J. Soil Plant Interact. 2026; 17(1): 75–94. https://doi.org/10.47176/jspi.17.1.21812

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

Effect of Salicylic Acid on Morphological, Phytochemical, and Photosynthetic Pigment Responses of Ornamental Kale Under Salinity Stress (Sodium Chloride)

Parvin Asadi[1], Soroush Tafakhri[1], Somaye Tayefeh[1,2*], Hossein Moradi[1] and Fateme Sohrabi[1]

1- Department of Horticultural Sciences, Sari University of Agriculture and Natural Resources, Sari, Iran
2- Department of Agricultural Engineering, Mahrat National University, Tehran, Iran
* Corresponding author, Email: Somaye.tayefeh@ut.ac.ir

(Received: 15 November 2025; Revised: 14 February 2026; Accepted: 15 February 2026)

Abstract

Background and Objective: Previous studies have demonstrated that salicylic acid, as a plant growth regulator, effectively mitigates the detrimental effects of abiotic stresses including salinity in plants; however, limited information is available regarding its impact on ornamental plants, particularly ornamental kale. This study aimed to investigate the effects of salicylic acid (SA) on tolerance of ornamental kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) under salinity stress.

Methods: This study was conducted as a factorial experiment in a complete randomized blocks design with three replications in a greenhouse. Two experimental treatments were evaluated: salicylic acid concentrations (0, 100, and 200 mg L^{-1}) and salinity levels (0, 2.5, and 5.12 dS m^{-1}). Fifty-four ornamental kale seedlings at the four-leaf stage were planted in 27 pots containing mixture of loam soil, perlite, and cocopeat. Salicylic acid was applied via foliar spraying five times (every three days) over two weeks, followed by salinity stress induced using sodium chloride solution over two weeks. Plants were nourished with Hoagland's solution. Measured traits included morphological characteristics, physiological parameters and phytochemical properties as assessed using standard protocols.

Results: The results showed that salinity alone negatively affected growth traits, particularly reducing leaf number. However, salicylic acid significantly mitigated these adverse effects. At 2.5 dS m^{-1} salinity, 200 mg L^{-1} salicylic acid increased chlorophyll a by 195% and chlorophyll b by 65% compared to the control. At 5.12 dS m^{-1} salinity, 100 mg L^{-1} salicylic acid improved leaf turgor weight by 20% and significantly enhanced antioxidant capacity. Total phenol and flavonoid contents also increased significantly after salicylic acid application.

Conclusion: Salicylic acid enhanced moderate salinity tolerance in ornamental kale by improving photosynthesis, maintaining water balance, and increasing antioxidant compounds. Salicylic acid concentrations of 100 and 200 mg L^{-1} were most effective at 2.5 dS m^{-1} salinity. Application of this growth stimulant is recommended for developing sustainable green spaces in moderately saline areas.

Keywords: Chlorophyll, Leaf turgor weight, Ornamental cabbage, Salicylic acid, Salinity stress.

How to Cite: Asadi, P., Tafakhri, S., Tayefeh, S., Moradi, H., Sohrabi, F., 2026. Effect of salicylic acid on morphological, phytochemical, and photosynthetic pigment responses of ornamental kale under salinity stress (sodium chloride). J. Soil Plant Interact. 17(1), 75–94 (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jspi.17.1.21812

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۵؛ ۱۷(۱): ۹۴-۷۵، https://doi.org/10.47176/jspi.17.1.21812

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۲۷۸۳-۵۰۱۴ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۵۲۸۶

مقاله پژوهشی

تأثیر تیمار سالیسیلیک اسید بر پاسخ‌های مورفولوژیک، فیتوشیمیایی و رنگیزه‌های فتوسنتزی کلم زینتی تحت تنش شوری (سدیم کلرید)

پروین اسدی[۱]، سروش تفاخری[۱]، سمیه طایفه[۱و۲*]، حسین مرادی[۱] و فاطمه سهرابی[۱]

۱- گروه علوم باغبانی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲- گروه مهندسی کشارزی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: Somaye.tayefeh@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۲۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که سالیسیلیک اسید در کاهش آثار تنش شوری در گیاهان مؤثر بوده، اما تأثیر آن بر گیاهان زینتی به‌ویژه کلم زینتی کمتر بررسی شده است. این پژوهش با هدف بررسی اثر سالیسیلیک اسید (SA) بر تحمل کلم زینتی (*Brassica oleracea* var. *acephala*) به تنش شوری انجام شد.

روش‌ها: این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل سه سطح سالیسیلیک اسید (۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و سه سطح شوری (۰، ۲/۵ و ۵/۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) بودند. نشاءهای کلم زینتی در گلدان کشت شده و تیمارهای سالیسیلیک اسید به‌صورت محلول‌پاشی و شوری با سدیم کلرید اعمال شد. پنجاه و چهار نشاء کلم زینتی در مرحله چهار برگی به‌صورت جفتی در ۲۷ گلدان دارای مخلوطی از خاک لومی، پرلیت و کوکوپیت کشت شدند. اسید سالیسیلیک در پنج نوبت (هر سه روز یک‌بار) به‌صورت محلول‌پاشی برگی و به‌مدت دو هفته اعمال گردید و به‌دنبال آن تنش شوری با استفاده از محلول کلرید سدیم در پنج نوبت طی دو هفته ایجاد شد. تغذیه گیاهان با محلول هوگلند انجام پذیرفت. صفات مورفولوژیک، فیزیولوژیک و فیتوشیمیایی به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند.

نتایج: نتایج نشان داد که شوری، رشد گیاه به‌ویژه تعداد برگ را کاهش داد، اما سالیسیلیک اسید این آثار را تعدیل کرد. در شوری ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر، سالیسیلیک اسید (۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) کلروفیل a و b را به‌ترتیب ۱۹۵ و ۶۵ درصد افزایش داد. در شوری ۵/۱۲ دسی‌زیمنس بر متر، سالیسیلیک اسید (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) وزن آماس برگ را ۲۰٪ و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی را بهبود بخشید. محتوای فنل و فلاونوئید نیز در اثر کاربرد سالیسیلیک اسید افزایش یافت.

نتیجه‌گیری کلی: سالیسیلیک اسید با بهبود فتوسنتز، حفظ تعادل آبی و افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، تحمل کلم زینتی به شوری متوسط را افزایش داد. غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سالیسیلیک اسید در شوری ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر بیشترین اثربخشی را داشتند. کاربرد این محرک برای توسعه فضای سبز پایدار در مناطق با شوری متوسط پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سالیسیلیک اسید، تنش شوری، کلروفیل، کلم زینتی، وزن آماس برگ.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۵ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

کلم زینتی (*Brassica oleracea* var. *acephala*) از خانواده شب‌بو (Brassicaceae) به‌دلیل تنوع رنگ برگ‌ها، شکل جذاب و دوام شاخساره، یکی از گیاهان زینتی پرکاربرد در طراحی فضای سبز شهری و باغ‌ها محسوب می‌شود. این گیاه به‌دلیل مقاومت زیاد در برابر شرایط نامساعد محیطی، از جمله سرما و خشکی، به‌ویژه در فصل زمستان که گزینه‌های گیاهی محدود هستند، جایگاه ویژه‌ای در زیباسازی فضاهای شهری دارد (Taqi Zadah and Solgi, 2014). کلم زینتی گیاهی دوساله است، اما معمولاً به‌صورت یک‌ساله کشت می‌شود و توانایی تحمل تنش‌های محیطی مختلف، آن را به گزینه‌ای مناسب برای استفاده در مناطق با اقلیم‌های چالش‌برانگیز تبدیل کرده است (Shannon and Grieve, 1999).

شوری خاک یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که رشد و عملکرد گیاهان را در سراسر جهان محدود می‌کند. این تنش ناشی از تجمع بیش از حد نمک‌های محلول همچون سدیم کلرید، کلسیم کلرید و منیزیم کلرید در خاک یا آب آبیاری است که با ایجاد تنش اسمزی، سمّیت یونی و مشکلات تغذیه‌ای، فرایندهای فیزیولوژیک گیاه مانند فتوسنتز، تنفس، سنتز پروتئین و متابولیسم رنگدانه‌ها را مختل می‌کند (Sharma, 2023; Arora, 2019). شوری به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مانند بخش‌های وسیعی از ایران، چالشی جدی برای کشاورزی پایدار ایجاد می‌کند، زیرا باعث کاهش عملکرد محصول، محدودیت زمین‌های قابل کشت و کاهش دسترسی به منابع آب با کیفیت می‌شود (FAO, 2020). نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که شوری می‌تواند با کاهش جذب آب و عناصر غذایی، رشد گیاهان را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد (Yeo et al., 1999).

برای مقابله با آثار منفی شوری، استفاده از ترکیبات محرک زیستی مانند سیلیسیم (Si) و سالیسیلیک اسید (SA) به‌عنوان راهکاری مؤثر مورد توجه قرار گرفته است. سیلیسیم به‌صورت سیلیسیک اسید (H_4SiO_4) در خاک وجود دارد و با تقویت دیواره سلولی، بهبود یکپارچگی غشاها و افزایش مقاومت به تنش‌های غیرزیستی مانند شوری، خشکی، سمّیت فلزات سنگین، عملکرد گیاه را بهبود می‌بخشد (Brahma et al., 2020). سالیسیلیک اسید نیز با تنظیم پاسخ‌های فیزیولوژیک، مانند افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش آثار سمّیت یونی، به گیاهان کمک می‌کند تا در شرایط تنش رشد بهتری داشته باشند (Shwethakumari et al., 2021). پژوهش‌های جدید نشان می‌دهند که این ترکیبات، به‌ویژه سالیسیلیک اسید، با فعال‌سازی مسیرهای هدف و افزایش بیان ژن‌های مرتبط با تحمل به شوری مانند ژن‌های تولید پروتئین‌های LEA و آنتی‌اکسیدان‌ها، تنش اکسیداتیو را کاهش داده و افزایش تعادل یونی در گیاهان مختلف را بهبود می‌بخشند. همچنین، پژوهش‌های اخیر بر نقش این اسیدها در حفظ یکپارچگی غشا، افزایش تجمع متابولیت‌های سازگار (مانند پرولین) و بهبود عملکرد فتوسنتز در شرایط شوری تأکید دارند. این نتایج، کاربرد این ترکیبات را به‌عنوان محرک‌های زیستی امیدوارکننده برای کاهش خسارت‌های ناشی از شوری در کشاورزی معرفی می‌کنند (Rezaee et al., 2022). درگزارشی پیش-تیمار سالیسیلیک اسید در شرایط تنش شوری موجب بهبود جوانه‌زنی تربچه شد (Ghanbari et al., 2011). تیمار سالیسیلیک اسید در شرایط تنش شوری توانست منجر به افزایش تمام شاخص‌های رشد، میزان پروتئین و محتوای نسبی آب برگ شب بو گردد (Abdolmohammadi et al., 2018).

