2]H.alrgei@zu.edu.ly

Deficiency in the Zawia Region, Libya

Adel Omer Saeed AL-Shaalali[1], Hassan Omran Alrgi'i[2]

[1]Department of Biology, Faculty of Education, Zawiya, University of Zawia. Libya

2Department of Plant Production, Faculty of Veterinary Medicine and Agriculture, University of Zawia. Libya

الملخص

هدفت الدراسة إلى تقييم تأثير الرش الورقي بتراكيز مختلفة من حمض الساليسيليك في نمو شتلات الطماطم وحالتها الفسيولوجية وقدرتها على تحمل نقص الري. نفذت التجربة داخل بيت محمي بمدينة الزاوية باستخدام صنف الطماطم، وفق تصميم عشوائي كامل بتوزيع عاملي 3×2، شمل ثلاثة تراكيز من حمض الساليسيليك هي 0 و0.5 و1.0 ملي مول، ومستويين من الري هما 100 و60% من السعة الحقلية، بأربع مكررات لكل معاملة. استمرت المعاملات 21 يوما، وتم قياس ارتفاع النبات وعدد الاوراق دوريا، إلى جانب قيمSPAD ، والمحتوى المائي النسبي للأوراق، والأوزان الجافة للمجموعين الخضري والجذري، والكتلة الجافة الكلية، ونسبة الجذور إلى المجموع الخضري، والكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري.

أظهرت النتائج أن خفض الري إلى 60% من السعة الحقلية أدى إلى انخفاض معنوي في معظم مؤشرات النمو والحالة الفسيولوجية والكتلة الحيوية. وفي المقابل، خفف حمض الساليسيليك من آثار نقص الري، إذ ارتفع متوسط ارتفاع الشتلات من 23.14 سم في الشاهد غير المعامل إلى 27.84 و28.70 سم عند 0.5 و1.0 ملي مول، على التوالي. كما ارتفعت قيم SPAD من 31.34 إلى 35.58 و37.26، والمحتوى المائي النسبي من 64.72% إلى 73.87 و75.84%، والكتلة الجافة الكلية من 3.59 إلى 4.39 و4.68 غ. كذلك تحسنت الكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري من 6.21 إلى 7.02 و7.23 غ/لتر. وكان تأثير حمض الساليسيليك أوضح تحت نقص الري، مع تسجيل التركيز 1.0 ملي مول أعلى المتوسطات العددية في أغلب الصفات، رغم عدم اختلافه معنويا عن 0.5 ملي مول في عدد منها.

تخلص الدراسة إلى أن الرش الورقي بحمض الساليسيليك يمكن أن يسهم في تحسين تحمل شتلات الطماطم لنقص الري من خلال المحافظة على حالتها المائية والكلوروفيل ودعم تراكم المادة الجافة، إلا أنه لا يعوض بصورة كاملة الآثار الناتجة عن انخفاض الماء المتاح.

Abstract:

This study aimed to evaluate the effects of foliar application of different salicylic acid concentrations on the growth, physiological status, and water-deficit tolerance of tomato seedlings. The experiment was conducted under greenhouse conditions in Zawia, Libya, using the tomato cultivar *Rio Grande*. A completely randomized design with a 3 × 2 factorial arrangement was applied, including three salicylic acid concentrations (0, 0.5, and 1.0 mM) and two irrigation levels corresponding to 100 and 60% of field capacity, with four replicates per treatment. The treatments were maintained for 21 days. Plant height and leaf number were recorded periodically, while SPAD value, leaf relative water content, shoot and root dry weights, total dry biomass, root-to-shoot ratio, and apparent irrigation water use efficiency were determined at the end of the experiment.

Reducing irrigation to 60% of field capacity caused significant decreases in most growth, physiological, and biomass-related traits. In contrast, salicylic acid alleviated the adverse effects of water deficit. Under 60% field capacity, plant height increased from 23.14 cm in untreated seedlings to 27.84 and 28.70 cm at 0.5 and 1.0 mM salicylic acid, respectively. SPAD values increased from 31.34 to 35.58 and 37.26, while relative water content increased from 64.72% to 73.87 and 75.84%. Total dry biomass also increased from 3.59 to 4.39 and 4.68 g, and apparent irrigation water use efficiency improved from 6.21 to 7.02 and 7.23 g L^{-1}. The effects of salicylic acid were more pronounced under water deficit. Although 1.0 mM generally produced the highest numerical means, it did not differ significantly from 0.5 mM for several traits.

The findings indicate that foliar application of salicylic acid can improve the tolerance of tomato seedlings to reduced irrigation by maintaining leaf water status and chlorophyll content and supporting dry matter accumulation. However, salicylic acid did not fully compensate for the adverse effects of limited water availability.

استلام الورقة: 2026-01-20 - قبول الورقة: 2026-02-22 - نشر الورقة: 2026-03-02

الكلمات المفتاحية: الطماطم، حمض الساليسيليك، نقص الري، السعة الحقلية، المحتوى المائي النسبي، الكتلة الحيوية.

Keywords: : tomato, salicylic acid, water deficit, field capacity, relative water content, biomass.

1. المقدمة

تعد الطماطم من محاصيل الخضر المهمة غذائيا واقتصاديا، ويتأثر نموها بدرجة كبيرة بمدى انتظام توفر الماء، ولا سيما خلال مرحلة الشتلات التي يتشكل فيها المجموعان الخضري والجذري وتزداد حساسية النبات للتغيرات في رطوبة التربة. ويؤدي نقص الماء إلى انخفاض ضغط امتلاء الخلايا والحد من استطالتها، واضطراب التوصيل الثغري والتمثيل الضوئي، وانخفاض المحتوى المائي للاوراق وتراكم المادة الجافة، مما ينعكس سلبا على نمو النبات وكفاءته الفسيولوجية. وقد اظهرت دراسات اجريت على الطماطم أن شدة هذه الاستجابة تتباين تبعا لمستوى العجز المائي ومدته والصنف ومرحلة النمو (Chakma et al., 2021; Wadood et al., 2024).

وفي ضوء الحاجة إلى الحد من الاثار الفسيولوجية المصاحبة لنقص الماء، حظي حمض الساليسيليك باهتمام بوصفه مركبا اشاريا طبيعيا يشارك في تنظيم نمو النبات واستجابته للاجهادات غير الحيوية. ويمكن للتطبيق الخارجي بتركيز ملائم أن يسهم في المحافظة على الحالة المائية للخلايا، وتنظيم حركة الثغور، ودعم الجهاز الضوئي، والتأثير في منظومة مضادات الاكسدة، بما يساعد النبات على الحد من الضرر الناتج عن الاجهاد المائي. ومع ذلك، فإن تأثير حمض الساليسيليك لا يرتبط بزيادة تركيزه بصورة مطلقة، وانما يتحدد وفقا للتركيز المستخدم وطريقة التطبيق والنوع النباتي ومرحلة النمو وشدة الاجهاد ومدته (Khan et al., 2015; Liu et al., 2022).

وقد بينت الدراسات السابقة تباينا في استجابة الطماطم لحمض الساليسيليك تحت محدودية الماء. فقد وجد Hayat et al. (2008) أن المعاملة بحمض الساليسيليك حسنت الحالة المائية والنشاط المضاد للاكسدة وأسهمت في المحافظة على كفاءة الجهاز الضوئي في نباتات الطماطم المعرضة لنقص الماء. كما اظهر Lobato et al. (2021) تحسنا في الكتلة الجافة والتمثيل الضوئي وكفاءة استخدام الماء، مصحوبا بارتفاع نشاط انزيمات مضادات الاكسدة وانخفاض مؤشرات الضرر التأكسدي. وفي المقابل، لم تسجل Fajardo-Galviz et al. (2020) استجابة مماثلة عند استخدام حمض الساليسيليك في تهيئة بذور الطماطم خلال الانبات والنمو المبكر، مما يشير إلى أن فاعليته تتأثر بطريقة التطبيق والمرحلة العمرية وظروف الاجهاد.

وتدعم الدراسات التي استخدمت الرش الورقي هذا التباين المعتمد على ظروف المعاملة. فقد وجد Chakma et al. (2021) ، عند مقارنة الرش الورقي وتهيئة البذور تحت مستويات مختلفة من رطوبة التربة، أن الرش الورقي كان اكثر فاعلية في تحسين استجابة نباتات الطماطم، لكنه لم يلغ الاثار السلبية للعجز المائي الشديد. كما بين Aires et al. (2022) أن الرش بتراكيز تراوحت بين 0.5 و2.0 ملي مول حسن تبادل الغازات وكفاءة استخدام الماء والانتاج في الطماطم تحت العجز المائي، مع اختلاف حجم الاستجابة باختلاف التركيز. كذلك سجل Kurniawan et al. (2025) تحسنا في ارتفاع النبات وعدد الاوراق والكتلة الحيوية والمحتوى المائي النسبي والمحتوى النسبي للكلوروفيل عند استخدام حمض الساليسيليك تحت الجفاف المستحث، وهو ما يؤكد امكانية الاستفادة منه في تخفيف بعض الاثار المرتبطة بمحدودية الماء.

وعلى الرغم من هذه النتائج، لا تزال الاستجابة مرتبطة بدرجة كبيرة بتركيز حمض الساليسيليك ومستوى توفر الماء ومرحلة نمو النبات. كما تظهر الدراسات السابقة المعروضة محدودية الدراسات التي جمعت في تجربة واحدة بين شتلات الطماطم والرش الورقي بتركيزي 0.5 و1.0 ملي مول ومستويي ري يعادلان 100 و60% من السعة الحقلية، مع متابعة النمو زمنيا وقياس المحتوى النسبي للكلوروفيل والمحتوى المائي النسبي والكتلة الجافة وتوزيعها والكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري في تجربة واحدة. وتمثل هذه الجوانب الفجوة العلمية التي تنطلق منها الدراسة الحالية .

