

Study the effect of salicylic acid foliar spraying on quantitative and qualitative characteristics of sugar beet at different irrigation levels.

Roghaye Fatemi^{1*}, Btjan kahrarian¹

(Received: 14 April. 2025 ; Accepted: 16 August. 2025)

How to cite this article:

Fatemi R, kahrarian B. Study the effect of salicylic acid foliar spraying on quantitative and qualitative characteristics of sugar beet at different irrigation levels. Journal of Sugar Beet. 2025; (41)1. 73-90. (In Persian with English abstract). DOI: 10.22092/jsb.2025.369144.1386

Extended Abstract

Introduction

Sugar beet (*Beta vulgaris L.*) is a key sugar-producing crop in temperate regions, with global cultivation covering ~4.52 million hectares in 2023. Drought stress significantly limits its growth and yield, particularly in arid and semi-arid areas like Iran. Plants respond to water deficit through biochemical, physiological, and morphological adaptations, including altered stomatal conductance, reduced RWC, and oxidative stress. Salicylic acid, a phytohormone, modulates stress responses by enhancing antioxidant activity, photosynthetic efficiency, and osmotic regulation. This study evaluated SA's potential to mitigate drought effects on sugar beet in Miandoab, Iran.

Materials and Methods

The experiment was conducted in a silty-loam soil (pH 7.6, EC 2.15 dS/m) using a split-plot design. Irrigation levels (normal: 60 mm, deficit: 120 mm evaporation) were assigned to main plots, and SA concentrations (0, 2, 4 mM) to subplots. The cultivar 'Dorothy' was sown at 100,000 plants/ha. SA was applied twice: one week before and after inducing drought. Traits measured included photosynthetic pigments, proline, RWC, stomatal conductance, root yield, sugar content, antioxidant enzymes (CAT, SOD), and MDA. Data were analyzed using SAS 9.1.

Results and Discussion:

The study investigated the effects of salicylic acid (SA) foliar application (0, 2, and 4 mM) under normal irrigation (60 mm evaporation) and water deficit (120 mm evaporation) on sugar beet physiology and yield. Water stress significantly reduced chlorophyll a (by 44.3%), chlorophyll b (by 48.7%), carotenoids (by

43.9%), relative water content (RWC, 10.1%), stomatal conductance (15.8%), and root yield (26.9%), while increasing proline (49.2%), sugar content (8.98%), and malondialdehyde (MDA, 72.4%). SA application, particularly 4 mM, mitigated these effects: under water deficit, it increased chlorophyll a (46.7%), chlorophyll b (71.3%), carotenoids (67.4%), RWC (12.1%), and stomatal conductance (14.1%), while reducing proline (12.1%) and MDA (31.1%). Antioxidant enzymes (CAT and SOD) showed elevated activity under stress, with 4 mM SA enhancing CAT by 39.2% and SOD by 146.5% compared to controls.

Yield parameters responded strongly to SA: under normal irrigation, 2 mM SA maximized root yield (97.57 t/ha) and sugar yield (15.29 t/ha), while 4 mM SA under water deficit improved root yield by 26.1% (67.12 t/ha) and sugar yield by 30.1% (12.10 t/ha) versus stressed controls. Sugar content increased by 8.98% under drought, but was highest (17.96%) with 4 mM SA. Correlation analysis revealed positive relationships between sugar yield and photosynthetic pigments (chlorophyll a: $r=0.76$, chlorophyll b: $r=0.80$), RWC ($r=0.60$), stomatal conductance ($r=0.62$), and root yield ($r=0.91$), but negative correlations with proline ($r=-0.67$) and MDA ($r=-0.76$).

The mechanisms of SA's protective effects involved: (1) Preservation of photosynthetic apparatus via increased chlorophyll synthesis and reduced degradation under oxidative stress, (2) Enhanced water status through improved stomatal regulation and RWC, (3) Activation of antioxidant systems (CAT, SOD) to scavenge ROS, reducing lipid peroxidation (MDA), and (4) Osmotic adjustment via moderated proline accumulation. The 4 mM SA concentration proved most effective in drought conditions, nearly equaling normal irrigation yields, suggesting its utility for water-limited cultivation. These findings align with previous reports of SA's role in stress

1. Agriculture and Plant Breeding Department, Miandoab Branch, Islamic Azad University, Miandoab, Iran.

*Corresponding author: Roghaya.fatemi1355@iau.ac.ir



mitigation across crops, demonstrating its potential as a sustainable strategy for maintaining sugar beet productivity under climate-induced water scarcity.

Conclusion

This study demonstrates that foliar application of salicylic acid (SA), particularly at 4 mM, effectively mitigates drought stress in sugar beet by enhancing physiological and biochemical responses. Under water deficit, SA improved photosynthetic efficiency by preserving chlorophyll and carotenoid content, maintained leaf water status through increased RWC and stomatal conductance, and activated antioxidant enzymes (CAT, SOD) to reduce oxidative damage. These adaptations translated into significant yield improvements, with 4 mM SA increasing root yield by 26.1% and sugar yield by 30.1% compared to stressed controls. The strong positive correlations between sugar yield and photosynthetic pigments, RWC, and stomatal conductance highlight SA's role in sustaining carbon assimilation and water-use efficiency under stress. Conversely, reduced proline and MDA levels with SA treatment confirmed its effectiveness in alleviating osmotic and oxidative stress. The results suggest that 4 mM SA can nearly compensate for yield losses under moderate drought, offering a practical strategy for sugar beet cultivation in water-limited environments. Future

research should explore SA's long-term effects and interactions with other stress-mitigation practices to optimize its field application.

Keywords: Enzyme, Photosynthetic Pigment, Physiological, Water deficit,

References

- Abbaszadeh B, Layeghhaghighi M, Azimi R, Hadi N. Improving water use efficiency through drought stress and using salicylic acid for proper production of *Rosmarinus officinalis* L. *Industrial Crops and Products*. 2020; 144: 111893. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111893>.
- Muneera DFA, Yaser MH, Kotb A, Emadeldeen R, Latifa A, Hussah IMA, Khaled AA. Evaluation of silicon and proline application on the oxidative machinery in drought-stressed sugar beet. *Antioxidants*. 2021; 10(398):1-19. Doi: <https://doi.org/10.3390/antiox10030398>.
- Liang G, Liu J, Zhang J, Guo J. Effects of drought stress on photosynthetic and physiological parameters of tomato. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2019; 145(1): 12-17. Doi: <https://doi.org/10.21273/JASHS04588-19>

بررسی اثر محلول پاشی اسید سالیسیلیک بر خصوصیات کمی و کیفی چغندرقد در سطوح مختلف آبیاری

رقیه فاطمی^{۱*}، بیژن کهاریان^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۲۵

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.22092/jsb.2025.369144.1386

ر. فاطمی و ب. کهاریان، ۱۴۰۴. بررسی اثر محلول پاشی اسید سالیسیلیک بر خصوصیات کمی و کیفی چغندرقد در سطوح مختلف آبیاری. چغندرقد ۴۱(۱): ۷۳-۹۰

چکیده

با هدف بررسی اثر محلول پاشی اسید سالیسیلیک بر خصوصیات کمی و کیفی چغندرقد، آزمایشی به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با چهار تکرار در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ اجرا شد، دو سطح آبیاری نرمال (آبیاری بعد از ۶۰ میلی متر تبخیر) و تنش کم آبی (آبیاری بعد از ۱۲۰ میلی متر تبخیر) به کرت های اصلی و محلول پاشی اسید سالیسیلیک (شاهد، ۲ و ۴ میلی مولار) به کرت های فرعی اختصاص داده شد. نتایج نشان داد کم آبی محتوی نسبی آب برگ (۱۰۶٪) و ضریب هدایت روزنه ای (۱۵/۸۲٪) را کاهش و عیار قند را افزایش داد، همچنین بالاترین سطوح محتوی نسبی آب برگ، ضریب هدایت روزنه ای و عیار قند به سطح ۴ میلی مولار اسید سالیسیلیک اختصاص داشت. نتایج همچنین نشان داد کاربرد ۲ میلی مولار تحت شرایط نرمال و ۴ میلی مولار تحت شرایط کم آبی اسید سالیسیلیک محتوی کلروفیل a (به ترتیب ۴۱/۴۷ و ۴۶/۶۹ درصد)، کلروفیل b (به ترتیب ۲۸/۶۷ و ۷۱/۳۲ درصد)، کارتنوئید (به ترتیب ۵۱/۷۳ و ۶۷/۴۴ درصد)، وزن خشک اندام هوایی (به ترتیب ۴۷/۴۸ و ۳۷/۱۹ درصد)، عملکرد ریشه (به ترتیب ۳۳/۷۴ و ۲۶/۱۱ درصد)، عملکرد شکر (به ترتیب ۳۶/۷۶ و ۳۰/۱۰ درصد)، مقدار فعالیت کاتالاز (به ترتیب ۸۲/۱۹ و ۳۹/۱۸ درصد)، سوپر اکسید دیسموتاز (به ترتیب ۳۴/۷۵ و ۱۴۶/۵۲ درصد) را افزایش و محتوی پرولین (به ترتیب ۱۹/۶۷ و ۱۲/۰۸ درصد) و مالون دی آلدید (به ترتیب ۳۶/۸۳ و ۳۱/۱۱ درصد) را کاهش دادند. همبستگی عملکرد شکر با محتوی کلروفیل a، کلروفیل b، کارتنوئید، محتوی نسبی آب برگ، ضریب هدایت روزنه ای و وزن خشک اندام هوایی و عملکرد ریشه مثبت و معنی دار و با محتوی پرولین منفی و معنی دار بود. می توان نتیجه گرفت کاربرد اسید سالیسیلیک می تواند راهکاری مناسب برای افزایش عملکرد شکر تحت شرایط آبیاری نرمال و شرایط تنش کم آبی باشد.

