Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Application of salicylic acid and zeolite for reducing alkalinity stress in black seed (*Nigella sativa* L.)

Farzaneh Khodavand[1] | Aliashraf Amirinejad[2]✉ | Mokhtar Ghobadi[3]

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: far.khodavand@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: a.amirinejad@razi.ac.ir
3. Department of Plant Genetics and Production, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: ghobadi.m@razi.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 8, 2023

Revised: Aug. 12, 2023

Accepted: Aug. 19, 2023

Published online: Sep. 23, 2023

Keywords:
Environmental Stress,
Growth Characteristics,
Modifiers,
Proline.

ABSTRACT

The use of modifiers can reduce the effects of environmental stress in plants. The aim of this study was to investigate the effect of salicylic acid and zeolite in reducing alkalinity stress in black seed (Nigella sativa L.). A factorial experiment was conducted based on a completely randomized design with three replications in 2022 in the greenhouse of Razi university, Kermanshah. The factors included alkalinity stress (at three levels of 0, 50 and 100 mM as NaHCO3), salicylic acid (at three levels of 0, 0.5 and 1 mM), and zeolite (at three levels of 0, 0.25 and 0.5 % by weight). The results showed that the effects of salicylic acid and zeolite on most of the plant growth characteristics under alkalinity stress were significant ($P \leq 0.01$). The highest amount of proline (12.65 µmol/g) and soluble sugars (0.2 mg/g) were obtained under severe alkalinity stress without the use of salicylic acid and zeolite. Also, the highest shoot height (24.6 cm), root length (19.5 cm), shoot dry mass (0.78 g) and leaf area (22.47 cm2) were obtained without alkalinity and with application of 1 mM salicylic acid and 0.5 % zeolite. In general, the use of salicylic acid, as a plant hormone, and zeolite, as a soil amendment, is a suitable and cheap strategy to reduce the effects of alkalinity stress in black seed.

Cite this article: Khodavand, F., Amirinejad, A. A., & Ghobadi, M., (2023) Application of salicylic acid and zeolite for reducing alkalinity stress in black seed (Nigella sativa L.). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (7), 1027-1041 https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361970.669531

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361970.669531

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۴، شماره ۷ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

کاربرد اسید سالیسیلیک و زئولیت برای کاهش تنش قلیائیت در گیاه سیاهدانه (*Nigella sativa* L.)

فرزانه خداوند[۱] | علی اشرف امیری‌نژاد[۲]✉ | مختار قبادی[۳]

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: far.khodavand@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: a.amirinejad@razi.ac.ir

۳. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: ghobadi.m@razi.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۱۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۵/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۲۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۷/۱

واژه‌های کلیدی:
پرولین،
تنش محیطی،
مواد اصلاح‌کننده،
ویژگی‌های رشدی.

چکیده

استفاده از مواد اصلاح‌کننده می‌تواند موجب کاهش اثرات تنش‌های محیطی در گیاهان شود. هدف از این مطالعه بررسی اثر اسید سالیسیلیک و زئولیت در کاهش تنش قلیائیت درگیاه دارویی سیاهدانه (Nigella sativa L.) بود. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۱ در گلخانه دانشگاه رازی، کرمانشاه انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل قلیائیت (در سه سطح ۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی مولار از نمک بی‌کربنات سدیم)، اسید سالیسیلیک (در سه سطح ۰، ۰/۵ و ۱ میلی مولار) و زئولیت (در سه سطح ۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی) بودند. نتایج نشان داد، که اثرهای اسید سالیسیلیک و زئولیت بر بیشتر ویژگی‌های رشدی گیاه تحت تنش قلیائیت معنی‌دار بود ($P \leq 0.01$). بیشترین مقدار پرولین (۱۲/۶۵ میکرومول بر گرم) و قندهای محلول (۰/۲ میلی‌گرم بر گرم) در شرایط تنش شدید قلیائیت و بدون کاربرد اسید سالیسیلیک و زئولیت به‌دست آمد. همچنین، بیشترین ارتفاع گیاه (۲۴/۶ سانتی‌متر)، طول ریشه (۱۹/۵ سانتی‌متر)، جرم خشک شاخساره (۰/۷۸ گرم) و سطح برگ (۲۲/۴۷ سانتی مترمربع) در شرایط بدون قلیائیت و کاربرد ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک و ۰/۵ درصد زئولیت به‌دست آمد. به‌طورکلی، کاربرد اسید سالیسیلیک به عنوان یک هورمون گیاهی و زئولیت به عنوان یک ماده اصلاحی در خاک، یک راهکار مناسب و ارزان در راستای کاهش اثرات تنش قلیائیت در گیاه سیاهدانه است.

استناد: خداوند؛ فرزانه، امیری نژاد؛ علی اشرف، قبادی؛ مختار. (۱۴۰۲) کاربرد اسید سالیسیلیک و زئولیت برای کاهش تنش قلیائیت در گیاه سیاهدانه (Nigella sativa L.)، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۷)، ۱۰۴۱-۱۰۲۷. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361970.669531

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361970.669531

مقدمه

حدود ۳۰ درصد اراضی تحت آبیاری در ایران تحت تأثیر شوری و قلیائیت قرار دارند. ایجاد قلیائیت در خاک این مناطق در اثر تجمع نمک‌هایی مثل کربنات سدیم (Na_2CO_3) و بیکربنات سدیم ($NaHCO_3$) صورت می‌گیرد (Ghanbari *et al.*, 2016). در شرایط بروز تنش قلیائیت در گیاهان، علاوه بر اثر اختصاصی نمک‌های سدیمی، تأثیر pH خاک نیز وجود دارد. pH بالای محیط ریشه سبب تغییر در شکل قابل جذب و حلالیت عناصر غذایی شده که می‌تواند منجر به اختلال در فعالیت فتوسنتزی شود. به عبارتی، تنش قلیائیت ناشی از افزایش غلظت یون بیکربنات، منجر به تخریب کلروپلاست و کاهش مقدار کلروفیل می‌شود. همچنین، در این شرایط، کاهش رشد رویشی گیاهان با تجمع پرولین همراه است (Fang *et al.*, 2021).

روش‌های مختلفی برای کاهش اثرات تنش قلیائیت در گیاهان پیشنهاد شده است که معمولاً هزینه‌بر بوده و یا دارای خطرات زیست محیطی هستند. بنابراین، امروزه کاربرد اسید سالیسیلیک به صورت محلول‌پاشی برگی و زئولیت به صورت مخلوط کردن با خاک، به عنوان راهکارهای مفید و دوست‌دار زیست‌بوم، در جهت کاهش اثرات تنش‌های محیطی بر گیاهان شناخته شده است.

از طرف دیگر، بالابودن هزینه تولید و نیز اثرات جانبی حاصل از مصرف داروهای شیمیایی، منجر به افزایش سطح کشت گیاهان دارویی در مناطق مختلف کشور شده است. به عبارت دیگر، با توجه به اهمیت دارویی و اقتصادی سیاهدانه، احتمال کاشت آن در بعضی خاک‌های شور و قلیا وجود دارد. در این راستا، این پژوهش با هدف بررسی اثرات اسید سالیسیلیک و زئولیت در کاهش تنش قلیائیت در گیاه دارویی سیاهدانه صورت گرفت.

پیشینهٔ پژوهش

اسید سالیسیلیک یک ترکیب فنلی است، که در شرایط حساس و تنش‌زا توسط گیاهان تولید می‌شود و به عبارتی، یک راهبرد دفاعی گیاهان برای مقابله با اثرات منفی حاصل از تنش است، که با افزایش خاصیت آنتی‌اکسیدانی، تنش اکسیداتیو در گیاهان را کاهش می‌دهد (Alam *et al.*, 2022). همچنین، اسید سالیسیلیک با تأثیر بر ویژگی‌های بیوشیمایی گیاه مثل مقدار پرولین، رنگیزه‌های فتوسنتزی و قندهای محلول، منجر به افزایش مقاومت گیاه در شرایط تنش می‌شود (Ogunsiji *et al.*, 2023). به هر حال، نحوه اثرگذاری این ماده بسته به نوع گیاه، مرحله رشد و مقدار مصرف متفاوت است.

همچنین، زئولیت به عنوان یک ماده اصلاح کننده معدنی شناخته شده است که کاربرد آن در خاک می‌تواند باعث افزایش عملکرد محصولات زراعی در شرایط تنش شود. زئولیت‌ها آلومینیوسیلیکات‌های بلورین با ساختار متخلخل هستند. این شبکه غربالی، قدرت انتخاب-گری بالا در جذب کاتیون‌ها و توانایی جذب آب تا۶۰ درصد وزنی را می‌دهد. به عبارتی، استفاده از زئولیت در خاک می‌تواند به علت افزایش دسترسی آب خاک و نیز داشتن عناصر معدنی مثل کلسیم، اثرات اسمزی و اختصاصی ناشی از نمک‌های سدیمی را کاهش دهد (Safikhan and Chaichi, 2021). همچنین، گزارش شده است که کاربرد زئولیت در خاک می‌تواند منجر به افزایش ویژگی‌های رشدی گیاهان مانند ارتفاع گیاه، وزن خشک شاخساره و ریشه و مقدار کلروفیل شود (Méndez Argüello *et al*, 2018).