ومن هنا تتمثل مشكلة الدراسة في الحاجة إلى تحديد مدى قدرة تراكيز مختلفة من حمض الساليسيليك على تخفيف الاثار السلبية لنقص الري في شتلات الطماطم، وما إذا كانت استجابة الشتلات لهذه التراكيز تختلف باختلاف مستوى الري. وبناء على ذلك، هدفت الدراسة إلى تقييم تأثير نقص الري في نمو شتلات الطماطم وحالتها الفسيولوجية، وتحديد تأثير الرش الورقي بتركيزي 0.5 و1.0 ملي مول من حمض الساليسيليك في النمو والمحتوى النسبي للكلوروفيل والمحتوى المائي النسبي وتراكم الكتلة الحيوية والكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري، إلى جانب اختبار التفاعل بين تركيز حمض الساليسيليك ومستوى الري وتحديد التركيز الاكثر فاعلية ضمن التراكيز المختبرة. وتكتسب الدراسة اهميتها من تقديم تقييم تجريبي متكامل لاستجابة شتلات الطماطم لهذه المعاملات تحت نقص ري مضبوط، بما يسهم في توضيح امكانية استخدام حمض الساليسيليك بوصفه معاملة ورقية مساعدة لتحسين تحمل الشتلات لمحدودية الماء، دون اعتباره بديلا عن توفير الاحتياجات المائية المناسبة للنبات.

2. فرضيات الدراسة

1. يؤثر نقص الري معنويا في نمو شتلات الطماطم ومحتواها النسبي من الماء والكلوروفيل وتراكم الكتلة الحيوية.
2. تختلف استجابة شتلات الطماطم معنويا باختلاف تراكيز حمض الساليسيليك المستخدمة.
3. يوجد تفاعل معنوي بين مستوى الري وتركيز حمض الساليسيليك في التأثير على صفات النمو والصفات الفسيولوجية والكتلة الحيوية لشتلات الطماطم.
4. تسهم المعاملة بتركيز مناسب من حمض الساليسيليك في تخفيف الاثار السلبية لنقص الري مقارنة بالشتلات غير المعاملة.

3. الاطار النظري

يتناول الاطار النظري الاسس العلمية المرتبطة باستجابة شتلات الطماطم لنقص الري، ودور حمض الساليسيليك في تنظيم النمو والعمليات الفسيولوجية تحت محدودية الماء. ويبدأ بعرض الاحتياجات المائية لنبات الطماطم خلال النمو المبكر، ثم يوضح آثار نقص الري، والوظائف الفسيولوجية لحمض الساليسيليك، والآليات التي يمكن من خلالها أن يخفف تأثير النقص المائي في النبات.

1.3 نبات الطماطم واحتياجاته المائية خلال مرحلة النمو المبكر

تعد الطماطم من محاصيل الخضر المهمة التابعة للعائلة الباذنجانية، وتتميز بسرعة نموها واستجابتها الملحوظة للتغيرات في رطوبة الوسط الزراعي. وتمثل مرحلة النمو المبكر فترة مهمة في تكوين المجموعين الخضري والجذري، إذ يتحدد خلالها ارتفاع النبات، وعدد

الاوراق، ومساحة السطح القادر على التمثيل الضوئي، وقدرة الجذور على امتصاص الماء والعناصر الغذائية. لذلك قد يؤدي اضطراب الحالة المائية خلال هذه المرحلة إلى انخفاض قوة الشتلات وتراكم كتلتها الحيوية، مع اختلاف شدة الاستجابة باختلاف الصنف ومستوى النقص المائي.(Yadav et al., 2025)

يسهم الماء في المحافظة على امتلاء الخلايا واستطالتها، ويساعد على امتصاص العناصر الغذائية ونقلها وإتمام العمليات المرتبطة بالنمو والتمثيل الضوئي. ولا تمثل الاحتياجات المائية للطماطم قيمة ثابتة، بل تتغير تبعا لمرحلة النمو والظروف المناخية وخصائص التربة والصنف وطريقة الري. ويتم تقدير الاحتياج المائي للمحصول عادة من خلال البخر والنتح المرجعي ومعامل المحصول، الذي يكون منخفضا نسبيا في بداية النمو ثم يرتفع مع زيادة المجموع الخضري وبلوغ مرحلة النمو الكامل (Steduto et al., 2012; Somefun et al., 2024).

وعلى الرغم من انخفاض الاستهلاك الكلي للماء خلال مرحلة الشتلات مقارنة بالمراحل المتقدمة، فإن صغر المجموع الجذري يجعل النباتات أكثر تأثرا بالتقلبات السريعة في رطوبة التربة. وقد تبين أن خفض الماء المتاح لشتلات الطماطم يؤدي إلى تراجع النمو، والمحتوى النسبي للكلوروفيل، والمحتوى المائي النسبي للاوراق، والوزن الجاف للمجموعين الخضري والجذري. ومن ثم، يتطلب إنتاج شتلات جيدة توفير رطوبة منتظمة تسمح بالنمو دون تعريض منطقة الجذور للتشبع أو النقص الشديد في الماء (Turan et al., 2023).

2.3 نقص الري وتأثيره في النمو والحالة الفسيولوجية للنبات

يحدث نقص الري عندما تقل كمية الماء المتاحة في منطقة الجذور عن احتياجات النبات، مما يؤدي إلى انخفاض الجهد المائي وفقد جزء من ضغط الامتلاء اللازم لاستطالة الخلايا ونمو الانسجة. وتظهر آثار هذا النقص عادة في صورة تباطؤ زيادة ارتفاع النبات، وضعف تكوين الاوراق واتساعها، وانخفاض نمو المجموعين الخضري والجذري. وقد بينت التجارب على الطماطم أن خفض رطوبة التربة يؤدي إلى انخفاض نمو الساق، وتختلف شدة هذا الانخفاض باختلاف الصنف ومدة التعرض ومستوى النقص المائي (Ximénez-Embún et al., 2018).

تمثل استجابة الثغور إحدى الاستجابات المبكرة للنقص المائي، إذ يقل انفتاحها للحد من فقد الماء عن طريق النتح، إلا أن ذلك يقلل في الوقت نفسه دخول ثاني أكسيد الكربون إلى الورقة ويحد من معدل التمثيل الضوئي. ومع استمرار النقص المائي قد تنخفض كفاءة النظام الضوئي وتتراجع العمليات المرتبطة بانقسام الخلايا ونموها، مما يفسر انخفاض النمو وتراكم المادة الجافة. وقد سجلت نباتات الطماطم المعرضة للجفاف التدريجي انخفاضا في التوصيل الثغري وتمثيل ثاني أكسيد الكربون، بالتزامن مع تراجع كفاءة التمثيل الضوئي والتعبير عن الجينات المرتبطة بالبناء الضوئي ودورة الخلية.(Iovieno et al., 2016)

يعد المحتوى المائي النسبي للاوراق من المؤشرات المباشرة لقدرة النبات على المحافظة على حالته المائية، ولذلك ينخفض عادة عند محدودية الماء نتيجة اختلال التوازن بين الامتصاص عن طريق الجذور والفقد من الاوراق. كما قد تنخفض قيم SPAD الدالة على اخضرار الورقة ومحتواها النسبي من الكلوروفيل، نتيجة تأثر تكوين الاصباغ أو تسارع تحللها وانخفاض كفاءة الاجهزة الضوئية.

وأظهرت دراسة شملت عدة تراكيب وراثية من الطماطم انخفاضا عاما في المحتوى المائي النسبي والتوصيل الثغري والنتح ومعدل التمثيل الضوئي تحت نقص الماء، مع انخفاض قيم SPAD في عدد من التراكيب، مما يوضح ترابط الحالة المائية مع كفاءة البناء الضوئي.(Wadood et al., 2024)

لا يقتصر تأثير نقص الري على المجموع الخضري، بل يمتد إلى نمو الجذور وبنيتها وقدرتها على امتصاص الماء والعناصر الغذائية. وقد تعدل النباتات توزيع المادة الجافة لصالح الجذور عند النقص المعتدل، في حين يؤدي النقص الشديد أو الممتد إلى إعاقة نمو الجذور وانخفاض الكتلة الحيوية الكلية. وتتأثر هذه الاستجابة كذلك بخصائص التربة وقدرتها على الاحتفاظ بالماء؛ فقد أظهرت نباتات الطماطم المزروعة تحت 50–55% من المحتوى المائي للسعة الحقلية تغيرات في طول النبات وبنية الجذور والتمثيل الضوئي والكلوروفيل، واختلفت الاستجابة باختلاف قوام التربة(Ahmad & Li, 2021) .

3.3 حمض الساليسيليك ودوره في تنظيم نمو النبات واستجابته للاجهاد

حمض الساليسيليك مركب فينولي طبيعي يعمل بوصفه هرمونا نباتيا وإشارة تنظيمية تشارك في عدد من عمليات النمو والتطور والدفاع. ويوجد داخل النبات في صورة حرة أو مرتبطة بمركبات اخرى، كما تتغير مستوياته تبعا للنوع النباتي والعضو ومرحلة النمو والظروف البيئية. ولا يقتصر دوره على مقاومة المسببات المرضية، بل يمتد إلى تنظيم إنبات البذور، والنمو الخضري، والتمثيل الضوئي، والتنفس، والإزهار، والشيخوخة، وتكوين البذور(Rivas-San Vicente & Plasencia, 2011) .

يرتبط تأثير حمض الساليسيليك في النمو بقدرته على تنظيم انقسام الخلايا واستطالتها، وهما العمليتان الاساسيتان المحددتان لحجم الانسجة والاعضاء النباتية. كما يتداخل مع مسارات هرمونية اخرى، من بينها الاوكسين والجبرلين وحمض الابسيسيك والإيثيلين، ولذلك قد يؤثر في نمو الساق والاوراق والجذور وتوزيع المادة الجافة. وقد أوضحت الدراسات أن حمض الساليسيليك يشارك في تنظيم نمو الجذور وتكوين الجذور الجانبية واتجاه نموها من خلال تأثيره في تكوين الاوكسين ونقله داخل الخلايا (Li et al., 2022; Bagautdinova et al., 2022).

يؤدي حمض الساليسيليك كذلك دورا مهما في استجابة النبات لعوامل الاجهاد غير الحيوي، إذ يسهم في تنظيم الاتزان بين إنتاج انواع الاكسجين التفاعلية وإزالتها. وتعد هذه الجزيئات جزءا من إشارات الاستجابة للاجهاد عند وجودها بمستويات معتدلة، إلا أن تراكمها المفرط يسبب أكسدة الدهون والبروتينات والاصباغ وإتلاف الاغشية الخلوية. ويمكن لحمض الساليسيليك تعديل نشاط إنزيمات الدفاع المضادة للاكسدة، والمحافظة على سلامة الاغشية، وتنظيم تراكم المذابات المتوافقة والحالة الغذائية، مما يساعد النبات على استمرار عملياته الحيوية عند تعرضه للظروف غير الملائمة(Khan et al., 2015) .