با توجه به رشد جمعیت جهانی و افزایش فشار بر منابع آب و خاک، کشاورزی پایدار به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت فزاینده‌ای یافته است (FAO, 2020). استفاده نادرست از منابع آب با کیفیت پایین، به‌ویژه در سیستم‌های کشت بدون خاک، می‌تواند منجر به تجمع نمک‌های مضر و تشدید تنش شوری شود (Miceli et al., 2003). در این راستا نوآوری این پژوهش را می‌توان تمرکز بر گیاه کلم زینتی نسبت به گونه‌های زراعی رایج اشاره کرد که کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند و ارزش اقتصادی این گیاه در فضای سبز و شهری، لزوم بررسی تحمل به شوری را پررنگ می‌کند. از آنجا که معیار اصلی کیفیت گیاهان زینتی، ویژگی‌های ظاهری و رنگ آن‌ها است، بررسی

همزمان تغییرات رنگیزه‌ها و صفات مورفولوژیک، نوآوری کاربردی مستقیمی برای صنعت گل و گیاهان زینتی دارد. هدف نهایی این پژوهش، می‌تواند ارائه یک دستورالعمل برای استفاده بهینه از سالسیلیک اسید به‌منظور حفظ شادابی و رنگ‌بندی کلم زینتی در شرایط خاک‌ها یا آب‌های با شوری متوسط ناشی از سدیم کلرید باشد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تیمارهای سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک، و عملکرد کلم زینتی تحت شرایط تنش شوری انجام شد. این پژوهش به دنبال ارائه راهکارهایی برای بهبود بردباری این گیاه زینتی در برابر تنش شوری و ارتقای کاربرد آن در فضای سبز شهری در مناطق با محدودیت‌های محیطی است.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با مشخصات جغرافیایی (عرض جغرافیایی: ۳۶/۳۳۳۴۳۹ درجه شمالی و طول جغرافیایی: ۵۳/۰۶۲۸۰۵ درجه شرقی) و گلخانه با پنجره باز در بازه زمانی دو ماه (۱۵ مهر تا ۱۵ آذر)، میانگین دمای روز ۱۵ تا ۲۳ درجه سلسیوس و دمای شب ۷ تا ۱۲ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۷۰ تا ۹۰ درصد، انجام شد. دو تیمار آزمایشی شامل سالیسیلیک اسید (۰، ۱۰۰، و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و تنش شوری سدیم کلرید (۰، ۲/۵، و ۵/۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) اعمال شدند. سطوح تیمارها بر اساس پژوهش‌های علمی معتبر انتخاب شد. ۵۴ نشای کلم زینتی (*Brassica oleracea* var. *acephala*) در مرحله چهار برگی که در بستر ۶۰ درصد وزنی کوکوپیت و ۴۰ درصد وزنی پرلیت رشد یافته بودند، تهیه شده و به‌صورت جفتی در ۲۷ گلدان پلاستیکی مشکی با قطر ۲۰ سانتی‌متر (دارای ۵۰ درصد وزنی خاک با بافت لوم ۳۰ درصد پرلیت و۲۰ درصد کوکوپیت که دارای رسانایی الکتریکی برابر یک دسی‌زیمنس بر متر بود) کاشته شدند. پس از یک ماه، محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید در پنج نوبت (هر سه روز یک‌بار) به مدت دو هفته انجام شد. تنش شوری با محلول سدیم کلرید نیز پس از دو هفته، در پنج نوبت طی دو هفته همراه با آب آبیاری با غلظت‌های ذکرشده اعمال شد. برای اعمال شوری ابتدا با رابطه ۱، میزان شوری از واحد دسی‌زیمنس بر متر تبدیل به پی‌پی‌ام (میلی‌گرم در لیتر) شد و سپس مقدار مورد نظر در هر لیتر آب آبیاری حل شده و به هر گلدان ۲۰۰ میلی‌لیتر از محلول تهیه‌شده داده شد. همچنین برای تغذیه گیاه از محلول هوگلند استفاده شد.

$$\text{نمک ppm} = \text{EC برحسب دسی‌زیمنس بر متر} \times ۶۴۰ \quad (۱)$$

که در این رابطه، EC شوری برحسب دسی‌زیمنس بر متر، و ppm غلظت نمک بر حسب میلی‌گرم در لیتر است.

صفات مورد بررسی شامل ویژگی‌های مورفولوژیک (ارتفاع، تعداد برگ، و وزن خشک)، فیزیولوژیک (محتوای آب نسبی، و هدایت روزنه‌ای)، و رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها) بودند.

محتوای نسبی آب برگ: به روش ریچی و همکاران (Banchio et al., 2008) و با استفاده از رابطه (۲) اندازه‌گیری شد:

$$RWC = (FW–DW)/(TW–DW)\times100 \quad (۲)$$

که در آن FW وزن تازه برگ بلافاصله پس از نمونه‌برداری، DW وزن خشک برگ پس از قرار گرفتن در آون و TW وزن آماس برگ پس از قرار گرفتن در آب مقطر است.

صفات فتوسنتزی: برای اندازه‌گیری رنگیزه‌ها، از حلال متانول به روش Carter and Knapp (2001) استفاده شد. به ازای هر نمونه یک لوله فالکون به حجم ۱۵ سی‌سی استفاده شد و به هرکدام ۱۰ سی‌سی متانول ۹۹ درصد افزوده شد. برگ مناسب انتخاب شده و بلافاصله به لوله دارای متانول انتقال یافت و در محیط تاریک و دمای ۳۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد. جذب عصاره (A) در طول موج‌های ۶۶۵/۲، ۶۵۲/۴ و ۴۷۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV-1800PC، شیماتزو ژاپن) خوانده شده و با روابط زیر غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی محاسبه شد (Lichtenthaler and Buschmann, 2001):

$$C_a\ (\mu g/ml) = 16.72A_{665.2}–9.16A_{652.4} \quad (۳)$$

$$C_b\ (\mu g/ml) = 34.09A_{652.4}–15.28A_{665.2} \quad (۴)$$

$$C_{(X+C)}\ (\mu g/ml) = (1000A_{470} - 1.63\ C_a - 104.96\ C_b)/221 \quad (۵)$$

$$C_{total}\ (\mu g/ml) = C_a + C_b \quad (۶)$$

که در آن‌ها، C_a میزان کلروفیل a، C_b میزان کلروفیل b، و $C_{(X+C)}$ میزان کاروتنویيدها (گزانتوفیل+کاروتن)، و C_{total} میزان کلروفیل کل است.

فعالیت آنتی‌اکسیدانی: به‌منظور اندازه‌گیری فعالیت آنتی‌اکسیدانی این گیاه، از روش DPPH استفاده شد. جذب نوری نمونه‌ها در طول‌موج ۵۱۷ نانومتر به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV-1800PC، شیماتزو ژاپن) محاسبه شد (Afshari and Malek-Mahdi., 2017):

$$Inhibition\ (\%) = [(Ac - As)/Ac] \times 100 \quad (۷)$$

که در آن، Inhibition (%) درصد مهار، Ac جذب نوری محلول شاهد و As جذب نوری محلول آزمایشی است.

فنل کل: برای سنجش میزان فنل کل از معرف فولین سیوکالتیو استفاده شد. به این صورت که عصاره برگ گرفته شده و در نهایت جذب محلول در طول موج ۷۶۵ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV-1800PC، شیماتزو ژاپن) اندازه‌گیری شد و میزان فنل کل بر اساس میزان معادل میلی‌گرم اسیدگالیک در گرم عصاره محاسبه شد (Slinkard and Singleton, 1977).

فلاونویید: اندازه‌گیری فلاونوئید کل برگ با استفاده از آلومینیوم کلرید و استات پتاسیم انجام شد و در طول‌موج ۴۱۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV-1800PC، شیماتزو ژاپن) قرائت شد. در نمونه شاهد نیز به‌جای عصاره، از متانول خالص استفاده شد (Chang et al., 2002). برای رسم منحنی واسنجی از کوئرسیتین به‌عنوان استاندارد استفاده شد.

تجزیه و تحلیل آماری: تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۴) انجام شد. طرح آزمایشی به‌کاررفته، پس از انجام تجزیه واریانس (ANOVA)، با معنی‌داربودن اثر تیمارها، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد انجام شد. نمودارها نیز با نرم‌افزار Microsoft Excel 2021 ترسیم شدند.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس نشان داد که اثر برهمکنش شوری و تیمار سالیسیلیک اسید بر صفات وزن تازه و خشک برگ، طول ریشه، و وزن تازه و خشک ریشه در سطح احتمال پنج درصد و بر صفات وزن آماس برگ، و وزن تازه و خشک شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، اما بر ارتفاع گیاه و تعداد برگ اثر معنی‌داری مشاهده نشد. اثر شوری بر تعداد برگ و وزن خشک ریشه در سطح ۵ درصد و بر وزن خشک و آماس برگ، وزن تازه و خشک شاخساره و وزن تازه ریشه در سطح یک درصد تفاوت معنی‌داری ایجاد کرد، ولی بر ارتفاع گیاه و وزن تازه برگ اثر معنی‌داری نداشت. اثر تیمار سالیسیلیک اسید بر وزن تازه شاخساره، و وزن تازه و خشک ریشه در سطح پنج درصد و بر وزن خشک برگ در سطح یک درصد معنی‌دار بود، اما بر ارتفاع گیاه، تعداد برگ، وزن تازه و آماس برگ، و وزن خشک شاخساره تفاوت معنی‌داری ایجاد نکرد (جدول ۱). این یافته بیان‌گر آن است که پاسخ کلم زینتی به سالیسیلیک اسید به شدت وابسته به سطح تنش شوری است و نمی‌توان اثر این محرک را مستقل از شرایط محیطی ارزیابی کرد.