بررسی واکنش‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه سیاهدانه به اسید سالیسیلیک تحت تنش نمک کلرید سدیم نشان داد، در حالی‌که با افزایش غلظت نمک، شاخص‌های رشد از قبیل ارتفاع گیاه، تعداد برگ و کلروفیل b کاهش پیدا کرد، اما مقدار پرولین برگ و کاتالاز افزایش یافت. همچنین، نتایج نشان داد با اعمال تیمار اسید سالیسیلیک، میزان کاهش شاخص‌های رشد و رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه تحت تنش تعدیل پیدا کرد. به‌عبارتی، اسید سالیسیلیک به عنوان یک تنظیم‌کننده رشد درونی گیاهان، نقش تعدیل‌کننده را ایفا کرد (Talei & Abolfazl, 2019).

همچنین، نتایج بررسی اثر تنش کلرید سدیم و اسید سالیسیلیک بر برخی پارامترهای رشدی گیاه سیاهدانه نشان داد که نمک کلرید سدیم اگرچه باعث کاهش معنی‌دار کلروفیلa، کلروفیلb، کلروفیل کل، کارتنوئید و افزایش معنی‌دار پرولین در گیاه گردید اما تیمار اسید سالیسیلیک در این شرایط توانست اثرات تنش را کاهش و موجب افزایش پارامترهای رشدی سیاهدانه شود (Zarei *et al.*, 2019).

سیاهدانه (*Nigella sativa* L.)، از تیره آلاله و خانواده رانونکولاسه (Ranunclaceae)، یک گیاه دارویی یک‌ساله و گل‌دار است که به طور معمول در خاورمیانه و اروپای شرقی رشد می‌کند. در غرب کشور به صورت خودرو رشد کرده، اما در بیشتر مناطق به صورت زراعی

کشت می‌شود. دانه‌های این گیاه حدود ۳۵ درصد روغن و ۲۰ درصد پروتئین و ۵-۱/۵ درصد اسانس دارند. خواص دارویی سیاهدانه شامل اثرات ضد التهابی، تقویت کننده سیستم ایمنی بدن، کاهش قند و چربی خون، بهبود فشار خون بالا، دفع صفرا و اسید اوریک و اثرات ضد انگلی است (Beheshti *et al.*, 2016).

مواد و روش‌ها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۲ در گلخانه دانشگاه رازی، کرمانشاه انجام شد. نمونه‌برداری خاک از لایه سطحی (۰-۳۰ سانتی متری) اراضی دشت بیستون با مشخصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴۴ دقیقه شمالی و عرض ۳۴ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی صورت گرفت. نمونه خاک بعد از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لازم مورد استفاده قرار گرفت. pH خاک در نسبت ۱:۱ آب به خاک به وسیله pH سنج و هدایت الکتریکی در عصاره آب به خاک با نسبت ۱:۱ به وسیله هدایت‌سنج الکتریکی، بافت خاک به روش هیدرومتر، کربنات کلسیم معادل خاک به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک، کربن آلی خاک به روش اصلاح شده واکلی و بلک و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات آمونیوم اندازه‌گیری شدند (Klute, 1986). جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

pH	EC (dS/m)	CEC ($cmol_c/kg$)	شن (٪)	رس (٪)	سیلت (٪)	بافت خاک	کربن آلی (٪)	کربنات کلسیم معادل (٪)
۷/۳	۰/۳۱	۳۱/۶	۱۸/۵	۳۶/۵	۴۵	SiCL	۱/۹۸	۱۲

تیمارهای آزمایشی شامل تنش قلیائیت در سه سطح (۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار با استفاده از نمک بی‌کربنات سدیم)، اسید سالیسیلیک در سه سطح (۰، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) و زئولیت در سه سطح (۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد جرمی) بودند. انتخاب سطوح تیمارها بر اساس نتایج تحقیقات قبلی در خصوص گیاه سیاهدانه صورت گرفت(Ghanbari *et al.*, 2016; Selahvarzi *et al.*, 2020; Talei & Abolfazl, 2019). برای اعمال تیمار زئولیت، ابتدا زئولیت طبیعی را توسط آسیاب به حالت پودری درآورده و از الک ۲۳۰ مش عبور داده شد. سپس، بر اساس سطوح تیمارهای آزمایشی، به مقدار لازم با نمونه خاک هر گلدان (به میزان ۸ کیلوگرم) مخلوط گردید. عملیات پرکردن خاک گلدان‌ها، با توجه به جرم ویژه ظاهری خاک منطقه نمونه‌برداری صورت گیرد. هر گلدان دارای ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و قطر دهانه ۲۳ سانتی‌متر بود.

جهت ایجاد زهکش، در کف هر گلدان، حدود دو سانتی‌متر ماسه درشت ریخته و سپس هشت کیلوگرم نمونه خاک اضافه شد. با توجه به توصیه رایج، یک گرم کود سوپر فسفات تریپل به خاک هر گلدان اضافه نموده و با آن مخلوط گردید. تعداد ۱۵ بذر به فواصل یکسان در خاک گلدان کاشته شد. عملیات آبیاری در هفته اول به صورت روزانه صورت گرفت. از هفته دوم به بعد تا پایان دوره رویشی، آبیاری گلدان‌ها در حد ظرفیت گلدانی انجام شد. جهت تعیین درصد رطوبت ظرفیت گلدانی، یک گلدان را با آب اشباع کرده و بعد اجازه داده شد تا ثابت شدن وزن گلدان (حداکثر ۷۲ ساعت) زهکشی انجام شود. برای جلوگیری از تبخیر، سطح گلدان توسط نایلون پوشیده شد. با خروج آب ثقلی، یک نمونه خاک از داخل گلدان برداشته و رطوبت آن تعیین شد. برای دوری از تنش رطوبتی، گلدان‌ها هر روز توزین و با فواصل کوتاه (بسته به دوره رشد گیاه)، تا رسیدن به ۷۰ درصد رطوبت ظرفیت گلدانی با آب مقطر آبیاری شدند. پس از استقرار گیاهچه در خاک، شش بوته در هر گلدان باقی گذاشته و بقیه تنک شدند. کود اوره در دو مرحله (بعد از تنک‌کردن گیاهچه‌ها و در رشد طولی ساقه) به مقدار نیم گرم در هر مرحله به هر گلدان اضافه شد. میانگین دمای روزانه و شبانه گلخانه در طول دوره آزمایش به ترتیب ۲۰ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد بود. پس از استقرار کامل گیاهان، تنش قلیائیت و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک انجام گردید.

جهت ایجاد تنش قلیائیت، بر اساس سطوح تیمارهای آزمایشی، مقادیر لازم از نمک بی‌کربنات سدیم در آب مقطر حل و همراه با آب آبیاری با فاصله هر پنج روز یک‌بار استفاده گردید. پس از هر سه مرحله اعمال تنش قلیائیت، یک مرحله آبیاری گلدان‌ها با آب معمولی صورت گرفت، تا از تجمع نمک جلوگیری شود.

برای اعمال تیمار اسید سالیسیلیک نیز بر اساس سطوح غلظت، مقادیر لازم از این ماده در آب مقطر حل گردید و در ساعات غروب آفتاب (جهت جلوگیری از تبخیر محلول) به صورت محلول‌پاشی برگی تا خیس شدن کامل سطح برگ انجام شد. این عملیات به فاصله هر ده روز یک بار تکرار شد. تیمار شاهد نیز با آب مقطر اسپری برگی شد. اعمال تیمارهای اسید سالیسیلیک و قلیائیت تا شروع گل‌دهی

ادامه یافت.

در پایان رشد رشد رویشی و در ابتدای گل‌دهی گیاه، بعضی پارامترهای رشدی از قبیل ارتفاع گیاه (از سطح خاک تا انتهای ساقه به وسیله خط کش)، طول ریشه (با خط کش)، قطر ساقه (توسط کولیس دیجیتالی)، تعداد برگ، سطح برگ (با Leaf Area Meter)، جرم خشک اندام هوایی و ریشه (خشک شده در آون با دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت)، حجم ریشه (از طریق تعیین حجم آب جابجا شده در یک استوانه مدرج)، سطح ریشه (با استفاده از رابطه اتکینسون)، محتوای نسبی آب برگ[1](با توجه به تغییرات جرم برگ‌های تازه، تورژسانس یافته و خشک شده در آون)، مقدار پرولین با روش بیتس و همکاران (Bates *et al.* 1973)، قندهای محلول با روش فنل–اسید سولفوریک (Kochert, 1978)، کاروتنوئید و کلروفیل a و b با روش استاندارد مربوطه (Lichtenthaler and Wellburn, 1983) تعیین و به صورت میانگین هر بوته محاسبه شدند. آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTATC و مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

اثرات تنش قلیائیت، اسید سالسیلیک و زئولیت بر ویژگی‌های فیتوشیمیایی سیاهدانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد، که اثرهای متقابل تنش قلیائیت، اسید سالیسیلیک و زئولیت بر مقدار پرولین، قندهای محلول، کلروفیل b و کاروتنوئید سیاهدانه در سطح یک درصد و بر مقدار کلروفیل a در سطح پنج درصد معنی‌دار شدند (جدول ۲).