تعتمد استجابة النبات لحمض الساليسيليك على التركيز المستخدم، وطريقة التطبيق، ومدة المعاملة، والنوع النباتي ومرحلة النمو وشدة الاجهاد. فقد تؤدي الجرعات الملائمة إلى تحسين النمو وكفاءة التمثيل الضوئي وتنشيط آليات الحماية، في حين يمكن أن تسبب التراكيز المرتفعة اختلالا في الاتزان التأكسدي أو تثبيطا لبعض عمليات النمو. ولذلك لا ترتبط فاعلية حمض الساليسيليك

بالزيادة المطلقة في تركيزه، بل باختيار تركيز يحقق التوازن بين تنظيم النمو وتنشيط الاستجابة الدفاعية دون إحداث آثار مثبطة (Liu et al., 2022; Khan et al., 2015).

4.3 دور حمض الساليسيليك في تخفيف آثار نقص الري

يسهم حمض الساليسيليك في تخفيف تأثير نقص الري من خلال تنظيم مجموعة مترابطة من الاستجابات المائية والفسيولوجية والكيميائية الحيوية. فعند انخفاض الماء المتاح، يساعد التطبيق الخارجي بتركيز ملائم على تحسين قدرة النبات على الاحتفاظ بالماء وتنظيم حركة الثغور والمحافظة على كفاءة العمليات الحيوية. كما يؤثر في التفاعل بين الإشارات الهرمونية المرتبطة بالجفاف، ولا سيما حمض الابسيسيك، مما يدعم استجابة النبات لمحدودية الماء ويقلل اضطراب النمو الناتج عنها(Aires et al., 2025) .

يرتبط تأثير حمض الساليسيليك أيضا بالمحافظة على الجهاز الضوئي تحت نقص الري. إذ يمكن أن يحد من تدهور أصباغ الكلوروفيل، ويحسن تمثيل ثاني أكسيد الكربون وكفاءة الكربوكسيلاز، ويساعد على استمرار إنتاج المواد الكربوهيدراتية اللازمة للنمو. وقد بينت دراسة حقلية على الطماطم أن الرش الورقي بحمض الساليسيليك حسن تبادل الغازات وكفاءة استخدام الماء والإنتاج تحت العجز المائي، إلا أن مقدار الاستجابة اختلف باختلاف التركيز المستخدم ومدة التعرض للنقص المائي (Aires et al., 2022).

يدعم حمض الساليسيليك الحالة المائية للخلايا من خلال تنظيم تراكم بعض المذابات العضوية، مثل السكريات الذائبة والبرولين، التي تسهم في الضبط الاسموزي والمحافظة على ضغط الامتلاء. كما يمكن أن ينشط منظومة مضادات الاكسدة ويحد من تراكم انواع الاكسجين التفاعلية وأكسدة مكونات الاغشية. وتساعد هذه الاستجابات على حماية الخلايا والكلوروفيل، والمحافظة على المحتوى المائي النسبي للاوراق، واستمرار تراكم المادة الجافة بدرجة أفضل تحت نقص الري(Aires et al., 2025) .

تعتمد فاعلية حمض الساليسيليك على التركيز وطريقة التطبيق ومرحلة النمو وشدة نقص الري. وقد أظهرت التجارب على الطماطم أن الرش الورقي وتهيئة البذور بحمض الساليسيليك يمكن أن يحسنا النمو والإنتاجية المائية والمحصول تحت الجفاف، مع اختلاف النتائج بين طرق المعاملة ومستويات الرطوبة. لذلك يعد اختبار أكثر من تركيز تحت مستوى ري كامل وآخر منخفض ضروريا لتحديد التركيز الذي يحقق أفضل استجابة دون إحداث أثر مثبط في النمو أو العمليات الفسيولوجية (Chakma et al., 2021; Aires et al., 2022).

4. الدراسات السابقة

تناولت دراسات متعددة دور حمض الساليسيليك في تحسين استجابة النباتات لنقص الماء، واختلفت في المحصول ومرحلة النمو وطريقة تطبيق الحمض وشدة الاجهاد والمؤشرات المقاسة. وقد ركزت غالبية الدراسات المباشرة على الطماطم على النمو والتمثيل الضوئي والحالة المائية والكتلة الحيوية والإنتاج، في حين تناولت دراسات اخرى مرحلة الإنبات والنمو المبكر أو اختبرت محاصيل خضر وفاكهة تحت مستويات مختلفة من السعة الحقلية.

درس Hayat et al. (2008) تأثير الرش بحمض الساليسيليك بتركيز 10مول في نباتات الطماطم المعرضة لنقص الماء خلال مرحلتين من النمو. وأدى الاجهاد إلى انخفاض الكلوروفيل والمحتوى المائي النسبي والجهد المائي ومؤشرات التمثيل الضوئي، في حين حسنت المعاملة بحمض الساليسيليك الحالة المائية والنشاط المضاد للاكسدة، وأسهمت في حماية الجهاز الضوئي ودعم النمو. وفي المقابل، وجد Galviz-Fajardo et al. (2020) أن تهيئة بذور الطماطم بتركيزي 25 و50 ميكرومول لم تحد من أثر انخفاض قدرة الوسط على الاحتفاظ بالماء خلال الإنبات والنمو المبكر، بل زادت بعض مؤشرات الاجهاد التأكسدي. وتشير هذه النتيجة إلى أن تأثير حمض الساليسيليك قد يختلف باختلاف طريقة التطبيق ومرحلة النمو وشدة النقص المائي.

واختبر Lobato et al. (2021) تأثير المعاملة الخارجية بتركيز 0.1 ملي مول في نباتات الطماطم تحت الري الطبيعي ونقص الماء. وأظهرت النتائج تحسنا في الكتلة الجافة الكلية والتمثيل الضوئي وكفاءة استخدام الماء، إلى جانب ارتفاع نشاط إنزيمات مضادات الاكسدة وانخفاض مؤشرات الضرر التأكسدي. كما بينت التغيرات التشريحية أن حمض الساليسيليك أسهم في المحافظة على كفاءة الانسجة الورقية تحت الاجهاد. وتؤكد هذه النتائج ارتباط تحسن تراكم المادة الجافة بالمحافظة على الجهاز الضوئي والاتزان التأكسدي للنبات.

وأجرى Chakma et al. (2021) تجربتين على طماطم العنب لمقارنة الرش الورقي وتهيئة البذور بخمسة تراكيز من حمض الساليسيليك تحت مستويات رطوبة بلغت 50 و75 و100% من السعة الحقلية. وأظهر الرش الورقي فاعلية أكبر من تهيئة البذور، إذ رفع التركيز 150 ملغ/لتر محصول الثمار بنسبة 41% مقارنة بالشاهد، بينما حققت التهيئة بتركيز 100 ملغ/لتر زيادة بلغت 33%. ومع ذلك، لم تتمكن المعاملات من إزالة الآثار الشديدة لمستوى 50% من السعة الحقلية، مما يدل على ارتباط فاعلية الحمض بدرجة النقص المائي.

وفي تجربة حقلية استمرت موسمين، اختبر Aires et al. (2022) خمسة تراكيز من حمض الساليسيليك تراوحت بين 0 و2.0 ملي مول في نباتات الطماطم المعرضة لنقص مائي مستمر لمدة 45 يوما. وأدى الرش الورقي إلى الحد من انخفاض تبادل الغازات وكفاءة استخدام الماء والإنتاج، وكان التحسن مرتبطا بزيادة تمثيل ثاني أكسيد الكربون وكفاءة الكربوكسيلاز وانخفاض تساقط الازهار وارتفاع عدد الثمار. وتتميز هذه الدراسة بتضمنها التركيزين 0.5 و1.0 ملي مول المستخدمين في الدراسة الحالية، إلا أنها ركزت على النباتات في مرحلة الإزهار والإثمار أكثر من مرحلة الشتلات.

أما Kurniawan et al. (2025) فقد درسوا تهيئة البذور والرش الورقي بتراكيز 0 و50 و75 و100 ميكرومول في الطماطم تحت الجفاف المستحث باستخدام PEG 6000. وأدى الرش الورقي إلى تحسين ارتفاع النبات وعدد الاوراق والكتلة الحيوية والمحتوى المائي النسبي والمحتوى النسبي للكلوروفيل تحت الاجهاد. وتعد هذه الدراسة قريبة من الدراسة الحالية من حيث مرحلة النمو والمؤشرات المقاسة، لكنها تختلف عنها في طريقة إحداث نقص الماء، إذ استخدمت مادة PEG بدلا من التحكم الوزني في رطوبة التربة.

وعلى المستوى العربي، درس أبو عسلي وآخرون (2024) تأثير نقع بذور الخيار البلدي في تراكيز 0 و1 و50 و150 ملغ/لتر من حمض الساليسيليك تحت مستويات ري بلغت 60 و80 و100% من الري الكامل. وأدى انخفاض مستوى الري إلى تراجع مؤشرات الإنبات

ونمو البادرات، في حين تفوق التركيز 50 ملغ/لتر في معظم الصفات، وأظهر التفاعل بين الحمض ومستوى الري تحسنا واضحا مقارنة بالشاهد. وتقترب هذه الدراسة من التصميم الحالي في استخدامها مستوى 60% وتحليل التفاعل بين العاملين، لكنها تختلف في المحصول وطريقة المعاملة.

كما اختبرت تينه وعبيد (2024) الرش الورقي بخمسة تراكيز من حمض الساليسيليك تحت 50 و75 و100% من السعة الحقلية في هجينين من الفريز خلال ثلاثة مواسم. وأدى نقص الري إلى انخفاض عدد الاوراق والمساحة الورقية وعدد المدادات والإنتاجية، بينما حسنت معاملات الحمض النمو الخضري والإنتاج تحت مستويي الري المنخفضين. وتكتسب هذه الدراسة أهمية خاصة لاستخدامها الرش الورقي والتركيزين 0.5 و1.0 ملي مول ومستويات محددة من السعة الحقلية، رغم اختلاف النوع النباتي ومرحلة التقييم.

