SBSI

Journal of Sugar Beet

Journal Home Page: https://jsb.areeo.ac.ir

ISCPBS
انجمن علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران

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

Roghaye Fatemi[1]*, Bijan Kahraryan[1]

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

How to cite this article:

Fatemi R, kahraryan 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: 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

نشریه چغندرقند
Journal Home Page: https://jsb.areeo.ac.ir

بررسی اثر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر خصوصیات کمی و کیفی چغندرقند در سطوح مختلف آبیاری†

رقیه فاطمی[1*]، بیژن کهراریان[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۲۵
نوع مقاله: پژوهشی
DOI: 10.22092/jsb.2025.369144.1386
ر. فاطمی و ب. کهراریان، ۱۴۰۴. بررسی اثر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر خصوصیات کمی و کیفی چغندرقند در سطوح مختلف آبیاری. **چغندرقند ۴۱(۱): ۷۳- ۹۰**

چکیده

با هدف بررسی اثر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر خصوصیات کمی و کیفی چغندرقند، آزمایشی به‌صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ اجرا شد. دو سطح آبیاری نرمال (آبیاری بعد از ۶۰ میلی‌متر تبخیر) و تنش کم‌آبی (آبیاری بعد از ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر) به کرت‌های اصلی و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک (شاهد، ۲ و ۴ میلی مولار) به کرت‌های فرعی اختصاص داده شد. نتایج نشان داد کم‌آبی محتوی نسبی آب برگ (۱۰/۰۶ درصد) و ضریب هدایت روزنه‌ای (۱۵/۸۲ درصد) را کاهش و عیار قند را افزایش داد. همچنین بالاترین سطوح محتوی نسبی آب برگ، ضریب هدایت روزنه‌ای و عیار قند به سطح ۴ میلی مولار اسید سالیسیلیک اختصاص داشت. نتایج همچنین نشان داد کاربرد ۲ میلی‌مولار تحت شرایط نرمال و ۴ میلی‌مولار تحت شرایط کم‌آبی 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 آلدهید (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 روزنه‌ای و وزن خشک اندام هوایی و عملکرد ریشه مثبت و معنی‌دار و با محتوی پرولین منفی و معنی‌دار بود. می‌توان نتیجه گرفت کاربرد اسید سالیسیلیک می‌تواند راهکاری مناسب برای افزایش عملکرد شکر تحت شرایط آبیاری نرمال و شرایط تنش کم‌آبی باشد.

واژه‌های کلیدی: آنزیم، خشکی، رنگدانه فتوسنتزی، فیزیولوژیک

†- این مقاله حاصل تحقیقات نویسندگان است.

۱. استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد میاندوآب میاندوآب، ایران
*- نویسنده مسئول: Roghaya.fatemi1355@iau.ac.ir

مقدمه

یکی از منابع اصلی شکر در مناطقی با آب و هوای معتدل، چغندرقند (*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 چغندرقند در ایران و میزان تولید آن به ترتیب ۸۹/۸۹ هزار هکتار و ۵/۱۹ میلیون تن بود (Anonymous 2023)

از مهم‌ترین تنش‌های غیر زیستی که رشد و تولید گیاهان را به‌صورت قابل توجهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کاهش می‌دهد، تنش کم‌آبی است (Shirani Rad *et al*. 2023). گیاهان در مواجهه با کم‌آبی سازوکارهای مختلفی برای غلبه بر اثرات مخرّب این تنش دارند (Abid et al. 2018; Shiranirad *et al*. 2023). درواقع گیاهان تحت تنش کم‌آبی؛ با کمک مکانیسم‌های دفاعی مختلف مانند تغییرات بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی با این تنش مقابله می‌کنند (Oguz *et al*. 2022).

در چغندرقند، کاهش عملکرد به دلیل کم‌آبی ممکن است به دلیل تغییر در محتوی نسبی آب برگ و پتانسیل آب در برگ‌ها (Chołuj *et al*. 2004)، رشد محدود برگ و جذب CO_2 باشد (Bloch *et al*. 2006). بسته شدن روزنه‌ها و کاهش محتوی نسبی آب برگ که در مراحل اولیه تنش خشکی رخ می‌دهد، منجر به اختلال فتوسنتزی و کاهش عملکرد در چغندرقند می‌شود (Mehrandish *et al*. 2012). کاهش عملکرد چغندرقند در شرایط آبِ محدود، مشاهده شده است (Hoffmann 2010). برآورد شده که محدودیت فعلی منابع آب به‌طور بالقوه تولید چغندرقند در اروپا را بین ۵ تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهد (Chołuj *et al*. 2004).

