

تأثیر محلول پاشی با پلی آمین ها بر صفات رشدی و عملکرد و اجزای عملکرد گیاه
کاملینا (*Camelina sativa* L.) در سطوح مختلف تنش شوری

اسماعیل قلی نژاد^{۱*}، شهریار کاظمی^۲ و بختیار لاله گانی^۲

^{۱*} دانشیار گروه علمی علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

^۲ استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران.

^۳ استادیار گروه علمی علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

* نویسنده مسئول: e_gholinejad@pnu.ac.ir

چکیده

این آزمایش با هدف بررسی تأثیر محلول پاشی با پلی آمین ها بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه کاملینا در سطوح مختلف تنش شوری، به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۱ در دانشگاه پیام نور مرکز ارومیه به صورت گلدانی در فضای باز اجرا شد. فاکتور اول تنش شوری با آب دریاچه ارومیه در سه سطح (۰، ۱۵ و ۳۰ دسی زیمنس بر متر) و فاکتور دوم محلول پاشی با پلی آمین ها در ۴ سطح (اسپریمین، اسپرمیدین، پوترسین و شاهد) بود. نتایج نشان داد تنش شوری ۳۰ و ۱۵ دسی زیمنس بر متر در مقایسه با شاهد به ترتیب صفات قطر ریشه (۱۶ و ۴ درصد)، وزن خشک ریشه (۳۹ و ۱۷)، حجم ریشه (۴۳ و ۳۱ درصد)، محتوای نسبی آب برگ (۶۰ و ۲۳ درصد)، غلظت کلروفیل a (۵۷ و ۱۳ درصد)، غلظت کلروفیل b (۶۱ و ۲۱ درصد)، تعداد کپسول در هر بوته (۵۲ و ۲۵ درصد)، وزن ۱۰۰ دانه (۳۰ و ۵ درصد)، عملکرد دانه (۵۲ و ۱۰ درصد) و عملکرد زیستی (۳۸ و ۱۰ درصد) را کاهش داد ولی باعث افزایش دمای برگ (۱۲ و ۶ درصد)، غلظت کاروتنوئید (۵۶ و ۴۶ درصد) و غلظت پرولین برگ (۴۴ و ۴۰ درصد) شد. محلول پاشی برگ با اسپریمین، اسپرمیدین و پوترسین در مقایسه با عدم محلول پاشی، به ترتیب تعداد کپسول در هر بوته (۲۶، ۲۳ و ۲۴ درصد)، وزن ۱۰۰ دانه (۲۸، ۱۷ و ۱۲ درصد)، عملکرد دانه (۳۸، ۸ و ۲۱ درصد) را افزایش داد و باعث کاهش اثرهای تنش شوری گردید. بنابراین به نظر می رسد گیاه کاملینا تحمل به تنش شوری تا ۱۵ دسی زیمنس بر متر را دارد. محلول پاشی برگ با پلی آمین ها می تواند رویکرد خوبی برای بهبود تنش، رشد و عملکرد گیاه کاملینا در شرایط تنش شوری باشد.

واژه های کلیدی: اسپریمین، اسپرمیدین، پوترسین، حجم ریشه، دمای برگ.

کاملینا (*Camelina sativa L.*) به دلیل کاربرد آن برای سوخت‌های زیستی، محصولات زیستی و مصارف غذایی سالم به عنوان دانه روغنی مهم شناخته شده است. این گیاه، دانه کوچکی دارد که می‌تواند برای استقرار گیاه در برخی از محیط‌ها مشکل جدی باشد، اطلاعات کافی در مورد این گیاه در پاسخ به تنش‌های محیطی غیر زنده مانند شوری وجود ندارد (Hosseini Sanehkoori *et al.*, 2022). کاملینا گیاهی یک ساله با چرخه زندگی کوتاه (۸۵-۱۰۰ روز) که گونه‌های بهاری و زمستانی آن شناخته شده است، و گونه بهاره آن سطح جهانی رایج‌تر است (Kurasiak-Popowska *et al.*, 2020). اعتقاد بر این است که کاملینا به عنوان یک علف هرز در محصولات کتان و احتمالاً غلات در اروپای جنوب شرقی و آسیای جنوب غربی منشأ گرفته است، قبل از اینکه به عنوان یک گیاه دانه روغنی کشت شود (Sydor *et al.*, 2022).

تنش شوری یکی از مخرب‌ترین تنش‌های محیطی است که به طور قابل توجهی بهره‌وری محصولات زراعی را در سراسر جهان به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک محدود می‌کند (Moghaddam *et al.*, 2023). شور شدن خاک‌ها (۱ تا ۳ درصد در سال) یک فرآیند پیوسته است و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ باعث از دست دادن ۵۰ درصد خاک‌های زراعی شود (Akbari *et al.*, 2020). شوری واکنش‌های زیادی را مانند تغییرات مولکولی، بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی در گیاهان ایجاد می‌کند که منجر به کاهش عملکرد و کیفیت محصولات می‌شود (Younessi-Hamzekhanlu *et al.*, 2021). بیش از نیمی از زمین‌های کشاورزی جهان در مناطق خشک و نیمه خشک قرار دارند و گرمایش جهانی شدت و فراوانی خشکسالی و شرایط شور را افزایش می‌دهد (Bencherif *et al.*, 2015). بنابراین، یافتن یک رویکرد جدید برای افزایش تحمل گیاه به شوری بسیار مهم است.

پوترسین، اسپرمیدین و اسپرمین فراوان‌ترین پلی‌آمین‌ها در گیاهان عالی هستند. پلی‌آمین‌ها پلی‌کاتیون‌های آلی هستند که در همه گونه‌های گیاهان وجود دارند. پوترسین، ترکیب آلی نیتروژن‌دار با وزن ملکولی کم است که در طیف وسیعی از فرایندهای رشد و نمو شامل تقسیم سلولی، تاخیر پیری، پایداری غشاء، جمع‌آوری زادیکال آزاد و تحمل به تنش‌های مختلف به‌ویژه تنش شوری و در پاسخ به تنش شوری به منزله تعدیل‌کننده اثر تنش عمل می‌کند (Kusano *et al.*, 2008). در گیاهان، پوترسین را می‌توان از طریق مسیر دو دکربوکسیلاز سنتز کرد: اورنیتین دکربوکسیلاز و آرژنین دکربوکسیلاز. از سایر پلی‌آمین‌ها می‌توان به اسپرمیدین و اسپرمین اشاره کرد که توسط اسپرمیدین و اسپرمین سنتز و با افزودن متوالی گروه‌های آمینوپروپیل به پوترسین سنتز می‌شوند. این گروه آمینوپروپیل توسط اس-آندونوسیل-ال میتیونین دکربوکسیله شده که محصولی از اس-آندونوسیل-ال میتیونین دکربوکسیلاز است، تهیه می‌شود (Guo *et al.*, 2018). در شاهی گوش موشی یا گیاه مین یاب *Arabidopsis thaliana*، عدم وجود اسپرمین (به دلیل جهش ژنتیکی) باعث حساسیت بیش از حد به کلرید سدیم می‌شود که احتمالاً به دلیل اختلال در تعادل کلسیم است. در آزمایشی حساسیت این گیاه به شوری، از طریق محلول‌پاشی با اسپرمین کاهش یافت (Russo and Reggiani, 2015). نشان داده شده است که اسپرمیدین اثرهای نامطلوب شوری را با کاهش آسیب‌های اکسیداتیو از طریق افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها مانند بیان ژن مربوطه آنها، تثبیت یکپارچگی ساختاری کلروپلاست‌ها و بهبود رشد گیاهان در شرایط غیربهینه کاهش می‌دهد (Wu *et al.*, 2018). در گیاهان، پلی‌آمین‌ها به عنوان مولکول‌های سیگنال‌دهنده سلولی و به‌عنوان ترکیبات محافظ مستقیم نقش کلیدی در بسیاری از فرایندهای رشد و