ارتفاع گیاه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تیمارهای اعمال‌شده اثر معنی‌داری بر ارتفاع گیاه نداشتند (جدول ۱). یکی از دلایل احتمالی این یافته می‌تواند مقاومت ژنوتیپی رقم مورد استفاده به تنش شوری باشد. ارقام مختلف گیاهان به‌دلیل تفاوت‌های ژنوتیپی، پاسخ‌های متفاوتی به تنش شوری نشان می‌دهند (Munns and Tester, 2008). علاوه بر این، نبود تأثیر معنی‌دار سالیسیلیک اسید ممکن است به‌دلیل استفاده از سطح پایین این ماده در آزمایش باشد که نتوانسته است آثار منفی تنش شوری را به‌طور مؤثری جبران کند. پژوهش‌های پیشین نیز نتایج مشابهی گزارش کرده‌اند. در پژوهشی، اثر سالیسیلیک اسید (۰، ۰/۰۱ و ۰/۱ میلی‌مولار) بر گیاه گوجه فرنگی تحت تنش شوری (۰/۵، ۲، ۴ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر) بررسی گردید. نتایج نشان داد که

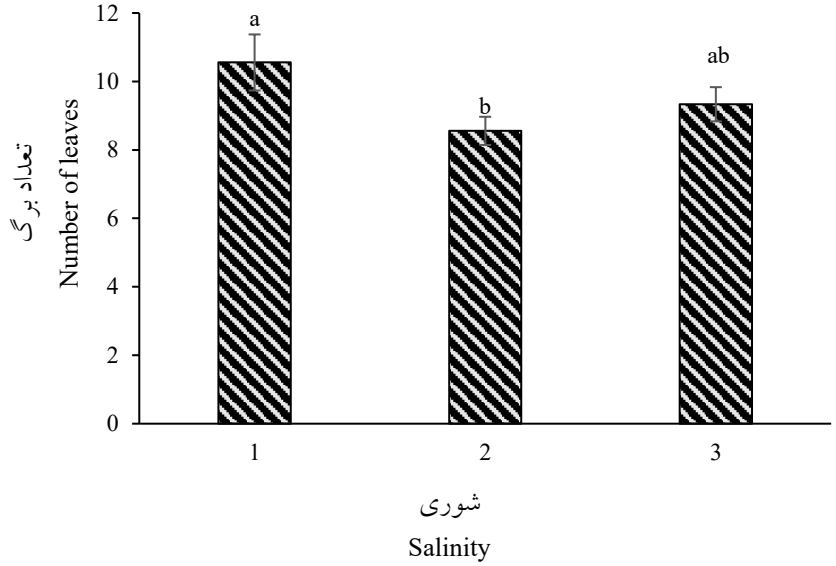
جدول ۱. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مورفوفیزیولوژیک کلم زینتی

Table 1. Analysis of variance (mean squares) of morphophysiological traits of ornamental cabbage

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی Df	ارتفاع گیاه Plant height	تعداد برگ در بوته Number of leaves per plant	وزن خشک برگ Leaf dry weight	وزن تازه برگ Leaf fresh weight	وزن آماس برگ Leaf turgid weight	وزن تازه شاخساره Shoot fresh weight	وزن خشک شاخساره Shoot dry weight	وزن تازه ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight
تنش شوری Salinity stress	2	3.73^{ns}	9.14*	0.01**	0.10^{ns}	0.14**	2.08**	0.3**	2.02**	0.22*
سالیسیلیک اسید Salicylic acid	2	0.14^{ns}	1.03^{ns}	0.003**	0.005^{ns}	0.014^{ns}	1.75*	0.02^{ns}	1.44*	0.63*
تنش شوری×سالیسیلیک اسید Salinity stress×Salicylic acid	4	1.62^{ns}	1.59^{ns}	0.005*	0.05*	0.01**	6.35**	0.55**	0.65*	0.11*
خطا Error	16	1.12	2.39	0.0001	0.006	0.005	0.33	0.008	0.15	0.03
ضریب تغییرات (٪) Coefficient of variation (%)		11.8	16.32	8.4	13.69	11.78	12.85	8.6	19.0	21.0

*، ** و ^{ns} به‌ترتیب بیان‌گر اثر معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد و اثر غیرمعنی‌دار است.

*, **, and ^{ns} indicate significant effect at the 5 and 1% probability levels, and non-significant effect, respectively.



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر ساده تنش شوری بر تعداد برگ کلم زینتی؛ حروف نامشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بر اساس آزمون LSD هستند.

Fig. 1. Mean comparison of the simple effect of salinity stress on the number of leaves of ornamental cabbage; Dissimilar letters indicate significant difference according to LSD test ($P < 0.05$).

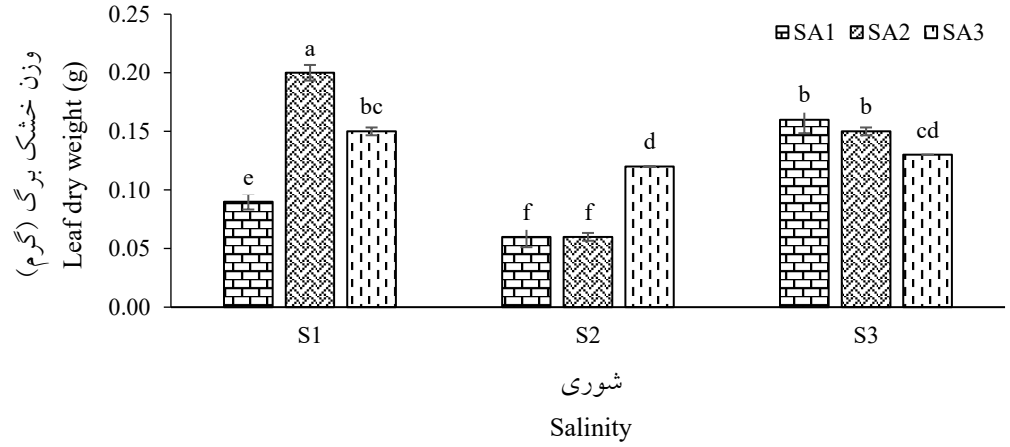
در سطوح بالای شوری (۶ دسی‌زیمنس بر متر)، ارتفاع گیاه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و کاربرد سالیسیلیک اسید تنها در سطوح پایین‌تر شوری (۰/۵ و ۲ دسی‌زیمنس بر متر) تأثیر مثبت و معنی‌داری بر ارتفاع گیاه داشت. این یافته نشان‌دهنده محدودیت اثربخشی سالیسیلیک اسید در شرایط تنش شوری شدید است (Sobhani et al., 2011).

تعداد برگ

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین تعداد برگ در گیاهان شاهد (بدون تنش شوری) مشاهده شد، اگرچه تنش شوری باعث کاهش معنی‌دار تعداد برگ شد (شکل ۱). اما ارتفاع گیاه تحت تأثیر معنی‌دار تیمارها قرار نگرفت. این مشاهده نشان می‌دهد که در کلم زینتی، تعداد برگ نسبت به ارتفاع گیاه شاخص حساس‌تری برای ارزیابی تنش شوری است. پژوهشگران گزارش کردند که صفات رشدی لوبیا تحت تنش شوری نسبت به گیاهان شاهد کاهش یافته است (Khoshbakht et al., 2012). به‌طور مشابه، پژوهش‌هایی روی چغندر قند نشان داده‌اند که تنش شوری باعث کاهش صفات رشدی، از جمله تعداد برگ و ارتفاع گیاه، در مقایسه با گیاهان شاهد می‌شود (Ghoulam et al., 2001). یکی از دلایل اصلی این کاهش، اثر تنش شوری بر پتانسیل اسمزی خاک است. تنش شوری با افزایش غلظت یون‌هایی مانند Na^+ و Cl^- در خاک، پتانسیل اسمزی را کاهش داده و جذب آب را برای گیاه دشوار می‌کند، حتی در شرایطی که خاک مرطوب است. این امر منجر به تنش اسمزی می‌شود که آماس سلولی را کاهش داده و فرآیندهای رشدی مانند تقسیم و طویل‌شدن سلول‌ها را مختل می‌کند. در کلم زینتی (*Brassica oleracea* var. *acephala*)، این سازوکار می‌تواند به کاهش رشد برگ‌ها و ساقه‌ها منجر شود (Munns and Tester, 2008).

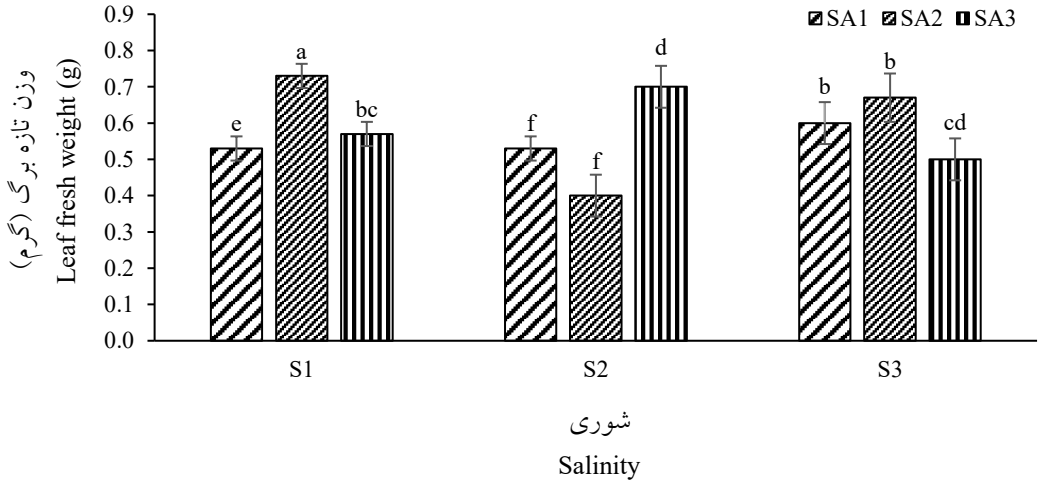
وزن تازه و خشک برگ

نتایج مقایسه میانگین اثر برهمکنش نشان داد که تیمار سالیسیلیک اسید با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، وزن خشک گیاه را به میزان ۵۵ درصد نسبت به گیاهان شاهد افزایش داد (شکل ۲). همچنین، نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین وزن تازه برگ در



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر برهمکنش تنش شوری (S) و سالیسیلیک اسید (SA) بر وزن خشک برگ در بوته کلم زینتی؛ حروف نامشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بر اساس آزمون LSD هستند.

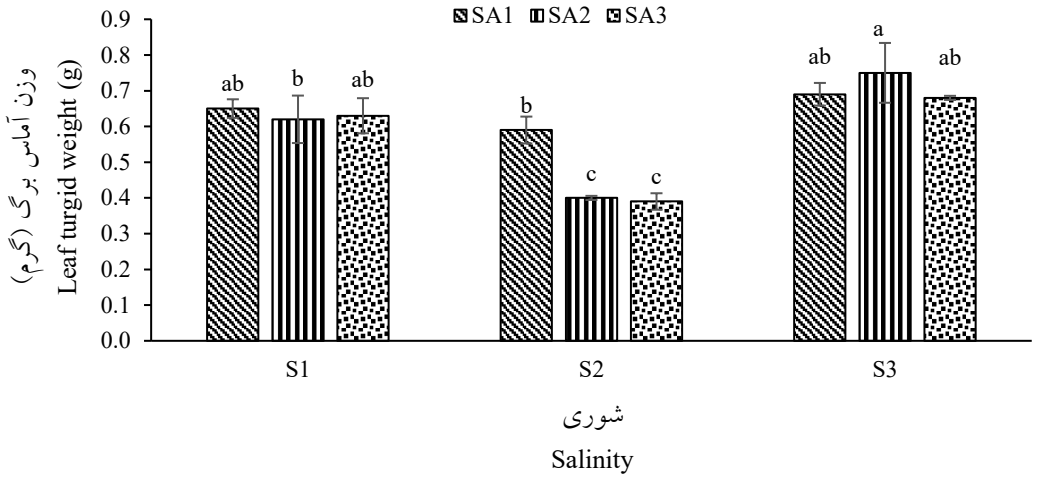
Fig. 2. Mean comparison of the interaction effect of salinity stress (S) and salicylic acid (SA) on the leaf dry weight of ornamental cabbage; Dissimilar letters indicate significant difference according to LSD test ($P < 0.05$).