در مطالعه‌ای بر روی چغندرقند تنش کمبود آب به‌صورت معنی‌داری از عملکرد ریشه و محتوی رنگدانه‌های فتوسنتزی کاست و در مقابل حداکثر محتوی پرولین، قندهای محلول برگ و عیار قند تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی به دست آمد (Hamze *et al*. 2025). در مطالعه‌ای دیگر بر روی چغندرقند مشخص شد شرایط تنش شدید کم‌آبی 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 صفت‌های 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 میلی‌متر تبخیر) به دست می‌آید (Khalili and Hamze 2021). در تحقیق دیگر تنش کم‌آبی (آبیاری بعد از ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر) عملکرد ریشه را کاهش و بر عیار قند، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء سلولی افزود (Molavi *et al*. 2025)

اسید سالیسیلیک به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی مهم، تأثیرات مختلفی بر روی فرآیندهای مهم گیاه از جمله جذب یون، فرآیند گل‌دهی، عملکرد دستگاه فتوسنتزی، فعالیت سیستم دفاعی و همچنین تحمل گیاه به تنش‌های زیستی و غیر زیستی دارد (Gerami *et al*. 2018; Koo et al. 2020; Ramezani et *et al*. 2021). عوامل مختلفی از جمله غلظت اسید سالیسیلیک، سطح اسید سالیسیلیک داخلی گیاه، شیوه کاربرد خارجی آن، مرحله نموی گیاه و گونه گیاهی بر روی اثرات کاربرد خارجی اسید سالیسیلیک تأثیر می‌گذارند (Horvath *et al*. 2007).

در گزارشی نشان داده شد که کاربرد خارجی اسید سالیسیلیک باعث افزایش تولید زیست‌توده، رنگیزه‌های 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 غشا، عملکرد دستگاه فتوسنتزی، پتانسیل آب برگ و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپر اکسید دیسموتاز، پراکسیداز، کربنیک آنیدراز و نیترات ردکتاز در گیاه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) در شرایط تنش

خشکی شد (Hayat *et al*. 2008). اثرات مثبت تیمار اسید سالیسیلیک بر رشد و عملکرد گیاهان دارویی رزماری (*Salvia 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 این‌حال، مکانیسم دقیق فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی اسید سالیسیلیک در تحمل گیاهان به تنش خشکی به‌خوبی درک نشده است. در مطالعه‌ای بر روی چغندرقند 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).

چغندرقند 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 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 ۸-۷/۵ و هدایت الکتریکی حدود ۲/۱۵ دسی زیمنس بر متر بود (جدول ۱).

جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1 Physical and chemical properties of the experimental soil

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

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، خط‌کشی و تهیه خطوط کاشت (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 چغندرقند 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 تحت‌فشار (قطره‌ای) با استفاده از نوار تیپ و کنتور استفاده شد، مقدار آب مصرف‌شده 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:

رابطه ۱ $ET0 = KP \times ETpan$

رابطه ۲ $ETc = KC \times ET0$

رابطه ۳ $I = \frac{ETc}{E\alpha}$

رابطه ۴ $V = \frac{I}{1000} * A$

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 چغندرقند که در مراحل آغازین، رشد، میانی و پایانی به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۸۲، ۱/۱۳ و ۱/۰۵ در نظر گرفته شد.

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

I = عمق آب آبیاری (برحسب میلی‌متر)

V = حجم آب آبیاری موردنیاز (برحسب مترمکعب)

A = سطح آزمایش (برحسب مترمربع)

محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در دو مرحله یک هفته قبل و یک هفته بعد از اعمال تنش کم‌آبی در سطوح ذکرشده 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 انتخاب‌شده 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 شوند، سپس نمونه‌ها در داخل فریزر و در دمای ۴۰– درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

در این آزمایش از روش لیچتنتالر 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 بازشده 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 آلدهید 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:

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

FW= وزن‌تر، 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 چغندرقند، 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

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 محتوای 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 چغندرقند

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*	2.50ns	1.25ns
خطا Error	12	0.22	0.08	0.08	0.003	32.21	1.11
ضریب تغییرات (٪) CV	-	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 محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک نشان داد. در مطالعه دیگری محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر روی چغندرقند تحت شرایط تنش شوری به‌صورت معنی‌داری 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؛ رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی را کاهش داد. با این حال تحت شرایط تنش کم‌آبی محلول‌پاشی جاسمونیک اسید، محتوی رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی را افزایش داد (Hamze *et al*. 2025).