نمو، به‌ویژه در تنظیم تحمل تنش دارند (Saravi et al., 2021). محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها به عنوان محرک زیستی برای افزایش تحمل گیاه چای (*Camellia sinensis*) در برابر تنش‌های محیطی مختلف از جمله شوری استفاده می‌شوند (Xiong et al., 2018). اسپرمین یک تترا آمین است که به مقاومت گیاه در برابر تنش غیرزیستی کمک می‌کند (Talaat, 2020). اسپرمین هنگامی که به صورت محلول‌پاشی اعمال می‌شود، می‌تواند به عنوان یک فعال‌کننده قوی دفاعی گیاه عمل کند (Talaat et al., 2022a). اسپرمین با از بین بردن گونه‌های اکسیژن فعال، دفاع از ساختار و عملکرد دستگاه فتوسنتزی، حفظ ثبات کاتیونی-آنیونی، کاهش تولید اتیلن، افزایش محتوای پروتئین، اصلاح سطوح فیتوهورمون درون زا و القای تجمع املاح آلی، به صورت برون‌زا اثرهای مضر شوری بر توسعه گیاه را کاهش می‌دهد (Geng et al., 2021). پتانسیل عملکرد گیاه کاملینا در شرایط شور به طور کامل شناخته نشده است. لذا این مطالعه با هدف بررسی تاثیر محلول‌پاشی برگ‌ها با پلی‌آمین‌ها بر صفات رشدی، خصوصیات ریشه، صفات فیزیولوژیک و عملکرد و اجزای عملکرد دانه گیاه کاملینا در سطوح مختلف تنش شوری انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایش در اسفند سال ۱۴۰۰ در دانشگاه پیام نور ارومیه به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی به صورت کشت گلدانی با ۱۲ تیمار و ۳ تکرار اجرا شد. تیمار تنش شوری با آب دریاچه ارومیه شامل سه سطح (صفر، ۱۵، ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر) بود. تیمار محلول‌پاشی برگ‌ها با پلی‌آمین‌ها در ۴ سطح محلول‌پاشی با اسپرمین (۲ میلی‌مولار)، محلول‌پاشی با اسپرمیدین (۲ میلی‌مولار)، محلول‌پاشی با پوترسین (۲ میلی‌مولار) و شاهد (عدم محلول‌پاشی) بود که زمان اعمال محلول‌پاشی برگ‌ها بعد از استقرار سه گیاهچه در گلدان و رسیدن به مرحله چهار برگ‌ها هر ۳ روز یکبار (در مجموع در ۶ مرحله) بود.

در ابتدا برای آماده سازی خاک گلدان‌ها به ترتیب با نسبت‌های ۳، ۱، ۱ خاک و کود دامی و ماسه بادی را مخلوط کرده و به گلدان‌هایی که برای زهکشی مناسب از قبل ته آن‌ها سوراخ شده بود، اضافه شدند و در هوای آزاد قرار گرفتند. وزن هر گلدان بعد از پر کردن با خاک برابر با ۱۳ کیلوگرم و دارای قطر ۳۰ و ارتفاع ۲۶ سانتی‌متری بود. سپس ظرفیت زراعی هر گلدان را به دست آورده و به هر گلدان به مقدار ۱۰ گرم کود اوره و اسید هیومیک اضافه گردید. همچنین بر اساس آزمون تجزیه خاک و توصیه کودی، گوگرد و سولفات روی و کود سه بیست (حاوی نیتروژن، فسفر و پتاسیم) هم در زمان آبیاری به گلدان‌ها اضافه شد. شروع کشت بذر کاملینا رقم سهیل (دارای تیپ رشد بهاره) در تاریخ ۲۳ اسفندماه سال ۱۴۰۰ بود که در هر گلدان شش بذر کشت شد، هر کدام از بذرها در عمق ۱ سانتی‌متری از خاک گلدان‌ها قرار گرفته و در بعد از استقرار کامل بوته، سه بوته تنک و سه بوته حفظ شد. برای تعیین زمان و حجم آبیاری از رابطه زیر (Alizadeh, 2000)

$$V = \frac{(FC - \theta m) \times \rho_b \times D_{Root} \times A}{E_i} \quad \text{استفاده شد: (۱)}$$

در فرمول بالا V حجم آب آبیاری بر حسب مترمکعب، FC درصد رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت زراعی، θM یا MAD یا f درصد رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری (۵۰ درصد در نظر گرفته شد)، ρ_b وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی متر مکعب)، A مساحت آبیاری شده بر حسب مترمربع و D_{Root} عمق توسعه ریشه بر حسب متر است.

مجله فرایند و کارکرد گیاهی

بر این اساس در هر نوبت آبیاری ۲ لیتر آب به هر گلدان داده شد و دور آبیاری بر اساس میزان تبخیر و تعرق تنظیم شد که حدوداً ۵ روز بود. تیمار شوری به صورت پلکانی اعمال شد. برای این منظور در ابتدا و برای سازگار شدن، گیاهان با آب دارای شوری کمتر آبیاری شدند و سپس تیمارهای شوری اعمال شدند در پایان آزمایش میزان شوری تجمعی در خاک گلدان‌ها اندازه‌گیری شد. عملیات برداشت برای تیمار آبیاری مطلوب، تنش شوری ۱۵ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب ۲۶، ۲۲ و ۱۷ خرداد ماه سال ۱۴۰۱ انجام گرفت. نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

پتاسیم (ppm)	فسفر قابل جذب	نیترژن (%)	بافت خاک	کربن الی (%)	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	درصد مواد خشتی شونده (%)	درصد اشباع	هدایت الکتریکی (dS m ⁻¹)	pH
۸۰۷	۲۸/۳	۰/۱	لوم-رسی شنی	۰/۹۸	۲۳	۱۵	۶۲	۱۶	۲۹	۳/۶۲	۷/۲۸

صفات بررسی شده و اندازه‌گیری شده

صفات فیزیولوژیک

محتوای نسبی آب برگ: بعد از مرحله گلدهی و اعمال کامل تیمارهای تنش شوری، ۳ برگ از هر بوته (سه برگ آخر توسعه یافته هر بوته و برگ‌ها نباید دچار شکستگی و پارگی باشند) جدا کرده و قطعات برگی پس از قطع شدن در پاکت پلاستیکی بسته‌بندی و به سرعت به آزمایشگاه منتقل گردیدند. سپس تعدادی قطعات کوچک از قسمت‌های سالم برگ جدا و با ترازوی دیجیتالی با دقت بالا توزین گردیدند. پس از آن قطعات برگی به مدت ۲۴ ساعت درون ظروف حاوی آب مقطر در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال قرار داده شدند تا به حالت اشباع برسند. در پایان این مرحله قطعات برگی توسط حوله‌های کاغذی خشک و مجدداً وزن شدند. این وزن به عنوان وزن اشباع (SW) ثبت گردید. نمونه‌ها جهت محاسبه وزن خشک (DW) به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. محتوای نسبی آب برگ با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (سید شریفی و قلی نژاد، ۱۴۰۰؛ Wikenz and Norfolk, 2010):

$$RWC = \frac{Wf - Wd}{Ws - Wd} \times 100 \quad (2)$$

در رابطه بالا RWC محتوای نسبی آب برگ، WF وزن تر برگ، WD وزن خشک برگ و WS وزن اشباع برگ می‌باشد. **دمای داخلی برگ:** در مزرعه در ساعات ۱۲ تا ۱۴ با استفاده از دماسنج مادون قرمز مدل ۸۸۸۹ ساخت کارخانه AZ تایوان اندازه‌گیری شد، حدود ۵ برگ مختلف از هر بوته به طور تصادفی انتخاب کرده و با ترمومتر با زاویه ۴۵ درجه و از فاصله ۲۵ تا ۳۰ سانتی‌متری نشانه‌گیری و لیزر دستگاه را روی پهن برگ تابانده و از آنها میانگین گرفته شد (سید شریفی و قلی نژاد، ۱۴۰۰).

غلظت کاروتنوئید برگ: برای سنجش غلظت کاروتنوئید از روش (Lichtenthaler, 1987) استفاده شد. برای این کار بعد از مرحله گلدهی و اعمال کامل تیمارهای تنش شوری، ۰/۲ گرم از قسمت میانی برگ کامل هر بوته با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰٪ در هاون چینی سائیده شد و پس از ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه (rpm) در طول موج

مجله فرایند و کارکرد گیاهی

۴۷۰ نانومتر جذب آن‌ها در مقابل نمونه شاهد (استون) توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (Universal ساخت Hettich آلمان) خوانده شد و پس از تعیین درصد جذب نوری با استفاده از رابطه ۳ غلظت کاروتنوئیدها با واحد $\text{mg g}^{-1} \text{FW}$ محاسبه گردید.