واژه های کلیدی: آنزیم، خشکی، رنگدانه فتوسنتزی، فیزیولوژیک

مقدمه

یکی از منابع اصلی شکر در مناطقی با آب و هوای معتدل، چغندر قند (*Beta vulgaris L.*) است (Hamze et al. 2021). سطح زیر کشت این محصول در سال ۱۴۰۲ حدود ۴/۵۲ میلیون هکتار و میزان تولید ریشه در این سال برابر ۲۸۱/۱۱ میلیون تن برآورد شده است، سطح زیر کشت چغندر قند در ایران و میزان تولید آن به ترتیب ۸۹/۸۹ هزار هکتار و ۵/۱۹ میلیون تن بود (Anonymous 2023)

از مهم ترین تنش های غیر زیستی که رشد و تولید گیاهان را به صورت قابل توجهی در مناطق خشک و نیمه خشک کاهش می دهد، تنش کم آبی است (Shirani Rad et al. 2023). گیاهان در مواجهه با کم آبی سازوکارهای مختلفی برای غلبه بر اثرات مخرب این تنش دارند (Abid et al. 2018; Shiranirad et al. 2023). در واقع گیاهان تحت تنش کم آبی؛ با کمک مکانیسم های دفاعی مختلف مانند تغییرات بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی با این تنش مقابله می کنند (Oguz et al. 2022).

در چغندر قند، کاهش عملکرد به دلیل کم آبی ممکن است به دلیل تغییر در محتوی نسبی آب برگ و پتانسیل آب در برگ ها (Chotuj et al. 2004)، رشد محدود برگ و جذب CO₂ باشد (Bloch et al. 2006). بسته شدن روزنه ها و کاهش محتوی نسبی آب برگ که در مراحل اولیه تنش خشکی رخ می دهد، منجر به اختلال فتوسنتزی و کاهش عملکرد در چغندر قند می شود (Mehrandish et al. 2012). کاهش عملکرد چغندر قند در شرایط آب محدود، مشاهده شده است (Hoffmann 2010). برآورد شده که محدودیت فعلی منابع آب به طور بالقوه تولید چغندر قند در اروپا را بین ۵ تا ۳۰ درصد کاهش می دهد (Chotuj et al. 2004).

در مطالعه ای بر روی چغندر قند تنش کمبود آب به صورت معنی داری از عملکرد ریشه و محتوی رنگدانه های فتوسنتزی کاست و در مقابل حداکثر محتوی پرولین، قندهای محلول برگ و عیار قند تحت شرایط تنش شدید کم آبی به دست آمد (Hamze et al. 2025). در مطالعه ای دیگر بر روی چغندر قند

مشخص شد شرایط تنش شدید کم آبی منجر به کاهش محتوی نسبی آب برگ، عملکرد ریشه، عملکرد شکر، عملکرد شکر سفید و افزایش محتوی پرولین، عیار قند، درصد قند سفید شد (Mir Mahmoudi et al. 2023). گزارش شده است که حداکثر صفت های شاخص سطح برگ، محتوی آب نسبی برگ، عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص، ضریب استحصال قند و عملکرد قند خالص تحت شرایط آبیاری نرمال (آبیاری بعد از ۶۰ میلی متر تبخیر) به دست می آید (Khalili and Hamze 2021). در تحقیق دیگر تنش کم آبی (آبیاری بعد از ۱۲۰ میلی متر تبخیر) عملکرد ریشه را کاهش و بر عیار قند، فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان و پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء سلولی افزود (Molavi et al. 2025)

اسید سالیسیلیک به عنوان تنظیم کننده های رشد گیاهی مهم، تأثیرات مختلفی بر روی فرآیندهای مهم گیاه از جمله جذب یون، فرآیند گل دهی، عملکرد دستگاه فتوسنتزی، فعالیت سیستم دفاعی و همچنین تحمل گیاه به تنش های زیستی و غیر زیستی دارد (Gerami et al. 2018; Koo et al. 2020; Ramezani et al. 2021). عوامل مختلفی از جمله غلظت اسید سالیسیلیک، سطح اسید سالیسیلیک داخلی گیاه، شیوه کاربرد خارجی آن، مرحله نمو گیاه و گونه گیاهی بر روی اثرات کاربرد خارجی اسید سالیسیلیک تأثیر می گذارند (Horvath et al. 2007).

در گزارشی نشان داده شد که کاربرد خارجی اسید سالیسیلیک باعث افزایش تولید زیست توده، رنگیزه های فتوسنتزی، شاخص پایداری غشاء و کاهش نشت یونی در گیاه دارویی شنبلیله (*Trigonella foenum-graceum L.*) تحت تنش خشکی شد (Touhidi Nejad et al. 2016). کاربرد اسید سالیسیلیک همچنین باعث بهبود شاخص پایداری غشاء، عملکرد دستگاه فتوسنتزی، پتانسیل آب برگ و فعالیت آنزیم های کاتالاز، سوپر اکسید دیسموتاز، پراکسیداز، کربنیک آنیدراز و نیترات ردکناز در گیاه گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum*) در شرایط تنش خشکی شد (Hayat et al. 2008). اثرات مثبت تیمار اسید سالیسیلیک بر رشد و عملکرد گیاهان دارویی رزماری (*Salvia*

مکانیسم‌های درگیر در افزایش تحمل به کم‌آبی و همچنین راه‌کارهای بهبود مقاومت به تنش کم‌آبی در این محصول ضروری است. این مطالعه با هدف بررسی اثر محلول‌پاشی بر تعدیل اثر تنش کم‌آبی اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در مزرعه کشاورزی واقع در شهرستان میاندوآب در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ اجرا شد، مزرعه مذکور در پنج کیلومتری شمال غربی شهر در موقعیت جغرافیایی ۴۶ درجه و ۹۰ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی و در ارتفاع ۱۳۱۴ متری از سطح دریای آزاد واقع شده است. این منطقه از نظر تقسیمات آب و هوایی کشور دارای رژیم دمایی فریک (متوسط دمای سالیانه خاک بین ۸ تا ۱۵ درجه سلسیوس) و رژیم رطوبتی رزیک (نیمه‌خشک) و خاک محل آزمایش دارای بافت سیلتی لوم با اسیدیته ۷/۵-۸ و هدایت الکتریکی حدود ۲/۱۵ دسی زیمنس بر متر بود (جدول ۱).

(*rosmarinus* و به‌لیمو (*Aloysia citrodora*) تحت تنش خشکی نیز گزارش شده است (Dianat et al. 2016; Abbaszadeh et al. 2020).

اگرچه نقش هورمون‌های گیاهی در پاسخ گیاهان به تنش‌های مختلف زیستی و غیر زیستی پذیرفته شده است (Ghorbani et al. 2022)، با این حال، مکانیسم دقیق فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی اسید سالیسیلیک در تحمل گیاهان به تنش خشکی به‌خوبی درک نشده است. در مطالعه‌ای بر روی چغندر قند تیمار اسید سالیسیلیک موجب افزایش معنی‌دار شاخص سطح برگ، شاخص کلروفیل برگ، هدایت روزنه‌ای، قندهای محلول و پرولین، موجب کاهش نفوذپذیری نسبی غشا نسبت به تیمار شاهد در شرایط تنش شوری شد (Mohammadi Cheraghabadi et al. 2015).

چغندر قند از لحاظ اقتصادی یکی از محصولات مهم در استان آذربایجان غربی به‌خصوص شهرستان میاندوآب است. همانند دیگر مناطق چغندرکاری کشور در ناحیه میاندوآب کم‌آبی یکی از مهم‌ترین مشکلات تولید این محصول است؛ بنابراین شناختن

جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1 Physical and chemical properties of the experimental soil

هدایت الکتریکی EC	اسیدیته pH	درصد مواد خنی‌شونده T.N.V	کربن آلی Organic Carbon	نیتрат کل N(total)	منیزیم Mg	نیترات NO3	آمونیم NH4	کلسیم Ca	فسفر P	پتاسیم K	بافت خاک Soil texture
ds/m		%					ppm				
2.15	7.6	8	0.78	0.12	3.5	19.55	13.13	8	8.05	255	Silt-Loam

(با استفاده از شیپر) صورت گرفت. هر واحد آزمایش، شامل ۴ ردیف کشت به طول ۵ متر بود، فاصله بین ردیف‌ها ۵۰ و فاصله بین بوته‌ها در هر ردیف ۲۰ سانتی‌متر (تراکم ۱۰۰ هزار بوته در هکتار) در نظر گرفته شد. رقم مورد استفاده در این آزمایش دوروتی بود که در ۱۰ اردیبهشت به‌صورت دستی کشت شد. از آن‌جا که چغندر قند در مراحل اولیه رشد به کم‌آبی حساس است، آبیاری از مرحله کاشت تا مرحله استقرار کامل به‌صورت منظم (هر هفته یک‌بار) انجام شد. از سیستم آبیاری تحت فشار (قطره‌ای) با استفاده از نوار تیپ و کنتور استفاده شد، مقدار آب

این آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. دو سطح آبیاری نرمال (آبیاری بعد از ۶۰ میلی‌متر تبخیر) و تنش کم‌آبی (آبیاری بعد از ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر) (Molavi et al. 2025) به کرت‌های اصلی و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک (شاهد، ۲ و ۴ میلی‌مولار) به کرت‌های فرعی اختصاص داده شد.

در پاییز جهت تهیه بستر کاشت، نسبت به انجام شخم عمیق اقدام گردید. در بهار سال ۱۴۰۳ عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم سطحی، دیسک، تسطیح، خاک‌کشی و تهیه خطوط کاشت

شوند، سپس نمونه‌ها در داخل فریزر و در دمای ۴۰- درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

در این آزمایش از روش لیچنتالر و بوشمن (Lichtenthaler and Buschmann 2001) برای اندازه‌گیری غلظت کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید استفاده شد.

اندازه‌گیری ضریب هدایت روزنه‌ای با استفاده از دستگاه پرومتر مدل SC-1 شرکت دِکاگون (Decagon) صورت گرفت. اندازه‌گیری در زمان بسته شدن کانوپی و در نیمه روز صورت گرفت (Rezaei et al. 2014). میزان پرولین موجود در برگ (برگ‌های جوان کاملاً باز شده و در مرحله بسته شدن کانوپی) بر اساس واکنش با معرف نین هیدرین و اسپکتروفتومتری تعیین شد (Bates et al. 1973). مقدار فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپر اکسید دیسموتاز، مالون دی آلدئید و پراکسید هیدروژن به ترتیب با استفاده از روش‌های برول و همکاران (Bowler et al. 1991)، بریتون و مهلی (Britton and Mehley 1995) و بیگی و اوست (Buege and Aust, 1978) انجام شد. از رابطه ۵ جهت اندازه‌گیری محتوی نسبی آب برگ استفاده شد:

$$\text{RWC} = \frac{FW - DW}{TW - DW} \times 100 \quad \text{رابطه ۵}$$

FW=وزن تر، DW=وزن خشک (بعد از قرارگیری نمونه برگ‌ها در آون ۷۵ درجه سانتی‌گراد و حصول وزن ثابت) و TW=وزن آماس (بعد از غوطه‌ور شدن نمونه برگ‌ها در داخل آب مقطر در زمان معین).