کلروفیل b

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

حداکثر محتوی کلروفیل b در این آزمایش به ترتیب با متوسط ۳/۵۹ و ۳/۴۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برای دو سطح ۲ و ۴ میلی‌مولار تحت شرایط نرمال آبیاری ثبت شد (جدول ۳). کمترین محتوی این رنگ‌دانه نیز با متوسط ۱/۴۳ و ۱/۳۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برای شاهد اسید سالیسیلیک و سطح ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط کم‌آبی ثبت شد. در مورد محتوی کلروفیل b نیز کاربرد هر دو سطح اسید سالیسیلیک تحت شرایط آبیاری نرمال و استفاده از سطح ۴ میلی‌مولار تحت شرایط تنش کمبود آب به‌صورت معنی‌داری بر محتوی این رنگ‌دانه در مقایسه با شاهد اسید سالیسیلیک افزود.

جدول ۳ مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر صفات مورد مطالعه چغندرقند

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 معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ هستند.

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

محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی از اصلی‌ترین عوامل مؤثر بر کارایی دستگاه فتوسنتز و رشد و عملکرد محصول است (Ghorbani *et al*. 2019). در این آزمایش تنش کم‌آبی به‌صورت قابل توجهی محتوی رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی را کاهش داد با این حال، گزارش شده است تیمار سالیسیلیک اسید از طریق افزایش فعالیت آنزیم دلتا–آمینولوولینیک اسید دهیدراتاز و کاهش فعالت آنزیم کلروفیلاز، باعث بهبود محتوای رنگ‌دانه‌ها فتوسنتزی و فلورسانس کلروفیل تحت تنش خشکی می‌شود (La *et al*. 2019). گزارش شده است که اسید سالیسیلیک با کاهش سطح تولید رادیکال‌های آزاد و بهبود فعالیت آنزیم‌های دخیل در تولید کلروفیل، از تخریب رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش جلوگیری می‌کند (Nazar *et al*. 2015). می‌توان اظهار داشت اسید سالیسیلیک با القاء متابولیسم کلروفیل و افزایش سطح رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی نقش چشمگیری در

تعدیل اثر تنش کم‌آبی در چغندرقند 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 می‌شود و پیری در گیاهان را با نگه داشتن و حفظ محتوای کلروفیل به تأخیر می‌اندازد (Aldesuquy *et al*. 2018).

جدول ۴ ضرایب همبستگی بین صفات مورد بررسی در چغندرقند 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 RWC	0.62**	0.58**	0.44*	-0.64**	1							
ضریب هدایت روزنه Stomatal conductance	0.73**	0.62**	0.64**	-0.73**	0.70**	1						
وزن خشک Dry weight of aerial parts	0.89**	0.81**	0.82**	-0.74**	0.62**	0.67**	1					
عیار قند Sugar content	0.32ns	0.35ns	0.25ns	-0.33ns	-0.17ns	-0.24ns	-0.34ns	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**	-0.01ns	0.91**	1		
کاتالاز Catalase	-0.38ns	-0.35ns	-0.19ns	0.44*	-0.16ns	-0.62**	-0.33ns	0.47*	-0.34ns	-0.20ns	1	
سوپر اکسید دیسموتاز Superoxide dismutase	-0.39ns	-0.25ns	-0.37ns	0.45*	-0.06ns	-0.22ns	-0.46*	0.69**	-0.41*	-0.16ns	0.71**	1
مالون دی آلدهید Malondialdehyde	-0.85**	-0.82**	-0.78**	0.77**	-0.62**	-0.62**	-0.82**	0.29ns	-0.81**	-0.76**	0.30ns	0.48*

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

کارتنوئید

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

نتایج تحقیق حاضر نشان داد کاربرد سطح ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط آبیاری نرمال با متوسط ۳/۴۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بالاترین محتوی کارتنوئید را داشت (جدول ۳)، کمترین محتوی کارتنوئید با متوسط ۱/۲۹ و ۱/۵۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر به شاهد اسید سالیسیلیک و سطح ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط کم‌آبی اختصاص داشت. نتایج نشان داد سطح ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط آبیاری نرمال و سطح ۴ میلی‌مولار تحت شرایط کم آبی قادر به افزایش محتوی کارتنوئید به‌صورت معنی‌داری در مقایسه با تیمار شاهد اسید سالیسیلیک شدند (جدول ۳).