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر برهمکنش تنش شوری (S) و سالیسیلیک اسید (SA) بر وزن تازه برگ در بوته کلم زینتی؛ حروف نامشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بر اساس آزمون LSD هستند.

Fig. 3. Mean comparison of the interaction effect of salinity stress (S) and salicylic acid (SA) on the leaf fresh weight of ornamental cabbage; Dissimilar letters indicate significant difference according to LSD test ($P < 0.05$).

شرایط بدون تنش شوری (شوری صفر) و با کاربرد سالیسیلیک اسید (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) به‌دست آمد (شکل ۳). این یافته نشان می‌دهد که سالیسیلیک اسید حتی در شرایط بدون تنش نیز پتانسیل افزایش زیست‌توده را دارد. این افزایش را می‌توان به سه سازوکار اصلی نسبت داد: ۱) بهبود کارایی فتوسنتز به‌دلیل حفاظت از ساختار کلروپلاست و افزایش فعالیت آنزیم روبیسکو(Hayat et al., 2010)، ۲) کاهش تخریب پروتئین‌های غشایی و حفظ یکپارچگی سلول در شرایط تنش اسمزی (Gunes et al., 2007)، و ۳) القای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی که پراکسیداسیون لیپیدهای غشا را مهار می‌کنند (Palma et al., 2009).



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر برهمکنش تنش شوری (S) و سالیسیلیک اسید (SA) بر وزن آماس برگ کلم زینتی؛ حروف نامشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بر اساس آزمون LSD هستند.

Fig. 4. Mean comparison of the interaction effect of salinity stress (S) and salicylic acid (SA) on the leaf turgid weight of ornamental cabbage; Dissimilar letters indicate significant difference according to LSD test ($P < 0.05$).

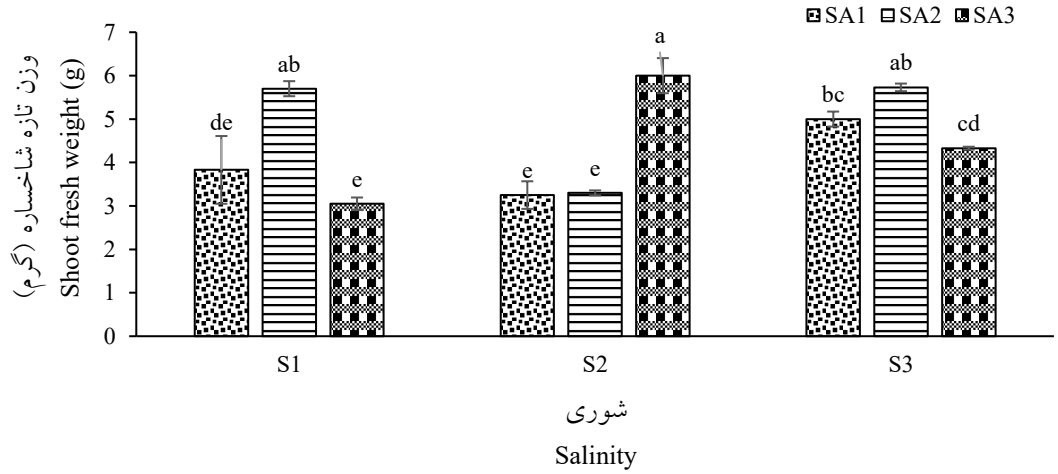
در پژوهشی کاربرد سالیسیلیک اسید باعث افزایش وزن تازه و خشک برگ در گیاه کلم زینتی شد (Mortezavi et al., 2016). در پژوهشی روی گل جعفری (*Tagetes erecta*)، بیشترین وزن تازه و خشک برگ در تیمار سالیسیلیک اسید مشاهده شد (Abdi et al., 2009). همچنین در پژوهشی روی گیاه ختمی زینتی گزارش شد که تیمار سالیسیلیک اسید منجر به افزایش وزن تازه و خشک برگ می‌شود (Ranjir et al., 2017). به‌طور مشابه، پژوهشگران در گیاه لوبیا سبز تحت تنش شوری، بیشترین وزن تازه و خشک برگ در تیمار سالیسیلیک اسید را گزارش کردند (Khoshbakht et al., 2012).

وزن آماس برگ

در شوری ۵/۱۲ دسی‌زیمنس بر متر، کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سالیسیلیک اسید وزن آماس برگ را ۲۰ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (شکل ۴). وزن آماس برگ که معرف گنجایش نگهداری آب در بافت است، در شرایط تنش شدید شوری به شدت کاهش می‌یابد. افزایش این صفت تحت تیمار سالیسیلیک اسید نشان می‌دهد که این ترکیب با کاهش نشت یونی و تقویت ویژگی‌های کشسانی دیواره سلولی، توانایی بافت را برای جذب و نگهداری آب بهبود می‌بخشد. پژوهشگران دریافتند که در شرایط تنش شوری در گیاه لوبیا، محتوای نسبی آب برگ افزایش یافت (Palma et al., 2009). پژوهشگران دریافتند که سالیسیلیک اسید باعث افزایش نسبی آب برگ شد (Khoshbakht et al., 2012). همچنین گزارش شده است که این هورمون از کاهش اکسین و سیتوکنین در گیاهان جلوگیری کرده و منجر به افزایش تقسیم سلولی و فتوسنتز می‌گردد (Hayat et al., 2010).

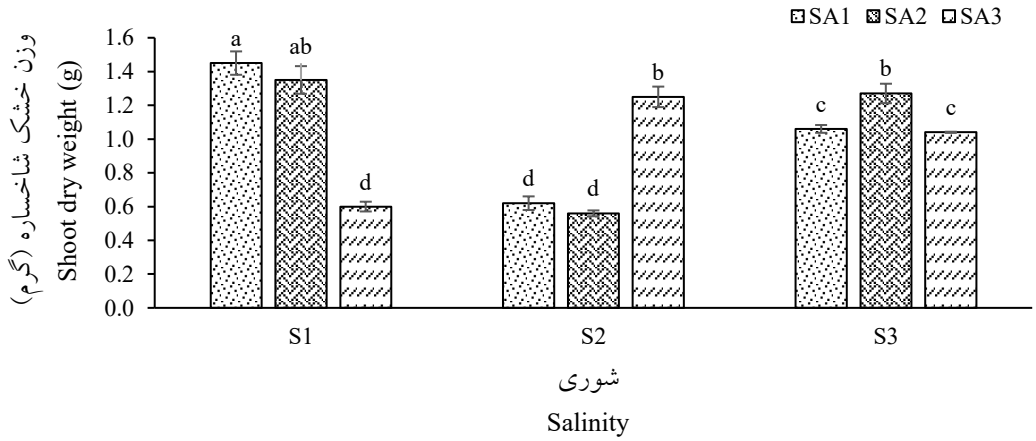
وزن تازه و خشک شاخساره

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین وزن تازه شاخساره در گیاهان تیمارشده با سالیسیلیک اسید (۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در سطح شوری ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد (شکل ۵). همچنین، نتایج مقایسه میانگین حاکی از آن بود که بیشترین وزن خشک شاخساره در گیاهان تیمارنشده با سالیسیلیک اسید در شرایط بدون تنش شوری (شوری صفر) به‌دست آمد (شکل ۶). پژوهش‌های متعددی تأثیر مثبت سالیسیلیک اسید بر وزن تازه و خشک شاخساره را تأیید کرده‌اند. در پژوهشی مشاهده شد که محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید باعث افزایش وزن تازه و خشک شاخساره گیاه سویا شد (Gutierrez-Coronado et al., 1998).



شکل ۵. مقایسه میانگین اثر برهمکنش تنش شوری (S) و سالیسیلیک اسید (SA) بر وزن تازه شاخساره کلم زینتی؛ حروف نامشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بر اساس آزمون LSD هستند.

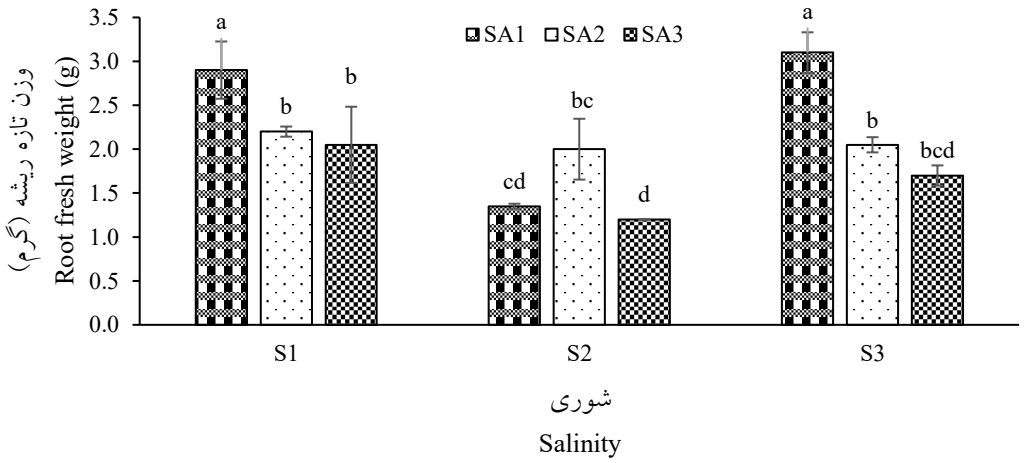
Fig. 5. Mean comparison of the interaction effect of salinity stress (S) and salicylic acid (SA) on the shoot fresh weight of ornamental cabbage; Dissimilar letters indicate significant difference according to LSD test ($P < 0.05$).



شکل ۶. مقایسه میانگین اثر برهمکنش تنش شوری (S) و سالیسیلیک اسید (SA) بر وزن خشک شاخساره کلم زینتی؛ حروف نامشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بر اساس آزمون LSD هستند.

Fig. 6. Mean comparison of the interaction effect of salinity stress (S) and salicylic acid (SA) on the shoot dry weight of ornamental cabbage; Dissimilar letters indicate significant difference according to LSD test ($P < 0.05$).

به‌طور مشابه، پژوهشگران دریافتند که کاربرد سالیسیلیک اسید منجر به بهبود زیست‌توده شاخساره گیاه سویا تحت تنش شوری شد (Khoshbakht et al., 2012). همچنین، نتایج پژوهشی دیگر نشان داد که سالیسیلیک اسید وزن تازه و خشک شاخساره گیاه ذرت را در شرایط تنش شوری افزایش داد (Gunes et al., 2007). افزایش وزن تازه و خشک شاخساره و ریشه در شرایط تنش شوری می‌تواند به نقش حفاظتی سالیسیلیک اسید نسبت داده شود. این ماده با تقویت غشاهای سلولی، کاهش نشت یونی، و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، تحمل گیاه به تنش شوری را بهبود می‌بخشد. همچنین، سالیسیلیک اسید با بهبود فرآیندهای فتوسنتزی و حفظ آماس سلولی به افزایش زیست‌توده گیاه کمک می‌کند.