در زمان برداشت حاشیه‌های هر کرت حذف و ریشه‌های باقی‌مانده شمارش و وزن شدند، وزن ریشه‌ها به‌عنوان عملکرد ریشه در نظر گرفته شد. عیار قند نمونه‌ها با استفاده از دستگاه بتالایزر به آزمایشگاه تکنولوژی قند کارخانه قند شهرستان میاندوآب ارسال شد.

برای تعیین وزن خشک اندام هوایی چغندر قند، نمونه‌های گیاهی پس از برداشت (یک مترمربع از هر کرت) به آزمایشگاه منتقل شدند. برگ‌ها و دم‌برگ‌ها با دقت از طوقه جدا شده و در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت تا رسیدن به وزن

مصرف شده در تیمارهای آبیاری پس از ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر به ترتیب ۹۵۰۰ و ۵۵۰۰ مترمکعب در هکتار بود.

در این آزمایش رابطه‌های ۱ تا ۴ با استفاده از داده‌های مربوط به تشت تبخیر کلاس A به‌منظور برآورد مقدار نیاز آبی استفاده شد:

$$\text{ET0} = \text{KP} \times \text{ETpan} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\text{ETc} = \text{KC} \times \text{ET0} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$I = \frac{\text{ETc}}{Ea} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$V = \frac{I}{1000} * A \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن‌ها:

ET0 = تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع

KP = ضریب تشتک که با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از اداره هواشناسی شهرستان میاندوآب برابر ۰/۸۷۵ بود.

ETpan = مقدار تبخیر از تشتک تبخیر برحسب میلی‌متر

ETc = تبخیر و تعرق گیاهی

KC = ضریب گیاهی که برای چغندر قند که در مراحل آغازین، رشد، میانی و پایانی به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۸۲، ۱/۱۳ و ۱/۰۵ در نظر گرفته شد.

Ea = راندمان آبیاری که با توجه به این که روش آبیاری قطره‌ای بود، راندمان آبیاری برابر ۰/۹ در نظر گرفته شد.

I = عمق آب آبیاری (برحسب میلی‌متر)

V = حجم آب آبیاری مورد نیاز (برحسب مترمکعب)

A = سطح آزمایش (برحسب مترمربع)

محلول پاشی اسید سالیسیلیک در دو مرحله یک هفته قبل و یک هفته بعد از اعمال تنش کم‌آبی در سطوح ذکر شده در تیمارهای مربوطه اعمال شد.

اندازه‌گیری صفات

جهت اندازه‌گیری خصوصیات بیوشیمیایی گیاه در اواخر فصل رشد قبل از برداشت محصول تعداد ۴-۵ برگ از هر واحد آزمایشی گزینش شدند. نمونه‌های انتخاب شده بلافاصله در داخل فویل آلومینیوم پیچیده شده و پس از درج شماره نمونه، در داخل ازت مایع (دمای ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد) قرار گرفت تا منجمد

ثابت خشک شدند. سپس وزن خشک با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری و به‌صورت تن در هکتار ثبت شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها پس از بررسی و تأیید برقراری فرض‌های تجزیه واریانس، انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها به کمک نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام و مقایسه میانگین پارامترهای مورد بررسی نیز با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت، برآورد همبستگی بین صفت به روش پیرسون و با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام شد.

نتایج و بحث

رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی

کلروفیل a

نتایج تحقیق حاضر نشان داد محتوی رنگ‌دانه کلروفیل a به‌صورت معنی‌داری تحت تأثیر اثر آبیاری و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک ($P \leq 0.01$) و برهم‌کنش دو تیمار ($P \leq 0.05$) قرار گرفت (جدول ۲).

نتایج مقایسه میانگین تیمارهای برهم‌کنش در جدول ۳ نشان داد محلول‌پاشی ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط آبیاری نرمال با متوسط ۵/۳۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بالاترین محتوی این رنگ‌دانه را کسب کرد. اختلاف بین سطح مذکور با سطح ۴ میلی‌مولار از نظر محتوی کلروفیل a معنی‌دار نبود، در این آزمایش گیاهان محلول‌پاشی نشده (شاهد) و گیاهان محلول‌پاشی شده با سطح ۲ میلی‌مولار در شرایط کم‌آبی به ترتیب با متوسط ۲/۱۲ و ۲/۷۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر کمترین محتوی کلروفیل را کسب کردند. نتایج حاکی از آن بود که ۴ میلی‌مولار تحت شرایط نرمال آبیاری، محتوی کلروفیل a را در مقایسه با شاهد اسید سالیسیلیک به‌صورت معنی‌داری افزایش داد. یکی از شاخص‌های مقاومت گیاهان به تنش کم‌آبی محتوی رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در گیاه است. کاهش محتوی کلروفیل ناشی از تنش کم‌آبی به عدم تعادل در رادیکال‌های اکسیژن مانند H_2O_2 در سلول‌ها و فعالیت چندین آنزیم مربوط می‌شود. در واقع غشای تیلاکوئید و پراکسیداسیون آن در اثر رادیکال‌های آزاد صورت می‌گیرد که موجب تخریب و تجزیه ساختار کلروفیل می‌شوند (Salehi et al. 2016).

جدول ۲ تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارهای آبیاری و اسید سالیسیلیک بر برخی از رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، پرولین و برخی از صفات مرتبط با وضعیت آبی گیاه در چغندر قند

Table 2 Analysis of variance (mean squares) of the effect of irrigation and salicylic acid treatments on some photosynthetic pigments, proline, and some traits related to plant water status in sugar beet

منابع تغییر SOV	درجه آزادی Df	میانگین مربعات MS					
		کلروفیل a Chloro phyll a	کلروفیل b Chloro phyll b	کارتنوئید Carotenoid	پرولین Proline	محتوی نسبی آب برگ Relative water content	ضریب هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance
تکرار Replication	3	0.41	0.05	1.48	0.001	6.38	2.59
آبیاری Irrigation (I)	1	22.48**	14.09**	10.29**	0.48*	311.04**	31.87*
خطای ۱ Error 1	3	0.55	0.13	0.09	0.02	7.51	1.68
اسید سالیسیلیک Salicylic acid (SA)	2	2.76**	1.78**	0.88**	0.06**	238.19**	9.92**
آبیاری × محلول‌پاشی (SA×I)	2	1.04*	0.49**	0.87**	0.01*	2.50 ^{ns}	1.25 ^{ns}
خطا Error	12	0.22	0.08	0.08	0.003	32.21	1.11
CV ضریب تغییرات (%)	-	13.13	11.43	12.14	8.46	8.35	7.85

^{ns}، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

ns, * and **: non-significant, significant at 1% and 5% of probability levels

در این آزمایش محتوی کلروفیل واکنش مثبتی به محلول پاشی اسید سالیسیلیک نشان داد. در مطالعه دیگری محلول پاشی اسید سالیسیلیک بر روی چغندر قند تحت شرایط تنش شوری به صورت معنی داری محتوی کلروفیل را در مقایسه با شاهد اسید سالیسیلیک افزایش داد (Mohammadi Cheraghabadi et al. 2015). همچنین نشان داده شده است که تنش کم آبی؛ رنگدانه های فتوسنتزی را کاهش داد. با این حال تحت شرایط تنش کم آبی محلول پاشی جاسمونیک اسید، محتوی رنگدانه های فتوسنتزی را افزایش داد (Hamze et al. 2025).

کلروفیل b

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد: اثر سطوح آبیاری، اسید سالیسیلیک و اثر متقابل دو تیمار، بر محتوی کلروفیل b معنی دار بود ($P \leq 0.01$ ، جدول ۲).

جدول ۳ مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای آبیاری و محلول پاشی اسید سالیسیلیک بر صفات مورد مطالعه چغندر قند

Table 3 Comparison of the mean effects of irrigation treatments and salicylic acid foliar spray on the studied traits of sugar beet

آبیاری Irrigation	اسید سالیسیلیک Salicylic acid	کلروفیل a Chloro phyll a mg g ⁻¹ FW	کلروفیل b Chloro phyll b mg g ⁻¹ FW	کارتنوئید Carotenoid mg g ⁻¹ FW	پرولین Proline mg g ⁻¹ FW	وزن خشک هوایی Dry weight of aerial parts t. ha ⁻¹	عملکرد ریشه Root yield t. ha ⁻¹	عملکرد شکر Root yield t. ha ⁻¹	کاتالاز U/mg ⁻¹ protein min	سوپر اکسید دیسموتاز U/mg ⁻¹ protein min	مالون دی آلدهید nmol g ⁻¹ FW- 1
نرمال Normal	Control	3.81bc	2.79b	2.30b	0.61bc	6.15b	72.95b	11.18bc	1.46c	1.87e	5.24cd
	2 mM	5.39a	3.59a	3.49a	0.49cd	9.07a	97.57a	15.29a	2.66b	2.52d	3.31e
	4 mM	4.59ab	3.40a	2.56b	0.45d	7.91a	89.8a	15.80a	1.83c	3.07cd	4.87d
کم آبی water deficit	Control	2.12e	1.43c	1.29c	0.91a	3.63d	53.22d	9.30c	2.45b	2.30c	9.03a
	2 mM	2.76de	1.30c	1.56c	0.68b	3.84cd	57.52cd	10.86bc	3.05ab	4.37b	7.43b
	4 mM	3.11cd	2.45b	2.16b	0.80a	4.98bc	67.12bc	12.10b	3.41a	5.67a	6.22c

میانگین دارای حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵ هستند.

Different superscript letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$)

محتوای رنگدانه های فتوسنتزی از اصلی ترین عوامل مؤثر بر کارایی دستگاه فتوسنتز و رشد و عملکرد محصول است (Ghorbani et al. 2019). در این آزمایش تنش کم آبی به صورت قابل توجهی محتوی رنگدانه های فتوسنتزی را کاهش داد با این حال، گزارش شده است تیمار سالیسیلیک اسید از طریق افزایش فعالیت آنزیم دلتا-آمینولولبیک اسید دهیدراتاز و کاهش فعالیت آنزیم کلروفیلاز، باعث بهبود محتوای رنگدانه ها

فتوسنتزی و فلورسانس کلروفیل تحت تنش خشکی می شود (La et al. 2019). گزارش شده است که اسید سالیسیلیک با کاهش سطح تولید رادیکال های آزاد و بهبود فعالیت آنزیم های دخیل در تولید کلروفیل، از تخریب رنگدانه های فتوسنتزی در شرایط تنش جلوگیری می کند (Nazar et al. 2015). می توان اظهار داشت اسید سالیسیلیک با القاء متابولیسم کلروفیل و افزایش سطح رنگدانه های فتوسنتزی نقش چشمگیری در

در این آزمایش همبستگی کلروفیل a با محتوی کلروفیل b مثبت و معنی دار بود (جدول ۴). وجود همبستگی مثبت و معنادار بین محتوای کلروفیل a و کلروفیل b نشان دهنده‌ی هماهنگی در سنتز و تجمع این دو رنگ دانه است.

تعدیل اثر تنش کم آبی در چغندر قند داشته باشد. گزارش شده است کاربرد اسید سالیسیلیک توانست محتوای کلروفیل (b+a) در گیاه گندم (*Triticum aestivum*) تحت تنش و بدون تنش را افزایش دهد. اسید سالیسیلیک باعث افزایش طول عمر برگ گیاهان در خشکی می شود و پیری در گیاهان را با ننگ داشتن و حفظ محتوای کلروفیل به تأخیر می اندازد (Aldesuquy et al. 2018).

جدول ۴ ضرایب همبستگی بین صفات مورد بررسی در چغندر قند تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و اسید سالیسیلیک
Table 4 Correlation coefficients among studied traits in sugar beet under irrigation and salicylic acid treatments

صفات Traits	کلروفیل a Chloro phyll a	کلروفیل b Chloro phyll b	کارتنوئید Carotenoid	پرولین Proline	محتوی نسبی آب برگ Relative water content	ضریب هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance	وزن خشک Dry weight of aerial parts	عیار قند Sugar content	عملکرد ریشه Root yield	عملکرد شکر Sugar yield	کاتالاز Catalase	سوپر اکسید دیسموتاز Superoxide dismutase
کلروفیل b Chloro phyll b	0.80**	1										
کارتنوئید Carotenoid	0.70**	0.81**	1									
پرولین Prolin	-0.70**	-0.74**	-0.65**	1								
محتوی نسبی آب برگ RW	0.62**	0.58**	0.44*	-0.64**	1							
ضریب هدایت روزنه tomatal conductanc	0.73**	0.62**	0.64**	-0.73**	0.70**	1						
وزن خشک Dry weight of aeria parts	0.89**	0.81**	0.82**	-0.74**	0.62**	0.67**	1					
عیار قند Sugar content	0.32 ^{ns}	0.35 ^{ns}	0.25 ^{ns}	-0.33 ^{ns}	-0.17 ^{ns}	-0.24 ^{ns}	-0.34 ^{ns}	1				
عملکرد ریشه Root yield	0.82**	0.88**	0.80**	-0.79**	0.62**	0.66**	0.85**	-0.41*	1			
عملکرد شکر Sugar yield	0.76**	0.80**	0.78**	-0.67**	0.60*	0.62**	0.79**	-0.01 ^{ns}	0.91**	1		
کاتالاز Catalase	-0.38 ^{ns}	-0.35 ^{ns}	-0.19 ^{ns}	0.44*	-0.16 ^{ns}	-0.62**	-0.33 ^{ns}	0.47*	-0.34 ^{ns}	-0.20 ^{ns}	1	
سوپر اکسید دیسموتاز superoxide dismutas	-0.39 ^{ns}	-0.25 ^{ns}	-0.37 ^{ns}	0.45*	-0.06 ^{ns}	-0.22 ^{ns}	-0.46*	0.69**	-0.41*	-0.16 ^{ns}	0.71**	1
مالون دی آلدئید Malondialdehyde	-0.85**	-0.82**	-0.78**	0.77**	-0.62**	-0.62**	-0.82**	0.29 ^{ns}	-0.81**	-0.76**	0.30 ^{ns}	0.48*

ns, * and **: non-significant, significant at 1% and 5% of probability levels

کارتنوئید

در این آزمایش اختلاف میان سطوح آبیاری، اسید سالیسیلیک و اثر متقابل دو تیمار بر محتوی کارتنوئید معنی دار بود ($P \leq 0.01$)، (جدول ۲).

نتایج تحقیق حاضر نشان داد کاربرد سطح ۲ میلی مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط آبیاری نرمال با متوسط ۳/۴۹ میلی گرم بر گرم وزن تر بالاترین محتوی کارتنوئید را داشت (جدول ۳)، کمترین محتوی کارتنوئید با متوسط ۱/۲۹ و ۱/۵۶ میلی گرم بر

گرم وزن تر به شاهد اسید سالیسیلیک و سطح ۲ میلی مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط کم آبی اختصاص داشت. نتایج نشان داد سطح ۲ میلی مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط آبیاری نرمال و سطح ۴ میلی مولار تحت شرایط کم آبی قادر به افزایش محتوی کارتنوئید به صورت معنی داری در مقایسه با تیمار شاهد اسید سالیسیلیک شدند (جدول ۳).

گزارش شده است تنش کم آبی به طور قابل توجهی رنگ دانه های فتوسنتزی را در مقایسه با شاهد اسید سالیسیلیک کاهش داده

محتوی نسبی آب برگ

نتایج نشان داد بین سطوح آبیاری و محلول پاشی از نظر اثر بر محتوی نسبی آب برگ اختلاف معنی دار وجود داشت ($P \leq 0.01$ ، جدول ۲).

در این بررسی تنش کم آبی محتوی آب نسبی برگ را در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال به صورت معنی دار ($7/2$ واحد) کاهش داد (شکل ۱). یکی از نشانه های برآورد وضعیت آب برگ های گیاه محتوی نسبی آب برگ است. نشت الکترولیت ها در سلول ها در اثر تغییرات در غشاء سلولی در اثر تنش کم آبی تسریع می شود. (Rajkumar et al. 2017). گزارش شده که تنش کم آبی اثر منفی بر محتوی آب نسبی چغندر قند داشته و آن را کاهش می دهد (Fatahighazi et al. 2024).

محتوای آب نسبی برگ از خصوصیات فیزیولوژیکی پاسخ دهنده به تنش خشکی است که همبستگی خوبی با تحمل گیاه به خشکی نشان داده است (Colom and Vazzana 2003). کاهش پتانسیل آب مانع از تقسیم سلولی، رشد اندام ها، فتوسنتز خالص و سنتز پروتئین می شود و تعادل هورمونی بافت های اساسی گیاه را تغییر می دهد. به خوبی مشخص شده است که تحت شرایط تنش زا مانند تنش خشکی، محتوای آب نسبی، پتانسیل آب برگ و پتانسیل اسمزی سلول ها را کاهش می دهد (Ma et al. 2006). کاهش محتوی نسبی آب برگ در اثر تنش کم آبی در چغندر قند در مطالعه دیگری نیز به اثبات رسیده است (Fugate et al. 2018). در مطالعه ای بر روی چغندر قند معلوم شده است که محتوی نسبی آب برگ در چغندر قند با تشدید تنش کم آبی کاهش یافت اما محلول پاشی جاسمونیک اسید تحت شرایط تنش کم آبی بر محتوی نسبی آب برگ افزود (Ghaffari et al. 2020). اثر مثبت محلول پاشی اسید سالیسیلیک در بهبود محتوی نسبی آب برگ در چغندر قند در مطالعات دیگری نیز به اثبات رسیده است (Abhari et al. 2023).

نتایج حاکی از آن بود که هر دو سطح ۲ و ۴ میلی مولار اسید سالیسیلیک (به ترتیب با متوسط ۶۹/۷۷ و ۷۲/۲۹ درصد) محتوی نسبی آب برگ (با متوسط ۶۱/۸۴ درصد) را در مقایسه با شاهد اسید سالیسیلیک به صورت معنی داری افزایش دادند (شکل ۱). اثر مثبت اسید سالیسیلیک در بهبود کارایی مصرف آب در گیاهان

است. کاهش رنگ دانه های کلروفیل ناشی از خشکی ممکن است به دلیل مهار فرآیندهای حیاتی فتوسنتز، مانند بیوسنتز کلروفیل باشد که در نهایت سبب کاهش محتوی کلروفیل می شود (Parveen et al. 2021). کاهش رنگدانه های فتوسنتزی و کارتنوئید برگ چغندر قند در اثر تنش کم آبی در مطالعه دیگری نیز گزارش شده است (Mir Mahmoudi et al. 2023). محتوی کارتنوئید با محتوی کلروفیل a و b مثبت و معنی دار بود (جدول ۴).

محتوی پرولین

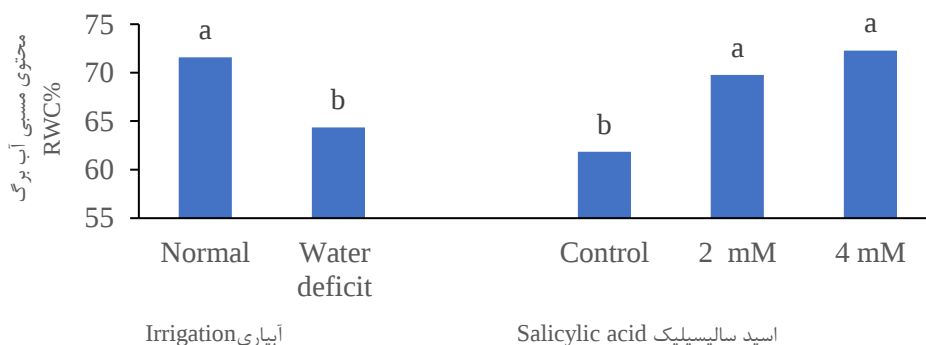
در این آزمایش اثرات ساده آبیاری ($P \leq 0.01$) و اسید سالیسیلیک ($P \leq 0.05$) و همچنین اثر متقابل آبیاری با اسید سالیسیلیک ($P \leq 0.01$) بر محتوی پرولین برگ معنی دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین تیمارهای برهم کنش نشان داد کم آبی به صورت معنی داری محتوی پرولین را افزایش داد به طوری که بالاترین محتوی پرولین با متوسط ۰/۹۱ و ۰/۸۰ میلی گرم بر گرم وزن تر به شاهد اسید سالیسیلیک و محلول پاشی ۴ میلی مولار تحت شرایط تنش کم آبی اختصاص داشت، کمترین محتوی پرولین نیز به محلول پاشی ۲ و ۴ میلی مولار تحت شرایط آبیاری نرمال به ترتیب با متوسط ۰/۴۹ و ۰/۴۵ میلی گرم بر گرم وزن تر اختصاص داشت (جدول ۳).