جدول ۲: تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرات اسید سالیسیلیک و زئولیت بر ویژگی‌های فیتوشیمیایی سیاهدانه تحت تنش قلیائیت

منابع تغییرات	درجه آزادی	پرولین	قندهای محلول	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئید
قلیائیت (A)	۲	۱۸۹/۱**	۰/۰۵۵**	۵۳۴/۶**	۱۰/۶**	۰/۸۷**
زئولیت (Z)	۲	۲۸/۷**	۰/۰۱۳**	۳۹/۴**	۱۲/۴**	۱/۰۹**
A × Z	۴	۱/۲**	۰/۰۱۱**	۲/۵**	۰/۳۳**	۰/۰۰۳*
اسید سالیسیلیک (Sa)	۲	۴۲**	۰/۰۱۷**	۱۱/۷**	۱۲/۸۴**	۱/۰۳۲**
Sa×A	۴	۰/۳**	۰/۰۱**	۲/۹**	۰/۷۹۲**	۰/۱۰۳**
Z×Sa	۴	۲/۷**	۰/۰۱۴**	۱/۴۱*	۰/۴۰۹**	۰/۰۷۱**
A×Z×Sa	۸	۰/۸۱**	۰/۰۱۹**	۱/۳۶*	۰/۲۶**	۰/۰۱**
خطا	۵۴	۰/۰۴	۰/۰۰۱	۰/۵۲۷	۰/۰۱۶	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات (٪)		۴/۰۳	۱/۶	۷/۷۲	۵/۲۵	۱/۵۶

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌داربودن در سطح پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.

پرولین

مقایسه میانگین اثرات اسید سالیسیلیک و زئولیت بر میزان پرولین سیاهدانه تحت تنش قلیائیت نشان می‌دهد، که بیشترین مقدار پرولین (۱۲/۶۵ میکرومول برگرم) در شرایط تنش شدید قلیائیت (۱۰۰ میلی‌مولار بیکربنات سدیم) و بدون کاربرد اسید سالیسیلیک و زئولیت و کمترین مقدار (۱/۳۳ میکرومول برگرم) در تیمار ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، ۰/۵ درصد زئولیت و بدون قلیائیت به‌دست آمد (جدول ۳). به عبارت دیگر، با تشدید قلیائیت، مقدار پرولین بیشتر شد، اما در مقابل، با افزایش سطوح کاربردی اسید سالیسیلیک و زئولیت، میزان پرولین کاهش یافت.

در زمان بروز هر گونه تنش محیطی، از جمله ایجاد تنش قلیائیت در محیط ریشه، میزان پرولین در بافت‌های گیاهی و بویژه در برگ‌ها افزایش می‌یابد. به عبارتی، جهت مقابله با تنش، سلول‌ها موادی با وزن مولکولی کم مثل اسید آمینه پرولین را تولید و در سیتوپلاسم سلولی ذخیره می‌کنند. افزایش پرولین در گیاهان تحت تنش، به منظور حفظ تعادل اسمزی و عدم اختلال در واکنش‌های بیوشیمیایی سلول است (Fang *et al.*, 2021).

بطورکلی، تجمع پرولین، به عنوان یک پاسخ فیزیولوژیک گیاه در شرایط تنش قلیائیت، از دو جنبه قابل بررسی است: اول اینکه در

1 Relative water content (RWC)

این شرایط، یون‌های Na^+ که در سیتوزول جمع شده و ایجاد سمیت می‌کنند، بایستی به واکوئل منتقل شود. بنابراین، پرولین به عنوان یک ترکیب آلی با جرم مولکولی کم، جهت حفظ تعادل پتانسیل آبی در سیتوپلاسم تجمع می‌یابد. دوم اینکه، پرولین در تعدیل پتانسیل اسمزی بسیار مؤثر است و نقش اسمولیتی به عنوان مخزن کربن و نیتروژن دارد (Gurrieri *et al.*, 2020). به عبارتی، افزایش پرولین در شرایط قلیائیت، به علت نقش این اسیدآمینه در تنظیم و کاهش پتانسیل اسمزی است و شدت سنتز آن به سرعت و توسعه تنش، نوع، سن و مرحله رشد گیاه بستگی دارد.

جدول ۳- اثرات اسید سالیسیلیک و زئولیت بر ویژگی‌های فیتوشیمیایی سیاهدانه تحت تنش قلیائیت

سطوح قلیائیت (mM)	سطوح زئولیت (٪)	سطوح اسید سالیسیلیک (mM)	پرولین (µmol/g)	قندهای محلول (mg/g)	کلروفیل a (mg/g)	کلروفیل b (mg/g)	کارتنوئید (mg/g)
۰	۰	۰	۴/۲۹۳^{k}	۰/۰۹^{fgh}	۱۱/۹۷^{g}	۱/۶۴^{n}	۰/۹۴^{q}
		۰/۵	۳/۳۲۳^{m}	۰/۰۸^{ghi}	۱۲/۵۱^{f}	۱/۹۲^{l}	۰/۹۸^{o}
		۱	۳/۱۳۷^{mn}	۰/۰۵^{kl}	۱۴/۷۷^{c}	۲/۷۲^{f}	۱/۱۸^{i}
	۰/۲۵	۰	۳/۱۵۷^{mn}	۰/۰۷^{hij}	۱۲/۹۹^{e}	۲/۰۴^{jk}	۱/۰۷^{l}
		۰/۵	۳/۰۱۳^{n}	۰/۰۵^{jkl}	۱۳/۳۶^{e}	۳/۴۸^{e}	۱/۱۲۳^{j}
		۱	۲/۸۰۷^{o}	۰/۰۳^{lm}	۱۴/۰۸^{d}	۴/۴۲^{b}	۱/۱۹^{h}
۰	۰/۵	۰	۲/۳۲۷^{p}	۰/۰۶^{ijk}	۱۴/۶۸^{c}	۲/۴۱^{h}	۱/۳۵۳^{e}
		۰/۵	۱/۸۰۷^{q}	۰/۰۴^{kl}	۱۵/۲۱^{b}	۴/۲۲^{c}	۱/۴۶۱^{b}
		۱	۱/۳۳^{r}	۰/۰۱^{m}	۱۸/۰۹^{a}	۴/۷۲^{a}	۱/۴۶۳^{a}
	۰	۰	۷/۵۵^{e}	۰/۱۴۷^{bc}	۸/۰۷^{k}	۱/۳۵^{p}	۰/۵۵^{y}
		۰/۵	۵/۳۶^{i}	۰/۱۲^{de}	۸/۱۲^{k}	۱/۵۴^{o}	۰/۷۷^{u}
		۱	۴/۲۲^{k}	۰/۰۹^{fgh}	۸/۱۹^{k}	۲/۰۶^{jk}	۱/۰۶^{n}
	۰/۲۵	۰	۵/۷^{h}	۰/۱۱۷^{de}	۸/۴۲^{jk}	۱/۶۵^{n}	۰/۶۷۳^{w}
		۰/۵	۴/۶۹^{j}	۰/۱^{efg}	۸/۴۴^{jk}	۲/۴^{h}	۱/۰۶۳^{m}
		۱	۳/۶۰۳^{l}	۰/۰۸^{ghi}	۸/۴۵^{jk}	۳/۴۱^{e}	۱/۰۸^{k}
۵۰	۰/۵	۰	۴/۲۲^{k}	۰/۱^{efg}	۸/۶۹^{j}	۲/۲۳^{i}	۰/۸۲۷^{t}
		۰/۵	۴/۲۲^{k}	۰/۰۸^{ghi}	۹/۳۹^{i}	۲/۷۲^{f}	۱/۳۶۳^{d}
		۱	۳/۵۳^{l}	۰/۰۵^{jkl}	۱۰/۰۵^{h}	۳/۸۸^{d}	۱/۳۷۷^{c}
	۰	۰	۱۲/۶۵^{a}	۰/۲^{a}	۳/۵۸^{p}	۰/۸۳^{q}	۰/۴۶۷^{z}
		۰/۵	۹/۵۱^{c}	۰/۱۷^{b}	۳/۹۱^{p}	۱/۳^{p}	۰/۵۶۷^{y}
		۱	۶/۵۲^{g}	۰/۱۴^{cd}	۴/۷۳^{o}	۱/۸۱^{m}	۰/۹۳۳^{s}
	۰/۲۵	۰	۱۰/۳۷^{b}	۰/۱۷^{b}	۵/۰۴^{no}	۱/۳۴^{p}	۰/۵۳^{z}
		۰/۵	۷/۵۱^{e}	۰/۱۴^{cd}	۵/۱^{no}	۱/۹۶^{kl}	۰/۹۴۳^{r}
		۱	۵/۲۱۷^{i}	۰/۱۱^{ef}	۵/۳۶^{n}	۲/۶^{g}	۰/۹۶۳^{p}
۱۰۰	۰/۵	۰	۸/۱۰۷^{d}	۰/۱۵^{bc}	۶/۰۶^{m}	۲/۱^{jk}	۰/۶۷۳^{v}
		۰/۵	۶/۸۳۱^{f}	۰/۱۲^{de}	۷/۲۵^{l}	۲/۲۴^{i}	۱/۲۵۳^{f}
		۱	۵/۶۰۳^{h}	۰/۰۹^{fgh}	۷/۳۹^{l}	۲/۷۲^{p}	۱/۸۰۷^{g}

همچنین، اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک تنظیم کننده هورمونی، سبب کاهش میزان پرولین در شرایط تنش قلیائیت شد. کاربرد اسید سالیسیلیک در غلظت مناسب، با فعال کردن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، گونه‌های فعال حاصل از تنش اکسیداتیو را کاهش و با بهبود وضعیت حاصل از تنش، منجر به کاهش تجمع پرولین می‌شود (Ogunsiji *et al.*, 2023). همینطور گزارش شده است که کاربرد اسید سالیسیلیک، با افزایش فعالیت آنزیم‌ها منجر به بیوسنتز و تجمع ترکیبات فنلی در جهت کاهش اثرات منفی تنش در گیاهان می‌شود (Alam *et al.*, 2022).