توضح الدراسات السابقة اتفاقا عاما على أن التطبيق الخارجي لتركيز ملائم من حمض الساليسيليك يمكن أن يخفف بعض آثار نقص الماء في النمو والحالة المائية والكلوروفيل والكتلة الحيوية وكفاءة استخدام الماء، مع وجود نتائج متباينة تبعا لطريقة التطبيق وشدة الاجهاد ومرحلة النمو. ومع ذلك، لم تجمع الدراسات المعروضة بصورة مطابقة بين شتلات الطماطم والرش الورقي بتركيزي 0.5 و1.0 ملي مول، والري عند 100 و60% من السعة الحقلية، والقياسات المتتابعة للنمو، إلى جانب SPAD والمحتوى المائي النسبي والكتلة الجافة وتوزيعها والكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري. ومن هنا تركز الدراسة الحالية على تحديد استجابة شتلات الطماطم لهذه التراكيز تحت نقص ري مضبوط، مع اختبار التأثيرين الرئيسين والتفاعل بينهما.

5. المواد والطرق

1.5 موقع التجربة والمادة النباتية

تم تنفيذ التجربة خلال الفترة من 1 فبراير إلى 23 مارس 2026 داخل بيت محمي تعليمي بمدينة الزاوية، ليبيا، باستخدام شتلات الطماطم صنف Rio Grande تم زرع البذور في صواني إنبات بتاريخ 1 فبراير، وبدأ الإنبات في 6 فبراير، ثم تم نقل الشتلات المتجانسة في 21 فبراير إلى اصص بلاستيكية سعة 3 لترات. احتوى كل اصيص على 2.5 كغ من التربة الجافة، وتم الإبقاء على نبات واحد في كل اصيص. وتم تسجيل القياسات الاساسية في 28 فبراير قبل بدء تطبيق المعاملات.

2.5 التصميم التجريبي

تم استخدام التصميم العشوائي الكامل بترتيب عاملي 3 × 2. اشتمل العامل الاول على ثلاثة تراكيز من حمض الساليسيليك هي 0 و0.5 و1.0 ملي مول، بينما اشتمل العامل الثاني على مستويين من الري هما 100% و60% من السعة الحقلية. نتج عن ذلك ست معاملات، وتم تخصيص اربعة مكررات لكل معاملة، ليبلغ إجمالي الوحدات التجريبية 24 اصيصا. وتم اعتبار الاصيص المحتوي على نبات واحد وحدة تجريبية مستقلة. كما تم توزيع الاصص عشوائيا داخل البيت المحمي وتدوير مواقعها يوميا للحد من تأثير الاختلافات الموضعية.

3.5 تحضير حمض الساليسيليك وتطبيقه

تم تحضير محلول حمض الساليسيليك بتركيز 0.5 ملي مول بإذابة 69.06 ملغ في لتر واحد من الماء المقطر، بينما تم تحضير تركيز 1.0 ملي مول بإذابة 138.12 ملغ في لتر واحد. وتم استخدام قطرات قليلة من هيدروكسيد الصوديوم عند الحاجة لتسهيل الذوبان وضبط الرقم الهيدروجيني، مع إضافة مادة ناشرة بتركيز 0.05%. أما معاملة الشاهد فقد تم رشها بالماء المقطر المحتوي على المادة الناشرة دون إضافة حمض الساليسيليك.

تم تطبيق الرش الورقي ثلاث مرات في 1 و8 و15 مارس 2026، بما يعادل اليوم صفر واليوم السابع واليوم الرابع عشر من فترة المعاملة. وتم استخدام 15 مل من محلول الرش لكل نبات في كل موعد، مع تطبيق الكمية نفسها على جميع النباتات.

4.5 تطبيق معاملات الري

تم تحديد وزن الهدف لكل اصيص عند 100% من السعة الحقلية بإضافة كمية الماء المحتجزة عند السعة الحقلية إلى الوزن الجاف الاساسي للاصيص والتربة. وتم تحديد وزن الهدف عند 60% من السعة الحقلية وفقا للمعادلة الاتية:

وزن الهدف عند 60% من السعة الحقلية = الوزن الجاف الاساسي للاصيص + (ماء السعة الحقلية × 0.60).

تم تطبيق معاملات الري لمدة 21 يوما، من 1 إلى 21 مارس 2026. وتم وزن جميع الاصص يوميا في الساعة الثامنة صباحا قبل الري، ثم تم إضافة كمية الماء اللازمة لإعادة كل اصيص إلى الوزن المستهدف للمعاملة المخصصة له. وتم حساب كمية الماء المضافة يوميا وفقا للمعادلة الاتية:

كمية الماء المضافة (مل) = [وزن الهدف (كغ) − وزن الاصيص قبل الري (كغ)] × 1000.

كما تم تسجيل كمية مياه الري المضافة يوميا لكل اصيص، ثم تم حساب إجمالي المياه المضافة خلال فترة المعاملة.

5.5 قياسات النمو

تم قياس ارتفاع النبات بالسنتيمتر وعدد الاوراق الحقيقية عند بداية التجربة، ثم بعد 7 و14 و21 يوما من بدء المعاملات. وتم استخدام القياسات المتتابعة لمتابعة تطور النمو، بينما تم اعتماد قياسات اليوم الحادي والعشرين لتقييم التأثير النهائي للمعاملات.

6.5 المحتوى النسبي للكلوروفيل

تم قياس المحتوى النسبي للكلوروفيل في اليوم الحادي والعشرين باستخدام جهاز .SPAD وتم أخذ ثلاث قراءات من اوراق مكتملة النمو لكل نبات، مع تجنب العرق الوسطي للورقة. ثم تم حساب متوسط القراءات الثلاث ليمثل قيمة واحدة لكل وحدة تجريبية.

7.5 المحتوى المائي النسبي للاوراق

تم تحديد المحتوى المائي النسبي باستخدام خمس اقراص ورقية من أحدث ورقة مكتملة النمو لكل نبات. وتم تسجيل الوزن الطازج، ثم وزن الامتلاء بعد تشبيع الاقراص بالماء، وبعد ذلك تم تحديد الوزن الجاف. وتم حساب المحتوى المائي النسبي وفقا للمعادلة الاتية:

المحتوى المائي النسبي (%) = [(الوزن الطازج − الوزن الجاف) ÷ (وزن الامتلاء − الوزن الجاف)] × 100.

8.5 تقدير الكتلة الحيوية

تم إجراء الحصاد النهائي في 21 مارس 2026، وتم فصل المجموع الخضري عن الجذور وتسجيل الوزن الطازج لكل منهما. ثم تم تجفيف العينات عند درجة حرارة 65°م لمدة 48 ساعة، وتم تسجيل الوزن الجاف في 23 مارس. وتم حساب الكتلة الجافة الكلية بجمع الوزن الجاف للمجموع الخضري والجذور، كما تم حساب نسبة الجذور إلى المجموع الخضري بقسمة الوزن الجاف للجذور على الوزن الجاف للمجموع الخضري.

وتم حساب الكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري وفقا للمعادلة الاتية:

الكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري (غ/لتر) = الكتلة الجافة الكلية (غ) ÷ إجمالي مياه الري المضافة خلال 21 يوما (لتر).

9.5 التحليل الاحصائي

تم حساب المتوسطات والانحرافات المعيارية للصفات المدروسة، ثم تم إجراء تحليل التباين الثنائي لاختبار تأثير تركيز حمض الساليسيليك ومستوى الري والتفاعل بينهما في القياسات النهائية. وشمل التحليل ارتفاع النبات، وعدد الاوراق، وقيمةSPAD ، والمحتوى المائي النسبي، والوزن الجاف للمجموع الخضري، والكتلة الجافة الكلية، والكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري. وتم اختبار طبيعية البواقي باستخدام اختبارShapiro–Wilk ، كما تم اختبار تجانس التباينات باستخدام اختبارLevene ، واعتمد مستوى دلالة إحصائية مقداره 0.05.

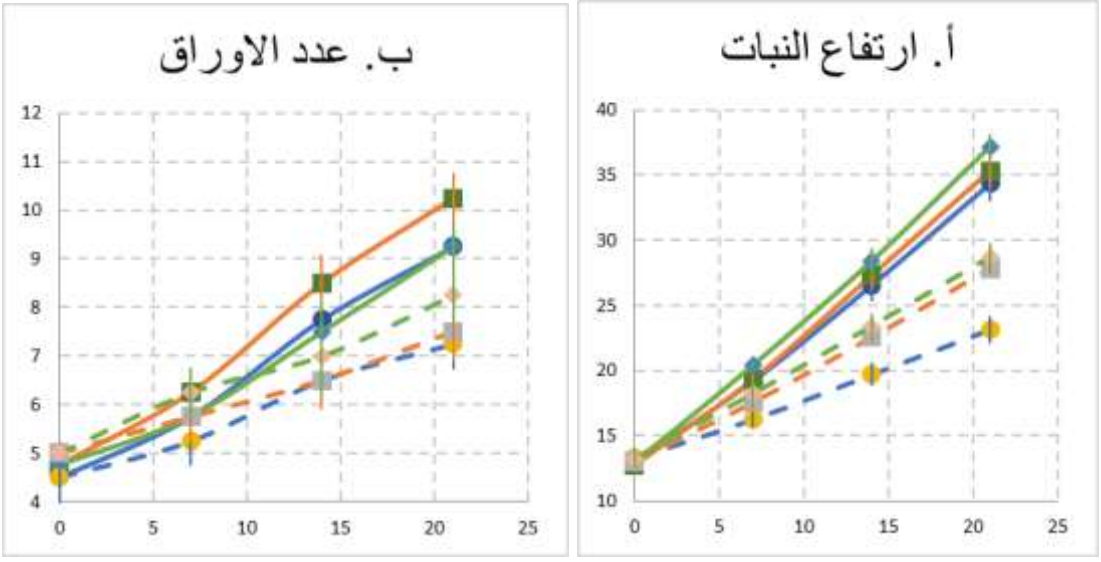
6. النتائج

يعرض هذا القسم استجابة شتلات الطماطم لتراكيز حمض الساليسيليك تحت مستويي الري، اعتمادا على التغيرات المسجلة في صفات النمو والمؤشرات الفسيولوجية والكتلة الحيوية واستخدام مياه الري. وتم تحليل تأثير كل من تركيز حمض الساليسيليك ومستوى الري والتفاعل بينهما، مع عرض المتوسطات ومؤشرات الدلالة الاحصائية والمقارنات بين المعاملات وفقا لطبيعة كل صفة.