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر برهمکنش تنش شوری (S) و سالیسیلیک اسید (SA) بر وزن تازه ریشه کلم زینتی؛ حروف نامشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بر اساس آزمون LSD هستند.

Fig. 7. Mean comparison of the interaction effect of salinity stress (S) and salicylic acid (SA) on the root fresh weight of ornamental cabbage; Dissimilar letters indicate significant difference according to LSD test ($P < 0.05$).

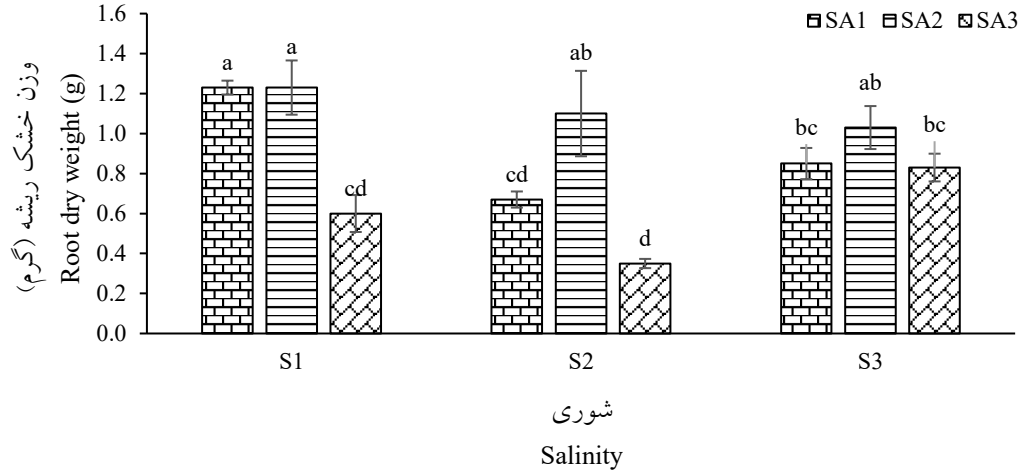
وزن تازه و خشک ریشه

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین مقدار وزن تازه ریشه در گیاهان تیمارنشده با سالیسیلیک اسید در سطح شوری ۵/۱۲ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد. این گیاهان از نظر آماری با گیاهان تیمارنشده در سطح شوری صفر درصد در یک گروه قرار گرفتند (شکل ۷). همچنین، نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین وزن خشک ریشه در گیاهان تیمارشده با سالیسیلیک اسید (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در سطح شوری صفر درصد به‌دست آمد (شکل ۸). یافته‌های پژوهشی نشان داد کاربرد سالیسیلیک اسید باعث افزایش وزن تازه و خشک ریشه در کلم زینتی شد (Mortezavi et al., 2016). پژوهش‌های دیگر نشان داده‌اند که سالیسیلیک اسید وزن تازه و خشک ریشه را در گیاهان ریحان و مرزنجوش افزایش داده است. همچنین کاربرد سالیسیلیک اسید باعث افزایش وزن تازه و خشک ریشه در گل جعفری شده است (Abdi et al., 2009). نتایج این پژوهش‌ها حاکی از آن است که سالیسیلیک اسید می‌تواند وزن تازه و خشک ریشه را افزایش دهد. از جمله دلایل احتمالی این اثر می‌توان به نقش سالیسیلیک اسید در حفظ آماس سلولی تحت تنش، کاهش تنفس سلولی در بافت‌ها و آثار محافظتی این ماده اشاره کرد (Ghai et al., 2002; AL-Khassawneh et al., 2006; Bariola et al., 1999; Herrera-Tuz, 2004).

با توجه به نتایج وزن تازه شاخساره (شکل ۵) و وزن خشک ریشه (شکل ۸)، می‌توان دریافت که این الگوی پاسخ متفاوت بین شاخساره و ریشه اهمیت دارد: در شوری ملایم، سالیسیلیک اسید رشد شاخساره را به‌طور نسبی بیش‌تر از ریشه تحریک می‌کند، اما در شرایط بدون تنش، تخصیص ماده خشک به ریشه افزایش می‌یابد. از نظر سازوکار، این پدیده می‌تواند به تنظیم هورمونی نسبت داده شود: سالیسیلیک اسید به‌دلیل مهار بیوسنتز اتیلن در شرایط تنش و تعدیل پاسخ‌های ناشی از آبسزیک اسید، الگوی تخصیص منابع را تغییر می‌دهد (Iqbal et al., 2022).

رنگیزه‌های فتوسنتزی

اثر برهمکنش شوری و سالیسیلیک اسید بر کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). اثر تنش شوری به‌تنهایی بر کلروفیل b و کاروتنوئید در سطح یک درصد معنی‌دار بود، اما اثر آن بر کلروفیل a معنی‌دار نشد. همچنین، اثر تیمار سالیسیلیک اسید بر تمامی صفات مورد بررسی



شکل ۸. مقایسه میانگین اثر برهمکنش تنش شوری (S) و سالیسیلیک اسید (SA) بر وزن خشک ریشه کلم زینتی؛ حروف نامشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بر اساس آزمون LSD هستند.

Fig. 8. Mean comparison of the interaction effect of salinity stress (S) and salicylic acid (SA) on the root dry weight of ornamental cabbage; Dissimilar letters indicate significant difference according to LSD test ($P < 0.05$).

جدول ۲. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات رنگیزه‌های فتوسنتزی کلم زینتی

Table 2. Analysis of variance (mean squares) of photosynthetic pigment traits of ornamental cabbage

کاروتنویید Carotenoid content	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل a Chlorophyll a	درجه آزادی Df	منابع تغییر Sources of variation
0.07**	0.05**	0.19ns	2	تنش شوری Salinity stress
0.02**	0.06**	0.53**	2	سالیسیلیک اسید Salicylic acid
0.04**	0.07**	2.3*	4	تنش شوری×سالیسیلیک اسید Salinity stress×Salicylic acid
0.004	0.002	0.06	16	خطا Error
16.06	14.37	17.08		ضریب تغییرات (٪) Coefficient of variation (%)

*، ** و ns به‌ترتیب بیان‌گر اثر معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد و اثر غیرمعنی‌دار است.

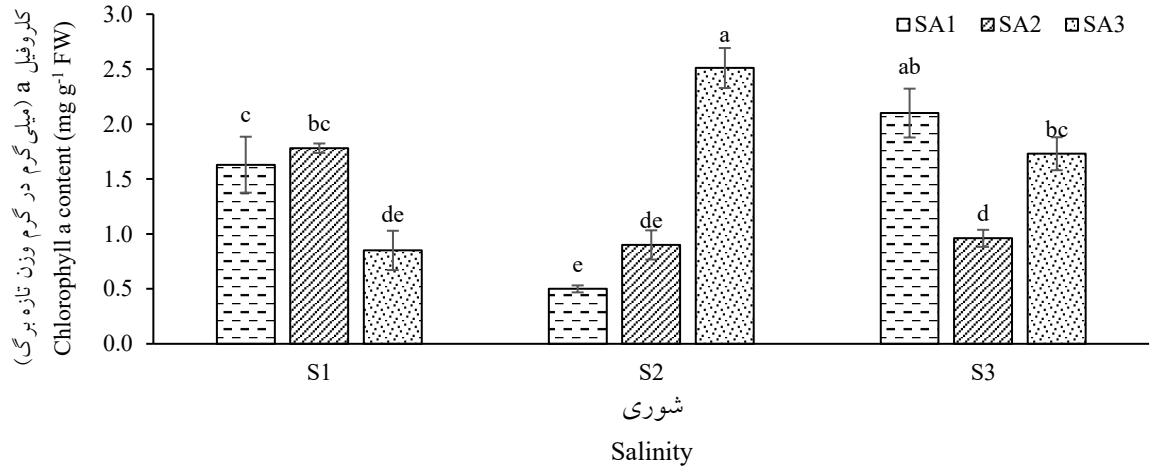
*, **, and ns indicate significant effect at the 5 and 1% probability levels, and non-significant effect, respectively.

(کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید) در سطح یک درصد تفاوت معنی‌داری ایجاد کرد (جدول ۲).

کلروفیل a و b

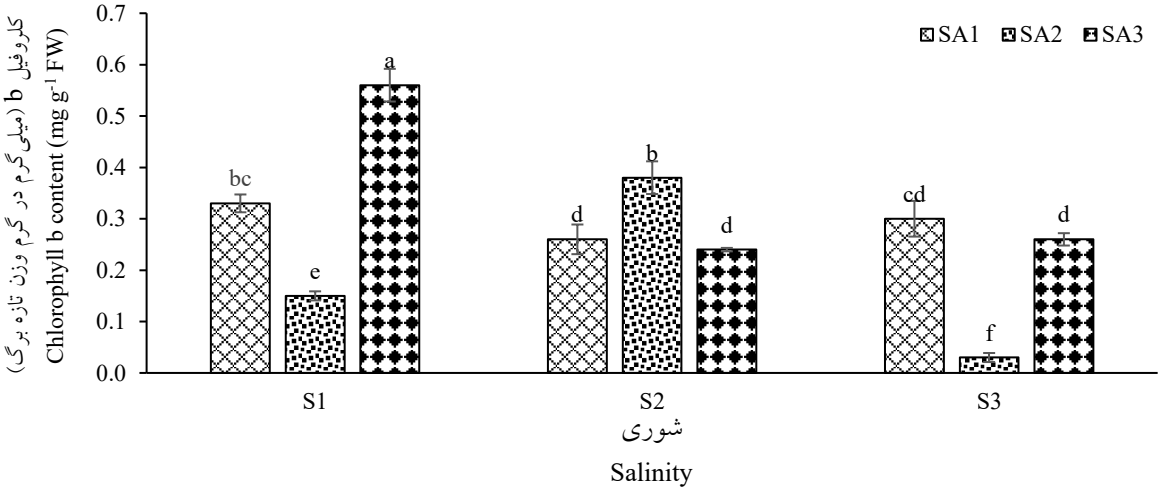
بیشترین میزان کلروفیل a (۱۹۵ درصد افزایش نسبت به شاهد) و کلروفیل b (۶۵ درصد افزایش نسبت به شاهد) در تیمار ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر سالیسیلیک اسید و شوری ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر به‌دست آمد (شکل‌های ۹ و ۱۰).