بر اساس نتایج، زئولیت نیز سبب کاهش میزان پرولین در شرایط تنش قلیائیت شد. در شرایط قلیائیت، غلظت زیاد یون سدیم ناشی از نمک بیکربنات سدیم سبب بهم خوردن تعادل اسمزی و به دنبال آن کاهش جذب آب به وسیله ریشه و افزایش تولید پرولین می‌شود

(Selahvarzi *et al*., 2020). به نظر می‌رسد زئولیت از طریق جذب سدیم، تنظیم تعادل اسمزی، افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک و یا تسهیل جذب آب به وسیله ریشه موجب کاهش تولید پرولین در گیاهان می‌شود.

قندهای محلول

اثرات اسید سالیسیلیک و زئولیت بر میزان قند محلول سیاهدانه تحت شرایط قلیائیت نشان داد، که بیشترین مقدار قند محلول (۰/۲ میلی‌گرم بر گرم) در شرایط تنش شدید قلیائیت و بدون کاربرد اسید سالیسیلیک و زئولیت و کمترین مقدار (۰/۰۱ میلی‌گرم بر گرم) در تیمار ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، ۰/۵ درصد زئولیت و بدون کاربرد بیکربنات سدیم به‌دست آمد (جدول ۳).

به هنگام ایجاد هر گونه تنش محیطی، سیستوپلاسم سلول‌های گیاهی موادی با جرم مولکولی کم تولید می‌کند. به عبارت دیگر، یکی از پاسخ‌های گیاهان نسبت به تنش شوری و قلیائیت، افزایش میزان قندهای محلول است، که در اثر سنتز قندهای ساده یا تجزیه نشاسته به وسیله آنزیم آمیلاز صورت می‌گیرد. قندهای محلول به عنوان اسمولیت سبب افزایش شیب جریان آب به سلول شده و از طریق تنظیم محتوی آب، منجر به حفظ تورژسانس سلول می‌گردند (Gurrieri *et al*., 2020). به عبارتی، سنتز قند محلول در شرایط تنش می‌تواند با تنظیم فشار اسمزی، موجب افزایش جذب آب سلول گردد.

از طرف دیگر، سطوح کاربردی اسید سالیسیلیک منجر به کاهش مقدار قندهای محلول در بخش‌های هوایی گیاه سیاهدانه تحت تنش قلیائیت شد. به عبارتی، اسید سالیسیلیک به عنوان یک آنتی‌اکسیدان غیرآنزیمی موجب افزایش مقاومت گیاهان نسبت به تنش محیطی می‌شود. در چنین شرایطی، با حفظ پتانسیل اسمزی درون گیاه، تجزیه مولکول‌های پلیمری قند به مولکول‌های کوچکتر و به عنوان مثال تبدیل نشاسته به ساکارز کاهش می‌یابد (Ogunsiji *et al*., 2023).

کاربرد زئولیت نیز بر میزان قندهای محلول سیاهدانه تحت تنش قلیائیت اثر منفی داشته و آن را کاهش داد. مکانیسم اثر زئولیت در کاهش قند محلول به‌خوبی مشخص نیست، اما به نظر می‌رسد، با افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، راندمان دسترسی گیاه به آب را افزایش و بطور غیرمستقیم از طریق تنظیم اسمزی، مانع از هیدرولیز نشاسته و تجمع قندهای محلول در اندام‌های هوایی گیاهان می‌شود.

کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید

نتایج نشان می‌دهد، که بیشترین مقدار کلروفیل a (۱۸/۰۹ میلی‌گرم در گرم)، کلروفیل b (۴/۷۲ میلی‌گرم در گرم) و کاروتنوئید (۱/۴۶ میلی‌گرم در گرم) در تیمار ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، ۰/۵ درصد زئولیت و بدون قلیائیت و کمترین مقادیر (به ترتیب ۳/۰۵، ۰/۸۳ و ۰/۴۶ میلی‌گرم در گرم) در تنش شدید قلیائیت و بدون کاربرد اسید سالیسیلیک و زئولیت به‌دست آمد (جدول ۳).

کلروفیل a یک مولکول آلی و رنگدانه اصلی عمل فتوسنتز است، که نقش آن تبدیل نور به انرژی شیمیایی است. کلروفیل b نیز یک رنگدانه فعال است، که به عنوان گیرنده نوری عمل می‌کند. کاروتنوئیدها نیز از جمله ترکیبات آنتی اکسیدانی غیرآنزیمی هستند که در کاهش غلظت سوپراکسیدها نقش دارند (Pérez-Gálvez *et al*., 2020).

تنش‌های محیطی می‌توانند با اختلال در تولید این رنگیزه‌ها بر ظرفیت فتوسنتزی گیاهان مؤثر باشند. به عبارت دیگر، تنش قلیائیت به عنوان یک تنش محیطی مهم، منجر به تنش اکسیداتیو و افزایش تولید انواع اکسیژن واکنش‌گر می‌شود. بنابراین، کاهش غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش قلیائیت، نشان دهنده وسعت آسیب‌های اکسیداتیو است (Ghanbari *et al*., 2016). اگرچه، علت اصلی کاهش غلظت این رنگیزه‌ها، تخریب آن‌ها با فعال شدن آنزیم‌ها کلروفیلاز است، اما اختلال در جذب بعضی عناصر غذایی ضروری (مانند آهن)، با افزایش pH محلول خاک ناشی از نمک بیکربنات سدیم و یا کاهش جذب آب به وسیله ریشه با تغییر پتانسیل اسمزی محیط خاک نیز از جمله عواملی هستند، که سبب از بین رفتن کلروپلاست و کاهش فعالیت فتوسنتزی در گیاهان می‌شوند (Fatima *et al*, 2021). همینطور، کاهش مقدار پیش‌سازهای بیوسنتز کلروفیل مثل گلوتامات و ۵-آمینولوولینیک اسید و یا افزایش تولید رادیکال‌های اکسیژن در سلول نیز سبب پراکسیداسیون و تجزیه کلروفیل می‌شوند (Ghanbari *et al*., 2016). علت کاهش کاروتنوئیدها در شرایط تنش قلیائیت نیز تخریب بتاکاروتن و تشکیل زاگزانتین ویا تخریب غشاء و صدمه به زنجیره انتقال الکترون در فتوسیستم‌ها است. به‌عبارت دیگر، تجمع یون‌های سدیمی موجب بی‌ثباتی اتصال پروتئین به رنگیزه‌ها می‌شود (Fatima *et al*., 2021).

از طرف دیگر، اسید سالیسیلیک بر ساختار کلروپلاست و فعالیت آنزیم روبیسکو و به دنبال آن افزایش کلروفیل مؤثر است. به عبارت دیگر، از طریق تأثیر بر فرایندهای فیزیولوژیک و متابولیسم سلول‌های گیاهی، سبب افزایش غلظت کلروفیل a و b می‌شود (Ogunsiji *et*

al., 2023). زئولیت نیز بر میزان کلروفیل اثر مثبت داشت. زئولیت می‌تواند از طریق افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک، ضمن تسهیل جذب آب، موجب افزایش دسترسی عناصر غذایی مؤثر بر ساخت کلروفیل مثل نیتروژن، منیزیم و یا آهن شود (Méndez Argüello *et al.*, 2018).

اثرات تنش قلیائیت، زئولیت و اسید سالسیلیک بر ویژگی‌های مورفولوژیک بخش هوایی سیاهدانه

نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) ویژگی‌های مورفولوژیک سیاهدانه نشان می‌دهد، که اثرات متقابل تنش قلیائیت، اسید سالیسیلیک و زئولیت بر جرم خشک شاخساره، ارتفاع گیاه، سطح و تعداد برگ، قطر ساقه و محتوای نسبی آب برگ در سطح یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۴).

جدول ٤- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرات اسید سالیسیلیک و زئولیت بر ویژگی‌های مورفولوژیک سیاهدانه تحت تنش قلیائیت

منابع تغییرات	درجه آزادی	سطح برگ	قطر ساقه	جرم شاخساره	تعداد برگ	RWC	ارتفاع
قلیائیت (A)	۲	۶۹/۵**	۱/۹۹**	۰/۱۹**	۲۰۵**	۵۳۹**	۱۰۱**
زئولیت (Z)	۲	۴۰۵**	۶/۱۹**	۰/۸۷**	۲۶۳**	۵۶۱**	۹۷/۸**
A × Z	۴	۰/۰۲ns	۰/۲۱**	۰/۰۱۴**	۳/۵**	۱۸/۶**	۰/۸۱**
اسید سالیسیلیک (Sa)	۲	۱۴۳/۲**	۰/۵۴**	۰/۰۱۷**	۶۶/۶**	۱۰۶۷*	۱۶۹**
Sa×A	۴	۰/۵**	۰/۲۸**	۰/۰۰۱ns	۰/۴۸ns	۱۸/۸**	۰/۱۶**
Z×Sa	۴	۴/۸**	۰/۲**	۰/۰۰۱ns	۰/۴۵ns	۶۹**	۲/۲۷**
A×Z×Sa	۸	۰/۴۲**	۰/۲۰۶**	۰/۰۱۲**	۲/۲۴**	۹/۴**	۰/۳۱**
خطا	۵۴	۰/۱۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۷۶	۱/۷۴	۰/۰۵
ضریب تغییرات (٪)		۲/۳۷	۳/۰۵	۵/۹۹	۵/۰۶	۲/۱۱	۱/۱۴

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌داربودن در سطح پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.