گزارش شده است تنش کم‌آبی به‌طور قابل توجهی رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی را در مقایسه با شاهد اسید سالیسیلیک کاهش داده در این آزمایش همبستگی کلروفیل a با محتوی کلروفیل b مثبت و معنی‌دار بود (جدول ۴). وجود همبستگی مثبت و معنادار بین محتوای کلروفیل a و کلروفیل b نشان‌دهنده‌ی هماهنگی در سنتز و تجمع این دو رنگ‌دانه است.

است. کاهش رنگ‌دانه‌های کلروفیل ناشی از خشکی ممکن است به دلیل مهار فرآیندهای حیاتی فتوسنتز، مانند بیوسنتز کلروفیل باشد که درنهایت سبب کاهش محتوی کلروفیل می‌شود (Parveen *et al*. 2021). کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی و کارتنوئید برگ چغندرقند 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 معنی‌دار 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 معنی‌دار بود (جدول ۲).

نتایج مقایسه میانگین تیمارهای برهم‌کنش نشان داد کم آبی به‌صورت معنی‌داری محتوی پرولین را افزایش داد به‌طوری که بالاترین محتوی پرولین با متوسط ۰/۹۱ و ۰/۸۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر به شاهد اسید سالیسیلیک و محلول‌پاشی ۴ میلی‌مولار تحت شرایط تنش کم آبی اختصاص داشت، کمترین محتوی پرولین نیز به محلول‌پاشی ۲ و ۴ میلی‌مولار تحت شرایط آبیاری نرمال به ترتیب با متوسط ۰/۴۹ و ۰/۴۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر اختصاص داشت (جدول ۳).

در جریان تنش کم آبی پرولین با تنظیم اسمزی ساختار اولیه مولکول‌های بزرگ و غشاءهای سلولی را حفظ می‌نماید. علاوه بر این پاک‌سازی رادیکال‌های هیدروکسیل و اکسیژن فعال توسط پرولین صورت می‌گیرد (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 برگ‌ها ارتباط دارد. یکی دیگر از دلایل افزایش غلظت پرولین تحت شرایط تنش کم آبی کاهش مصرف آن در گیاه است به‌طوری‌که توقف در اکسایش پرولین در پتانسیل‌های آب پایین اتفاق می‌افتد (Huguet- Robert *et al*. 2003)، گزارش شده است که پرولین در برگ‌های چغندرقند در اثر تنش کم آبی افزایش می‌یابد (Islam *et al*. 2020). در تحقیقی بر روی چغندرقند کاربرد مواد ضد تنش توانستند با افزایش سطح پرولین برگ اثر مضر کم آبی را بر عملکرد ریشه کاهش داد (Muneera *et al*. 2021).

محتوی نسبی آب برگ

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

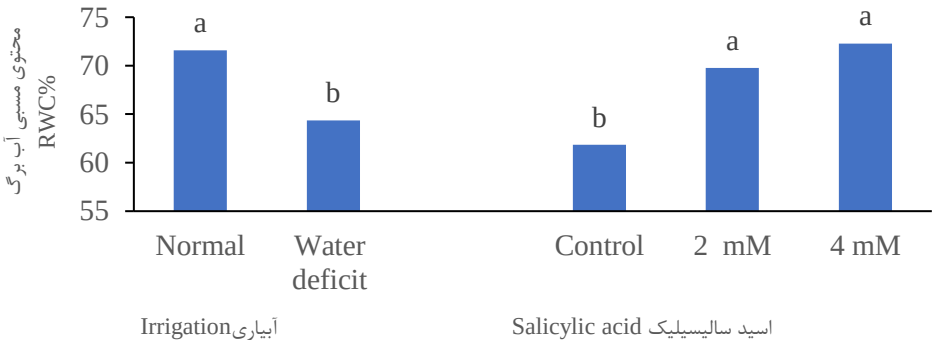
در این بررسی تنش کم آبی محتوی آب نسبی برگ را در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال به‌صورت معنی‌دار (۷/۲ واحد) کاهش داد (شکل ۱). یکی از نشانه‌های برآورد وضعیت آب برگ‌های گیاه محتوی نسبی آب برگ است. نشت الکترولیت‌ها در سلول‌ها در اثر تغییرات در غشاء سلولی در اثر تنش کم آبی تسریع می‌شود. (Rajkumar *et al*. 2017). گزارش‌شده که تنش کم‌آبی اثر منفی بر محتوی آب نسبی چغندرقند داشته و آن را کاهش می‌دهد (Fatahighazi *et al*. 2024).