در جریان تنش کم آبی پرولین با تنظیم اسمزی ساختار اولیه مولکول های بزرگ و غشاء های سلولی را حفظ می نماید. علاوه بر این پاک سازی رادیکال های هیدروکسیل و اکسیژن فعال توسط پرولین صورت می گیرد (Bhardwaj et al. 2012). عامل تجمع پرولین در برگ در اثر تنش خشکی به افزایش غلظت پرولین در شیره سلولی گیاهان و انتقال آن به برگ ها ارتباط دارد. یکی دیگر از دلایل افزایش غلظت پرولین تحت شرایط تنش کم آبی کاهش مصرف آن در گیاه است به طوری که توقف در اکسایش پرولین در پتانسیل های آب پایین اتفاق می افتد (Huguet- Robert et al. 2003). گزارش شده است که پرولین در برگ های چغندر قند در اثر تنش کم آبی افزایش می یابد (Islam et al. 2020). در تحقیقی بر روی چغندر قند کاربرد مواد ضد تنش توانستند با افزایش سطح پرولین برگ اثر مضر کم آبی را بر عملکرد ریشه کاهش داد (Muneera et al. 2021).

پرویلین منفی و معنی‌دار بود (جدول ۴). وجود این ارتباط بیانگر این است که با بهبود وضعیت آب گیاه بر میزان سنتز رنگ‌دانه‌های فتوسنتز افزوده می‌شود.

شنبليله (*Trigonella foenum-graecum*) (Touhidi, 2016) و گوجه‌فرنگی (Nejad et al. 2008) نیز گزارش شده است.

در این آزمایش همبستگی محتوی آب نسبی برگ با محتوی کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئید مثبت و معنی‌دار و با محتوی



شکل ۱ مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای اثر متقابل آبیاری با محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر محتوی نسبی آب برگ در چغندر قند
Fig 1 Comparison of the mean effects of the interaction between irrigation and salicylic acid foliar application treatments on the relative water content of sugar beet leaves

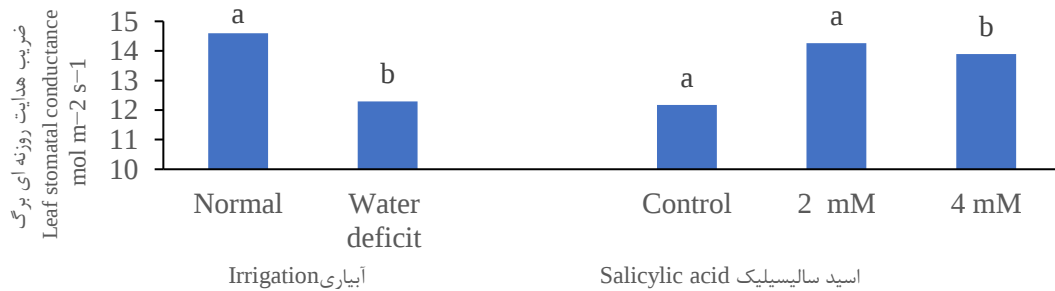
از محتوی نسبی آب برگ و ضریب هدایت روزنه‌ای برگ‌های چغندر قند کاست، اما محلول‌پاشی جاسمونیک اسید و نانوکلات روی، ضریب هدایت روزنه‌ای را افزایش داد (Hamze et al. 2025).

همبستگی ضریب هدایت روزنه‌ای با محتوی کلروفیل a، کلروفیل b، کارتنوئید و محتوی نسبی آب برگ، مثبت و معنی‌دار و با محتوی پرویلین، منفی و معنی‌دار بود (جدول ۴). وجود همبستگی منفی میان محتوی پرویلین و ضریب هدایت روزنه‌ای بیانگر این واقعیت است که زمانی که محتوای پرویلین به دلیل تنش کم‌آبی افزایش می‌یابد، ضریب هدایت روزنه‌ای برگ کاهش خواهد یافت. همبستگی منفی مشاهده‌شده میان محتوای پرویلین و ضریب هدایت روزنه‌ای برگ نشان می‌دهد که تحت شرایط تنش کم‌آبی، تجمع پرویلین به‌عنوان یک متابولیت محافظتی با کاهش هدایت روزنه‌ای همراه است. این رابطه بیانگر سازوکار تطابقی گیاه برای حفظ آب از طریق بسته‌شدن روزنه‌ها و در عین حال افزایش تحمل به تنش با تجمع ترکیبات اسمزی مانند پرویلین است. یافته‌ها مؤید نقش پرویلین در تعدیل پاسخ‌های فیزیولوژیکی به محدودیت آب است.

ضریب هدایت روزنه‌ای

ضریب هدایت روزنه‌ای به‌صورت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد تحت تأثیر آبیاری و در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک قرار گرفت (جدول ۲). در این آزمایش؛ تنش کم‌آبی، ضریب هدایت روزنه‌ای را در مقایسه با شرایط نرمال ۱۵/۸۲ درصد کاهش داد (شکل ۲). در گیاهان تحت تنش، تجمع اسید آبسزیک در برگ‌ها تحریک می‌شود که باعث عدم تعادل یونی شده و یون پتاسیم (K^+) از سلول‌های نگهبان نشت و فشار تورگر سلول‌های نگهبان کم می‌شود. در نهایت با کاهش محتوای آب نسبی برگ بسته شدن روزنه شدت می‌گیرد. گزارش شده است که تنش خشکی شدید ضریب هدایت روزنه‌ای در برگ چغندر قند را به‌صورت چشم‌گیری کاهش می‌دهد (Fatahighazi et al. 2023).

نتایج نشان داد ضریب هدایت روزنه‌ای واکنش مثبتی به محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک نشان داد به‌طوری‌که محلول‌پاشی ۲ و ۴ میلی‌مولار ضریب هدایت روزنه‌ای را در مقایسه با شاهد اسید سالیسیلیک به ترتیب ۱۷/۱۷ و ۱۴/۱۳ درصد افزایش داد (شکل ۲). در مطالعه دیگری تنش کم‌آبی به‌صورت معنی‌داری



شکل ۲ مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای اثر متقابل آبیاری با محلول پاشی اسید سالیسیلیک ضریب هدایت روزنه‌ای در چغندر قند
Fig 2 Comparison of the mean effects of the interaction between irrigation and salicylic acid foliar application treatments on leaf stomatal conductance in sugar beet

کمیاب آب اختصاص داشت، نتایج تحقیق حاضر حاکی از آن بود که کاربرد هر دو سطح سطوح ۲ و ۴ میلی مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط آبیاری نرمال و کاربرد ۴ میلی مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط کم آبی توانست وزن خشک ماده هوایی را در مقایسه با شاهد اسید سالیسیلیک به صورت معنی داری افزایش داد (جدول ۳).
 در این مطالعه وزن خشک اندام هوایی با محتوی کلروفیل a، کلروفیل b، کارتنوئید، محتوی نسبی آب برگ و ضریب هدایت روزنه‌ای مثبت و معنی دار و با محتوی پروتئین منفی و معنی دار بود (جدول ۴).

وزن خشک اندام هوایی

آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد اثر آبیاری، محلول پاشی اسید سالیسیلیک و اثر متقابل دو تیمار بر وزن خشک اندام هوایی معنی دار بود ($P \leq 0.01$)، (جدول ۵).
 مقایسه میانگین تیمارهای برهم کنش نشان داد کاربرد سطوح ۲ و ۴ میلی مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط آبیاری نرمال به ترتیب با متوسط ۹/۰۷ و ۷/۹۱ تن در هکتار حداکثر وزن خشک اندام هوایی را به خود اختصاص دادند، کمترین وزن خشک اندام هوایی با متوسط ۳/۶۳ و ۳/۸۴ تن در هکتار به شاهد اسید سالیسیلیک و محلول پاشی ۲ میلی مولار تحت شرایط تنش

جدول ۵ تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارهای آبیاری و اسید سالیسیلیک بر برخی از صفات کمی و کیفی و همچنین تعدادی از آنزیم‌های آنتی اکسیدان در چغندر قند

Table 5 Analysis of variance (Mean squares) of the effect of irrigation and salicylic acid treatments on some quantitative and qualitative traits, as well as several antioxidant enzymes in sugar beet

منابع تغییر SOV	درجه آزادی Df	میانگین مربعات MS						
		وزن خشک اندام هوایی Dry weight of aerial parts	عیار قند Sugar content	عملکرد قند Sugar yield	عملکرد ریشه Root yield	کاتالاز Catalase	سوپر اکسید دیسموتاز Superoxide dismutase	مالون دی آلدئید Malondialdehyde
تکرار Replication	3	0.99	0.90	2.80	7.83	0.16	0.04	0.10
آبیاری Irrigation	1	76.10**	19.08**	66.81**	717.18**	7.50**	23.26**	57.19**
خطای ۱ Error 1	3	1.27	0.16	0.39	1.26	0.27	0.23	0.46
اسید سالیسیلیک Salicylic acid	2	6.47**	6.26*	30.09**	86.70**	1.01*	5.90**	7.57**
آبیاری × محلول پاشی (SA×I)	2	4.23**	2.02	6.90*	55.72*	0.82*	1.59**	4.59**
خطا Error	12	0.57	1.47	1.29	10.48	0.20	0.20	0.48
CV ضریب تغییرات (%)	-	12.81	7.14	9.17	10.98	17.61	12.98	11.61

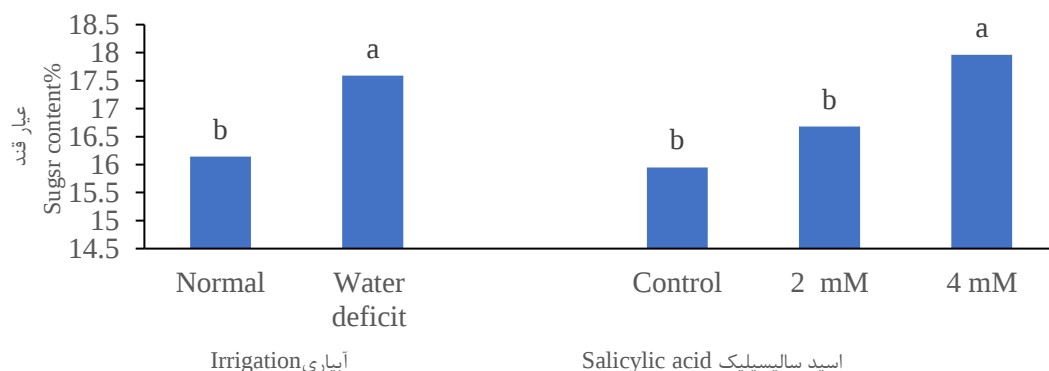
ns, * و ** به ترتیب غیر معنی دار، معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

ns, * and **: non-significant, significant at 1% and 5% of probability levels

عیار قند

در این آزمایش اثر آبیاری در سطح احتمال یک درصد و اثر محلول پاشی اسید سالیسیلیک در سطح احتمال پنج درصد بر عیار قند معنی دار بود (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین تیمارها نشان داد: شرایط تنش کم آبی عیار قند را در مقایسه با شرایط نرمال ۸/۹۸ درصد (۱/۴۵ واحد) افزایش داد (شکل ۳).