افزایش چشم‌گیر رنگیزه‌های فتوسنتزی در شوری ملایم و نه در شرایط بدون تنش، نشان می‌دهد که سالیسیلیک اسید لزوماً ساخت کلروفیل را در شرایط بهینه افزایش نمی‌دهد، بلکه عمدتاً از تخریب آن در شرایط تنش جلوگیری می‌کند. این تمایز برای



شکل ۹. مقایسه میانگین اثر برهمکنش تنش شوری (S) و سالیسیلیک اسید (SA) بر میزان کلروفیل a کلم زینتی؛ حروف نامشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بر اساس آزمون LSD هستند.

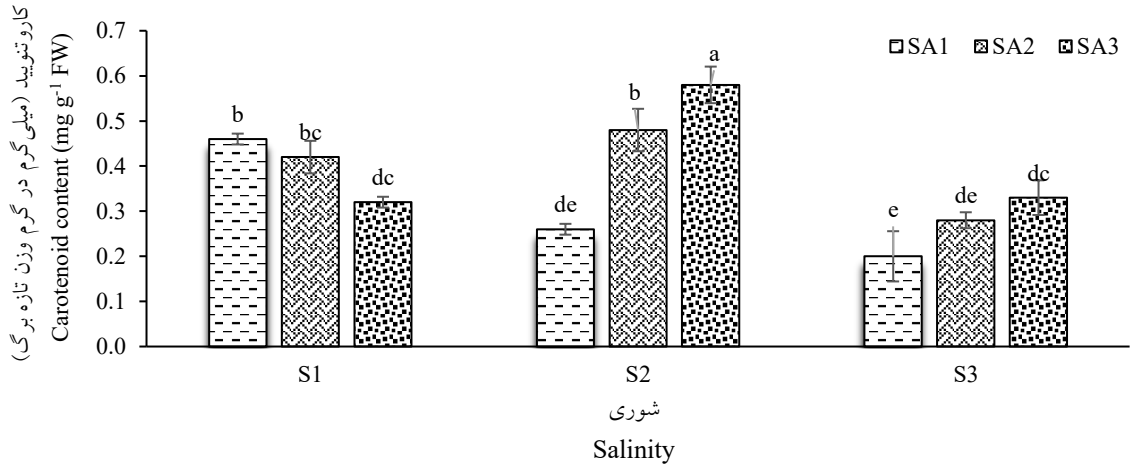
Fig. 9. Mean comparison of the interaction effect of salinity stress (S) and salicylic acid (SA) on the chlorophyll a content of ornamental cabbage; Dissimilar letters indicate significant difference according to LSD test ($P < 0.05$).



شکل ۱۰. مقایسه میانگین اثر برهمکنش تنش شوری (S) و سالیسیلیک اسید (SA) بر میزان کلروفیل b کلم زینتی؛ حروف نامشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بر اساس آزمون LSD هستند.

Fig. 10. Mean comparison of the interaction effect of salinity stress (S) and salicylic acid (SA) on the chlorophyll b content of ornamental cabbage; Dissimilar letters indicate significant difference according to LSD test ($P < 0.05$).

درک نقش واقعی سالیسیلیک اسید حیاتی است. آنچه در پژوهش‌های پیشین به‌عنوان «افزایش کلروفیل» تفسیر شده، و در واقع «کاهش تخریب ناشی از تنش» است. در خردل و در کلم زینتی نتایج مشابهی گزارش شده است (Mortezavi et al., 2016; Fariduddin et al., 2003). سازوکارهای حفاظتی سالیسیلیک اسید در برابر تخریب کلروفیل شامل موارد زیر است: ۱) مهار فعالیت آنزیم کلروفیلاز که در شرایط تنش فعال شده و(Koyro, 2006) سبب تجزیه کلروفیل می‌شود (Raskin, 1992)، ۲) کاهش تجمع اکسیژن منفرد در واکنشگاه فتوسیستم II به‌دلیل افزایش بیان پروتئین‌های D1 و D2 که در ترمیم



شکل ۱۱. مقایسه میانگین اثر برهمکنش تنش شوری (S) و سالیسیلیک اسید (SA) بر میزان کاروتنویید کلم زینتی؛ حروف نامشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بر اساس آزمون LSD هستند.

Fig. 11. Mean comparison of the interaction effect of salinity stress (S) and salicylic acid (SA) on the carotenoids content of ornamental cabbage; Dissimilar letters indicate significant difference according to LSD test ($P < 0.05$).

آسیب‌های نوری نقش دارند (Karlovic et al., 2004)، و ۳) افزایش فعالیت آنزیم δ-آمینولوولینیک اسید دهیدراتاز که آنزیم کلیدی بیوسنتز کلروفیل است (Ghai et al., 2002).

کاروتنویید

بیشترین میزان کاروتنوئید در گیاهان تیمارشده با سالیسیلیک اسید (۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در سطح شوری ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر به‌دست آمد (شکل ۱۱). کاربرد سالیسیلیک اسید در گیاه سویا تحت تنش شوری باعث افزایش محتوای کاروتنوئید شد (Ghaffari and Tadayyon, 2019). افزایش سنتز کاروتنوئیدها در شرایط تنش شوری می‌تواند به نقش محافظتی این رنگ‌دانه‌ها در ساختارهای فتوسنتزی مرتبط باشد. کاروتنوئیدها با خاموش کردن اکسیژن تک‌یاخته[1] و جلوگیری از پراکسیداسیون لیپیدها، به کاهش تنش اکسیداتیو کمک می‌کنند. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده اهمیت سالیسیلیک اسید در تقویت سیستم‌های دفاعی گیاه در برابر تنش شوری است. پژوهشگران دیگر نیز افزایش کاروتنوئید را تحت تأثیر سالیسیلیک اسید در سویا و گلرنگ تأیید کرده‌اند (Ghaffari and Tadayyon, 2019; Daneshmand et al., 2014).

صفات فیتوشیمیایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر برهمکنش شوری و سالیسیلیک اسید بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در سطح احتمال یک درصد و بر صفات فنل و فلاونوئید در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ایجاد کرد. تنش شوری بر تمامی صفات مورد بررسی (ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، فنل و فلاونوئید) در سطح یک درصد تفاوت معنی‌دار ایجاد نمود. تیمار سالیسیلیک اسید بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در سطح یک درصد تفاوت معنی‌داری ایجاد کرد (جدول ۳).

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی

بیشترین ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه در تیمار ترکیبی شوری ۵/۱۲ دسی‌زیمنس بر متر و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سالیسیلیک اسید مشاهده شد (شکل ۱۲). اگرچه شوری شدید (۵/۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) به‌تنهایی سبب افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی شد، اما کاربرد سالیسیلیک اسید این ظرفیت را به‌طور معنی‌داری ارتقا داد. این یافته نشان می‌دهد که سالیسیلیک اسید نه‌تنها پاسخ دفاعی گیاه را تقویت می‌کند، بلکه آستانه القای این پاسخ‌ها را نیز کاهش می‌دهد.

1. Singlet oxygen

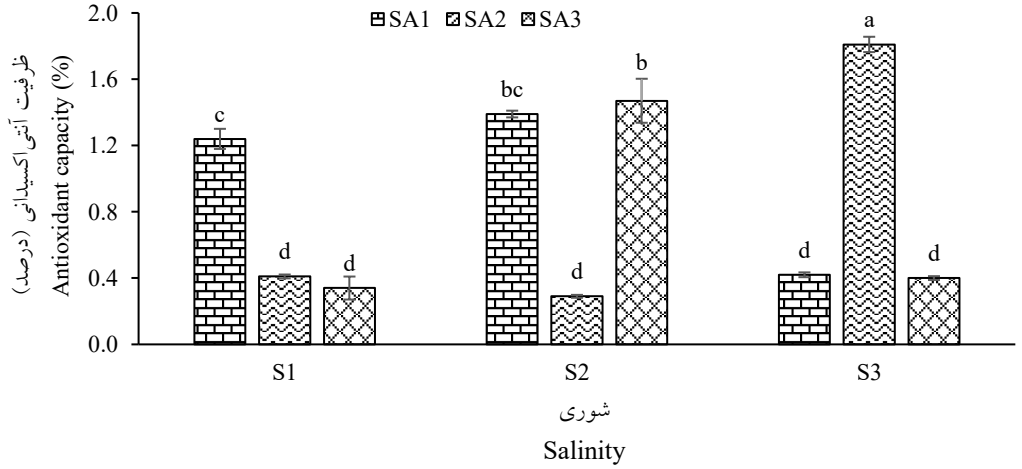
جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات فیتوشیمیایی کلم زینتی

Table 3. Analysis of variance (mean squares) of phytochemical traits of ornamental cabbage

فلاونویید Flavonoid	فنل Phenol	ظرفیت آنتی‌اکسیدانی Antioxidant capacity	درجه آزادی Df	منابع تغییر Sources of variation
0.06**	0.006**	0.33**	2	تنش شوری Salinity stress
0.009ns	0.001ns	0.18**	2	سالیسیلیک اسید Salicylic acid
0.02*	0.002*	1.91**	4	تنش شوری×سالیسیلیک اسید Salinity stress×Salicylic acid
0.003	0.001	0.01	16	خطا Error
19	26	11.53		ضریب تغییرات (٪) Coefficient of variation (%)

*، ** و ns به‌ترتیب بیانگر اثر معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد و اثر غیرمعنی‌دار است.

*, **, and ns indicate significant effect at the 5 and 1% probability levels, and non-significant effect, respectively.



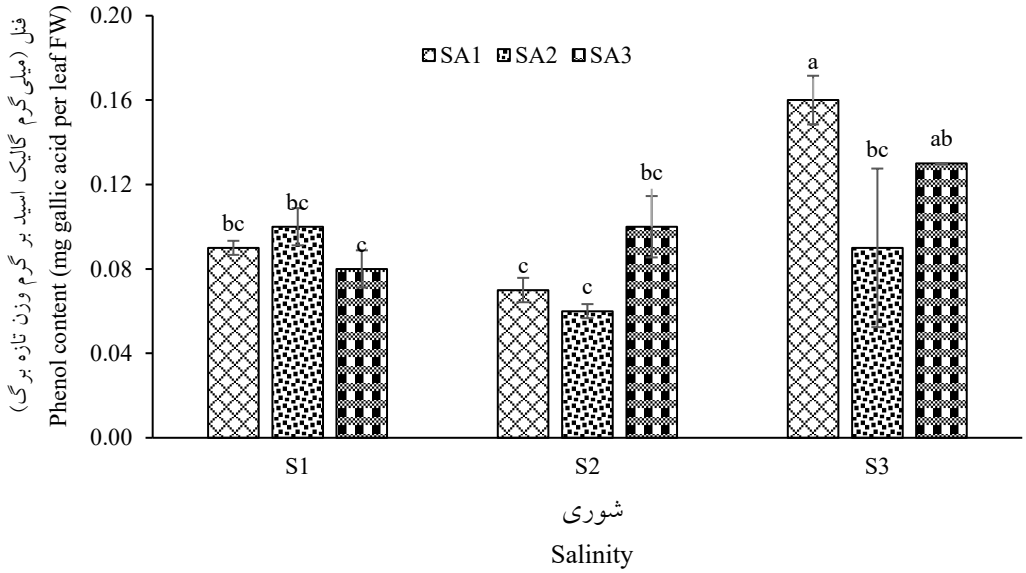
شکل ۱۲. مقایسه میانگین اثر برهمکنش تنش شوری (S) و سالیسیلیک اسید (SA) بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کلم زینتی؛ حروف نامشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بر اساس آزمون LSD هستند.