محتوای آب نسبی برگ از خصوصیات فیزیولوژیکی پاسخ‌دهنده 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 اندام‌ها، فتوسنتز خالص و سنتز پروتئین می‌شود و تعادل هورمونی بافت‌های اساسی گیاه را تغییر می‌دهد. به‌خوبی مشخص شده است که تحت شرایط تنش‌زا مانند تنش خشکی، محتوای آب نسبی، پتانسیل آب برگ و پتانسیل اسمزی سلول‌ها را کاهش می‌دهد (Ma *et al*. 2006). کاهش محتوی نسبی آب برگ در اثر تنش کم آبی در چغندرقند در مطالعه دیگری نیز به اثبات رسیده است (Fugate *et al*. 2018). در مطالعه‌ای بر روی چغندرقند معلوم شده است که محتوی نسبی آب برگ در چغندرقند با تشدید تنش کم آبی کاهش یافت اما محلول‌پاشی جاسمونیک اسید تحت شرایط تنش کم آبی بر محتوی نسبی آب برگ افزود (Ghaffari *et al*. 2020). اثر مثبت محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در بهبود محتوی نسبی آب برگ در چغندرقند در مطالعات دیگری نیز به اثبات رسیده است (Abhari *et al*. 2023).

نتایج حاکی از آن بود که هر دو سطح ۲ و ۴ میلی‌مولار 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 به‌صورت معنی‌داری افزایش دادند (شکل ۱). اثر مثبت اسید سالیسیلیک در بهبود کارایی مصرف آب در گیاهان

شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum*) (Touhidi) (Nejad *et al*. 2016) و گوجه‌فرنگی (*Hayat 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 پرولین 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.



شکل ۱ مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای اثر متقابل آبیاری با محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر محتوی نسبی آب برگ در چغندرقند

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

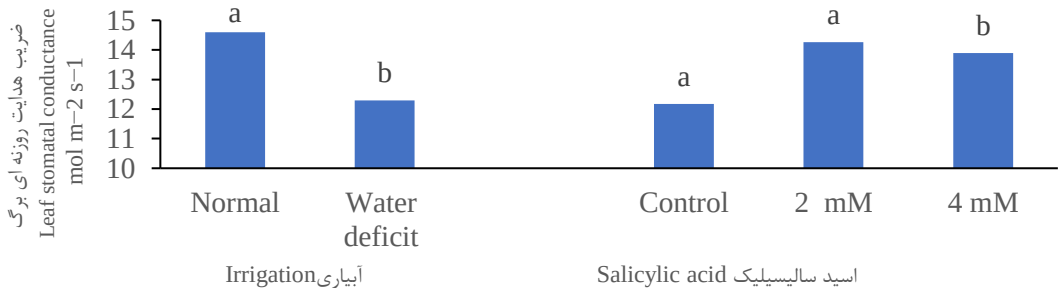
ضریب هدایت روزنه‌ای

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 آبسیزیک 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 چغندرقند 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 از محتوی نسبی آب برگ و ضریب هدایت روزنه‌ای برگ‌های چغندرقند 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 پرولین، منفی و معنی‌دار بود (جدول ۴). وجود همبستگی منفی میان محتوی پرولین و ضریب هدایت روزنه‌ای بیانگر این واقعیت است که زمانی که محتوای پرولین به دلیل تنش کم‌آبی افزایش می‌یابد، ضریب هدایت روزنه‌ای برگ کاهش خواهد یافت. همبستگی منفی مشاهده‌شده میان محتوای پرولین و ضریب هدایت روزنه‌ای برگ نشان می‌دهد که تحت شرایط تنش کم‌آبی، تجمع پرولین 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 پرولین است. یافته‌ها مؤید نقش پرولین در تعدیل پاسخ‌های فیزیولوژیکی به محدودیت آب است.