(۳)

$$C(x+c) = \left[\frac{100A_{770} - 1.82Ch_a - 85.02Ch_b}{198} \right]$$

غلظت کلروفیل: جهت اندازه‌گیری غلظت کلروفیل‌های a و b در مرحله گلدهی از هر گلدان پنج برگ کامل و توسعه یافته از قسمت‌های بالای هر بوته به طور تصادفی برداشت و از قسمت میانی برگ‌ها یک گرم نمونه تازه تهیه و از دستگاه اسپکتروفتومتر استفاده شد. غلظت‌های کلروفیل طبق روابط ۴ و ۵ محاسبه گردید (سید شریفی و قلی نژاد، ۱۴۰۰).

$$\text{رابطه (۴)} \quad \text{میلی گرم کلروفیل } a \text{ در هر گرم برگ} = [12.7 (D_{663}) - 2.59 (D_{645})] \times \frac{V}{1000 \times W}$$

$$\text{رابطه (۵)} \quad \text{میلی گرم کلروفیل } b \text{ در هر گرم برگ} = [22.9 (D_{645}) - 4.69 (D_{663})] \times \frac{V}{1000 \times W}$$

غلظت پرولین برگ: بعد از مرحله گلدهی و اعمال کامل تیمارهای شوری، با استفاده از نمونه‌ی تهیه شده از برگ کامل و بالغ بالای ساقه گیاه که تا زمان انجام آزمایش در فریزر -80°C درجه سانتی‌گراد نگهداری شد، غلظت پرولین برگ اندازه‌گیری گردید. نیم گرم از قسمت میانی برگ از هر نمونه را با ترازوی دقیق وزن کرده و در 10°C میلی‌لیتر محلول ۳ درصد اسید سولفوسالسیلیک پودر کرده تا مخلوط همگنی بدست آید. مخلوط حاصل را با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۲ صاف کرده و از هر کدام به مقدار ۲ میلی‌لیتر به لوله آزمایش انتقال داده شدند. سپس به هر کدام از عصاره گیاهی ۲ میلی‌لیتر معرف ناین هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال اضافه گردید. در مرحله بعدی کلیه لوله‌های آزمایش در بن ماری و در دمای 100°C درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و بعد از یک ساعت لوله‌ها را بیرون آورده و جهت قطع واکنش در لوله‌ها در حمام آب یخ قرار داده و به هریک ۴ میلی‌لیتر تولوئن افزوده گردید. لایه سرخ رنگ تشکیل می‌شود که حاوی تولوئن و پرولین می‌باشد و جهت اندازه‌گیری پرولین استفاده می‌گردد. مقدار معینی از لایه بالایی برداشته و در دستگاه اسپکتروفتومتر قرار داده و در طول موج 520 نانومتر جذب قرائت شد. در این مرحله اسپکتروفتومتر توسط تولوئن کالیبره گردید و سپس استانداردهای پرولین در طول موج 520 نانومتر قرائت شده و غلظت پرولین با استفاده از منحنی استاندارد پرولین و به صورت میلی‌مول بر کیلوگرم وزن خشک برگ تعیین گردید (Bates et al., 1973). برای تهیه معرف ناین هیدرین، ابتدا $1/25$ گرم اسید ناین هیدرین را به 30 میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال افزوده مخلوط حاصل را گرم کرده تا ناین هیدرین به خوبی در اسید حل شود. سپس 30 میلی‌لیتر اسید فسفریک 6 مولار به آن افزوده و محلول حاصل را به مدت 24 ساعت جهت تثبیت در یخچال نگهداری می‌گردد.

صفات رشدی

مساحت برگ: بعد از مرحله گلدهی، عرض برگ از قسمت وسط هر برگ و مساحت برگ بر اساس رابطه ۶ اندازه‌گیری شد (Quarrie and Jones, 1979):

مجله فرایند و کارکرد گیاهی

$$(۶) \quad ۰/۷۵ \times \text{عرض} \times \text{طول} = \text{مساحت برگ}$$

ارتفاع بوته: در انتهای فصل رشد گیاه کاملینا برای اندازه گیری ارتفاع، با استفاده از متر از محل یقه تا انتهای ساقه اصلی، با دقت یک میلی متر اندازه گیری به عمل آمد.

تعداد برگ در بوته: بعد از برداشت کاملینا که سه بوته در هر گلدان بود تمامی برگها و گل آذین های موجود در گیاه شمارش گردید. گل آذین کاملینا در هوای آزاد و بدون دستگاه خشک کن، به طور طبیعی خشک و سپس توسط ترازوی دقیق توزین گردید.

عملکرد و اجزاء عملکرد

وزن صد دانه: به منظور اندازه گیری وزن صد دانه، بعد از برداشت گیاه کاملینا و بوجاری کردن بذور، چهار تکرار ۱۰۰ تایی بذر شمارش گردید سپس وزن آنها با ترازوی دقیق با دقت یک هزارم محاسبه و میانگین گرفته شد و وزن ۱۰۰ دانه به دست آمد.

عملکرد دانه: بذرهاي موجود در کپسول های سه بوته هر گلدان جدا و وزن گردید.

تعداد دانه در هر کپسول: تعداد ۱۰ کپسول به طور تصادفی از هر گلدان (سه بوته) انتخاب و تعداد دانه در هر کپسول شمارش و سپس از آنها میانگین گرفته شد.

تعداد کپسول در هر بوته: تعداد ۱۰ بوته به طور تصادفی از هر گلدان (سه بوته) انتخاب و تعداد کپسول در هر بوته شمارش و سپس از آنها میانگین گرفته شد.

طول کپسول: تعداد ۱۰ کپسول به طور تصادفی از هر گلدان (سه بوته) انتخاب و طول کپسول با خط کش اندازه گیری و سپس از آنها میانگین گرفته و بر حسب میلی متر گزارش شد.

عملکرد زیستی: تمامی اجزای گیاه کاملینا شامل برگ، ساقه، کپسول و دانه را خشک کرده سپس توسط ترازو اندازه گیری شدند.

شاخص برداشت: عملکرد دانه بر عملکرد زیستی تقسیم و به صورت درصد محاسبه گردید.

خصوصیات ریشه

حجم ریشه: بعد از اتمام فصل رشد و خارج کردن ریشه از گلدان، برای اندازه گیری حجم، ریشه داخل استوانه مدرج پر از آب مقطر قرار گرفت و بر اساس میزان آب جابجا شده در استوانه، حجم ریشه بر حسب سانتی متر مکعب در بوته گزارش گردید (Kesahvarznia et al., 2014).

طول ریشه اصلی: بعد از اتمام فصل رشد و خارج کردن ریشه از گلدان، ریشه ها بعد از استخراج از خاک و تمیز شدن از ابتدا تا انتهای ریشه با دقت یک میلی متر اندازه گیری به عمل آمد.

قطر ریشه: بعد از اتمام فصل رشد و خارج کردن ریشه از گلدان از قسمت وسط هر ریشه توسط کولیس با دقت یک میلی متر اندازه گیری و ثبت شد.

وزن خشک ریشه: ریشه‌ها را به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه در آون قرار داده، سپس توسط ترازوی دقیق توزین شدند.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) و MATATC انجام و مقایسه میانگین‌ها نیز توسط آزمون توکی (Tukey) در سطح پنج درصد انجام شد. برای داده‌هایی که از طریق شمارش به دست آمده بودند با استفاده از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۱۶) تبدیل جذری به عمل آمد و سپس مقایسه میانگین انجام شد.