از آن جا که اندازه گیری بر اساس وزن تر انجام شده، این افزایش می تواند ناشی از دو عامل تجمع واقعی متابولیت های قندی در پاسخ به تنش و یا کاهش محتوای آب گیاه که منجر به تغلیظ نسبی مواد جامد شده است، باشد. گزارش شده است که کمبود آب باعث افزایش تنفس در چغندر قند شده و نشاسته را به ساکارز تبدیل می کند و در نتیجه میزان قند را افزایش می دهد (Ober and Luterbacher 2002). افزایش عیار قند در اثر تنش کم آبی در مطالعه های دیگر نیز گزارش شده است (Ghaffari et



شکل ۳ مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای اثر متقابل آبیاری با محلول پاشی اسید سالیسیلیک بر عیار قند در چغندر قند

Fig 3 Comparison of the mean effects of the interaction between irrigation and salicylic acid foliar application treatments on sugar content in sugar beet

نشده تحت شرایط تنش کم آبی اختصاص داشت، اختلاف بین تیمار مذکور با کاربرد سطح ۲ میلی مولار تحت شرایط کم آبی معنی دار نبود. نتایج نشان داد کاربرد سطح ۴ میلی مولار اسید سالیسیلیک در شرایط نرمال و کم آبی عملکرد ریشه را در مقایسه با شاهد اسید سالیسیلیک به ترتیب ۲۳/۰۹ و ۲۶/۱۱ درصد افزایش داد (جدول ۳). تنش کمبود آب می تواند رشد برگ و ریشه را محدود کند که باعث کاهش تجمع ساکارز در چغندر قند می شود (Hoffmann 2010).

عملکرد ریشه

بر اساس نتایج آنالیز واریانس داده ها اثر اصلی آبیاری و محلول پاشی اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد و برهم کنش دو تیمار در سطح احتمال پنج درصد بر عملکرد ریشه معنی دار بود (جدول ۵).

در این آزمایش کاربرد سطوح ۲ و ۴ میلی مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط آبیاری نرمال بالاترین عملکرد ریشه را با میانگین ۹۷/۵۷ و ۸۹/۸۰ تن در هکتار کسب کرد، کمترین عملکرد ریشه نیز با متوسط ۵۳/۲۲ تن در هکتار به کرت های محلول پاشی

تحت شرایط کم آبی با متوسط ۹/۳۰ ثبت شد، اگرچه اختلاف میان تیمار ذکر شده با تیمار ۲ میلی مولار تحت شرایط کم آبی قابل توجه نبود (جدول ۳). در این بررسی اگرچه کم آبی از عملکرد شکر کاست اما کاربرد سطح ۴ میلی مولار، عملکرد شکر را در مقایسه با شاهد اسید سالیسیلیک مربوطه ۳۰/۱۱ درصد افزایش داد. لازم به ذکر است که در هر دو شرایط محیطی کاربرد ۴ میلی مولار اسید سالیسیلیک در هر دو شرایط، عملکرد شکر را به صورت قابل توجهی در مقایسه با شاهد اسید سالیسیلیک افزایش داد (جدول ۳). گزارش شده است استفاده از مواد ضد تنش مانند اسید سالیسیلیک، تیوفل و گلیسین در سطوح مختلف موجب بهبود خصوصیات کیفی در چغندر قند از جمله عملکرد ریشه و عملکرد قند می شود (Kheirkhah et al. 2016).

همبستگی عملکرد شکر با محتوی کلروفیل a، کلروفیل b، کارتنوئید، محتوی نسبی آب برگ، ضریب هدایت روزنه ای و وزن خشک اندام هوایی و عملکرد ریشه مثبت و معنی دار و با محتوی پرولین منفی و معنی دار بود (جدول ۴). با توجه به اینکه عملکرد شکر برآیند عملکرد ریشه و عیار قند است، بهبود عملکرد ریشه در اثر مثبت محلول پاشی اسید سالیسیلیک بر دو صفت مذکور است.

فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان

فعالیت آنزیم کاتالاز

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد اثر آبیاری ($P \leq 0.01$) محلول پاشی اسید سالیسیلیک و اثر متقابل دو تیمار بر مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز ($P \leq 0.05$) معنی دار بود (جدول ۵).

مقایسه میانگین تیمارهای برهم کنش نشان داد کاربرد سطح ۴ میلی مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط تنش کم آبی با متوسط ۳/۴۱ واحد بر میلی گرم پروتئین بر دقیقه بالاترین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز را کسب کرد، اختلاف بین سطح مذکور با سطح ۲ میلی مولار تحت شرایط تنش کم آبی قابل توجه نبود. کمترین مقدار فعالیت این آنزیم با میانگین ۱/۴۶ و ۱/۸۳ واحد بر میلی گرم پروتئین بر دقیقه به سطح شاهد اسید سالیسیلیک و ۴ میلی مولار اسید سالیسیلیک در شرایط نرمال اختصاص داشت. در این

در این آزمایش اگرچه تنش کم آبی عملکرد ریشه را افزایش داد اما محلول پاشی سطح ۴ میلی مولار اسید سالیسیلیک توانست اثر کم آبی را تعدیل نمود. اسید سالیسیلیک یکی از هورمون های مهم گیاه است که نقش چشم گیری در افزایش تحمل گیاه به تنش های مختلف از جمله شوری (Nazar et al. 2015)، خشکی (Abbaszadeh et al. 2020; Sohag et al. 2020) و سمیت فلزات سنگین (Zhang et al. 2015) دارد. نشان داده شده است که استفاده از اسید سالیسیلیک تحت شرایط تنش کم آبی عملکرد ریشه را افزایش داد (Abhari et al. 2023) همسو با نتایج تحقیق حاضر است.

در مطالعه ای بر روی چغندر قند مشاهده شد کاربرد مواد ضد تنش مانند سیلیکون و پرولین از طریق بهبود محتوی نسبی آب برگ، افزایش پرولین و کاهش نشت الکترولیت توانست عملکرد ریشه را تحت شرایط کم آبی افزایش دهد (Muneera et al. 2021). در تحقیقی بر روی گندم کاربرد اسید سالیسیلیک عملکرد دانه را از طریق کاهش نشت یونی، افزایش غلظت پرولین و افزایش سطح رنگ دانه های فتوسنتزی در شرایط کم آبی افزایش داد. در تحقیق حاضر عملکرد ریشه با همبستگی محتوی کلروفیل a، کلروفیل b، کارتنوئید، محتوی نسبی آب برگ، ضریب هدایت روزنه ای و وزن خشک اندام هوایی مثبت و معنی دار و با محتوی پرولین و عیار قند منفی و معنی دار بود (جدول ۴). افزایش عملکرد ریشه در مطالعه حاضر در اثر تیمار اسید سالیسیلیک می تواند به دلیل اثر این تیمار بر سنتز رنگ دانه های فتوسنتزی و بهبود وضعیت آبی گیاه باشد که موجب افزایش تولید مواد فتوسنتزی و انتقال آن به ریشه ها می گردد.

عملکرد شکر

در این تحقیق اثر سطوح آبیاری و محلول پاشی اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد و برهم کنش دو تیمار در سطح احتمال پنج درصد معنی دار بود (جدول ۵).

نتایج برهم کنش تیمارهای اثر متقابل نشان داد کاربرد سطوح ۲ و ۴ میلی مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط آبیاری نرمال با متوسط ۱۵/۲۹ و ۱۵/۸۰ تن در هکتار بالاترین عملکرد شکر را کسب کرد، کمترین عملکرد شکر برای شاهد اسید سالیسیلیک

نقش مهمی در از بین بردن پراکسید هیدروژن دارند و این ماده را به H_2O و O_2 کاتالیز می کنند و اثرات مخرب ROS را کاهش می دهند (Sorkhi 2021).

گزارش شده است که افزایش محتوی آنزیم های آنتی اکسیدان SOD، POD، CAT و APX در واکنش به تنش کم آبی در چغندر قند واکنش محافظتی است (Islam et al. 2020).

محتوی مالون دی آلدئید

محتوی مالون دی آلدئید به صورت معنی داری تحت تأثیر آبیاری، محلول پاشی اسید سالیسیلیک و برهمکنش دو عامل مورد بررسی قرار گرفت ($P \leq 0.01$) (جدول ۵).

نتایج مقایسه میانگین تیمارهای برهمکنش نشان داد بالاترین محتوی مالون دی آلدئید به گیاهان تیمار نشده تحت شرایط تنش کمبود آب با متوسط $9/03$ نانو مول بر گرم وزن تر اختصاص داشت، کمترین محتوی این ماده نیز با متوسط $3/31$ نانو مول بر گرم وزن تر برای تیمار 2 میلی مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط آبیاری نرمال ثبت شد، در این آزمایش اگرچه تیمار کم آبی به صورت معنی داری بر محتوی مالون دی آلدئید افزود اما استفاده از هر دو سطح 2 و 4 میلی مولار اسید سالیسیلیک به صورت معنی داری از محتوی مالون دی آلدئید کاست.