Fig. 12. Mean comparison of the interaction effect of salinity stress (S) and salicylic acid (SA) on the antioxidant capacity of ornamental cabbage; Dissimilar letters indicate significant difference according to LSD test ($P < 0.05$).

سازوکار مولکولی این پدیده به فعال‌سازی پروتئین‌های کیناز وابسته به کلسیم و فاکتورهای رونویسی خانواده WRKY باز می‌گردد که بیان ژن‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POX) و آسکوربات پراکسیداز (APX) را افزایش می‌دهد (Shwethakumari et al., 2021). دیگر پژوهشگران نیز افزایش فعالیت این آنزیم‌ها را در ختمی زینتی گزارش کرده‌اند که با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی کامل دارد (Biramzadeh and Habibi, 2014).

فنل

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که تنش شوری به تنهایی محتوای



شکل ۱۳. مقایسه میانگین اثر برهمکنش تنش شوری (S) و سالیسیلیک اسید (SA) بر میزان فنل کلم زینتی؛ حروف نامشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بر اساس آزمون LSD هستند.

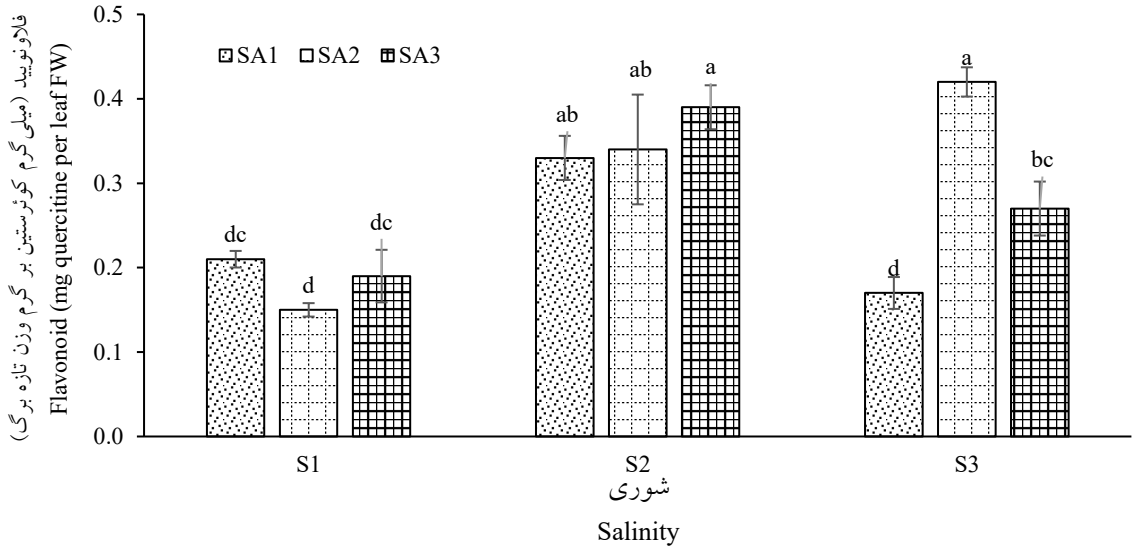
Fig. 13. Mean comparison of the interaction effect of salinity stress (S) and salicylic acid (SA) on the phenol content of ornamental cabbage; Dissimilar letters indicate significant difference according to LSD test ($P < 0.05$).

فنل را ۷۷ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (شکل ۱۳). این افزایش بیان‌گر فعال‌سازی مسیر فنیل‌پروپانوئید به‌عنوان یک پاسخ عمومی به تنش است. اگرچه اثر اصلی سالیسیلیک اسید بر فنل و فلاونوئید معنی‌دار نبود، اما اثر برهمکنش آن با شوری بر این صفات معنی‌دار شد. بنابراین یافته مهم پژوهش حاضر این است که سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک محرک، لزوماً در همه شرایط متابولیت‌های ثانویه را افزایش نمی‌دهد، بلکه اثر آن وابسته به وجود و سطح تنش است. به‌بیان دیگر، سالیسیلیک اسید «القاگر» نیست، بلکه «تقویت‌کننده» پاسخ‌های القاشده توسط تنش است.

در پژوهشی مشاهده شد کاربرد سالیسیلیک اسید (۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار) در جوانه‌های کلم بروکلی تحت تنش شوری، تولید سولفورافان (یک ترکیب فنلی با خواص آنتی‌اکسیدانی) را افزایش داد (Esfandiari et al., 2014). این اثر به فعال‌سازی مقاومت اکتسابی سیستمیک (SAR) و بهبود متابولیسم فنلی نسبت داده شد. همچنین، در پژوهشی روی گیاه وتیورگرس، کاربرد سالیسیلیک اسید (۱ و ۲ میلی‌مولار) تحت تنش کم‌آبی، محتوای فنل کل برگ‌ها را به‌طور معنی‌داری افزایش داد، که این اثر در شرایط تنش شدیدتر (۴۰ درصد گنجایش مزرعه‌ای) برجسته‌تر بود (Safari et al., 2017).

فلاونویید

بیشترین میزان فلاونویید در گیاهان رشدیافته در تیمار ترکیبی سطح شوری ۵/۱۲ و تیمار سالیسیلیک اسید به میزان ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد (شکل ۱۴). نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که سالیسیلیک اسید می‌تواند محتوای فلاونوئیدها را در گیاهان تحت تنش افزایش دهد. به‌عنوان نمونه، پژوهشی روی گیاه گندم نشان داد که کاربرد سالیسیلیک اسید (۰/۵ میلی‌مولار) تحت تنش شوری، محتوای فلاونوئیدهای کل را به‌طور معنی‌داری افزایش داد که به بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی و کاهش آسیب اکسیداتیو نسبت داده شد (Khalil et al., 2018). در پژوهش دیگری، کاربرد سالسیلیک اسید در گیاه ریحان تحت تنش شوری، سنتز فلاونوئیدها را به‌دلیل فعال‌سازی مسیر فنیل‌پروپانوئید و افزایش بیان ژن‌های مرتبط با بیوسنتز فلاونوئیدها (مانند CHS و F3H) تقویت کرد. می‌توان انتظار



شکل ۱۴. مقایسه میانگین اثر برهمکنش تنش شوری (S) و سالیسیلیک اسید (SA) بر میزان فلاونویید کلم زینتی؛ حروف نامشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بر اساس آزمون LSD هستند.

Fig. 14. Mean comparison of the interaction effect of salinity stress (S) and salicylic acid (SA) on the flavonoid content of ornamental cabbage; Dissimilar letters indicate significant difference according to LSD test ($P < 0.05$).

داشت که سالیسیلیک اسید به‌دلیل تحریک مسیرهای بیوسنتزی و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز)، محتوای فلاونوئیدها را افزایش دهد. این افزایش می‌تواند به محافظت از سلول‌ها در برابر گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) ناشی از تنش شوری کمک کند (Ghasemzadeh et al., 2016).

به‌طور کلی یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد الگوی پاسخ وابسته به غلظت و سطح تنش است. سالیسیلیک اسید در شوری ملایم (۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر) عمدتاً به‌دلیل حفاظت از دستگاه فتوسنتزی و افزایش رنگیزه‌ها عمل کرده و منجر به افزایش زیست‌توده می‌شود. اما در شوری شدید (۵/۱۲ دسی‌زیمنس بر متر)، مسیر دفاعی غالب، افزایش متابولیت‌های ثانویه و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی است. این تغییر راهبرد، از «افزایش رشد» به «بقا و دفاع» با تغییر غلظت بهینه سالیسیلیک اسید همراه است: غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر در شوری ملایم و غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر در شوری شدید مؤثرترند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر برای نخستین بار نقش محرک سالیسیلیک اسید را در بهبود همزمان صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک کلم زینتی تحت تنش شوری به‌صورت سیستماتیک مورد بررسی قرار داد. نوآوری این پژوهش در تلفیق ارزیابی‌های رنگیزه‌ای، متابولیت‌های ثانویه و شاخص‌های رشدی در یک گیاه زینتی با کاربرد مشخص در فضای سبز شهری است.

نتایج نشان داد که سالیسیلیک اسید با فعال‌سازی هماهنگ دو سامانه دفاعی عمل می‌کند: از یک سو با حفظ یکپارچگی غشاء و آماس سلولی، زیرساخت‌های فیزیولوژیک فتوسنتز را پایدار نگاه می‌دارد و از سوی دیگر با تحریک بیوسنتز ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه را به‌طور چشم‌گیری ارتقاء می‌بخشد. این پاسخ دوگانه، سازوکاری کارآمد برای کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از شوری فراهم می‌کند.

برجسته‌ترین یافته‌نوآورانه این پژوهش، اثربخشی متمایز سالیسیلیک اسید در سطوح مختلف تنش است: غلظت‌های بیشتر

آن (۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در شوری ملایم کارآمدتر بوده و غلظت کمتر آن (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در شوری شدید عملکرد بهتری نشان می‌دهد. این الگوی پاسخ وابسته به سطح تنش، امکان بهینه‌سازی کاربرد این محرک را متناسب با کیفیت آب و خاک فراهم می‌کند.

از منظر کاربردی، این پژوهش سالیسیلیک اسید را به‌عنوان ابزاری راهبردی برای مدیریت پایدار فضای سبز در مناطق با محدودیت منابع آب باکیفیت معرفی می‌کند. توانایی این ترکیب در حفظ شادابی و رنگ‌پذیری کلم زینتی در شرایط شور، ارزش اقتصادی آن را در صنعت گیاهان زینتی دوچندان می‌کند. با این‌حال، محدودیت اثربخشی در شوری‌های بسیار زیاد نشان می‌دهد که این راهکار برای دامنه متوسط تنش (تا ۵/۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) قابل پیشنهاد است.

پژوهش‌های آینده می‌توانند با تمرکز بر شناسایی مسیرهای مولکولی درگیر در این پاسخ‌ها، ترکیب این محرک با سایر تعدیل‌کننده‌های تنش و آزمون ژنوتیپ‌های متنوع کلم زینتی، افق‌های تازه‌ای برای به‌کارگیری این راهکار در کشاورزی شورورزی و زیباسازی شهری بگشایند.