نتایج و بحث

خصوصیات ریشه و صفات رشدی

بررسی نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای ساده تیمار تنش شوری و محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها تاثیر معنی‌داری بر قطر ریشه کاملینا داشت (جدول ۲). سطح شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، قطر ریشه را به ترتیب ۱۶ و ۴ درصد کاهش دادند (جدول ۳). بین تیمار بدون شوری و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر تفاوت معنی‌داری برای قطر ریشه مشاهده نشد که نشان می‌دهد دامنه تحمل کاملینا تا شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد، اما با افزایش سطح شوری (۳۰ دسی‌زیمنس بر متر) قطر ریشه کاهش معنی‌داری پیدا کرد. در شرایط تنش شوری، روزه‌های گیاه بسته شده و به دلیل کاهش تبادلات گازی، میزان فتوسنتز کاهش یافته و رشد ریشه نیز متوقف شده و از این طریق ظرفیت جذب و انتقال آب و عناصر غذایی از خاک به طرف اندام هوایی را کاهش می‌یابد (Boorboori, 2023). در بررسی حاضر محلول-پاشی برگ با اسپرمیدین، اسپرمیدین و پوترسین، قطر ریشه گیاه کاملینا را به ترتیب ۱۹، ۹ و ۱۲ درصد افزایش داد. در تحقیقات دیگر روی ریشه گوجه‌فرنگی با سطوح شوری (۱/۵، ۲/۵، ۴ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر) نیز گزارش شده است که با افزایش شدت تنش شوری، قطر ریشه کاهش معنی‌داری یافت که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (Abdoli et al., 2021).

جدول ۲- تجزیه واریانس اثرهای تنش شوری و محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها بر صفات رشدی و ریشه در کاملینا

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		قطر ریشه	وزن خشک ریشه	حجم ریشه	ارتفاع بوته	تعداد برگ در بوته	قطر ساقه
		مساحت برگ	طول ریشه				
تنش شوری	۲	۰/۰۰۷۱ **	۰/۱۳ **	۰/۳۱ **	۳۱۶/۰۲ **	۳/۵۴ **	۰/۰۰۰۸۳ ns
محلول‌پاشی	۳	۰/۰۰۳۰ **	۰/۰۹ **	۰/۰۶ **	۱۰/۷۴ ns	۰/۲۸ **	۰/۰۰۱۴ ns
شوری × محلول‌پاشی	۶	۰/۰۰۰۳۲ ns	۰/۰۰۹۴ ns	۰/۱۵ ns	۱۳/۱۰ ns	۰/۰۵ ns	۰/۰۰۱۹ ns
خطای آزمایشی	۲۴	۰/۰۰۰۳۸	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۹۰	۱۸/۲۵	۰/۰۶	۰/۰۰۱۷
ضریب تغییرات (%)	-	۸/۲۳	۱۶/۲۰	۱۷/۲۸	۱۰/۵۶	۸/۲۶	۲۱/۳۱

ns، ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد می‌باشد.

مجله فرایند و کارکرد گیاهی

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرهای ساده تنش شوری و محلول پاشی با پلی آمین ها بر صفات رشدی و خصوصیات ریشه در

کاملینا

تیمار	قطر ریشه (سانتی متر)	وزن خشک ریشه (گرم)	حجم ریشه (سانتی متر مکعب)	ارتفاع بوته (سانتی متر)	تعداد برگ در بوته
تنش شوری					
۰	۰/۲۵ ^a	۰/۵۴ ^a	۰/۷۲ ^b	۴۶/۱۶ ^a	۱۳/۸۹ ^a
۱۵	۰/۲۴ ^a	۰/۴۵ ^b	۰/۵۰ ^a	۳۸/۹۱ ^b	۹/۲۳ ^b
۳۰	۰/۲۱ ^b	۰/۳۳ ^c	۰/۴۱ ^b	۳۶/۲۵ ^b	۷/۰۱ ^c
محلول پاشی					
آب	۰/۲۱ ^b	۰/۳۰ ^c	۰/۴۲ ^b	-	۸/۴۷ ^b
اسپریمین	۰/۲۶ ^a	۰/۴۷ ^{ab}	۰/۶۰ ^a	-	۱۰/۲۱ ^{ab}
اسپریمیدین	۰/۲۳ ^b	۰/۴۴ ^b	۰/۵۹ ^a	-	۱۰/۹۷ ^a
پوترسین	۰/۲۴ ^{ab}	۰/۵۵ ^a	۰/۵۷ ^a	-	۱۰/۵۲ ^{ab}

میانگین هایی که در هر ستون حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد اختلاف معنی دار بر اساس آزمون توکی در سطح ۵ درصد می باشند. بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس، تاثیر اثرهای ساده تیمار تنش شوری و محلول پاشی با پلی آمین ها بر وزن خشک ریشه کاملینا معنی دار بود (جدول ۲). بیشترین وزن خشک ریشه مربوط به تیمار بدون تنش (۰/۵۴ گرم) و کمترین آن مربوط به شوری ۳۰ دسی زیمنس بر متر (۰/۳۳ گرم) بود (جدول ۳). همچنین در شرایط محلول پاشی با پلی آمین ها، بیشترین و کمترین حجم ریشه به ترتیب از محلول پاشی با پوترسین (۰/۵۵ گرم) و عدم محلول پاشی (۰/۳۰ گرم) حاصل شد (جدول ۳). در آزمایشی روی گندم سطوح مختلف تنش شوری (۰/۱، ۰/۶ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر) باعث کاهش وزن خشک ریشه و محلول پاشی برگی با پلی آمین اسپریمین باعث افزایش آن شد که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (Talaat et al., 2022b). در تحقیق دیگری روی گندم گزارش شده است که سطوح مختلف تنش شوری (۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی مولار کلرید سدیم) باعث کاهش وزن خشک ریشه شد ولی محلول پاشی با اسپریمیدین اثر شوری را تعدیل و نسبت به تیمار شاهد باعث افزایش وزن خشک ریشه گردید (Bouabdallah et al., 2022).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تاثیر تیمار تنش شوری و محلول پاشی با پلی آمین ها بر حجم ریشه کاملینا معنی دار بود (جدول ۲). بیشترین حجم ریشه مربوط به تیمار بدون تنش (۰/۷۲ سانتی متر مکعب) و کمترین آن مربوط به شوری ۳۰ دسی زیمنس بر متر (۰/۴۱ سانتی متر مکعب) به دست آمد (جدول ۳). به نظر می رسد به دلیل اینکه در شرایط تنش شوری، حجم آب قابل دسترس کاهش پیدا کرده و افزایش فشار اسمزی خاک سبب کمبود آب برای گیاه می شود، لذا حجم ریشه در مقایسه با شرایط بدون تنش کاهش یافته است (Liu et al., 2022). همچنین در شرایط محلول پاشی با پلی آمین ها، بیشترین و کمترین حجم ریشه به ترتیب از محلول پاشی با اسپریمین و عدم محلول پاشی حاصل شد (جدول ۳). بین سطوح مختلف محلول پاشی با پلی آمین ها از نظر حجم ریشه تفاوت معنی داری مشاهده نشد. در مطالعه ای روی ریشه گوجه فرنگی

با سطوح شوری (۱/۵، ۲/۵، ۴ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر) نیز گزارش شده است که با افزایش شدت تنش شوری، حجم ریشه کاهش معنی‌داری یافت که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (Abdoli et al., 2021).

در پژوهش حاضر تاثیر سطوح مختلف تیمار تنش شوری بر ارتفاع بوته کاملینا معنی‌دار بود (جدول ۲). سطوح شوری ۱۵ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، ارتفاع بوته را به ترتیب ۲۱ و ۱۶ درصد کاهش دادند (جدول ۳). محققان دیگر نیز نشان دادند که در گیاه گوجه فرنگی تنش شوری باعث کاهش ارتفاع بوته و محلول‌پاشی با اسپرمیدین در شرایط تنش شوری باعث افزایش ارتفاع گیاه شد (Raziq et al., 2022). در بررسی دیگری اعمال تنش شوری باعث کاهش ارتفاع بوته و محلول‌پاشی اسپرمیدین در شرایط تنش شوری باعث افزایش ارتفاع گیاه لوبیا شد (Al-Mushhin, 2022).