جرم خشک شاخساره

بیشترین جرم خشک شاخساره (۰/۷۸ گرم بر بوته) در تیمار ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، ۰/۵ درصد زئولیت و بدون قلیائیت و کمترین آن (۰/۰۹ گرم) در شرایط قلیائیت شدید (۱۰۰ میلی‌مولار بیکربنات سدیم) و بدون کاربرد اسید سالیسیلیک و زئولیت به‌دست آمد (جدول ۵). گیاهان به غلظت بالای بیکربنات خاک با کاهش رشد اندام‌های هوایی پاسخ می‌دهند. به عبارت دیگر، یون بیکربنات بر فرایندهای متابولیکی گیاهان مانند نرخ تنفس و شدت فتوسنتز و یا قابلیت دسترسی و جذب بعضی از عناصر غذایی تأثیر منفی گذاشته و لذا با کاهش رشد عمومی گیاه، موجب کاهش جرم خشک شاخساره می‌شود (Stoleru *et al.*, 2019).

در مقابل، محلول‌پاشی گیاه با اسید سالیسیلیک سبب افزایش جرم خشک اندام هوایی سیاهدانه گردید. از دلایل این موضوع، نقش اسید سالیسیلیک بر جذب بیشتر مواد معدنی توسط ریشه و یا افزایش فعالیت آنزیم کربنیک آن‌هیدراز و به دنبال آن افزایش فتوسنتز اعلام شده است (Ogunsiji *et al.*, 2023). از طرف دیگر، اسید سالیسیلیک بر فعالیت آنتی اکسیدانی در غشا سلولی و نیز افزایش مقادیر لیگنین در ساختار دیواره سلولی مؤثر بوده، که این خود موجب حفظ نفوذپذیری غشاء و اصلاح متابولیسم سلولی و به دنبال آن افزایش رشد عمومی گیاه می‌شود (Ogunsiji *et al.*, 2023).

کاربرد زئولیت در خاک نیز موجب افزایش جرم خشک سیاهدانه گردید. به عبارت دیگر، زئولیت به علت ساختار متخلخل، قادر به جذب مولکول‌های آب و باز پس دادن آن‌ها به صورت واکنش‌های برگشت‌پذیر است. بنابراین، استفاده از زئولیت باعث حفظ رطوبت منطقه ریزوسفر و افزایش دسترسی ریشه به آب و عناصر غذایی و به تناسب آن، افزایش رشد گیاه و جرم شاخساره می‌شود (Selahvarzi *et al.*, 2020).

ارتفاع گیاه

بیشترین ارتفاع گیاه سیاهدانه (۲۴/۶ سانتی‌متر)، در شرایط بدون تنش قلیائیت و کاربرد ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک و ۰/۵ درصد زئولیت و کمترین آن (۱۲/۳ سانتی‌متر) در تنش شدید قلیائیت و بدون کاربرد اسید سالیسیلیک و زئولیت به‌دست آمد (جدول ۵). در شرایط تنش قلیائیت ناشی از نمک بیکربنات سدیم، اثر اختصاصی یون سدیم و نیز pH بالای ناشی از یون بیکربنات در محیط ریشه، به عنوان عوامل

محدودکننده رشد گیاه مطرح بوده که از طریق بهم‌خوردن تعادل یونی، سبب آسیب‌های تغذیه‌ای و اختلالات متابولیکی در گیاهان می‌شوند (Fang *et al.*, 2021). در این شرایط، کاهش قابلیت دسترسی و جذب آهن بر میزان کلروفیل و سرعت فتوسنتز و به دنبال آن رشد عمومی و طولی گیاه تأثیر منفی می‌گذارد. بررسی آنالیز خاک گلدان‌ها، قبل و بعد از اعمال تیمار بی‌کربنات سدیم نیز نشان می‌دهد که pHخاک به طور معنی‌داری افزایش و از مقدار ۷/۳ اولیه به ۷/۹ و ۸/۴ به ترتیب در تیمارهای ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار رسیده است.

جدول ۵- اثرات اسید سالیسیلیک و زئولیت بر ویژگی‌های مورفولوژیک سیاهدانه تحت تنش قلیائیت

سطوح قلیائیت (mM)	سطوح زئولیت (٪)	سطوح اسید سالیسیلیک (mM)	سطح برگ (cm^2)	قطر ساقه (mm)	جرم خشک شاخساره (g)	تعداد برگ	RWC (%)	ارتفاع گیاه (cm)
		۰	۱۰/۸۳^{l}	۱/۳^{k}	۰/۲۹^{no}	۱۶/۲۵$^{i-l}$	۵۵/۳^{m}	۱۶/۲^{j}
		۰/۵	۱۳/۱۴^{j}	۱/۴۸^{j}	۰/۳۱^{mno}	۱۷/۴۱$^{j-i}$	۶۴/۵۶$^{f-i}$	۱۹/۵^{f}
	۰	۱	۱۵/۵۶^{h}	۱/۶۳^{hi}	۰/۳۳^{lmn}	۲۰/۰۸^{def}	۶۹/۱۹^{cd}	۲۱/۵^{d}
		۰	۱۵/۳۱^{h}	۲/۰۸^{cd}	۰/۴۴^{ghi}	۱۷/۶۶^{ghi}	۶۳/۴۳$^{g-k}$	۱۸/۰۸^{gh}
		۰/۵	۱۷/۴۷^{f}	۱/۸۹^{e}	۰/۴۶^{fgh}	۱۹/۶^{ef}	۶۵/۷۵$^{e-h}$	۲۱^{d}
	۰/۲۵	۱	۱۸/۹^{de}	۲/۰۷^{cd}	۰/۴۷^{efg}	۲۱/۱۶^{cde}	۶۷/۳۷^{def}	۲۴/۰۹^{b}
۰		۰	۱۸/۶۸^{de}	۲/۳۴^{b}	۰/۶۶^{b}	۲۱/۵۸^{bcd}	۶۶/۷۱$^{d-g}$	۲۰/۵۲^{e}
		۰/۵	۲۱/۳۷^{b}	۲/۱۲^{cd}	۰/۶۹^{ab}	۲۳/۰۸^{b}	۷۱/۴۳^{bc}	۲۲/۵C
	۰/۵	۱	۲۲/۴۷^{a}	۳/۶۹^{a}	۰/۷۴^{a}	۲۴/۵۸^{a}	۷۸/۲a	۲۴/۶^{a}
		۰	۷/۵^{m}	۱/۱۵^{lm}	۰/۱۹^{qr}	۱۳/۰۸^{o}	۴۸/۷۱^{n}	۱۴/۴^{l}
	۰	۰/۵	۱۱/۱۴^{l}	۱/۲۶^{kl}	۰/۲۳^{pq}	۱۳/۹۱^{mno}	۶۱/۶۱$^{i-l}$	۱۷/۷۲^{hi}
		۱	۱۴/۴۶^{i}	۱/۳۵^{k}	۰/۲۷^{op}	۱۵^{klm}	۶۸/۲۴^{de}	۲۰/۳۴^{e}
		۰	۱۳/۴۳^{j}	۱/۷۴^{fgh}	۰/۳۷^{jkl}	۱۴/۷۵^{lmn}	۵۵/۴۴^{m}	۱۶/۴۷^{g}
	۰/۲۵	۰/۵	۱۵/۵۸^{h}	۱/۸^{efg}	۰/۴^{ijk}	۱۷/۱۶^{hij}	۶۳/۰۵$^{h-k}$	۱۹/۵۴^{f}
		۱	۱۶/۵۵^{g}	۱/۸۱^{efg}	۰/۴۱^{hij}	۱۸/۹۱^{fg}	۶۵/۶۱^{ef}	۲۱/۶۱^{d}
۵۰		۰	۱۶/۱۳^{gh}	۲/۰۲^{d}	۰/۵۲^{cde}	۱۹/۶۶^{ef}	۶۲/۹۱$^{h-k}$	۱۹/۵۸^{f}
		۰/۵	۱۹/۵۱^{d}	۲/۰۴^{cd}	۰/۵۴^{cd}	۱۹/۸۳^{ef}	۶۷/۰۷^{def}	۲۱/۵۳^{d}
	۰/۵	۱	۲۰/۵۶^{c}	۲/۱۴^{c}	۰/۵۷^{c}	۲۲/۴۱^{bc}	۷۲/۶^{b}	۲۲/۶۹^{b}
		۰	۶/۴۰۳^{n}	۱/۰۴^{m}	۰/۰۹^{s}	۹/۱۶^{q}	۳۹/۰۶^{o}	۱۲/۳۴^{m}
	۰	۰/۵	۱۰/۳۲^{l}	۱/۰۶^{m}	۰/۱۱^{s}	۱۰/۸۳^{p}	۵۵/۴۷^{m}	۱۵/۴۳^{kl}
		۱	۱۳/۰۴^{j}	۱/۱^{m}	۰/۱۷^{r}	۱۳/۱۶^{o}	۶۰/۳۷^{kl}	۱۸/۲۳^{g}
		۰	۱۲/۱۲^{k}	۱/۵۹^{ij}	۰/۳۴^{lmn}	۱۳/۴۱^{no}	۵۰/۶۹^{n}	۱۴/۳۶^{j}
	۰/۲۵	۰/۵	۱۴/۳۱^{i}	۱/۷۱^{gh}	۰/۳۵$^{k-n}$	۱۴/۹۱$^{k-n}$	۶۰/۷۵^{jkl}	۱۶/۴^{j}
		۱	۱۵/۸۴^{gh}	۱/۷۱^{gh}	۰/۳۶$^{j-m}$	۱۶^{jkl}	۶۳/۹۷^{fg}	۱۹/۶^{f}
۱۰۰		۰	۱۵/۳۴^{h}	۱/۹^{f}	۰/۴۸^{efg}	۱۶/۴۱^{ijk}	۵۹/۲۳^{i}	۱۷/۳^{i}
		۰/۵	۱۸/۵۷^{e}	۱/۸۳^{ef}	۰/۵^{def}	۱۸/۵^{fgh}	۶۴/۶۱$^{f-i}$	۱۹/۴^{f}
	۰/۵	۱	۱۹/۴۳^{d}	۱/۸۶^{e}	۰/۵۱^{def}	۱۸/۹۱^{fg}	۶۷/۴^{def}	۲۰/۸^{e}