یکی از نشانه های آسیب تنش اکسیداتیو به غشاء سلول گیاهی محتوی مالون دی آلدئید است، غشای سلولی برگ در اثر تنش کم آبی آسیب می زند (Liang et al. 2019)، این آسیب با محتوی مالون دی آلدئید در ارتباط است. افزایش پراکسیداسیون لیپیدی با تشدید تنش کم آبی با تولید ROS از جمله پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و رادیکال های سوپر اکسید (O_2^-) مرتبط است (Ghassemi et al. 2018). افزایش پراکسیداسیون لیپیدی با تشدید تنش کم آبی با تولید ROS از جمله پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و رادیکال های سوپر اکسید (O_2^-) مرتبط است (Naeem et al. 2018). افزایش محتوی مالون دی آلدئید در اثر تنش کم آبی در چغندر قند در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است (Ghaffari et al. 2022). گزارش شده است که اسید سالیسیلیک باعث پایداری غشاء سلول و کاهش مالون دی آلدئید

آزمایش استفاده از سطح 2 میلی مولار تحت شرایط آبیاری نرمال و سطح 4 میلی مولار تحت شرایط تنش کمبود آب به صورت معنی داری بر مقدار فعالیت این آنزیم در مقایسه با شاهد های مربوطه افزود (جدول ۳).

نتایج تحقیق حاضر نشان داد میزان فعالیت آنزیم کاتالاز با پرولین و عیار قند مثبت و معنی دار و با ضریب هدایت روزنه ای منفی و معنی دار بود (جدول ۴).

فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز

اثر آبیاری، محلول پاشی اسید سالیسیلیک و همچنین برهمکنش دو عامل مورد بررسی بر مقدار فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز معنی دار بود ($P \leq 0.01$) (جدول ۵).

در این آزمایش بالاترین مقدار فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز با متوسط $5/67$ واحد بر میلی گرم پروتئین بر دقیقه برای تیمار 4 میلی مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط تنش کمبود آب ثبت شد، گیاهان محلول پاشی نشده تحت شرایط آبیاری نرمال با متوسط $1/87$ واحد بر میلی گرم پروتئین بر دقیقه کمترین مقدار فعالیت آنزیم مذکور را نشان دادند. تنش کم آبی به صورت معنی داری، فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز را افزایش داد. با این وجود محلول پاشی اسید سالیسیلیک در هر دو سطح بر مقدار فعالیت این آنزیم تحت شرایط کم آبی افزود (جدول ۳).

بر اساس نتایج جدول همبستگی میان صفات فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز و محتوی پرولین، عیار قند و مقدار فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز، مثبت و معنی دار و با وزن خشک اندام هوایی و عملکرد ریشه، منفی و معنی دار بود (جدول ۴).

افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی تحت تنش کم آبی نشان دهنده ی افزایش تولید گونه های فعال اکسیژن (ROS) است. این آنزیم ها برای سم زدایی ROS تولید شده تحت تنش های زنده و غیر زنده عمل می کنند (Zeighami Nejad et al. 2020). محققان نشان داده اند که افزایش مقدار فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان ارتباط نزدیکی با تنش خشکی دارد (Zeighami Nejad et al. 2020; Ahanger et al. 2021).

آنزیم های کاتالاز، آسکروبات پراکسیداز و سوپر اکسید دیسموتاز

میلی مولار اسید سالیسیلیک علاوه بر این که عملکرد شکر را نسبت به شاهد اسید سالیسیلیک مربوطه افزایش داد اختلاف معنی داری نیز با سطح شاهد اسید سالیسیلیک تحت شرایط آبیاری نرمال نداشت. با توجه به نتایج همبستگی میان صفات همبستگی عملکرد شکر با محتوی مالون دی آلدهید منفی و با محتوی رنگ دانه های فتوستنتزی، محتوی نسبی آب برگ و ضریب هدایت روزنه ای مثبت و معنی دار بود. می توان اظهار داشت در این تحقیق کاربرد اسید سالیسیلیک با بهبود وضعیت آب در داخل گیاه و بهبود ضریب هدایت روزنه ای از میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشائی (مالون دی آلدهید) کاسته و از این طریق اثر تنش کم آبی را بر عملکرد شکر تعدیل می کند.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است

سپاسگزاری

بدین وسیله از تمامی حمایت ها و مساعدت های دانشگاه آزاد اسلامی واحد میاندوآب جهت فراهم نمودن امکانات مورد نیاز برای اجرای این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را داریم.

در گندم در شرایط تنش شده است (Khalvandi et al. 2021). در مطالعه دیگری نیز محتوی مالون دی آلدهید در برگ چغندر قند در اثر تنش کم آبی افزایش یافت (Fatahighazi et al. 2023).

مالون دی آلدهید با محتوی پرولین و سوپر اکسید دیسموتاز همبستگی مثبت و معنی دار مشاهده شد، با این حال همبستگی مالون دی آلدهید با کلروفیل a، کلروفیل b، کارتنوئید، ضریب هدایت روزنه ای، وزن خشک، عملکرد ریشه و عملکرد شکر منفی و معنی دار بود (جدول ۴).

وجود این ارتباط بیانگر آن است که با افزایش پراکسیداسیون چربی های غشاء (مالون دی آلدهید) که در اثر تنش کم آبی صورت می گیرد، تخریب رنگ دانه های فتوستنتزی انجام شده، ضریب هدایت روزنه ای کم شده و در نهایت سطح فتوستنتز کننده کاهش یافته و از این طریق عملکرد ریشه که جزء اساسی عملکرد ریشه است کاهش می یابد.

نتیجه گیری

با توجه به اهمیت عملکرد شکر در چغندر قند نتیجه گیری نیز بر اساس این صفت ها انجام شد. در این بررسی با شرایط تنش کم آبی، عملکرد شکر کاهش یافت. با این حال کاربرد سطح ۴

References

منابع مورد استفاده

- Abbaszadeh B, Layeghhighi M, Azimi R, Hadi N. Improving water use efficiency through drought stress and using salicylic acid for proper production of *Rosmarinus officinalis* L. Industrial Crops and Products. 2020; 144: 111893. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111893>
- Abhari A, Seydabadi M, Kermani M. Study of physiological tolerance of sugar beet to drought stress with salicylic acid consumption. Journal of Crop Science Research in Arid Regions. 2023; 5: 2, 429-446. Doi: <https://doi10.22034/csrar.2023.356848.1268>
- Ahanger MA, Qi M, Huang Z, Xu X, Begum N, Qin C, Zhang C, Ahmad N, Mustafa NS, Ashraf M, Zhang L. Improving growth and photosynthetic performance of drought stressed tomato by application of nano-organic fertilizer involves up-regulation of nitrogen, antioxidant and osmolyte metabolism. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2021; 216: 112195. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112195>
- Aldequay HS, Ibraheem FL, Ghanem HE. Exogenously supplied salicylic acid and trehalose protect growth vigor, chlorophylls and thylakoid membranes of wheat flag leaf from drought-induced damage. Journal of Agriculture and Forest Meteorology Research. 2018; 1(1): 13-20.
- Anonymous. FAO. Crops Production and Area Harvested. 2023, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2025.
- Bates LS, Waldren RP, Teare IO. Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant and Soil. 1973; 39: 205-207. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Bhardwaj J, Yadav SK. Comparative study on biochemical parameters and antioxidant enzymes in a drought tolerant and a sensitive variety of horsegram (*Macrotyloma uniflorum*) under drought stress. American Journal of Plant Physiology. 2012; 7: 17-29.
- Bloch D, Hoffman CM, Märlander B. Solute accumulation as a cause for quality losses in sugar beet submitted to continuous and temporary drought stress. Journal of Agronomy and Crop Science. 2006; 192: 17-24. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2006.00185.x>