سطوح شوری ۱۵ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شاهد، تعداد برگ در بوته را به ترتیب ۴۹ و ۳۳ درصد کاهش دادند (جدول ۳). محلول‌پاشی برگ با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین، تعداد برگ در بوته را به ترتیب ۱۷، ۲۳ و ۱۹ درصد افزایش داد (جدول ۳). بین سطوح مختلف محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها از نظر تعداد برگ در بوته تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. پلی‌آمین‌ها نقش مهمی در تقسیم DNA، تقسیم سلولی و در نهایت رشد، توسعه گیاه و افزایش تعداد برگ در بوته دارند (Nandy et al., 2022). در تحقیقی روی مرکبات، تنش شوری (۰ و ۷۵ میلی‌مولار کلرید سدیم) تعداد برگ را کاهش داد و با محلول‌پاشی با اسپرمیدین و پوترسین هم در شرایط بدون تنش و هم در شرایط تنش شوری تعداد برگ در بوته افزایش معنی‌داری یافت (Khoshbakht et al., 2018) که با یافته‌های ما در این تحقیق در یک راستا می‌باشد. در تحقیق دیگری روی فلفل قرمز گزارش شده است که محلول‌پاشی با اسپرمین تعداد برگ در بوته را در گیاه فلفل افزایش داد (Ramadan et al., 2022).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرهای ساده و برهمکنش تیمار تنش شوری و محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها تاثیر معنی‌داری بر مساحت برگ کاملینا داشت (جدول ۲). در سطوح تیماری بدون تنش و محلول‌پاشی با اسپرمین، بیشترین مساحت برگ (۱۱/۵۴ سانتی‌مترمربع) و در تنش شوری ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر و بدون محلول‌پاشی کمترین مساحت برگ (۲/۱۳ سانتی-مترمربع) به دست آمد. با افزایش سطح تنش شوری از مساحت برگ کاسته شد، به طوری که سطوح شوری ۱۵ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، مساحت برگ را به ترتیب ۵۳ و ۴۴ درصد کاهش دادند (جدول ۸).

در بررسی حاضر، در سطوح شوری با محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها، مساحت برگ افزایش یافت و باعث تعدیل اثر تنش شوری گردید. بررسی دیگری نیز نشان داد که محلول‌پاشی با اسپرمیدین در مرحله ۴-۶ برگی و قبل از شکوفه‌دهی باعث افزایش مساحت برگ در گیاه همیشه بهار شد (Sadeghzadeh et al., 2023). الگوی کلی پاسخ گیاه به تنش شوری کاهش سرعت توسعه مساحت برگ و به دنبال آن توقف توسعه با تشدید تنش است (Parida and Das, 2005). کاهش توسعه سلولی به دلیل تنش شوری ممکن است ناشی از کاهش انبساط پذیری دیواره سلولی باشد (Munns et al., 2000). در شرایط شور، رشد گیاه معمولاً با کاهش سرعت افزایش طول برگ، بزرگ شدن و تقسیم سلول‌های این برگ‌ها کاهش می‌یابد (Ouda et al., 2006). از طرفی، گیاه در شرایط تنش شوری سعی می‌کند با کاهش مساحت برگ، خود را سازگار کرده و

انرژی برای ادامه حیات خود ذخیره کند (Jaleel et al., 2008). امیری و همکاران (Amiri et al., 2023) بیان کردند که محلول پاشی با اسپرمین تحت تنش شوری می‌تواند اثرات نامطلوب شوری را با بهبود رشد در گیاه سنبله کاهش دهد. طبق جدول تجزیه واریانس، اثرهای ساده و برهمکنش تیمار تنش شوری و محلول پاشی با پلی آمین‌ها تاثیر معنی‌داری بر طول ریشه کاملینا داشتند (جدول ۲). در سطوح تیماری بدون تنش و محلول پاشی با اسپرمین، بیشترین طول ریشه (۱۱/۱۶ سانتی‌متر) و در تنش شوری ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر و محلول پاشی با پوترسین کمترین طول ریشه (۶/۲۷ سانتی‌متر) به دست آمد. با افزایش سطح تنش شوری از طول ریشه کاسته شد، به طوری که سطوح شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، طول ریشه را به ترتیب ۲۱ و ۹ درصد کاهش دادند (جدول ۸). در بررسی حاضر در تمام سطوح شوری با محلول پاشی با پلی آمین‌ها، طول ریشه افزایش یافت. افزایش غلظت نمک و تنش شوری سبب کاهش طول ریشه و اندام‌های هوایی می‌شود که دلیل آن را به اثرات اسمزی، کاهش پتانسیل آبی خاک و عدم تعادل یونی نسبت داده‌اند (Sharma et al., 2023). ترکیبات پلی آمینی سبب طولی شدن ریشه در محیط شور می‌گردند و اثرات بازدارندگی شوری بر طولی شدن ریشه را کاهش داده و محرک پیدایش کلتوپتیل (غلافی محافظتی که نوک شاخه جوان گندمیان را هنگام خروج از خاک می‌پوشاند) می‌باشند (Noor et al., 2023). در تحقیقی روی گیاه گوجه فرنگی گزارش شده است که بیشترین طول ریشه در شرایط بدون تنش شوری و کمترین آن در شرایط تنش شوری حاصل شد و محلول پاشی با اسپرمیدین در شرایط تنش شوری باعث افزایش طول ریشه شد (Raziq et al., 2022).

صفات فیزیولوژیک

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که تاثیر اثرهای ساده تیمار تنش شوری و محلول پاشی با پلی آمین‌ها بر محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار بود (جدول ۴). سطوح شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، محتوای نسبی آب برگ را به ترتیب ۶۰ و ۲۳ درصد کاهش دادند (جدول ۵). همچنین محلول پاشی با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین، محتوای نسبی آب برگ را به ترتیب ۱۶، ۷ و ۶ درصد افزایش داد (جدول ۵). بین سطوح مختلف محلول پاشی با پلی آمین‌ها از نظر محتوای نسبی آب برگ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. در تحقیقی مشاهده شد که با افزایش شدت شوری، محتوای نسبی آب برگ در گیاه گندم کاهش یافت و با محلول پاشی اسپرمین در مقایسه با شاهد مقدار آن افزایش معنی‌داری پیدا کرد که یافته‌های ما در این تحقیق را تایید می‌کند (Talaat et al., 2022b). بررسی نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که تاثیر اثرهای ساده و برهمکنش تیمار تنش شوری و محلول پاشی پلی آمین‌ها بر غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل برگ کاملینا معنی‌دار بود (جدول ۴). با افزایش سطح تنش شوری غلظت کلروفیل برگ کاهش یافت به طوری که سطوح شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، به ترتیب غلظت کلروفیل a (۵۷ و ۱۳ درصد)، کلروفیل b (۶۱ و ۲۱ درصد) و کلروفیل کل برگ (۵۸ و ۱۵ درصد) را کاهش دادند (جدول ۵). محلول پاشی با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین، در مقایسه با بدون محلول پاشی، به ترتیب غلظت کلروفیل a (۲۶، ۲۲ و ۱۹ درصد)، کلروفیل b (۲۹، ۲۵ و ۱۸ درصد) و کلروفیل کل (۲۷، ۲۲ و ۱۹ درصد) برگ را افزایش داد (جدول ۵). گزارش شده است که محلول پاشی با اسپرمین باعث افزایش غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کل رنگیزه‌های فتوسنتزی در گیاه گندم شد (Aldesuquy et al., 2014a).