همچنین، در شرایط مواجه شدن گیاه با تنش نمک‌های سدیمی، افزایش نسبت سدیم به پتاسیم ممکن است، علاوه بر اثرات منفی بر فرایند باز و بسته شدن روزنه‌ها، فعالیت آنزیم‌های مؤثر بر نقل و انتقالات مواد در سیستم آوند آبکشی را نیز غیرفعال سازد (Fatima *et al.*, 2021). مشابه افزایشpH خاک، بررسی آنالیز خاک گلدان‌ها نشان داد که نسبت جذبی سدیم نیز بعد از اعمال تیمار بی‌کربنات سدیم روند افزایشی داشته و از مقدار ۲/۷ اولیه به ۸/۴ و ۱۱/۳ به ترتیب در تیمارهای ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار رسید. توضیح اینکه، هدایت الکتریکی (EC) خاک نیز از مقدار ۳۱/. در نمونه شاهد به ۲/۰۱ دسی‌زیمنس بر متر (dS/m) در تیمار ۱۰۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم افزایش یافت. به هر حال، نمک بی‌کربنات سدیم به طرق مختلف موجب کاهش رشد عمومی و ارتفاع گیاهان می‌شود.

از طرف دیگر، کاربرد همزمان اسید سالیسیلیک و زئولیت توانست صدمات ناشی از تنش قلیائیت در گیاه سیاهدانه را کاهش دهد. گزارش شده است که اسید سالیسیلیک از طریق افزایش تقسیم سلولی مریستم‌های انتهایی و نیز اثر بر تولید بعضی هورمون‌های گیاهی

مانند اکسین می‌تواند باعث رشد طولی گیاهان گردد (Alam *et al.*, 2022). همچنین، زئولیت با افزایش قابلیت جذب آب و عناصر غذایی در شرایط تنش موجب افزایش رشد و ارتفاع گیاه می‌شود (Safikhan and Chaichi, 2021).

سطح برگ

طبق نتایج، بیشترین سطح برگ (۲۲/۵ سانتی‌مترمربع)، در شرایط بدون قلیائیت و کاربرد سطوح ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک و ۰/۵ درصد زئولیت و کمترین آن (۶/۴ سانتی‌مترمربع) در تیمار تنش شدید قلیائیت، بدون کاربرد اسید سالیسیلیک و زئولیت بوده است (جدول ۵). کاهش سطح برگ تحت شرایط قلیائیت ممکن است، در اثر کاهش سرعت تقسیم سلولی با افزایش فشار اسمزی محیط خاک و در ادامه کاهش جذب آب توسط ریشه باشد (Fang *et al.*, 2021). دلیل دیگر کاهش سطح برگ، آسیب اختصاصی یون‌های سدیم با ایجاد عدم تعادل یونی در محیط ریزوسفر و در ادامه آن، کاهش جذب بعضی یون‌های غذایی باشد، که توسط قنبری و همکاران (۱۳۹۵) در بررسی اثر تنش قلیائیت ناشی از نمک بیکربنات سدیم در فلفل گزارش شده است.

از طرف دیگر، اسید سالیسیلیک باعث افزایش سطح برگ در شرایط تنش قلیائیت گردید. این امر می‌تواند به دلیل نقش این ماده در افزایش جذب عناصر غذایی، تحت تنش نمک‌های سدیمی باشد (Ogunsiji *et al.*, 2023). همچنین، زئولیت نیز منجر به افزایش سطح برگ گردید. زئولیت به علت ساختار متخلخل خود نقش مهمی در ذخیره رطوبت و افزایش جذب عناصر غذایی در شرایط قلیائیت خاک دارد. به‌عبارتی، با در اختیار گذاشتن آب و عناصر غذایی لازم سبب افزایش فتوسنتز و به دنبال آن افزایش سطح برگ می‌شود (Selahvarzi *et al.* 2020).

تعداد برگ

بیشترین تعداد برگ (۲۵ برگ در بوته) در شرایط بدون قلیائیت و کاربرد ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک و ۰/۵ درصد زئولیت و و کمترین آن (۸ برگ) مربوط به شرایط قلیائیت شدید و بدون کاربرد اسید سالیسیلیک و زئولیت بود. در شرایط تنش قلیائیت، گیاه برای مقابله با تنش، بخشی از یون‌ها را در واکوئول سیتوپلاسمی برگ‌ها ذخیره می‌کند، که منجر به حذف یا ریزش برگ‌های مسن می‌شود (Stoleru *et al.*, 2019). از طرف دیگر، کاربرد اسید سالیسیلیک و زئولیت سبب افزایش تعداد برگ سیاهدانه شد. این ترکیبات می‌توانند زمینه جذب بیشتر آب برای حفظ تورم سلولی و به تناسب آن تقسیم سلولی و افزایش تعداد برگ را فراهم سازند.

محتوای نسبی آب برگ

حداکثر محتوای نسبی آب برگ (RWC) (۷۸/۲ درصد)، در تیمار ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، ۰/۵ درصد زئولیت و شاهد قلیائیت و کمترین آن (۳۹ درصد) در شرایط تنش شدید قلیائیت (۱۰۰ میلی‌مولار بیکربنات سدیم) و بدون کاربرد اسید سالیسیلیک و زئولیت حاصل شد. کاهش آب برگ گیاه در شرایط تنش قلیائیت می‌تواند به علت تضعیف سیستم ریشه و یا کاهش رشد و نفوذپذیری آن و به دنبال آن کاهش جذب آب باشد (Fatima *et al.*, 2021). در مقابل، تیمار اسید سالیسیلیک سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش قلیائیت گردید. این اسید به عنوان یک فیتوهورمون در برخی از فرایندهای موفولوژیکی نقش داشته و می‌تواند سبب افزایش ذخیره آبی گیاه شود (Alam *et al.*, 2022). همچنین، زئولیت به علت نقش آن در ذخیره سازی آب در خاک، موجب افزایش آب برگ گردید.

اثرات تنش قلیائیت، زئولیت و اسید سالیسیلیک بر ویژگی‌های ریشه گیاه سیاهدانه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات)، اثرات تنش قلیائیت، زئولیت و اسید سالیسیلیک بر خصوصیات ریشه گیاه سیاهدانه شامل طول، حجم و جرم خشک ریشه در سطح یک درصد و بر سطح ریشه در سطح پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۶).

حجم، طول و سطح ریشه

مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد، که بیشترین طول (۱۹/۶ سانتی‌متر)، حجم (۴/۹ سانتی‌مترمکعب) و سطح ریشه (۳۷/۸ سانتی‌مترمربع) در تیمار ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک و ۰/۵ درصد زئولیت و بدون کاربرد بیکربنات سدیم و کمترین آنها (به ترتیب ۷/۶۶ سانتی‌متر، ۰/۸۸ سانتی‌مترمکعب و ۶/۵۹ سانتی‌متر مربع)، در تیمار سطح ۱۰۰ میلی‌مولار بیکربنات سدیم و بدون کاربرد اسید سالیسیلیک و زئولیت به‌دست آمد (جدول ۷).

جدول ٦- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرات زئولیت و اسید سالیسیلیک بر ویژگی‌های ریشه سیاهدانه تحت تنش قلیائیت

منابع تغییرات	درجه آزادی	طول ریشه	حجم ریشه	سطح ریشه	جرم خشک ریشه
قلیائیت (A)	۲	۱۲۴**	۲۷/۲۵**	۱۲۳۴**	۰/۰۱۸**
زئولیت (Z)	۲	۹۴/۸**	۲۳/۸۶**	۸۳۰**	۰/۰۲۷**
A × Z	۴	۱/۸۲**	۰/۹۲**	۲۵/۲**	۰/۰۱۰**
اسید سالیسیلیک (Sa)	۲	۹۲/۵**	۱۲/۷۴**	۱۷۴**	۰/۰۵۷**
Sa×A	۴	۳/۴۶**	۰/۱۴**	۱۰/۶۱*	۰/۰۱۶**
Z×Sa	۴	۳/۲۸**	۰/۴۱**	۱۱/۷۱*	۰/۰۲۰**
A×Z×Sa	۸	۲/۸۵**	۰/۱۵**	۱۶/۵۳*	۰/۰۱۵**
خطا	۵۴	۰/۶۸	۰/۰۰۹	۳/۸۸	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات (٪)		۱/۶۹	۳/۵۱	۹/۹	۲/۷۱

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌داربودن و معنی‌داربودن در سطح پنج و یک درصد رانشان می‌دهد.