1.6 تجانس الشتلات وتطور صفات النمو خلال فترة المعاملة

أظهرت القياسات المسجلة قبل تطبيق المعاملات تجانسا واضحا بين شتلات الطماطم؛ إذ تراوح متوسط الارتفاع الابتدائي بين 12.74 و13.29 سم، بينما تراوح متوسط عدد الاوراق بين 4.50 و5.00 اوراق للنبات. ولم تظهر فروق معنوية بين المعاملات في ارتفاع النبات ($p = 0.734$) أو عدد الاوراق($p = 0.431$) ، مما يؤكد تقارب الحالة الابتدائية للشتلات قبل بدء معاملات حمض الساليسيليك والري.

ازدادت قيم ارتفاع النبات وعدد الاوراق تدريجيا في جميع المعاملات خلال مدة التجربة، إلا أن الاختلافات بين المعاملات بدأت في الظهور بعد اليوم السابع، وأصبحت أكثر وضوحا في اليومين الرابع عشر والحادي والعشرين. وكما يوضح الشكل 1، أدى الري عند 60% من السعة الحقلية إلى انخفاض تطور الارتفاع وعدد الاوراق، وكان هذا الانخفاض أكثر وضوحا في النباتات غير المعاملة بحمض الساليسيليك. في المقابل، حافظت النباتات المعاملة بتركيزي 0.5 و1.0 ملي مول على مستويات نمو أعلى تحت نقص الري، وسجل التركيز 1.0 ملي مول أعلى متوسط نهائي للارتفاع وعدد الاوراق ضمن معاملات نقص الري.



الشكل 1. تطور ارتفاع النبات وعدد الاوراق في شتلات الطماطم المعاملة بتراكيز مختلفة من حمض الساليسيليك تحت مستويي الري خلال فترة التجربة.

يمثل الجزء (أ) متوسط ارتفاع النبات، ويمثل الجزء (ب) متوسط عدد الاوراق عند 0 و7 و14 و21 يوما من بدء المعاملات. وتمثل القيم المتوسط ± الانحراف المعياري لأربعة مكررات.

2.6 التأثيرات الرئيسة والتفاعلية لحمض الساليسيليك ومستوى الري

أظهر تحليل التباين الثنائي أن مستوى الري أثر معنويا في جميع الصفات المدروسة، حيث سجلت قيم دلالة أقل من 0.001، مما يبين أن خفض الري إلى 60% من السعة الحقلية أدى إلى تغير واضح في نمو شتلات الطماطم وحالتها الفسيولوجية وتراكم كتلتها الحيوية. كما كان التأثير الرئيس لتركيز حمض الساليسيليك معنويا في ارتفاع النبات، والمحتوى النسبي للكلوروفيل، والمحتوى المائي النسبي، والوزن الجاف للمجموع الخضري، والكتلة الجافة الكلية، والكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري، في حين لم يصل تأثيره في عدد الاوراق إلى مستوى الدلالة الاحصائية.($p = 0.059$)

وكما يوضح الجدول 1، كان التفاعل بين تركيز حمض الساليسيليك ومستوى الري معنويا في ارتفاع النبات، وعدد الاوراق، والمحتوى النسبي للكلوروفيل، والمحتوى المائي النسبي، والكتلة الجافة الكلية، والكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري. وتبين هذه النتيجة أن استجابة هذه الصفات لتراكيز حمض الساليسيليك اختلفت باختلاف مستوى الري. في المقابل، لم يكن التفاعل معنويا في الوزن الجاف للمجموع الخضري($p = 0.158$) ، رغم وجود تأثير معنوي مستقل لكل من حمض الساليسيليك ومستوى الري في هذه الصفة.

الجدول 1. نتائج تحليل التباين الثنائي لتأثير تركيز حمض الساليسيليك ومستوى الري والتفاعل بينهما في الصفات المدروسة

الصفة	حمض الساليسيليك F	p	مستوى الري F	p	التفاعل F	p
ارتفاع النبات النهائي	33.47	<0.001	450.94	<0.001	6.82	**0.006**
عدد الاوراق النهائي	3.32	0.059	83.53	<0.001	5.84	**0.011**
المحتوى النسبي للكلوروفيلSPAD	82.83	<0.001	749.83	<0.001	16.19	**<0.001**
المحتوى المائي النسبيRWC	74.21	<0.001	1125.64	<0.001	20.97	**<0.001**
الوزن الجاف للمجموع الخضري	38.10	<0.001	456.37	<0.001	2.05	**0.158**
الكتلة الجافة الكلية	53.19	<0.001	550.75	<0.001	3.73	**0.044**
الكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري	20.85	<0.001	246.15	<0.001	3.78	**0.042**

ملاحظة: درجات الحرية لحمض الساليسيليك والتفاعل = 2، ولمستوى الري = 1، وللخطأ = 18. وتم اعتماد مستوى دلالة مقداره 0.05.

3.6 استجابة صفات النمو والحالة الفسيولوجية للمعاملات

أظهرت النتائج النهائية اختلاف استجابة صفات النمو والحالة الفسيولوجية باختلاف مستوى الري وتركيز حمض الساليسيليك. وكما يبين الجدول 2، أدى خفض الري إلى 60% من السعة الحقلية إلى انخفاض واضح في ارتفاع النبات وعدد الاوراق والمحتوى النسبي للكلوروفيل والمحتوى المائي النسبي مقارنة بالري الكامل. وكان الانخفاض أشد في النباتات غير المعاملة بحمض الساليسيليك، إذ سجلت هذه المعاملة أدنى المتوسطات تحت نقص الري، وبلغت 23.14 سم لارتفاع النبات، و7.25 ورقة للنبات، و31.34 وحدةSPAD ، و64.72% للمحتوى المائي النسبي.

أدى الرش الورقي بحمض الساليسيليك إلى تحسين استجابة الشتلات تحت نقص الري. فقد رفع التركيز 0.5 ملي مول متوسط ارتفاع النبات إلى 27.84 سم، بينما بلغ 28.70 سم عند التركيز 1.0 ملي مول، دون فرق معنوي بين التركيزين. كما سجل التركيز 1.0 ملي مول أعلى متوسط لعدد الاوراق تحت نقص الري، وبلغ 8.25 أوراق للنبات، في حين جاءت معاملة 0.5 ملي مول في مرتبة وسطية بين التركيز 1.0 ملي مول ومعاملة الشاهد.

كانت استجابة المؤشرات الفسيولوجية أكثر وضوحا؛ إذ ارتفعت قيمة SPAD تحت نقص الري من 31.34 في النباتات غير المعاملة إلى 35.58 و37.26 عند استخدام 0.5 و1.0 ملي مول، على التوالي، وكانت الفروق بين التراكيز الثلاثة معنوية. كما ارتفع المحتوى المائي النسبي من 64.72% في معاملة الشاهد إلى 73.87 و75.84% عند التركيزين 0.5 و1.0 ملي مول، على التوالي. ولم يظهر فرق معنوي بين التركيزين في هذه الصفة، رغم تسجيل التركيز 1.0 ملي مول أعلى متوسط عددي.

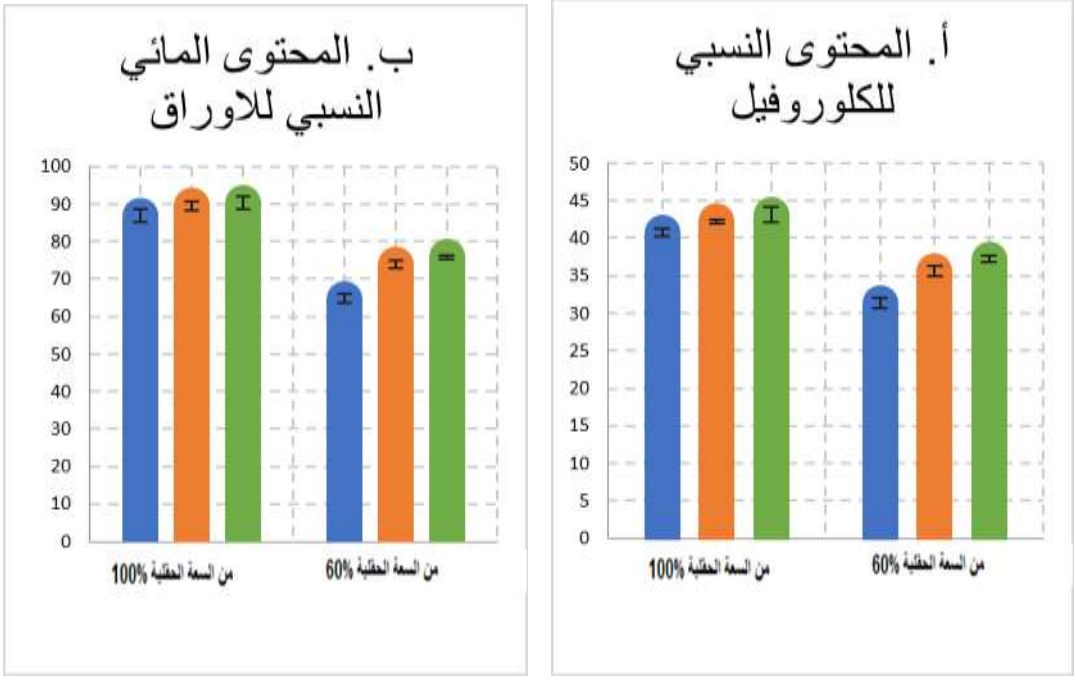
تحت الري الكامل، كانت استجابة الصفات لحمض الساليسيليك أقل وضوحا مقارنة بنقص الري. ومع ذلك، سجل التركيز 1.0 ملي مول أعلى متوسط لارتفاع النبات، بينما حقق التركيزان 0.5 و1.0 ملي مول قيما أعلى للمحتوى النسبي للكلوروفيل والمحتوى المائي النسبي مقارنة بالنباتات غير المعاملة. وتوضح هذه النتائج أن فاعلية حمض الساليسيليك كانت أكثر بروزا عند تعرض الشتلات لنقص الري، وهو ما يتفق مع معنوية التفاعل بين العاملين في هذه الصفات.