شکل۲ مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای اثر متقابل آبیاری با محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک ضریب هدایت روزنه‌ای در چغندرقند

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

وزن خشک اندام هوایی

آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد اثر آبیاری، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اثر متقابل دو تیمار بر وزن خشک اندام هوایی معنی‌دار بود ($P\leq 0.01$)، (جدول ۵).

مقایسه میانگین تیمارهای برهم‌کنش نشان داد کاربرد سطوح ۲ و ۴ میلی‌مولار 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 محلول‌پاشی ۲ میلی‌مولار تحت شرایط تنش کمبود آب اختصاص داشت، نتایج تحقیق حاضر حاکی از آن بود که کاربرد هر دو سطح سطوح ۲ و ۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط آبیاری نرمال و کاربرد ۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط کم آبی توانست وزن خشک ماده هوایی را در مقایسه با شاهد اسید سالیسیلیک به‌صورت معنی‌داری 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 معنی‌دار و با محتوی پرولین منفی و معنی‌دار بود (جدول ۴).

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

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 آلدهید 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 × محلول‌پاشی (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
ضریب تغییرات (٪) CV	-	12.81	7.14	9.17	10.98	17.61	12.98	11.61

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

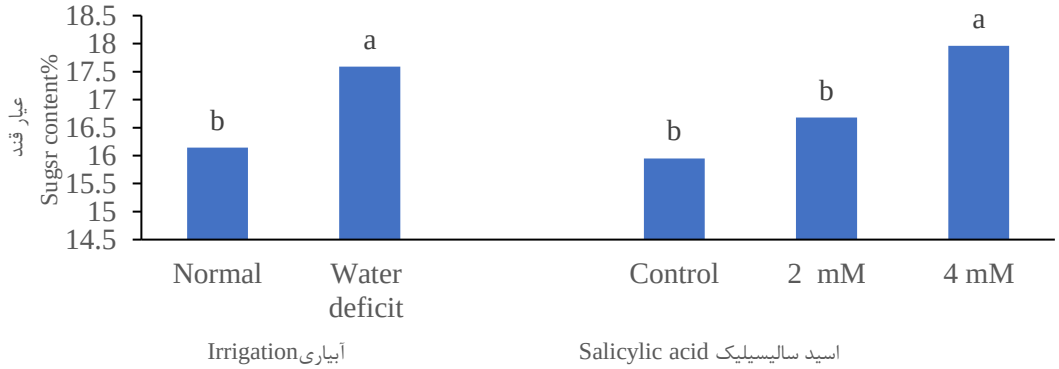
ns, * and **: non-significant, significant at 1% and 5% of probability levels

عیار قند

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

از آن‌جا که اندازه‌گیری بر اساس وزن تر انجام شده، این افزایش می‌تواند ناشی از دو عامل تجمع واقعی متابولیت‌های 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 چغندرقند شده و نشاسته را به ساکارز تبدیل می‌کند و در نتیجه میزان قند را افزایش می‌دهد (Ober and Luterbacher 2002). افزایش عیار قند در اثر تنش کم آبی در مطالعه‌های دیگر نیز گزارش شده است (Ghaffari *et al*. 2020; Mir Mahmoudi *et al*. 2023; Hamze *et al*. 2025).

در این مطالعه بالاترین عیار قند با متوسط ۱۷/۹۶ درصد به سطح ۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک اختصاص داشت، کمترین عیار قند با متوسط ۱۵/۹۵ درصد به شاهد اسید سالیسیلیک اختصاص یافت، اختلاف میان شاهد اسید سالیسیلیک و سطح ۲ میلی‌مولار از نظر عیار قند معنی‌دار نبود (شکل ۳). در مطالعه‌ای ثابت شد مواد ضد تنش مانند اسید سالیسیلیک، تیوفول و گلیسین در سطوح مختلف عیار قند و عملکرد شکر را در مقایسه با شاهد اسید سالیسیلیک افزایش دادند (Kheirkhah *et al*., 2016). افزایش عیار قند در چغندر تحت تأثیر سطوح اسید سالیسیلیک در مطالعات دیگری نیز به اثبات رسیده است (Abhari *et al*. 2023).



شکل ۳ مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای اثر متقابل آبیاری با محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر عیار قند در چغندرقند

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

عملکرد ریشه

بر اساس نتایج آنالیز واریانس داده‌ها اثر اصلی آبیاری و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش دو تیمار در سطح احتمال پنج درصد بر عملکرد ریشه معنی‌دار بود (جدول ۵).