تشکر و سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از پروژه درسی دانشجویان دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری است. بدین وسیله نویسندگان از حمایت‌های علمی و پژوهشی دانشگاه مذکور صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شـــخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

References

1. Abdel, L., Gharib, F., 2006. Effect of salicylic acid on the growth and metabolic activities bio oil content of basil and marjoram. Int. J. Agric. Biol. Eng. 4, 485–492.
2. Abdi, G., Hedayat, M., Asghari, N., 2009. The effect of different concentrations of salicylic acid on the growth and flowering of *Tagetes patula*. In: 6th Iranian Horticultural Science Congress, University of Guilan, Iran. (In Persian)
3. Abdolmohammadi, S., Omidi, J., Hatemkzadeh, A., Hassanpour, M., 2018. Evaluation of salinity stress tolerance in stock plant under treatment with salicylic acid. Appl. Biol. 3(31), 121–131.
4. Afshari, M., Malek-Mahdi, R., 2017. Evaluation of phenolic compounds, essential oil and antioxidant activity of yarrow (*Achillea millefolium* L.) at different growth stages. Plant Proc. Func. 6, 15–25.
5. AL-Khassawneh, N.M., Karam, N.S, Shibli, R.A., 2006. Growth and flowering of black iris (*Iris nigricans* Dinsm.) following treatment with plant growth regulators. Sci. Hort. 107, 187–193. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.10.003.
6. Arora, N.K., 2019. Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. Environ. Sustain. 2, 95–96.
7. Banchio, E., Bogino, P.C., Zygadlo, J., Giordano, W., 2008. Plant growth promoting rhizobacteria improve growth and essential oil yield in *Origanum majorana* L. Biochem. Syst. Ecol. 36, 766–771. https://doi.org/10.1016/j.bse.2008.08.006.
8. Brahma, R., Perves, A., Mrinal, C., 2020. Silicon nutrition for alleviation of abiotic stress in plants: A review. J. Pharm. Phytochem. 9(4), 1374–1381.
9. Bariola P.A., Macintosh, G.C., Green, P.J., 1999. Regulation of s-like ribonuclease levels in *Arabidopsis antisense* inhibition of RNS1 or RNS2 elevates anthocyanin accumulation. Plant Physiol. 199, 331–342. https://doi.org/10.1104/pp.119.1.331.
10. Biramzadeh, Kh., Habibi, Gh., 2014. Application of salicylic acid in reducing the effects of saline water on ornamental hollyhock. In: Proceedings of the First National Conference on Medicinal Plants and Sustainable Agriculture, Shahid Mofatteh, Hamedan, Iran.
11. Carter, G.A., Knapp, A.K., 2001. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. Am. J. Bot., 88(1), 677–684. https://doi.org/10.2307/2657068.
12. Chang, C., Yang, C., Wen, M.H., Chern, J.C., 2002. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. J. Food Drug Anal. 10(3), 178–182.
13. Daneshmand, F., Arvin, M.J., Keramat, B., 2014. Changes induced by salicylic acid in safflower under salinity stress.

Plant Res. J. 27(2), 204–214. (In Persian with English abstract)
14. Esfandiari, A., Babalar, M., Hashemi, J., Mostofi, Y., 2014. The effect of salicylic acid and salinity stress on seed germination and health-promoting antioxidants in broccoli sprouts. J. Hortic. Sci. 28(3), 388–398. (In Persian with English abstract)
15. Fariduddin, Q., Hayat, S., Ahmad, A., 2003. Salicylic acid influences net photosynthetic rate, carboxylation deficiency, nitrate reductase activity and seed yield in *Brassica juncea*. Photosynthetic a, 41, 281–284.
16. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2020. The state of food and agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture. FAO. https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb1447en.
17. Ghaffari, H., Tadayyon, M.R., 2019. Effect of foliar application of proline and salicylic acid on some physiological indices of soybean under saline irrigation. Plant Process. Func. 8(29), 125–138.
18. Ghai, N., Setiva, R.C., Setia, N., 2002. Effect of paclobutrazol and salicylic acid on chlorophyll content, hill activity and yield components in *Brassica napus* L. (cv. GSL-l). Phytomorphol. 52, 83–87.
19. Ghanbari, M., Ghanbarian, A., Javanmardi, Sh., Farzaneh, M., 2011. Effect of salicylic acid pre-treatment on radish seed germination under salinity conditions. Agroecology 7(3), 45–50. (In Persian with English abstract)
20. Ghasemzadeh, A., Ashkani, S., Baghdadi, A., Pazoki, A., Jaafar, H.Z., Rahmat, A., 2016. Improvement in flavonoids and phenolic acids production and pharmaceutical quality of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) by ultraviolet-B irradiation. Molecules 21(9), 1203. https://doi.org/10.3390/molecules21091203.
21. Ghoulam, C., Ahmed, F., Khalid, F., 2001. Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. Environ. Exp. Bot. 47, 139–150. https://doi.org/10.1016/S0098-8472(01)00109-5.
22. Gunes, A., Inal, A., Alpaslan, M., Eraslan, F., Bagci, E.G., Cicek, N., 2007. Salicylic acid induced changes on some physiological parameters symptomatic for oxidative stress and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.) grown under salinity. J. Plant Physiol. 164, 728–736. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.12.009.
23. Gutierrez-Coronado, M.A., Trejo-Lopez, C., Larqué-Saavedra, A., 1998. Effects of salicylic acid on the growth of roots and shoots in soybean. Plant Physiol. Biochem. 36, 653–665. https://doi.org/10.1016/S0981-9428(98)80003-X.
24. Hayat, Q., Hayat, S., Irfan, M., Ahmad, A., 2010. Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: A review. Environ. Exp. Bot. 68, 14–25. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.08.005.
25. Herrera-Tuz, R. 2004. Reguladors de crecimiento XXI. Efectode acido salicilico en li productivided de papaya maradol (*Carica papaya* L.), Tesis de Licein ciatura. lnstituto Tecnologico Agropecuario, conkal, Yucatan, Mexico.
26. Karlovic, K., Vrsek, I., Sindrak, Z., Zidovec, V., 2004. Influence of growth regulators on the height and number of inflorescence shoots in the Chrysanthemum cultivar Revert. Agric. Conspectus Scienti. 69, 63–66.
27. Iqbal, S., Wang, X., Mubeen, I., Kamran, M., Javed, M.T., 2022. Gibberellic acid mitigates salinity stress in plants: An integrative overview. J. Plant Growth Regul. 41(3), 2032–2049. https://doi.org/10.1007/s00344-022-10659-5.
28. Khalil, N., Fekry, M., Bishr, M., El-Zalabani, S., Salama, O., 2018. Foliar spraying of salicylic acid induced accumulation of phenolics, increased radical scavenging activity and modified the composition of the essential oil of water stressed *(Thymus vulgaris* L.). Plant Physiol. Biochem. 123, 65–74. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.12.007.
29. Khoshbakht, D., Ramin, A., Baghbanha, M.R., 2012. Possibility of reducing the effect of salinity stress in bean using salicylic acid. J. Crop Prod. Process. 2(5), 189–199. (In Persian with English abstract)
30. Koyro, H.W., 2006. Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of potential cash crop halophyte *Plantago coronopus* (L.). Environ. Exp. Bot. 56, 136–149. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.02.00.
31. Lichtenthaler, H.K., Buschmann, C., 2001. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-vis spectroscopy. Curr. Protoc. 1(2), 4-3.
32. Miceli, A., Moncada, A., D'Anna, F., 2003. Effect of salt stress in lettuce cultivation. Acta Hort. 609, 371–375.
33. Mortezavi, N., Khodabandeloo, F., Azimi, M.H., 2016. Effect of different concentrations of cycocel and salicylic acid on morphophysiological traits of ornamental cabbage. J. Hort. Sci. 3(4), 590–596. (In Persian with English abstract)
34. Munns, R., Tester, M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. Annu. Rev. Plant Biol. 59, 651–681. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911.
35. Nazarbeigi, A., Nasri, R., 2014. Effect of gibberellic acid and salicylic acid under salinity stress on ion uptake and leaf traits of two rapeseed cultivars. Ecophysiol. Crops. 8(1), 1–16. (In Persian with English abstract)
36. Palma, F., Carmen, L., Carmen, I., Jose, M.G., Noel, A.T.G., 2009. Combined effect of salicylic acid and salinity on some antioxidant activities, oxidative stress and metabolite accumulation in *Phaseolus vulgaris*. J. Plant Growth Regul. 58, 307–316.
37. Ranjir, T., Safari, V., Maqsoudi-Mood, A.A., 2017. Application of salicylic acid in reducing the effects of saline water on ornamental hollyhock. In: Proceedings of the 14th National Conference on Irrigation and Reduction of Water Evaporation, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. (In Persian)
38. Raskin, I., 1992. Role of salicylic acid in plants, Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 43, 439–463.

39. Rezaei, M., Mohammadi, H., Khoshbakht, T., 2021. The effect of exogenous application of salicylic acid on some physiological and biochemical indices of canola under salinity stress. J. Plant Res. 34(4), 45–60. (In Persian with English abstract)
40. Safari, M., Arghavani, M., Kheiri, A., 2017. Effect of salicylic acid on morphophysiological traits of vetiver grass under drought stress. Agric. Crop Improv. 19(3), 591–603. https://doi.org/10.22059/jci.2017.60464.
41. Shanks, J.B., 1972. Chemical control of growth and flowering in hibiscus. Hort. Sci. 7, 574.
42. Shannon, M.C., Grieve, C.M., 1999. Tolerance of vegetable crops to salinity. Sci. Hort. 78(2), 5–38. https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00189-7.
43. Sharma, M.K., 2023. Plant stress: Salt stress and mechanisms of stress tolerance. Current Agric. Res. J. 11(2), 380–400. http://dx.doi.org/10.12944/CARJ.11.2.03.
44. Shwethakumari, U., Pallavi, T., Prakash, N.B., 2021. Influence of foliar silicic acid application on soybean (*Glycine max* L.) varieties grown across two distinct rainfall years. Plants 10(6), 116. https://doi.org/10.3390/plants10061162.
45. Slinkard, K., Singleton, V.L., 1977. Total phenol analysis: automation and comparison with manual methods. Am. J. Enol. Vitic. 28(1), 49–55.
46. Sobhani, Gh., Golchin, A., Shekari, F., 2011. Effect of different levels of salicylic acid on growth and yield of tomato under salinity stress. In: Proceedings of the First Congress of New Sciences and Technologies in Agriculture, Zanjan, Iran. (In Persian)
47. Taghizadeh, M., Solgi, M., 2014. Introduction of commercial protocol for *in vitro* propagation of ornamental cabbage (*Brassica oleraceae* L.). Hort. Sci. 45(4), 484–475. https://ijhs.ut.ac.ir/article_53501_6954.html.
48. Yeo, A.R., Flowers, S.A., Rao, G., Welfare, K., Senanayake, N., Flowers, T.J., 1999. Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for a reduction in the transpirational bypass flow. Plant Cell Environ. 22, 559–565. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00418.x.