الجدول 2. تأثير تراكيز حمض الساليسيليك ومستويي الري في صفات النمو والحالة الفسيولوجية لشتلات الطماطم بعد 21 يوما من المعاملة

مستوى الري (% من السعة الحقلية)	حمض الساليسيليك (ملي مول)	ارتفاع النبات (سم)	عدد الاوراق	SPAD	المحتوى المائي النسبي (%)
100	0.0	34.36 ± 1.24^{b}	9.25 ± 0.50^{b}	40.83 ± 0.50^{b}	**86.85 ± 1.71^{b}**
100	0.5	35.32 ± 1.39^{ab}	10.25 ± 0.50^{a}	42.23 ± 0.31^{a}	**89.52 ± 1.22^{a}**
100	1.0	37.20 ± 0.88^{a}	9.25 ± 0.50^{b}	43.21 ± 1.05^{a}	**90.32 ± 1.61^{a}**
60	0.0	23.14 ± 1.00^{b}	7.25 ± 0.50^{b}	31.34 ± 0.71^{c}	**64.72 ± 1.21^{b}**
60	0.5	27.84 ± 0.42^{a}	7.50 ± 0.58^{ab}	35.58 ± 0.68^{b}	**73.87 ± 0.99^{a}**
60	1.0	28.70 ± 1.07^{a}	8.25 ± 0.50^{a}	37.26 ± 0.43^{a}	**75.84 ± 0.50^{a}**

ملاحظة: تمثل القيم المتوسط ± الانحراف المعياري لأربعة مكررات. تشير الحروف المختلفة داخل مستوى الري نفسه وفي العمود نفسه إلى وجود فروق معنوية بين تراكيز حمض الساليسيليك وفقا لاختبار Tukey عند مستوى دلالة 0.05.

ويعرض الشكل 2 نمط التفاعل بين تركيز حمض الساليسيليك ومستوى الري في كل من المحتوى النسبي للكلوروفيل والمحتوى المائي النسبي. ويظهر الشكل اتساع الفروق بين تراكيز حمض الساليسيليك تحت مستوى الري 60% مقارنة بالري الكامل، ولا سيما عند الانتقال من معاملة الشاهد إلى التركيزين 0.5 و1.0 ملي مول.



الشكل 2. استجابة المحتوى النسبي للكلوروفيل والمحتوى المائي النسبي في شتلات الطماطم لتراكيز حمض الساليسيليك تحت مستويي الري.

يمثل الجزء (أ) متوسط قيمSPAD ، ويمثل الجزء (ب) متوسط المحتوى المائي النسبي للاوراق بعد 21 يوما من المعاملة. وتمثل الاعمدة المتوسط ± الانحراف المعياري لأربعة مكررات.

4.6 استجابة الكتلة الحيوية ومؤشرات استخدام مياه الري

أظهرت نتائج الحصاد النهائي أن خفض مستوى الري إلى 60% من السعة الحقلية أدى إلى انخفاض واضح في تراكم المادة الجافة في شتلات الطماطم. وكما يبين الجدول 3، انخفضت الكتلة الجافة الكلية في النباتات غير المعاملة بحمض الساليسيليك من 5.50 غ تحت الري الكامل إلى 3.59 غ تحت نقص الري، بما يعادل انخفاضا قدره 34.7%. كما انخفض كل من الوزن الجاف للمجموع الخضري والجذور، مما يؤكد تأثر النمو الكلي للنبات بانخفاض كمية الماء المتاحة.

أسهمت المعاملة بحمض الساليسيليك في الحد من انخفاض الكتلة الحيوية تحت نقص الري؛ إذ ارتفع الوزن الجاف للمجموع الخضري من 2.67 غ في النباتات غير المعاملة إلى 3.31 و3.54 غ عند التركيزين 0.5 و1.0 ملي مول، على التوالي. كما ارتفع الوزن الجاف للجذور من 0.93 إلى 1.08 و1.14 غ، بينما ازدادت الكتلة الجافة الكلية من 3.59 غ إلى 4.39 و4.68 غ، بما يمثل تحسنا قدره 22.3 و30.3% مقارنة بمعاملة الشاهد تحت مستوى الري نفسه. وتفوق التركيزان معنويا على الشاهد، في حين لم يكن الفرق بينهما معنويا، رغم تسجيل التركيز 1.0 ملي مول أعلى متوسط عددي.

كانت نسبة الجذور إلى المجموع الخضري أعلى عموما تحت نقص الري مقارنة بالري الكامل، إلا أنها لم تختلف معنويا بين تراكيز حمض الساليسيليك داخل مستوى الري نفسه. وتراوحت هذه النسبة تحت نقص الري بين 0.324 و0.349، مقابل 0.262–0.274 تحت الري الكامل، مما يشير إلى تغير نسبي في توزيع المادة الجافة بين المجموعين الجذري والخضري نتيجة اختلاف مستوى الماء.

انخفض إجمالي مياه الري المضافة خلال فترة المعاملة تحت مستوى الري 60% إلى 0.579–0.648 لتر للنبات، مقارنة بنحو 1.085–1.140 لتر تحت الري الكامل. وفي المقابل، ارتفعت الكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري تحت نقص الري، وسجلت 6.21 غ/لتر في النباتات غير المعاملة، ثم ارتفعت معنويا إلى 7.02 و7.23 غ/لتر عند استخدام 0.5 و1.0 ملي مول من حمض الساليسيليك، على التوالي. ولم يظهر فرق معنوي بين التركيزين، مما يدل على تقارب فاعليتهما في المحافظة على تراكم الكتلة الجافة بالنسبة إلى كمية مياه الري المضافة.

الجدول 3. تأثير تراكيز حمض الساليسيليك ومستويي الري في الكتلة الحيوية ومؤشرات استخدام مياه الري لشتلات الطماطم

مستوى الري (% من السعة الحقلية)	حمض الساليسيليك (ملي مول)	الوزن الجاف للمجموع الخضري (غ)	الوزن الجاف للجذور (غ)	الكتلة الجافة الكلية (غ)	نسبة الجذور إلى المجموع الخضري	إجمالي مياه الري (لتر)	الكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري (غ/لتر)
100	0.0	4.32 ± 0.13^{b}	1.18 ± 0.06^{b}	5.50 ± 0.16^{b}	0.274 ± 0.015^{a}	1.085 ± 0.017^{b}	**5.07 ± 0.17^{b}**
100	0.5	4.82 ± 0.09^{a}	1.29 ± 0.01^{a}	6.10 ± 0.09^{a}	0.268 ± 0.006^{a}	1.140 ± 0.024^{a}	**5.35 ± 0.06^{ab}**
100	1.0	4.85 ± 0.24^{a}	1.27 ± 0.02^{a}	6.12 ± 0.24^{a}	0.262 ± 0.014^{a}	1.110 ± 0.008^{ab}	**5.51 ± 0.25^{a}**
60	0.0	2.67 ± 0.14^{b}	0.93 ± 0.07^{b}	3.59 ± 0.08^{b}	0.349 ± 0.043^{a}	0.579 ± 0.006^{c}	**6.21 ± 0.09^{b}**
60	0.5	3.31 ± 0.12^{a}	1.08 ± 0.03^{a}	4.39 ± 0.10^{a}	0.326 ± 0.019^{a}	0.626 ± 0.011^{b}	**7.02 ± 0.24^{a}**
60	1.0	3.54 ± 0.24^{a}	1.14 ± 0.10^{a}	4.68 ± 0.28^{a}	0.324 ± 0.030^{a}	0.648 ± 0.004^{a}	**7.23 ± 0.41^{a}**

ملاحظة: تمثل القيم المتوسط ± الانحراف المعياري لأربعة مكررات. تشير الحروف المختلفة داخل مستوى الري نفسه وفي العمود نفسه إلى وجود فروق معنوية بين تراكيز حمض الساليسيليك وفقا لاختبار Tukey عند مستوى دلالة 0.05.

7. مناقشة النتائج

بينت النتائج أن خفض مستوى الري إلى 60% من السعة الحقلية أحدث تأثيرا واضحا في نمو شتلات الطماطم وحالتها المائية والفسيولوجية وتراكم الكتلة الحيوية، في حين أسهم الرش الورقي بحمض الساليسيليك في تخفيف جانب من هذه التأثيرات، وكانت استجابة الشتلات للمعاملة أكثر وضوحا تحت نقص الري مقارنة بالري الكامل. ويتفق ذلك مع نتيجة تحليل التباين الثنائي التي أظهرت تأثيرا معنويا لمستوى الري في جميع الصفات المدروسة، إلى جانب تأثير معنوي لحمض الساليسيليك والتفاعل بين العاملين في عدد من الصفات. ويشير هذا النمط إلى أن توفر الماء ظل العامل الرئيس المحدد للنمو، بينما ظهر دور حمض الساليسيليك بصورة أكبر عندما تعرضت الشتلات لمحدودية الماء .

ظهر تأثير نقص الري تدريجيا في صفات النمو، إذ انخفض ارتفاع النبات وعدد الاوراق مع تقدم مدة المعاملة. ويمكن تفسير ذلك بانخفاض ضغط امتلاء الخلايا عند محدودية الماء، وهو ما يحد من انقسام الخلايا واستطالتها، إلى جانب انخفاض امتصاص العناصر الغذائية والتوصيل الثغري ودخول ثاني اكسيد الكربون، بما ينعكس على التمثيل الضوئي وتوفير المواد اللازمة للنمو. وهذا التفسير يتفق مع ما اشارت اليه الدراسات المتعلقة باستجابة الطماطم للجفاف من ارتباط انخفاض النمو بتراجع الحالة المائية والنشاط الضوئي. كما تتفق النتائج مع Hayat et al. (2008) و Kurniawan et al. (2025)، اللذين سجلا تراجعا في نمو الطماطم تحت نقص الماء وتحسنا في عدد من صفات النمو بعد المعاملة بحمض الساليسيليك.