در این آزمایش کاربرد سطوح ۲ و ۴ میلی‌مولار 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 کرت‌های محلول‌پاشی نشده تحت شرایط تنش کم‌آبی اختصاص داشت، اختلاف بین تیمار مذکور با کاربرد سطح ۲ میلی‌مولار تحت شرایط کم آبی معنی‌دار نبود. نتایج نشان داد کاربرد سطح ۴ میلی‌مولار 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 می‌تواند رشد برگ و ریشه را محدود کند که باعث کاهش تجمع ساکارز در چغندرقند می‌شود (Hoffmann 2010).

در این آزمایش اگرچه تنش کم آبی عملکرد ریشه را افزایش داد اما محلول‌پاشی سطح ۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک توانست اثر کم‌آبی را تعدیل نمود. اسید سالیسیلیک یکی از هورمون‌های مهم گیاه است که نقش چشم‌گیری در افزایش تحمل گیاه به تنش‌های 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 کم‌آبی عملکرد ریشه را افزایش داد (Abhari *et al*. 2023) که همسو با نتایج تحقیق حاضر است.

در مطالعه‌ای بر روی چغندرقند 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 رنگ‌دانه‌های 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 روزنه‌ای و وزن خشک اندام هوایی مثبت و معنی‌دار و با محتوی پرولین و عیار قند منفی و معنی‌دار بود (جدول ۴). افزایش عملکرد ریشه در مطالعه حاضر در اثر تیمار اسید سالیسیلیک می‌تواند به دلیل اثر این تیمار بر سنتز رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی و بهبود وضعیت آبی گیاه باشد که موجب افزایش تولید مواد فتوسنتزی و انتقال آن به ریشه‌ها می‌گردد.

عملکرد شکر

در این تحقیق اثر سطوح آبیاری و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش دو تیمار در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۵).

نتایج برهم‌کنش تیمارهای اثر متقابل نشان داد کاربرد سطوح ۲ و ۴ میلی‌مولار 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 تحت شرایط کم آبی با متوسط ۹/۳۰ ثبت شد، اگرچه اختلاف میان تیمار ذکرشده با تیمار ۲ میلی‌مولار تحت شرایط کم آبی قابل توجه نبود (جدول ۳). در این بررسی اگرچه کم آبی از عملکرد شکر کاست اما کاربرد سطح ۴ میلی‌مولار، 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 میلی‌مولار اسید سالیسیلیک در هر دو شرایط، عملکرد شکر را به‌صورت 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 چغندرقند از جمله عملکرد ریشه و عملکرد قند می‌شود (Kheirkhah *et al*. 2016).

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

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان

فعالیت آنزیم کاتالاز

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر آبیاری ($P\leq 0.01$) محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اثر متقابل دو تیمار بر مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز ($P\leq 0.05$) معنی‌دار بود (جدول ۵).

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

آزمایش استفاده از سطح ۲ میلی‌مولار تحت شرایط آبیاری نرمال و سطح ۴ میلی‌مولار تحت شرایط تنش کمبود آب به‌صورت معنی‌داری بر مقدار فعالیت این آنزیم در مقایسه با شاهدهای مربوطه افزود (جدول ۳).

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

فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز

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

در این آزمایش بالاترین مقدار فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز با متوسط ۵/۶۷ واحد بر میلی‌گرم پروتئین بر دقیقه برای تیمار ۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط تنش کمبود آب ثبت شد، گیاهان محلول‌پاشی نشده تحت شرایط آبیاری نرمال با متوسط ۱/۸۷ واحد بر میلی‌گرم پروتئین بر دقیقه کمترین مقدار فعالیت آنزیم مذکور را نشان دادند. تنش کم آبی به‌صورت معنی‌داری، فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز را افزایش داد. با این وجود محلول‌پاشی 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 معنی‌دار و با وزن خشک اندام هوایی و عملکرد ریشه، منفی و معنی‌دار بود (جدول ۴).

افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تحت تنش کم‌آبی نشان‌دهنده‌ی افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) است. این آنزیم‌ها برای سم‌زدایی ROS تولیدشده تحت تنش‌های زنده و غیرزنده عمل می‌کنند (Zeighami Nejad *et al*. 2020). محققان نشان داده‌اند که افزایش مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ارتباط نزدیکی با تنش خشکی دارد (Zeighami Nejad *et al*. 2020; Ahanger *et al*. 2021). آنزیم‌های کاتالاز، آسکروبات پراکسیداز و سوپر اکسید دیسموتاز نقش مهمی در از بین بردن پراکسید هیدروژن دارند و این ماده را به H_2O و O_2 کاتالیز می‌کنند و اثرات مخرب ROS را کاهش می‌دهند (Sorkhi 2021).