مجله فرایند و کارکرد گیاهی

جدول ۴- تجزیه واریانس اثرهای سطوح مختلف تنش شوری و محلول پاشی با پلی آمین ها بر برخی صفات فیزیولوژیک در

کاملینا

میانگین مربعات								درجه آزادی	منابع تغییر
کاروتنوئید	پرولین	دمای برگ	نسبت کلروفیل کل	کلروفیل b	کلروفیل a	محتوای نسبی آب برگ			
a									
b									
۰/۸۵ **	۲۶۷۱۳۶۳/۳۱ **	۸۰/۸۶ **	۰/۱۸۸ *	۵/۱۶ **	۰/۴۴ **	۲/۵۷ **	۳۸۵۲/۰۳ **	۲	تنش شوری
۰/۴۷ **	۱۰۲۷۶۳۰/۳ **	۴۴/۸۶ **	۰/۰۱۵ **	۰/۴۰ **	۰/۰۳ **	۰/۲۰ **	۸۶/۷۶ **	۳	محلول پاشی
۰/۰۸۹ **	۱۸۱۶۷۸/۵۲ **	۵/۶۳ ns	۰/۰۲۶ ns	۰/۰۰۲۴ ns	۰/۰۰۱۶ ns	۰/۰۰۱۲ ns	۸/۶۷ ns	۶	شوری × محلول پاشی
۰/۰۰۶۵	۴۹۳۶۶/۲۶	۴/۲۸	۰/۰۵۳	۰/۰۱۶	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۷۵	۱۵/۴۸	۲۴	خطای آزمایشی
۱۱/۶۶	۱۳/۴۹	۵/۱۵	۸/۶۱	۷/۸۶	۱۴/۳۸	۷/۲۵	۹/۱۹	-	ضریب تغییرات (%)

ns, ** و * به ترتیب عدم معنی داری، معنی داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد می باشد.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرهای ساده تنش شوری و محلول پاشی با پلی آمین ها بر برخی صفات فیزیولوژیک کاملینا

تیمار	محتوای نسبی آب برگ (%)	کلروفیل a (میلی گرم بر گرم تر برگ)	کلروفیل b (میلی گرم بر گرم تر برگ)	کلروفیل کل (میلی گرم بر گرم تر برگ)	نسبت کلروفیل a به b	دمای برگ (درجه سانتی-گراد)
تنش شوری						
۰	۵۹/۲۶ a	۱/۵۵ a	۰/۶۲ a	۲/۱۸ a	۲/۵۴ b	۳۷/۵۴ c
۱۵	۴۵/۳۸ b	۱/۳۵ b	۰/۴۹ b	۱/۸۴ b	۲/۷۳ ab	۴۰/۱۳ b
۳۰	۲۳/۷۱ c	۰/۶۷ c	۰/۲۴ c	۰/۹۱ c	۲/۷۸ a	۴۲/۷۳ a
محلول پاشی						
آب	۳۹/۵۷ b	۰/۹۸ c	۰/۳۶ b	۱/۳۵ c	-	۴۳/۲۸ a
اسپرمین	۴۷/۰۲ a	۱/۳۳ a	۰/۵۱ a	۱/۸۴ a	-	۳۸/۱۷ b
اسپرمیدین	۴۲/۵۰ ab	۱/۲۵ ab	۰/۴۸ a	۱/۷۳ ab	-	۴۰/۰۲ b
پوترسین	۴۲/۰۳ ab	۱/۲۱ b	۰/۴۴ ab	۱/۶۶ b	-	۳۹/۰۵ b

میانگین‌هایی که در هر ستون حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون توکی در سطح ۵ درصد می‌باشند.

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که سطوح شوری به شدت غلظت کلروفیل‌های *a* و *b* برگ را کاهش دادند. این تغییر در غلظت کلروفیل ممکن است ناشی از تولید بیش از حد H_2O_2 (پراکسید هیدروژن) باشد (Azeem *et al.*, 2023). تحقیق دیگری نشان داد که کاهش در غلظت رنگدانه برگ در دو گونه جو تحت تنش آب دریا (۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) مشاهده شد (Khosravinejad *et al.*, 2008). اثر نامطلوب آبیاری آب دریا بر غلظت رنگدانه برگ را می‌توان به کاهش فعالیت اسید دهیدراتاز ۵-آمینو لولولینیک (ALA-D) نیز نسبت داد که تشکیل حلقه پورفیرین مورد استفاده در ساخت کلروفیل را کاتالیز می‌کند. بنابراین، شرایطی که سنتز ALA-D را سرکوب می‌کند، با سنتز کلروفیل تداخل خواهد داشت (Aldesuquy *et al.*, 2014a). مطابق با این فرض، گزارش شد که تنش آبی غلظت کلروفیل‌های *a* و *b* برگ را با مهار همزمان فعالیت ALA-D در ذرت کاهش داد (Jamei *et al.*, 2008). پلی‌آمین‌ها در سنتز کلروفیل، آنزیم دی‌آمین آمینوترانسفراز گروه آمینه را از پلی‌آمین‌ها به اسید آگزیگلوتاریک که پیش‌ساز کلروفیل است، منتقل می‌کند (Askar and Treptow, 2006). محققان دریافتند که اسپرمیدین در حفاظت از غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاهچه‌های خیار تحت تنش شوری نقش دارد (Shu *et al.*, 2012). تحقیقات دیگر نشان داده است که محلول‌پاشی تیمارهای پلی‌آمین (۱۰۰ میکرومولار اسپرمین)، غلظت کلروفیل کل و کاروتنوئیدها را در شرایط بدون تنش افزایش داد و باعث بهبود گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط تنش شوری شد (Ahanger *et al.*, 2019). بررسی‌ها نشان می‌دهد که پلی‌آمین ممکن است عملکرد آنزیم‌های شرکت‌کننده در ساخت کلروفیل را افزایش و اختلال در سیستم فتوسنتزی را کاهش داده، در نتیجه تجزیه کلروفیل را کاهش دهد (Ahanger *et al.*, 2019). سلول‌های گیاهی اسمولیت‌های مناسبی مانند اسیدهای آلی (اگزالات و مالات)، ترکیب‌های نیتروژنی (پروتئین‌ها، بتائین، گلوتامین، آسپارات، گلیسین و پوترسین) و کربوهیدرات‌های (ساکاروز، سوربیتول، مانیتول، گلیسرول، آرابینیتول، پینیتول و دیگر پلی‌اول‌ها) را برای مبارزه با اثرهای مضر شوری در سلول‌های خود تجمع می‌کنند (قلی نژاد و همکاران، ۱۴۰۱). نتایج مطالعه حاضر نشان داد که پلی‌آمین‌ها در ایجاد محافظ اسمزی مانند پرولین نقش دارند و القای تجمع مانند املاح آلی از طریق پلی‌آمین می‌تواند راهکاری برای مقابله با تنش شوری باشد.

تنش شوری به طور مستقیم بر رشد گیاه از طریق برخی از جنبه‌های مورفوفیزیولوژیک مانند تخریب کلروفیل، از دست دادن آب برگ و کاهش زیست توده تأثیر می‌گذارد (Ahanger and Agarwal, 2017). با این حال، محلول‌پاشی پلی‌آمین می‌تواند از طریق برگ، خاک یا محیط ریشه به داخل گیاه نفوذ کرده، رشد را بهبود بخشد و اثرهای نامطلوب تنش را به طور معنی‌داری کاهش دهد (Alcázar and Tiburcio, 2014). در پژوهش حاضر محلول‌پاشی پلی‌آمین‌ها، زیست توده و محتوای نسبی آب برگ، غلظت کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها را در شرایط بدون تنش و تنش شوری افزایش داد (جدول ۵)، که نشان‌دهنده اثرهای مثبت کاربرد پلی‌آمین‌ها بر رشد کاملینا است. محلول‌پاشی برگ با پلی‌آمین‌ها می‌تواند با مکانیسم‌های فیزیولوژی مختلف برای بهبود رشد مانند تجمع اسمولیت‌های سازگار، به‌ویژه در محیط تنش، تعامل داشته باشد (Zhiwei *et al.*, 2020). در مجموع، محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها سبب بهبود تنظیم اسمزی شده و از رشد و فتوسنتز کاملینا تحت تنش شوری با افزایش بیوستنز و تجمع پرولین محافظت می‌کند (Qian *et al.*, 2021).