ریشه اولین اندامی است، که به دلیل جذب مستقیم مواد غیرضروری با تنش مواجه می‌شود. به عبارت دیگر، یکی از بارزترین اثرات غلظت بالای سدیم ناشی از تنش قلیائیت، کاهش ویژگی‌های رشدی ریشه از جمله طول، حجم و سطح ریشه می‌باشد. طول و حجم ریشه به عنوان شاخص توانایی گیاه در نفوذ و توسعه بیشتر ریشه در خاک برای جذب آب و مواد غذایی از لایه‌های خاک محسوب می‌شود. از اثرات تنش قلیائیت، عدم تعادل یونی در منطقه ریشه است و به‌عبارتی، از جذب بعضی یون‌ها و عناصر غذایی ضروری رشد توسط ریشه جلوگیری می‌کند. بنابراین، کاهش طول و حجم ریشه گیاهان در شرایط تنش قلیائیت ممکن است به دلیل بهم خوردن تعادل یونی باشد. به عنوان مثال، کاهش جذب پتاسیم توسط ریشه در رقابت با سدیم در شرایط قلیائیت گزارش شده است (Fatima *et al.*, 2021).

اثر تنش قلیائیت مشابه تنش شوری است، اما علاوه بر اثرات اسمتیک تنش شوری، اثر pH بالا نیز وجود دارد. بنابراین، از دیگر دلایل کاهش ویژگی‌های رشدی ریشه در این شرایط، pH بالای محیط ریشه می‌باشد. این pH بالا، سبب غیرقابل جذب شدن یا رسوب بعضی عناصر غذایی شده، که می‌تواند منجر به تخریب ساختار ریشه گردد (Ghanbari *et al.*, 2016).

از طرف دیگر، محلول‌پاشی گیاه سیاهدانه با اسید سالیسیلیک سبب افزایش ویژگی‌های رشدی ریشه گردید. عقیده بر این است، که اسید سالیسیلیک با افزایش سرعت فتوسنتز گیاه و به دنبال آن جذب بیشتر مواد معدنی، می‌تواند موجب افزایش ویژگی‌های رشدی گیاهان تحت تنش شود (Alam *et al.*, 2022). همچنین، کاربرد زئولیت در محیط ریشه گیاه، منجر به افزایش رشد طولی و حجم ریشه گیاه در خاک گردید. زئولیت دارای قابلیت جذب و نگهداری آب و کاتیون‌های غذایی است و به‌عبارتی می‌تواند سبب فراهم‌آوری آب و عناصر مفید جهت رشد ریشه شود (Selahvarzi *et al.*, 2020). همینطور، زئولیت ممکن است، به علت خاصیت جذب یونی، موجب جذب کاتیون‌های سدیم اضافی محلول خاک شده و لذا با کاهش تخریب خاکدانه‌ها، شرایط فیزیکی خاک برای رشد و توسعه ریشه را اصلاح نماید.

جرم خشک ریشه

بیشترین جرم خشک ریشه (۰/۳۳ گرم) در تیمار ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، ۰/۵ درصد زئولیت و شاهد قلیائیت و کمترین آن (۰/۰۹ گرم) در تیمار قلیائیت شدید و شاهد اسید سالیسیلیک و زئولیت بود (جدول ۷). کاهش جرم ریشه در شرایط تنش قلیائیت می‌تواند مربوط به کاهش قابلیت جذب عناصر غذایی، به دلیل افزایش pH ناشی از یون بی‌کربنات باشد (Fatima *et al.*, 2021)، اما اسید سالیسیلیک از طریق بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی به عنوان تعدیل‌کننده اثرات تنش عمل می‌کند. به‌عنوان مثال، علت افزایش جرم خشک گیاه در اثر استفاده از اسید سالیسیلیک، به علت اثر القایی این اسید در افزایش میزان فتوسنتز، نقش آنتی اکسیدانی در فعالیت‌های متابولیکی گیاهان و القای ژن‌های کدکننده مقاومت در برابر تنش است، که در مجموع منجر به بهبود رشد عمومی گیاه در شرایط تنش می‌شود (Alam *et al.*, 2022). کاربرد زئولیت در خاک نیز به‌عنوان یک سوپرجاذب و مخزن ذخیره آب عمل کرده تا ضمن حفظ رطوبت خاک، از طریق پخش مجدد آب در ناحیه ریشه، موجب افزایش قابلیت دسترسی ریشه به آب و عناصر غذایی شود.

جدول ۷- اثرات اسید سالیسیلیک و زئولیت بر ویژگی‌های ریشه سیاهدانه تحت تنش قلیائیت

سطوح قلیائیت (mM)	سطوح زئولیت (٪)	سطوح اسید سالیسیلیک (mM)	طول ریشه (cm)	حجم ریشه (cm^3)	سطح ریشه (cm^2)	جرم خشک ریشه (g)
۰	۰	۰	۱۳/۳^{h}	۲/۲۵^{hi}	۱۹/۳۶^{gh}	۰/۱۸۳^{fg}
		۰/۵	۱۵/۳۷^{f}	۲/۶۶^{fg}	۲۰/۶۲^{fg}	۰/۲۱۶$^{c-g}$
		۱	۱۸/۳۱^{c}	۲/۸۸^{ef}	۲۱/۰۴^{efg}	۰/۲۸۶^{abc}
	۰/۲۵	۰	۱۶/۲۸^{c}	۲/۸۵^{f}	۲۶/۳۳^{c}	۰/۲۱۳$^{c-g}$
		۰/۵	۱۸/۳۶^{c}	۳/۴۳^{d}	۲۴/۶^{cde}	۰/۲۴۳$^{b-g}$
		۱	۱۹/۰۳^{ab}	۳/۸۳^{c}	۲۲./۲۹$^{d-g}$	۰/۲۷$^{a-e}$
	۰/۵	۰	۱۷/۳۹^{d}	۴/۳۳^{b}	۳۰/۵۷^{b}	۰/۲۴۶$^{b-g}$
		۰/۵	۱۸/۴۱^{c}	۴/۸۳^{a}	۳۱/۴۱^{b}	۰/۲۶۳$^{a-f}$
		۱	۱۹/۵۵^{a}	۴/۹۱^{a}	۳۵/۵۱^{a}	۰/۳۳^{a}
۵۰	۰	۰	۱۰/۷۴^{k}	۱/۲۵$^{e-i}$	۱۳$^{i-l}$	۰/۱۴۷^{ijk}
		۰/۵	۱۳/۴۷^{h}	۱/۸^{kl}	۱۴/۶^{ij}	۰/۲$^{e-j}$
		۱	۱۶/۶۶^{e}	۲/۱۹^{ij}	۱۶/۳۲^{hi}	۰/۲۶۶$^{a-e}$
	۰/۲۵	۰	۱۴/۶۲^{g}	۱/۵۵^{lm}	۱۵/۱۶^{ij}	۰/۱۶$^{h-k}$
		۰/۵	۱۶/۴۸^{e}	۲/۲۷^{hi}	۱۹/۳۴^{gh}	۰/۲۲۶$^{b-i}$
		۱	۱۷/۳۶^{d}	۲/۵۳^{gh}	۲۴$^{c-f}$	۰/۲۵$^{b-f}$
	۰/۵	۰	۱۶/۴۵^{e}	۳/۱۶^{de}	۲۳/۹۱$^{c-f}$	۰/۲۲۳$^{b-i}$
		۰/۵	۱۷/۵^{d}	۳/۴۵^{d}	۲۵/۴۶^{cd}	۰/۲۵$^{b-f}$
		۱	۱۸/۶^{bc}	۳/۸۱^{c}	۳۰/۱۴^{b}	۰/۳۰۳^{ab}
۱۰۰	۰	۰	۷/۶۶^{l}	۰/۸۸^{n}	۶/۵۹^{n}	۰/۰۹^{k}
		۰/۵	۱۱/۳۸^{j}	۱/۴۲^{m}	۱۰/۸۸^{klm}	۰/۱۶۶$^{h-k}$
		۱	۱۳/۴^{h}	۱/۹۲^{jk}	۱۲/۸$^{i-l}$	۰/۲۳۶$^{b-h}$
	۰/۲۵	۰	۱۱/۴۵^{j}	۰/۵۶^{o}	۹/۴۹^{lmn}	۰/۱۴^{jk}
		۰/۵	۱۲/۵۸^{i}	۰/۶۸^{no}	۸/۸^{mn}	۰/۲۰۳$^{d-j}$
		۱	۱۵/۶۱^{f}	۱/۸۵^{kl}	۱۲/۰۲$^{j-m}$	۰/۲۲$^{c-j}$
	۰/۵	۰	۱۳/۶۸^{h}	۰/۴۳^{o}	۱۴/۲^{ijk}	۰/۲۰۶$^{c-j}$
		۰/۵	۱۵/۶۳^{f}	۰/۵^{o}	۱۹/۴۴^{jh}	۰/۲۴$^{b-h}$
		۱	۱۶/۳۵^{e}	۲/۴۶^{ghi}	۲۲/۸۱$^{c-g}$	۰/۲۸۳$^{a-b}$

نتیجه‌گیری

نتایج بیانگر اثرات منفی تنش قلیائیت بر کلیه صفات رویشی گیاه سیاهدانه و افزایش مقادیر پرولین و قندهای محلول بخش‌های هوایی است. در مقابل، محلول‌پاشی گیاه با اسید سالیسیلیک همراه با افزودن زئولیت به خاک توانست ویژگی‌های رشدی از قبیل ارتفاع گیاه، سطح برگ، جرم خشک شاخساره و ریشه، طول و حجم ریشه و نیز مقادیر کلروفیل a و b و کاروتنوئید بخش هوایی را افزایش دهد. بنابراین می‌توان گفت، که استفاده هم‌زمان از مواد اصلاح‌کننده اسید سالیسیلیک و زئولیت می‌تواند یک راهکار مناسب، ارزان و اقتصادی در راستای کاهش اثرات تنش قلیائیت در گیاه سیاهدانه باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندرد"

منابع

زارعی بتول، فاضلی آرش، و طهماسبی زهرا. (۱۳۹۸). تأثیر اسید سالیسیلیک در کاهش اثرات تنش شوری بر صفات رشدی گیاه سیاه دانه (*Nigella sativa* L.). *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۸ (۲۹)، ۲۸۷-۲۹۸.