وعند مستوى 60% من السعة الحقلية، رفع حمض الساليسيليك ارتفاع الشتلات بنحو 20.3% عند التركيز 0.5 ملي مول و24.0% عند التركيز 1.0 ملي مول مقارنة بالنباتات غير المعاملة. ولا يبدو هذا التحسن منفصلا عن التحسن الذي سجلته الدراسة في الحالة المائية والكلوروفيل، اذ إن المحافظة على امتلاء الخلايا واستمرار كفاءة الجهاز الضوئي بدرجة افضل يمكن أن يوفرا ظروفا اكثر ملاءمة لاستطالة الخلايا واستمرار النمو الخضري. كما يمكن أن يسهم حمض الساليسيليك في تنظيم العمليات المرتبطة بالنمو والاستجابة للاجهاد من خلال تداخله مع الاشارات الهرمونية وتنظيم الاتزان التأكسدي، وهي ادوار سبق توثيقها لحمض الساليسيليك تحت الاجهادات غير الحيوية .(Khan et al., 2015; Liu et al., 2022) ومع ذلك، لم يكن التأثير الرئيس للحمض في عدد الاوراق معنويا، رغم اتجاه المتوسطات إلى الارتفاع تحت نقص الري، مما يشير إلى أن استجابة تكوين الاوراق خلال مدة التجربة كانت اقل وضوحا من استجابة ارتفاع النبات، ولا يصح افتراض استجابة متماثلة لجميع مؤشرات النمو .

كان انخفاض قيم SPAD والمحتوى المائي النسبي للاوراق من ابرز الاستجابات الفسيولوجية لنقص الري. فانخفاض الماء المتاح للجذور يخل بالتوازن بين امتصاص الماء وفقده من الاوراق، ويخفض ضغط الامتلاء، كما يحفز اغلاق الثغور للحد من النتح، وهو ما يقلل في الوقت نفسه دخول ثاني اكسيد الكربون ويحد من النشاط الضوئي. ومع استمرار الاجهاد يمكن أن تتأثر اصباغ الكلوروفيل وسلامة الجهاز الضوئي، وهو ما يفسر انخفاض قيم SPAD المسجلة في الشتلات المعرضة لنقص الري. وقد اظهرت

دراسات على الطماطم ارتباط محدودية الماء بانخفاض المحتوى المائي النسبي والتوصيل الثغري والتمثيل الضوئي ومؤشرات اخضرار الاوراق .

في المقابل، رفع حمض الساليسيليك قيم SPAD تحت نقص الري بنحو 13.5% عند 0.5 ملي مول و18.9% عند 1.0 ملي مول، كما زاد المحتوى المائي النسبي بنحو 14.1 و17.2% على التوالي. ويمكن تفسير ارتفاع SPAD بقدرة حمض الساليسيليك المحتملة على الحد من تدهور اصباغ الكلوروفيل والمحافظة على مكونات الجهاز الضوئي من الضرر التأكسدي، في حين قد يرتبط ارتفاع المحتوى المائي النسبي بتحسن قدرة الخلايا على الاحتفاظ بالماء وتنظيم حركة الثغور والضبط الاسموزي. كما يمكن أن يسهم تنشيط منظومة مضادات الاكسدة وتراكم بعض المذابات المتوافقة في المحافظة على سلامة الاغشية وتقليل فقد الماء واستمرار الوظائف الخلوية تحت الاجهاد. وتدعم ذلك نتائج(2021) .Lobato et al ، الذين سجلوا تحسنا في التمثيل الضوئي والنشاط المضاد للاكسدة وانخفاض مؤشرات الضرر التأكسدي في الطماطم المعاملة بحمض الساليسيليك، وكذلك(2022) .Aires et al ، الذين وجدوا تحسنا في تبادل الغازات وكفاءة الكربوكسيلاز تحت العجز المائي. كما اظهرت دراسة (2025) .Aires et al ارتباط استجابة الطماطم لحمض الساليسيليك بتعديلات ايضية وهرمونية مرتبطة بالعجز المائي .

وينبغي التعامل مع هذه الاليات بحذر عند تفسير نتائج الدراسة الحالية؛ لان التجربة لم تقس بصورة مباشرة التوصيل الثغري أو معدل التمثيل الضوئي أو البرولين أو السكريات الذائبة أو نشاط انزيمات مضادات الاكسدة أو مؤشرات الضرر التأكسدي. ومن ثم، فإن المحافظة على الكلوروفيل وتنظيم الثغور والضبط الاسموزي وتنشيط الدفاع المضاد للاكسدة تمثل **اليات فسيولوجية محتملة تفسر النتائج** استنادا إلى الادبيات السابقة، وليست اليات اثبت قياسها مباشرة في هذه التجربة. وهذا التمييز مهم لتجنب تجاوز ما تسمح به البيانات الفعلية للدراسة .

انعكس تأثير نقص الري في الحالة المائية والجهاز الضوئي على تراكم المادة الجافة، اذ انخفضت الاوزان الجافة للمجموعين الخضري والجذري والكتلة الجافة الكلية. ويرتبط انخفاض الكتلة الحيوية بتباطؤ النمو وانخفاض المساحة الورقية الفعالة وقدرة النبات على تثبيت الكربون وتكوين المركبات العضوية، فضلا عن تراجع امتصاص الماء والعناصر الغذائية. وفي المقابل، رفع حمض الساليسيليك الكتلة الجافة الكلية تحت نقص الري بنسبة 22.3% عند التركيز 0.5 ملي مول و30.3% عند التركيز 1.0 ملي مول مقارنة بالشاهد غير المعامل. ويمكن النظر إلى هذه الزيادة بوصفها نتيجة تراكمية للتحسن النسبي في الحالة المائية والمحافظة على الكلوروفيل والنشاط الضوئي، بما يسمح باستمرار انتاج المواد الكربوهيدراتية وتوجيهها إلى نمو المجموعين الخضري والجذري. وتتفق هذه النتيجة مع (2021) .Lobato et al و(2025) .Kurniawan et al، اللذين سجلا تحسنا في الكتلة الحيوية للطماطم المعاملة بحمض الساليسيليك تحت الاجهاد المائي، كما تتفق مع (2021) .Chakma et al في أن الرش الورقي يمكن أن يحسن نمو الطماطم تحت النقص المائي، مع انخفاض قدرته على التعويض كلما اشتد الاجهاد .

أما نسبة الجذور إلى المجموع الخضري فقد ارتفعت عموما تحت نقص الري، في حين لم تظهر فروق معنوية واضحة بين تراكيز حمض الساليسيليك داخل مستوى الري نفسه. وقد يعكس ارتفاع النسبة استجابة في توزيع النمو تحت محدودية الماء، لكنه لا

يعني بالضرورة حدوث زيادة مطلقة في نمو الجذور؛ اذ يمكن أن ينتج كذلك عن تأثر المجموع الخضري بدرجة اكبر من المجموع الجذري. ويؤيد ذلك انخفاض الكتلة الحيوية الكلية تحت نقص الري. كما يشير غياب الفروق المعنوية بين تراكيز الحمض في هذه النسبة إلى أن تأثير حمض الساليسيليك كان اوضح في المحافظة على النمو الكلي والحالة الفسيولوجية من تأثيره في تغيير نمط توزيع المادة الجافة بين الجذور والمجموع الخضري .

اظهرت النتائج كذلك ارتفاع الكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري عند خفض مستوى الري، وارتفعت تحت نقص الري من 6.21 غ/لتر في النباتات غير المعاملة إلى 7.02 و7.23 غ/لتر عند 0.5 و1.0 ملي مول من حمض الساليسيليك، أي بنحو 13.1 و16.4% على التوالي. ويرجع ارتفاع المؤشر تحت نقص الري اساسا إلى أن الانخفاض النسبي في كمية الماء المضافة كان اكبر من الانخفاض في الكتلة الجافة، في حين يشير ارتفاعه مع حمض الساليسيليك إلى أن النباتات المعاملة حافظت على كتلة جافة اكبر لكل وحدة من مياه الري المضافة. ويمكن ربط ذلك بالتحسن المتزامن في المحتوى المائي النسبي والمحافظة على الكلوروفيل والكتلة الحيوية، وهو اتجاه ينسجم مع ما اظهره Lobato et al. (2021) و Aires et al. (2022)من تحسن مؤشرات استخدام الماء بعد المعاملة بحمض الساليسيليك. ومع ذلك، يجب تفسير هذا المؤشر بوصفه **كفاءة ظاهرية** للمقارنة بين المعاملات وليس قياسا مباشرا للكفاءة الفسيولوجية لاستخدام الماء، لان الحساب اعتمد على الكتلة الجافة النهائية التي تتضمن جزءا من النمو المتكون قبل بدء معاملات الري .

وتكتسب نتائج التفاعل بين حمض الساليسيليك ومستوى الري اهمية خاصة؛ اذ كان تأثير الحمض محدودا نسبيا تحت الري الكامل، بينما اتسعت الفروق بين التراكيز عند 60% من السعة الحقلية، ولا سيما في ارتفاع النبات و SPADوالمحتوى المائي النسبي والكتلة الجافة الكلية والكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري. ويشير ذلك إلى أن الدور الابرز لحمض الساليسيليك في هذه التجربة ارتبط بتعديل استجابة الشتلات لنقص الماء أكثر من كونه محفزا عاما للنمو في الظروف المائية الملائمة. ويتفق هذا التفسير مع Chakma et al. (2021)و Aires et al. (2022)، اللذين اظهرا أن فاعلية حمض الساليسيليك تختلف باختلاف شدة العجز المائي وطريقة المعاملة والتركيز المستخدم. كما تساعد هذه النتيجة في تفسير سبب عدم ظهور فروق كبيرة بين التراكيز تحت الري الكامل، حيث يكون الضغط الفسيولوجي الذي تستجيب له اليات الحماية اقل شدة.