- Bowler C, Slooten L, Vandenbranden S, De Rycke R, Botterman J, Sybesma C, Van Montagu M, Inzé D. Manganese superoxide dismutase can reduce cellular damage mediated by oxygen radicals in transgenic plants. *The EMBO Journal*. 1991; 10: 1723- 32. Doi: <https://doi.org/10.1002/j.1460-2075.1991.tb07696.x>
- Britton C, Mehley A. Assay of catalase and peroxidase. *Methods in Enzymology*. 1995; 2: 764-75. Doi: <https://doi.org/10.1002/9780470110171.ch14>
- Buege JA, Aust SD. Microsomal lipid peroxidation. *Methods in Enzymology*. 1978; 52: 302–310. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(78\)52032-6](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(78)52032-6).
- Choluj D, Karwowska R, Jasińska M, Haber G. Growth and dry matter partitioning in sugar beet plants (*Beta vulgaris* L.) under moderate drought. *Plant, Soil and Environment*. 2004; 50: 265–272. Doi: <https://doi.org/10.17221/4031-PSE>
- Colom MR, Vazzana C. Photosynthesis and PSII functionality of drought-resistant and drought-sensitive weeping lovegrass plants. *Environmental and Experimental Botany*. 2003; 49: 135-144. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(02\)00065-5](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(02)00065-5)
- Dianat M, Saharkhiz MJ, Tavassolian I. Salicylic acid mitigates drought stress in *Lippia citriodora* L.: effects on biochemical traits and essential oil yield. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2016; 8: 286 -293. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.10.010>
- Fatahighazi S, Mir Mahmoodi T, Hamze H. The effect of vermicompost, humic acid and manure on yield, biochemical and enzymatic properties of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under water deficit conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*. 2024; 54(4): 61-78. Doi: <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.356803.654991>.
- Fugate KK, Lafta MA, Eide GD, Li GL, Lulai ECN, Olson LL, Deckard FL, Khan MFR, Finger FL. Methyl jasmonate alleviates drought stress in young sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2018; 24(6): 566-576. Doi: <https://doi.org/10.1111/jac.12286>.
- Gerami M, Ghorbani A, Karimi S. Role of salicylic acid pretreatment in alleviating cadmium -induced toxicity in *Salvia officinalis* L. *Iranian Journal of Plant Biology*. 2018; 10: 81 -95. Doi: <https://doi.org/10.22067/jhs.2025.92581.1420>
- Ghaffari H, Tadayon M, Razmjoo J, Bahador M, Soureshjani HK, Yuan T. Impact of jasmonic acid on sugar yield and physiological traits of sugar beet in response to water deficit regimes: using stepwise regression approach. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2020; 67:482–493. Doi: <https://doi.org/10.1134/S1021443720030097>.
- Ghaffari H, Tadayon MR, Nadeem M, Razmjoo J, Cheema M. Investigating the effectiveness of silicon and salicylic acid on yield and antioxidant properties of sugar beet under drought stress. *Agricultural Water Management*. 2022; 271: 107760. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107760>.
- Ghassemi S, Farhangi-Abriz S, Faegi-Analou R, Ghorbanpour M, Lajayer BA. Monitoring cell energy, physiological functions and grain yield in field grown mung bean exposed to exogenously applied polyamines under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2018; 18: 1108–1125. Doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005003102>.
- Ghorbani A, Ghasemi Omran VO, Razavi SM, Pirdashti H, Ranjbar M. Piriformospora indica confers salinity tolerance on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) through amelioration of nutrient accumulation, K⁺/Na⁺ homeostasis and water status. *Plant Cell Reports*. 2019 a; 38: 1151 -1163. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00299-019-02434-w>
- Hamze H, Hassani M, Mansouri H. Screening O-type lines of sugar beet in terms of resistance to rhizoctonia root rot. *Journal of Sugar Beet*. 2021; 37(2): 153-165.(Persian with English abstract) Doi: <https://doi.org/10.22092/jsb.2022.357181.1296>.
- Hamze H, Khalili M, Mir-Shafiee Z, Nasiri J. Integrated Biomarker Response Version 2 (IBRv2) - Assisted Examination to Scrutinize Foliar Application of Jasmonic Acid (JA) and Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO NPs) Toward Mitigating Drought Stress in Sugar Beet. *Journal of Plant Growth Regulation* 2025. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11475-9>.
- Hayat S, Hasan SA, Fariduddin Q, Ahmad A. Growth of tomato (*Lycopersicon esculentum*) in response to salicylic acid under water stress. *Journal of Plant Interactions*. 2008; 3: 297 -304 Doi: <https://doi.org/10.1080/17429140802320797>
- Hoffmann CM. Sucrose accumulation in sugar beet under drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2010; 196: 243–252. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2009.00415.x>
- Horvath E, Szalai G, Janda, T. Induction of abiotic stress tolerance by salicylic acid signaling. *Journal of Plant Growth Regulation*. 2007; 26: 290 -300. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00344-007-9017-4>
- Huguet-Robert V, Sulpice R, Lefort C, Maerskalck V, Emery N, Larcher FR. The suppression of osmoinduced stress response of *Brassica napus* L. var. oleifera leaf discs by polyunsaturated fatty acids and methyljasmonate. *Plant Science*. 2003;164:119-127. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00343-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00343-6)
- Islam MJ, Kim JW, Begum MK, Sohel MAT, Lim YS. Physiological and biochemical changes in sugar beet seedlings to confer stress adaptability under drought condition. *Plants*. 2020; 9(11):1511, Doi: <https://doi.org/10.3390/plants9111511>
- Khalili M, Hamze H. Effect of Different Soil Amendment Treatments on Quantitative and Qualitative Characteristics of Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) under Different Irrigation Regimes. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. 2021; 31 (1): 171-192. Doi: <https://doi.org/10.1001.1.24764310.1400.31.1.11.9>.
- Khalvandi M, Amerian M, Siosemardeh A, Roohi E. The effect of salicylic acid on some physiological characteristics of wheat under drought stress. *Cereal Research*. 2021; 11(2): 175-189.
- Kheirkhah M, Farazi M, Dadkhah A, Khoshnood A. 2016. Application of glycine, tufol and salicylic acid in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under drought conditions. *Journal of Crop Ecophysiology*. 2016; 10(1): 167- 182. (In Persian).
- Kheirkhah M, Gholami A, Asgharzadeh A. The effect of foliar application of salicylic acid, thiofol and glycine on quality traits and yield of sugar beet. *Journal of Crop Production and Processing*. 2016; 6(19): 117-128.
- Koo YM, Heo AY, Choi HW. Salicylic acid as a safe plant protector and growth regulator. *The Plant Pathology Journal*. 2020; 36: 1 -10. Doi: <https://doi.org/10.5423/PPJ.RW.12.2019.0295>.
- La VH, Lee BR, Islam MT, Park SH, Jung HI, Bae DW, Kim TH. Characterization of salicylic acid-mediated modulation of the drought stress responses: Reactive oxygen species, proline, and redox state in *Brassica napus*. *Environmental and Experimental Botany*, 2019;157: 1-10. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.09.013>.
- Liang G, Liu J, Zhang J, Guo J. Effects of drought stress on photosynthetic and physiological parameters of tomato. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2019; 145(1): 12-17. Doi: <https://doi.org/10.21273/JASHS04588-19>.

- Lichtenthaler HK, Buschmann C. Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*. 2001; (8): 52-63. Doi: <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>
- Ma QQ, Wang WLI YH, Li, DQ, Zou Q. Alleviation of photoinhibition in drought-stressed wheat (*Triticum aestivum*) by foliar applied glycine betaine. *Journal of Plant Physiology*. 2006; 163: 165-175. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.04.023>
- Mehrandish M, Moeini MJ, Armin M. Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) response to potassium application under full and deficit irrigation. *European Journal of Experimental Biology*. 2012; 2: 2113-2119.
- Mir Mahmoudi T, Hamze H, Golabi Lak I. Impact of biofertiliser and zinc nanoparticles on enzymatic, biochemical, and agronomic properties of sugar beet under different irrigation regimes. *Zemdirbyste*, 2023; J 109(4):217-224. Doi: <https://doi.org/10.13080/z-a.2023.110.025>
- Mohammadi Cheraghabadi M, Roshanfekr H, Hasibi P, Meskarbashi M. Effect of foliar application of salicylic acid on some physiological traits of sugar beet in salt stress conditions. *Iranian Journal of Filed Crop Science*. 2015; 46: 4. Doi: <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2015.56809>
- Molavi M, Nabizadeh E, Hamze H, Sharafi S. Investigating the Effect of Priming with UV-B and Foliar Application of Micronutrient Elements in Modulating the Adverse Effect of Water Deficit Stress in Sugar Beet (*Beta vulgaris*). *Agricultural Research*, 2025; 1-17. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40003-025-00851-w>
- Muneera DFA, Yaser MH, Kotb A, Emadeldeen R, Latifa A, Hussah IMA, Khaled AA. Evaluation of silicon and proline application on the oxidative machinery in drought-stressed sugar beet. *Antioxidants*. 2021; 10(398):1-19. Doi: <https://doi.org/10.3390/antiox10030398>
- Naeem M, Naeem MS, Ahmad R, Ahmad R, Ashraf MY, Ihsan MZ, Nawaz F, H-u-R A, Ashraf M, Abbas HT. Improving drought tolerance in maize by foliar application of boron: water status, antioxidative defense and photosynthetic capacity. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2018; 64(5): 626-639. Doi: <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1370541>
- Naeem MA, Khalid M, Aon M, Abbas G, Amjad M, Murtaza B, Ahmad N. Combined application of biochar with compost and fertilizer improves soil properties and grain yield of maize. *Journal of Plant Nutrition*. 2018; 41(1): 112-122. Doi: <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1381734>
- Nazar R, Umar S, Khan N A. Exogenous salicylic acid improves photosynthesis and growth through increase in ascorbate -glutathione metabolism and assimilation in mustard under salt stress. *Plant Signaling and Behavior*. 2015; 10: e1003751. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80173-8](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80173-8)
- Oguz MC, Aycan M, Oguz E, Poyraz I, Yildiz M. Drought stress tolerance in plants: interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages. *Physiologia*. 2022; 2: 180-197. Doi: <https://doi.org/10.3390/physiologia2040015>
- Rajkumar, M., Bruno, L. B., & Banu, J. R. Alleviation of environmental stress in plants: The role of beneficial *Pseudomonas* spp. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2017; 47(6): 372-407. Doi: <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1318619>
- Ramezani M, Enayati M, Ramezani M, Ghorbani A. A study of different strategical views into heavy metal (oid) removal in the environment. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021; 14: 2225. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08572-4>
- Rezaei J, Bannayan Awal M, Nezami A, Mehrvar M, Mahmoudi B. Physiological Response of Sugar Beet to Viral Diseases of Rhizomania. *Iranian Plant Protection Research*. 2014; 28 (1): 138-146. (In Persian).
- Salehi H, Chehregani A, Lucini L, Majd A, Gholami M. Morphological, proteomic and metabolomic insight into the effect of cerium dioxide nanoparticles to *Phaseolus vulgaris* L. under soil or foliar application. *Science of the Total Environment*. 2018; 616: 1540-1551. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.159>
- Shiranirad, S, Eyni-Nargeseh H, Shirani Rad AH, Malmir M. Managing irrigation and sowing date can improve oil content and fatty acid composition of *Camelina sativa* L. *The Archives of Agronomy and Soil Scienc*. 2023; 69 (14): 2847-2861. Doi: <https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2177989>
- Sohag A A M, Tahjib -Ul -Arif M, Brestic M, Afrin S, Sakil M A, Hossain M T, Hossain M A, Hossain, M A. Exogenous salicylic acid and hydrogen peroxide attenuate drought stress in rice. *Plant, Soil and Environment*, 2020; 66: 7 -13. Doi: <https://doi.org/10.17221/472/2019-PSE>
- Sorkhi F. Effect of vermicompost fertilizer on antioxidant enzymes and chlorophyll contents of *Borago officinalis* under salinity stress. *Iranian Journal of Plant Physiology*, 2021; 11 (2): 3589-3598. (In Persian).
- Touhidi Nejad Z, Farahbakhsh H, Maghsoudi Moud AA. Evaluation of salicylic acid effects on some physiological traits of Fenugreek under drought stress. *Journal of Plant Process and Function*. 2016; 5: 85 -96. Doi: <https://doi.org/10.1001.1.23222727.1395.5.16.2.7>
- Zeighami Nejad K, Ghasemi M, Shamili M, Damizadeh GR. Effect of mycorrhiza and vermicompost on drought tolerance of lime seedlings (*Citrus aurantifolia* Cv. Mexican Lime). *International Journal of Fruit Science*, 2020; 20 (3): 646-657. Doi: <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1678448>
- Zhang Y, Xu S, Yang S, Chen Y. Salicylic acid alleviates cadmium -induced inhibition of growth and photosynthesis through upregulating antioxidant defense system in two melon cultivars (*Cucumis melo* L.). *Protoplasma*, 2015; 252: 911 -924.