گزارش شده است که افزایش محتوی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان SOD، POD، CAT و APX در واکنش به تنش کم‌آبی در چغندرقند واکنش محافظتی است (Islam *et al*. 2020;).

محتوی مالون دی آلدهید

محتوی مالون دی آلدهید به‌صورت معنی‌داری تحت تأثیر آبیاری، محلول‌پاشی 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 آلدهید به گیاهان تیمار نشده تحت شرایط تنش کمبود آب با متوسط ۹/۰۳ نانو مول بر گرم وزن تر اختصاص داشت، کمترین محتوی این ماده نیز با متوسط ۳/۳۱ نانو مول بر گرم وزن تر برای تیمار ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک تحت شرایط آبیاری نرمال ثبت شد، در این آزمایش اگرچه تیمار کم‌آبی به‌صورت معنی‌داری بر محتوی مالون دی آلدهید افزود اما استفاده از هر دو سطح ۲ و ۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک به‌صورت معنی‌داری از محتوی مالون دی آلدهید کاست.

یکی از نشانه‌های آسیب تنش اکسیداتیو به غشاء سلول گیاهی محتوی مالون دی آلدهید است، غشای سلولی برگ در اثر تنش کم‌آبی آسیب می‌زند (Liang *et al*. 2019)، این آسیب با محتوی مالون دی آلدهید در ارتباط است. افزایش پراکسیداسیون لیپیدی با تشدید تنش کم‌آبی با تولید ROS از جمله پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و رادیکال‌های سوپر اکسید (O^{-2}) مرتبط است (Ghassemi *et al*. 2018). افزایش پراکسیداسیون لیپیدی با تشدید تنش کم‌آبی با تولید ROS از جمله پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و رادیکال‌های سوپر اکسید (O^{-2}) مرتبط است (Naeem *et al*. 2018). افزایش محتوی مالون دی آلدهید در اثر تنش کم‌آبی در چغندرقند 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

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

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

وجود این ارتباط بیانگر آن است که با افزایش پراکسیداسیون چربی‌های غشاء (مالون دی آلدهید) که در اثر تنش کم‌آبی صورت می‌گیرد، تخریب رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی انجام شده، ضریب هدایت روزنه‌ای کم شده و در نهایت سطح فتوسنتز کننده کاهش یافته و از این طریق عملکرد ریشه که جزء اساسی عملکرد ریشه است کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیّت عملکرد شکر در چغندرقند نتیجه‌گیری نیز بر اساس این صفت انجام شد. در این بررسی با شرایط تنش کم‌آبی، عملکرد شکر کاهش یافت. با این حال کاربرد سطح ۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک علاوه بر این‌که عملکرد شکر را نسبت به شاهد اسید سالیسیلیک مربوطه افزایش داد اختلاف معنی‌داری 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 رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، محتوی نسبی آب برگ و ضریب هدایت روزنه‌ای مثبت و معنی‌دار بود. می‌توان اظهار داشت در این تحقیق کاربرد اسید سالیسیلیک با بهبود وضعیت آب در داخل گیاه و بهبود ضریب هدایت روزنه‌ای از میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشائی (مالون دی آلدهید) کاسته و از این طریق اثر تنش کم‌آبی را بر عملکرد شکر تعدیل می‌کند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از تمامی حمایت‌ها و مساعدت‌های دانشگاه آزاد اسلامی واحد میاندوآب جهت فراهم نمودن امکانات مورد نیاز برای اجرای این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع مورد استفاده

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

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

Aldesuquy 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. Märländer 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: 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.

Chołuj 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. 10.17221/4031-PSE

Colom M R, 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

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 Repports. 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: 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 stresse 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

Islam MJ, Kim JW, Begum MK, Sohel MAT, Lim YS. Physiologicaland 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. ournal of Agricultural Science and Sustainable Production. 2021; 31 (1): 171-192. Doi: https://doi: 20.1001.1.24764310.1400.31.1.11.9.

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, tufool 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. 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 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: 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, KhanN 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

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/20.1001.1.23222727.1395.5.16.2.7

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.