قنبری فردین. امیری نژاد، علی اشرف. سیاری، محمد. و کردی، سجاد. (۱۳۹۵). اثر اسید سالیسیلیک بر مقاومت به تنش‌های شوری و قلیائیت گیاه فلفل شیرین (*Capsicum annuum* L). *مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست شناسی ایران)*، ۲۹(۱): ۱۳۰-۱۴۰.

طالعی داریوش، و ریحانی ابوالفضل. (۱۳۹۸). واکنش‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) به اسید سالیسیلیک تحت تنش

شوری. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*. ۱۲(۳). ۹۴۹-۹۶۰.

REFERENCES

Alam, P., Balawi, T.A. and Faizan, M. (2022). Salicylic acid's impact on growth, photosynthesis, and antioxidant enzyme activity of *Triticum aestivum* when exposed to salt. *Molecules*, 28(1), 100. https://doi.org/10.3390/molecules28010100.

Bates, L.S., Waldren, R.P. and Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 29, 205-207.

Beheshti, F., Khazaei, M. and Hosseini, M. (2016). Neuropharmacological effects of *Nigella sativa*. *Avicenna Journal of phytomedicine*, 6(1), 104-116. https://doi.org/10.22038/AJP.2016.6231

Fang, S., Hou, X. and Liang, X. (2021) .Response mechanisms of plants under saline-alkali stress. *Frontiers in Plant Science*, 12, 1-20. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.667458

Fatima, A., Hussain, S., Hussain, S., Ali, B., Ashraf, U., Zulfiqar, U., Aslam, Z., Al-Robai, S.A., Alzahrani, F.O., Hano, C. and El-Esawi, M. (2021). Differential morphophysiological, biochemical, and molecular responses of maize hybrids to salinity and alkalinity stresses. *Agronomy*, 11(6),1150. https://doi.org/10.3390/agronomy11061150

Ghanbari, F., Amirinejad, A.A., Sayyari, M. and Kordi, S. (2016). Effect of salicylic acid on salinity and alkalinity resistance in sweet pepper plant. *Journal of Plant Research*, 29(1), 130-141. (In Persian).

Gurrieri, L., Merico, M., Trost, P., Forlani, G. and Sparla, F. (2020). Impact of drought on soluble sugars and free proline content in selected arabidopsis mutants. *Biology*, 9(11), 367. https://doi.org/10.3390/biology9110367

Klute, A. (1986). *Methods of soil analysis*: *Part 1 and 2, Physical and chemical methods*, Second Edition, Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc.

Kochert, G. (1978). Carbohydrate determination by the phenol sulfuric acid method. In: Hellebust JA, Craigie JS, (Ed) Handbook of Phycological Methods, Physiological and Biochemical Methods. Cambridge University Press, Cambridge, pp.95-97.

Lichtenthaler, H.K. and Wellburn, A.R. (1983). Determination of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extract in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11, 591–592.

Méndez Argüello, B., Vera Reyes, I., Cárdenas Flores, A., De Los Santos, Villarreal, G., Ibarra Jiménez, L. and Saldivar, R. (2018). Water holding capacity of substrates containing zeolite and its effect on growth, biomass production and chlorophyll content of *Solanum lycopersicuml*. *Nova Scientia*, 10(21), 45–60. https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1413

Ogunsiji, E., Umebese, C., Stabentheiner, E., Iwuala, E., Odjegba, V. and Oluwajobi, A. (2023). Salicylic acid enhances growth, photosynthetic performance and antioxidant defense activity under salt stress in two mungbean (*Vigna radiata* L.) variety. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2217605. https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2217605.

Pérez-Gálvez, A., Viera, I. and Roca, M. (2020). Carotenoids and chlorophylls as antioxidants. *Antioxidants*, 9(6), 505. https://doi.org/10.3390/antiox9060505.

Safikhan, S. and Chaichi, M.R. (2021). Evaluation of the sole and integrated application of nano-graphene oxide, zeolite, and chitosan on gas exchanges and silymarin content of milk thistle (*Silybum marianum* L.) under salinity stress. *Ausrtralian Journal of Crop Science*, 15(05), 743-756. https://doi.org/10.21475/ajcs.21.15.05.p3131

Selahvarzi, Y., Sarfaraz, S., Zabihi, M. and Kamali, M. (2020). Study on the effect of zeolite and soil texture on quantitative and qualitative characteristics of *Ligustrum vulgare* in different irrigation levels. *Journal of Horticultural Science*, 34, 451-463. https://doi.org/10.22067/JHORTS4.V34I3.83164

Stoleru, V., Slabu, C., Vitanescu, M., Peres, C., Cojocaru, A., Covasa, M. and Mihalache, G. (2019). Tolerance of three Quinoa cultivars (*Chenopodium quinoa Willd*.) to salinity and alkalinity stress during germination stage. *Agronomy*, 9(6), 287. https://doi.org/10.3390/agronomy9060287.

Talei, D. and Abolfazl, R. (2019). Morphophysiological responses of *Nigella sativa* L. to salicylic acid under

salinity stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(3), 949-960. https://sid.ir/paper/386352/en. (In Persian).

Zarei, B., Fazeli, A. and Tahmasebi, Z. (2019). Salicylic acid in reducing effect of salinity on some growth parameters of Black cumin (*Nigella sativa*). *Plant Process and Function*, 8(29), 287-298. http://jispp.iut.ac.ir/article-1-833-fa.html. (In Persian).

Application of salicylic acid and zeolite for reducing alkalinity stress in black seed (*Nigella sativa* L)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The stress effects of soil alkalization on plants include the specific effect of sodium ions and the effect of soil pH. Soil pH influences solubility, concentration in soil solution, ionic form, and mobility of micronutrients, and consequently acquisition of these elements by plants. Various methods have been proposed to reduce the effects of alkalinity stress in plants, which are usually expensive or have environmental risks. In this regard, the simultaneous use of salicylic acid, as a phenolic compound, and zeolite, as a mineral modifier, are known as a useful method to reduce the effects of environmental stress in plants. The aim of this study was to investigate the effect of salicylic acid and zeolite in reducing alkalinity stress in black seed *(Nigella sativa* L.).

Materials and Methods

A factorial experiment was conducted based on a completely randomized design with three replications in 2022 in the greenhouse of Razi University, Kermanshah. The factors included alkalinity stress (at three levels of 0, 50 and 100 mM as $NaHCO_3$), salicylic acid (at three levels of 0, 0.5 and 1 mM), and zeolite (at three levels of 0, 0.25 and 0.5 % by weight). Before planting, natural zeolite was crushed and ground by a planetary ball mill to a fine powder, passing through a sieve, then it was mixed with the soil samples, based on the levels of experimental treatments. To create alkalinity stress, the desired levels of sodium bicarbonate were dissolved in distilled water and they were applied as irrigation water, once every five days. After applying alkalinity treatments, the salicylic acid solutions were made using distilled water and were sprayed on the shoots of the plants. At the end of vegetative growth and at the beginning of flowering, some growth parameters were determined and calculated as the average of each plant. Data analysis was done using MSTATC software and comparison of means was done by Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at α=0.05.

Results and Discussion

The results of variance analysis showed that the effects of salicylic acid and zeolite on the phytochemical characteristics (i.e., proline, soluble sugars, chlorophyll and carotenoid), and most of the plant growth parameters were significant ($P \leq 0.01$) under alkali stress. Also, comparisons of means showed that the alkalinity stress was significantly reduced in all the vegetative traits of black seed. The highest amount of proline (12.65 µmol/g) and soluble sugars (0.2 mg/g) were obtained under severe alkalinity stress and no application of salicylic acid and zeolite. Also, foliar application of salicylic acid along with the addition of zeolite to the soil could improve growth characteristics. The highest shoot height (24.6 cm), root length (19.5 cm), shoot dry mass (0.78 g) and leaf area (22.47 cm^2) were obtained in traits conditions without alkalinity and with application of 1 mM salicylic acid and 0.5 % zeolite.

Conclusion

In general, it can be said that the simultaneous use of salicylic acid, as a plant hormone, and zeolite, as a soil amendment, is a suitable and cheap strategy to reduce the effects of alkalinity stress in black seed.

Keywords: Environmental Stress, Growth Characteristics, Modifiers, Proline.