وعلى الرغم من أن التركيز 1.0 ملي مول سجل اعلى المتوسطات العددية في معظم الصفات تحت نقص الري، فإن الفروق بينه وبين 0.5 ملي مول لم تكن معنوية في عدد من المؤشرات. ولذلك لا تدعم النتائج افتراض وجود علاقة خطية بين زيادة تركيز حمض الساليسيليك وحجم الاستجابة. فالاستجابة لهذا المركب تعتمد على التركيز، وقد تحقق الجرعات الملائمة الاستجابة التنظيمية المطلوبة دون أن تؤدي الزيادة اللاحقة إلى تحسن مماثل. ويتفق ذلك مع ما اشار اليه Khan et al. (2015) و Liu et al. (2022)من أن تأثير حمض الساليسيليك يعتمد على الجرعة والنوع النباتي ومرحلة النمو وشدة الاجهاد. كما أن اختلاف النتائج المنشورة، ومنها عدم تسجيل Galviz-Fajardo et al. (2020) تحسنا مماثلا عند استخدام حمض الساليسيليك في تهيئة بذور الطماطم، يؤكد أن الاستجابة لا تتحدد بالتركيز وحده، بل تتأثر كذلك بطريقة التطبيق والمرحلة العمرية وظروف الاجهاد .

وبوجه عام، تدعم النتائج الفرضية المتعلقة بالتأثير السلبي لنقص الري في نمو شتلات الطماطم وحالتها المائية والفسيولوجية وتراكم كتلتها الحيوية. كما تدعم بدرجات متفاوتة الفرضيات المتعلقة باستجابة الشتلات لتراكيز حمض الساليسيليك ووجود تفاعل بين تركيز الحمض ومستوى الري، مع مراعاة أن التأثير الرئيس أو التفاعل لم يكن معنويا في جميع الصفات دون استثناء. وتدعم النتائج كذلك قدرة المعاملة بتركيز مناسب من حمض الساليسيليك على تخفيف جزء من الاثار السلبية لنقص الري، لكنها تبين في الوقت نفسه أن هذا التأثير كان **تخفيفيا وليس تعويضيا كاملا**؛ اذ بقيت معظم مؤشرات الشتلات تحت مستوى 60% من السعة الحقلية دون نظيراتها تحت الري الكامل. ومن ثم، يمكن النظر إلى الرش الورقي بحمض الساليسيليك بوصفه معاملة مساعدة لتحسين تحمل شتلات الطماطم لمحدودية الماء، دون اعتباره بديلا عن توفير مستوى ملائم من الري.

8. الخاتمة

أثبتت الدراسة أن خفض الري إلى 60% من السعة الحقلية يحد من نمو شتلات الطماطم ويؤثر سلبا في حالتها المائية والفسيولوجية، إذ أدى إلى انخفاض ارتفاع النبات وعدد الاوراق وقيم SPAD والمحتوى المائي النسبي، إلى جانب تراجع الاوزان الجافة للمجموعين الخضري والجذري والكتلة الجافة الكلية. وتبين أن الرش الورقي بحمض الساليسيليك أسهم في تخفيف جانب مهم من هذه التأثيرات، وكانت استجابة الشتلات أكثر وضوحا تحت نقص الري مقارنة بالري الكامل.

حقق التركيزان 0.5 و1.0 ملي مول تحسنا في معظم مؤشرات النمو والحالة الفسيولوجية وتراكم المادة الجافة والكفاءة الظاهرية لاستخدام مياه الري، وسجل التركيز 1.0 ملي مول أعلى المتوسطات العددية في أغلب الصفات، ولا سيما قيمة SPAD. ومع ذلك، لم تكن الفروق بين التركيزين معنوية في عدد من المؤشرات، مما يدل على أن زيادة تركيز حمض الساليسيليك لم تقترن بزيادة ثابتة في جميع الاستجابات، وأن التركيز 0.5 ملي مول كان كافيا لتحقيق تحسن قريب في عدة صفات.

وتؤكد النتائج أن حمض الساليسيليك يمكن استخدامه بوصفه معاملة مساعدة لتحسين تحمل شتلات الطماطم لنقص الري، لكنه لم يعوض الآثار السلبية لانخفاض الماء تعويضا كاملا. لذلك يبقى توفير مستوى مناسب من الري العامل الاساس لنمو الشتلات، مع إمكانية الاستفادة من الرش بحمض الساليسيليك ضمن برامج إدارة المياه، بعد التحقق من فاعليته تحت الظروف الحقلية وعلى أصناف ومراحل نمو مختلفة.

9. قائمة المراجع

أبو عسلي، كوثر، بايرلي، رولا، والعطا الله، بسام. (2024). تأثير المعاملة بحمض الساليسيليك (Salicylic acid) واختلاف مستويات الري في إنبات بذور صنف الخيار البلدي. *المجلة السورية للبحوث الزراعية، 11*(4)، 273-288. https://agri-research-journal.net/sjar/?p=9575

تينه، عنود، وعبيد، حسان. (2024). دراسة تأثير الرش الورقي بحمض السالسيليك في بعض الصفات المورفولوجية والإنتاجية للهجينين فيستفال وكماروزا المزروعين في ظروف الإجهاد المائي. *مجلة جامعة دمشق للعلوم الزراعية، 40*(3)، 213-226. https://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/agrj/article/view/7266

Ahmad, H., & Li, J. (2021). Impact of water deficit on the development and senescence of tomato roots grown under various soil textures of Shaanxi, China. *BMC Plant Biology, 21*, 241. https://doi.org/10.1186/s12870-021-03018-1

Aires, E. S., Ferraz, A. K. L., Carvalho, B. L., Teixeira, F. P., Putti, F. F., de Souza, E. P., Rodrigues, J. D., & Ono, E. O. (2022). Foliar application of salicylic acid to mitigate water stress in tomato. *Plants, 11*(13), 1775. https://doi.org/10.3390/plants11131775

Aires, E. S., Ferraz, A. K. L., Ribera, L. M., Teixeira, F. P., Carvalho, B. L., Silva, D. M. R., Freschi, L., Rodrigues, J. D., & Ono, E. O. (2025). The application of salicylic acid minimizes the deleterious effects of water deficit in tomato through metabolic and ABA adjustments. *Plant Physiology and Biochemistry, 229*, 110417. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110417

Bagautdinova, Z. Z., Omelyanchuk, N., Tyapkin, A. V., Kovrizhnykh, V. V., Lavrekha, V. V., & Zemlyanskaya, E. V. (2022). Salicylic acid in root growth and development. *International Journal of Molecular Sciences, 23*(4), 2228. https://doi.org/10.3390/ijms23042228

Chakma, R., Biswas, A., Saekong, P., Ullah, H., & Datta, A. (2021). Foliar application and seed priming of salicylic acid affect growth, fruit yield, and quality of grape tomato under drought stress. *Scientia Horticulturae, 280*, 109904. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109904

Galviz-Fajardo, Y. C., Bortolin, G. S., Deuner, S., do Amarante, L., Reolon, F., & Moraes, D. M. de. (2020). Seed priming with salicylic acid potentiates water restriction-induced effects in tomato seed germination and early seedling growth. *Journal of Seed Science, 42*, e202042031. https://doi.org/10.1590/2317-1545v42234256

Hayat, S., Hasan, S. A., Fariduddin, Q., & Ahmad, A. (2008). Growth of tomato (*Lycopersicon esculentum*) in response to salicylic acid under water stress. *Journal of Plant Interactions, 3*(4), 297–304. https://doi.org/10.1080/17429140802320797

Iovieno, P., Punzo, P., Guida, G., Mistretta, C., Van Oosten, M. J., Nurcato, R., Bostan, H., Colantuono, C., Costa, A., Bagnaresi, P., Chiusano, M. L., Albrizio, R., Giorio, P., Batelli, G., & Grillo, S. (2016). Transcriptomic changes drive physiological responses to progressive drought stress and rehydration in tomato. *Frontiers in Plant Science, 7*, 371. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00371

Khan, M. I. R., Fatma, M., Per, T. S., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2015). Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in Plant Science, 6*, 462. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00462

Kurniawan, A., Noviandi, W. D., Maulidah, N. I., Mullatif, I. A., Rahmandhias, D. T., Karim, M. F., & Shyu, D. J. H. (2025). Mitigating drought stress effects in tomato through seed priming and foliar application of salicylic acid: Impacts on germination and plant growth. *Journal of Ecological Engineering, 26*(4), 369–383. https://doi.org/10.12911/22998993/200337

Li, A., Sun, X., & Liu, L. (2022). Action of salicylic acid on plant growth. *Frontiers in Plant Science, 13*, 878076. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.878076

Liu, J., Qiu, G., Liu, C., Li, H., Chen, X., Fu, Q., Lin, Y., & Guo, B. (2022). Salicylic acid, a multifaceted hormone, combats abiotic stresses in plants. *Life, 12*(6), 886. https://doi.org/10.3390/life12060886

Lobato, A. K. da S., Barbosa, M. A. M., Alsahli, A. A., Lima, E. J. A., & da Silva, B. R. S. (2021). Exogenous salicylic acid alleviates the negative impacts on production components, biomass and gas exchange in tomato plants under water deficit improving redox status and anatomical responses. *Physiologia Plantarum, 172*(2), 869–884. https://doi.org/10.1111/ppl.13329

Rivas-San Vicente, M., & Plasencia, J. (2011). Salicylic acid beyond defence: Its role in plant growth and development. *Journal of Experimental Botany, 62*(10), 3321–3338.https://doi.org/10.1093/jxb/err031

Somefun, O. T., Masasi, B., & Adelabu, A. O. (2024). Irrigation and water management of tomatoes—A review. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment, 3*(4), e70020. https://doi.org/10.1002/sae2.70020

Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i2800e

Turan, M., Ekinci, M., Argin, S., Brinza, M., & Yildirim, E. (2023). Drought stress amelioration in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings by biostimulant as regenerative agent. *Frontiers in Plant Science, 14*, 1211210. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1211210

Wadood, A., Hameed, A., Akram, S., & Ghaffar, M. (2024). Unraveling the impact of water deficit stress on nutritional quality and defense response of tomato genotypes. *Frontiers in Plant Science, 15*, 1403895. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1403895

Ximénez-Embún, M. G., González-Guzmán, M., Arbona, V., Gómez-Cadenas, A., Ortego, F., & Castañera, P. (2018). Plant-mediated effects of water deficit on the performance of *Tetranychus evansi* on tomato drought-adapted accessions. *Frontiers in Plant Science, 9*, 1490. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01490

Yadav, P. K., Bhujel, P., Bhandari, N., Sharma, S., & Sharma, A. (2025). Screening tomato genotypes for early-stage drought tolerance using polyethylene glycol-induced osmotic stress. *BMC Plant Biology, 25*, 1476. https://doi.org/10.1186/s12870-025-07508-4