تأثیر اثرهای ساده تیمار تنش شوری و محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها بر دمای برگ معنی‌دار بود (جدول ۴). سطوح شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، دمای برگ را به ترتیب ۱۲ و ۶ درصد افزایش دادند (جدول ۵). محلول‌پاشی با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین، دمای برگ را به ترتیب ۱۲، ۷ و ۱۰ درصد کاهش داد (جدول ۵). در بررسی حاضر، بین سطوح مختلف محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها از نظر دمای برگ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. از آنجا که دمای برگ تابعی از هدایت روزنه‌ای می‌باشد، اندازه‌گیری آن می‌تواند در سنجش تحمل به تنش اسمزی مورد استفاده قرار گیرد (James and Sirault, 2012). در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است با افزایش سطح شوری از ۱۰۰ به ۲۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم، دمای برگ در گیاه چغندر قند افزایش یافته است (اسدی نسب و همکاران، ۱۳۹۱). به نظر می‌رسد تجمع آب‌سبزیک اسید طی تنش شوری در ریشه و انتقال آن به اندام هوایی منجر به کاهش هدایت روزنه‌ای و به دنبال آن کاهش تعرق شده، از سوی دیگر کاهش در میزان تعرق گیاه و عدم تعادل دمایی موجب افزایش دمای برگ می‌گردد (اسدی نسب و همکاران، ۱۳۹۱). کاهش دمای برگ در اثر محلول‌پاشی با پوترسین با حفظ محتوای نسبی آب برگ، جلوگیری از بسته شدن روزنه‌ها و حفظ تعرق گیاهی در ارتباط می‌باشد (Khodabakhshi et al., 2023). پژوهش دیگری روی گلرنگ نشان داد که در شرایط تنش خشکی، دمای برگ به دلیل کاهش پتانسیل آب و بسته شدن روزنه‌ها، افزایش می‌یابد. بسته شدن روزنه‌ها با محدود کردن دی اکسید کربن قابل دسترس در برگ، فتوسنتز را نیز کاهش می‌دهد (Farzi-Aminabad et al., 2022). گیاهان با محتوای نسبی آب برگ بالاتر، توان بالاتری در حفظ آب دارند و می‌توانند به فتوسنتز ادامه دهند، اما با افزایش دمای برگ و در نتیجه آن بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز، با افت عملکرد مواجه خواهند شد (Hussain and Al-Dakheel, 2018) که در همین راستا در پژوهش حاضر مشاهده شد که گیاهانی که دمای برگ در آنها افزایش یافته بود، افت عملکرد دانه را داشتند.

با افزایش سطح تنش شوری، غلظت پرولین برگ افزایش یافت، به طوری که سطوح شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، غلظت پرولین برگ را به ترتیب ۴۴ و ۴۰ درصد افزایش دادند (جدول ۸). در تمام سطوح شوری با محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها، غلظت پرولین برگ افزایش یافت و باعث تعدیل اثر تنش شوری گردید. در شرایط بدون تنش شوری، محلول‌پاشی با پوترسین، در شرایط تنش شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر، محلول‌پاشی با پوترسین و در شرایط تنش شوری ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر، محلول‌پاشی با اسپرمیدین موجب افزایش غلظت پرولین گردیده است (جدول ۸). پرولین برای مقابله با تنش موثر بوده و یکی از اسمولیت‌های مهم است که سبب سازگاری اسمزی شده و تجمع آن در پاسخ به تنش اسمزی به طور عمده گزارش شده است (Anwar-ul-Hag et al., 2023). سایر محققان نیز نشان دادند که بیشترین غلظت پرولین برگ در شرایط تنش شوری و کمترین آن در شرایط بدون تنش شوری بدست آمد و محلول‌پاشی با اسپرمیدین در شرایط تنش شوری باعث افزایش غلظت پرولین برگ گیاه گوجه‌فرنگی شد (Raziq et al., 2022).

با افزایش سطح شوری، غلظت کاروتنوئید برگ افزایش یافت، به طوری که سطوح شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، غلظت کاروتنوئید برگ را به ترتیب ۵۶ و ۴۶ درصد افزایش دادند (جدول ۸). در تمام سطوح شوری با محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها، غلظت کاروتنوئید برگ افزایش یافت. در شرایط بدون تنش شوری، محلول‌پاشی با اسپرمیدین، در شرایط تنش شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر، محلول‌پاشی با اسپرمین و در شرایط تنش شوری ۳۰ دسی‌زیمنس

بر متر، محلول‌پاشی با اسپرمین در افزایش غلظت کاروتنوئید موثر بوده است (جدول ۸). همسو با یافته‌های ما در این تحقیق، گزارش شده است که محلول‌پاشی با اسپرمیدین غلظت کاروتنوئید را در شرایط بدون تنش و تنش شوری در گیاه گوجه فرنگی افزایش داد (Raziq et al., 2022). در مطالعه‌ای روی گیاه فلفل، محلول‌پاشی با اسپرمین، سبب افزایش غلظت کاروتنوئید تحت شرایط تنش شوری شد (Ramadan et al., 2022). محلول‌پاشی با اسپرمین در شرایط شوری ممکن است از طریق حذف گونه‌های اکسیژن فعال، محافظت از غلظت کلروفیل، بهبود پارامترهای فتوسنتز و عملکرد فتوسیستم، اثرهای مخرب شوری بر غلظت کلروفیل و کاروتنوئید را کاهش دهد (Khoshbakht et al., 2018). نتایج پژوهش حاضر نشان‌دهنده افزایش قابل توجه غلظت کاروتنوئید در گیاهان کاملینا تیمار شده با پلی‌آمین‌ها بود (جدول ۸). کاهش اثرهای نامطلوب تنش شوری با استفاده از پلی‌آمین‌ها ممکن است به دلیل افزایش تعداد گرانا (کلروپلاست از واحدهایی به نام گرانا ساخته شده است که انرژی خورشید را به دام می‌اندازد و خود این گراناها نیز از واحدهایی به نام تیلاکوئید تشکیل شده‌اند) و در نتیجه افزایش تیلاکوئیدها باشد و افزایش تیلاکوئیدها منجر به افزایش غلظت کلروفیل می‌شود. علاوه بر این، یکی از مزیت‌های انباشته شدن بیشتر گرانا این است که با ایجاد یک محیط مناسب باعث انتقال انرژی فتوسیستم ۱ و ۲ و بهبود کنترل برداشت نور و عملیات فتوشیمیایی می‌شود (Aldesuquy et al., 2014a). انباشته شدن بیشتر گرانا ناشی از محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها ممکن است دلیل تجمع کاروتنوئیدها در برگ کاملینا باشد. همچنین کاروتنوئیدها ممکن است به عنوان رنگدانه گیرنده نور عمل کنند (Aldesuquy et al., 2014b). این نتایج با نتایج بدست آمده توسط (Weier and Benson, 1967) مطابقت دارد که پیشنهاد کردند تجمع رنگدانه کاروتنوئید ممکن است از رنگدانه کلروفیل در برابر تنش‌ها محافظت کند.

عملکرد و اجزای عملکرد دانه

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد، تاثیر اثرهای ساده تیمار تنش شوری و محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها بر تعداد دانه در هر کپسول، تعداد کپسول در هر بوته، وزن صد دانه، طول کپسول، عملکرد دانه و شاخص برداشت کاملینا معنی‌دار بود (جدول ۶). اثر برهمکنش تنش شوری و محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها فقط بر عملکرد زیستی معنی‌دار بود (جدول ۶). با افزایش سطح تنش شوری عملکرد و اجزای عملکرد دانه کاهش معنی‌داری یافت، به طوری که سطوح شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، به ترتیب تعداد دانه در هر کپسول (۳۰ و ۰ درصد)، تعداد کپسول در هر بوته (۵۲ و ۲۵ درصد)، وزن صد دانه (۳۰ و ۵ درصد)، طول کپسول (۱۸ و ۹ درصد)، عملکرد دانه (۵۲ و ۱۰ درصد)، عملکرد زیستی (۳۸ و ۱۰ درصد) و شاخص برداشت (۲۲ و ۰ درصد) را کاهش دادند (جدول ۷). همچنین محلول‌پاشی با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین، در مقایسه با شاهد، به ترتیب تعداد دانه در هر کپسول (۳۶، ۲۵ و ۱۸ درصد)، تعداد کپسول در هر بوته (۲۶، ۲۳ و ۲۴ درصد)، وزن صد دانه (۲۸، ۱۷ و ۱۲ درصد)، طول کپسول (۱۳، ۱۵ و ۱۷ درصد) و عملکرد دانه (۳۲، ۸ و ۲۱ درصد) را افزایش داد (جدول ۷).

شوری خاک اثرهای مخربی بر توسعه گیاهان دارد و عملکرد محصول را کاهش می‌دهد (Kaya et al., 2020). نتایج بررسی برخی محققان (Talaat et al., 2022b) نشان داده است که تنش شوری به طور قابل توجهی ($p < 0.05$) با کاهش غلظت کلروفیل‌های a و b، رشد گیاه را متوقف می‌کند و محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها، اثر شوری را مهار کرده و باعث بهبود رشد و عملکرد کاملینا شده است. در آزمایشی، محلول‌پاشی با پلی‌آمین اسپرمین رشد و عملکرد گیاه پروانش (*Catharanthus*)

مجله فرایند و کارکرد گیاهی

roseus L. را در شرایط تنش شوری بهبود بخشید و بر صفات وزن تر و وزن خشک بوته، ارتفاع، تعداد گل، محتوای نسبی آب، غلظت پرولین، غلظت کلروفیل ها، غلظت کاروتنوئید و آنزیم پراکسیداز در سطح احتمال یک درصد و بر صفت تعداد برگ در سطح احتمال پنج درصد معنی دار بود (اعلائی و همکاران، ۱۴۰۰). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که محلول پاشی با پلی آمین ها می تواند با افزایش غلظت کلروفیل، افزایش محتوای نسبی آب برگ، افزایش تجمع پرولین، بهبود وضعیت ریشه در شرایط تنش شوری (جذب بهتر مواد مغذی) و افزایش رنگیزه های گیاهی (بهبود فتوسنتز) به طور معنی داری به تحمل تنش شوری توسط گیاه کاملینا کمک کند.

جدول ۶- تجزیه واریانس اثرهای تنش شوری و محلول پاشی با پلی آمین ها بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه گیاه کاملینا

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		تعداد دانه در هر کیسول	تعداد کیسول در هر بوته	وزن ۱۰۰ دانه	طول کیسول	عملکرد دانه
تنش شوری	۲	۰/۷۴**	۸/۵۴**	۰/۰۰۰۱۲**	۰/۰۴۲**	۰/۴۰۸**
محلول پاشی	۳	۰/۴۳**	۰/۹۵**	۰/۰۰۰۰۵۷**	۰/۰۲۰**	۰/۰۸۱**
شوری × محلول پاشی	۶	۰/۰۲ ns	۰/۱۰ ns	۰/۰۰۰۰۰۳۶ ns	۰/۰۰۰۰۸۰ ns	۰/۰۰۶ ns
خطای آزمایشی	۲۴	۰/۰۲۵	۰/۰۶	۰/۰۰۰۰۰۳۵	۰/۰۰۰۰۹۱	۰/۰۰۰۶۷
ضریب تغییرات (%)	-	۶/۶۸	۵/۵۶	۱۰/۴۳	۵/۰۷	۱۵/۲۳

ns، ** و * به ترتیب عدم معنی داری، معنی داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد می باشد.

جدول ۷- مقایسه میانگین اثرهای ساده تنش شوری و محلول پاشی با پلی آمین ها بر برخی صفات فیزیولوژیک کاملینا

تیمار	تعداد دانه در هر کیسول	تعداد کیسول در هر بوته	وزن ۱۰۰ دانه (گرم)	طول کیسول (سانتی متر)	عملکرد دانه (گرم بر گلدان)	شاخص برداشت (%)
تنش شوری						
۰	۶/۴۳ a	۳۰/۰۲ a	۰/۰۲۰ a	۰/۶۵ a	۰/۶۷ a	۲۲/۴۱ a
۱۵	۶/۵۹ a	۲۲/۳۵ b	۰/۰۱۹ a	۰/۵۹ b	۰/۶۰ a	۲۲/۷۰ a
۳۰	۴/۴۹ b	۱۴/۴۱ c	۰/۰۱۴ b	۰/۵۳ c	۰/۳۲ b	۱۷/۳۷ b
محلول پاشی						
آب	۴/۴۶ c	۱۷/۸۵ b	۰/۰۱۵ c	۰/۵۲ b	۰/۴۴ c	۲۰/۹۶ b
اسپریمین	۷/۱۰ a	۲۴/۲۶ a	۰/۰۲۱ a	۰/۶۰ a	۰/۶۵ a	۲۴/۹۹ a
اسپریمیدین	۶/۱۰ ab	۲۳/۲۹ a	۰/۰۱۸ b	۰/۶۱ a	۰/۴۸ bc	۱۸/۶۴ b
پوترسین	۵/۵۸ bc	۲۳/۶۶ a	۰/۰۱۷ bc	۰/۶۳ a	۰/۵۶ ab	۱۸/۷۲ b

میانگین هایی که در هر ستون حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد اختلاف معنی دار بر اساس آزمون توکی در سطح ۵ درصد می باشند.

یافته‌های مطالعه حاضر نشان می‌دهد که محلول‌پاشی با پلی آمین‌ها ممکن است باعث رشد و نمو کاملینا شده و از طریق افزایش اجزای عملکرد دانه، عملکرد دانه را بهبود و باعث کاهش اثرهای تنش شوری شود. پلی آمین‌ها اثر تنظیم‌کنندگی رشد و همچنین مقابله با اثر هورمون اسید آبسزیک دارند و در تحمل گیاهان در شرایط تنش‌های محیطی، نقش دفاعی دارند (Jangra et al., 2022). سایر محققان نیز نشان دادند که بیشترین عملکرد زیستی در شرایط بدون تنش شوری و کمترین آن در شرایط تنش شوری حاصل شد و محلول‌پاشی با اسپرمیدین در شرایط تنش شوری باعث افزایش عملکرد زیستی گیاه گوجه‌فرنگی شد (Raziq et al., 2022). وقتی گیاه در معرض تنش شوری قرار می‌گیرد، بر اثر کاهش پتانسیل اسمزی دچار نوعی خشکی فیزیولوژیک شده و ریشه‌ها تحت این شرایط مقدار اسید آبسزیک را افزایش داده که این هورمون از طریق جریان تعلق به اندام‌های هوایی منتقل شده و در اندام‌های هوایی سبب کاهش هدایت روزنه‌ها و به دنبال آن کاهش تعلق می‌شود (Zlatev and Yordanov, 2004). در نهایت، به دلیل کاهش انتشار دی اکسید کربن فتوسنتز، رشد و در نتیجه عملکرد دانه کاهش می‌یابد (Ashraf, 2001). نتایج دیگر نیز نشان دادند که با افزایش سطح تنش شوری، عملکرد و اجزای عملکرد دانه کاملینا کاهش معنی‌داری یافت که یافته‌های ما در این پژوهش را تایید می‌کند (Gholamian et al., 2017). در نتایج محققان دیگر نیز به تاثیر مثبت معنی‌دار اسپرمین (۰ و ۱۰ میکرومول و ۱ میلی‌مول) بر روی اندام هوایی گیاه کرچک در شرایط تنش خشکی نسبت به شاهد، در افزایش وزن ۱۰۰ دانه و تعداد دانه اشاره شده است (Izadi and Tadayon, 2016).

جدول ۸- مقایسه میانگین اثرهای برهمکنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی بر صفات مورد مطالعه در کاملینا

تیمار	مساحت برگ (سانتی - مترمربع)	طول ریشه (سانتی - مترمربع)	پرولین (میلی‌مول بر کیلوگرم وزن خشک برگ)	کاروتنوئید (میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ)	عملکرد
تنش شوری	محلول‌پاشی				
۰	آب	۶/۲۳ bc	۸/۹۹ a	۳۴۳/۳۷ e	۰/۲۸۷ f
	اسپرمین	۱۱/۴۵ a	۱۱/۱۶ ab	۱۲۳۲/۵۱ d	۰/۴۵۵ ef
	اسپرمیدین	۴/۸۱ cd	۱۰/۷۱ ab	۱۲۵۱/۵۳ d	۰/۴۹۲ ef
	پوترسین	۷/۳۹ b	۱۰/۷۷ ab	۱۵۹۲/۵۸ bcd	۰/۳۸۰ ef
۱۵	آب	۳/۷۵ de	۸/۲۲ bcd	۱۴۹۱/۸۰ cd	۰/۴۰۰ ef
	اسپرمین	۳/۹۰ cde	۱۰/۹۹ ab	۱۶۶۸/۱۸ abcd	۱/۰۲۰ b
	اسپرمیدین	۴/۲۲ cde	۹/۲۲ abc	۲۰۷۱/۸۷ abc	۰/۶۰۴ de
	پوترسین	۴/۹۳ cd	۹/۴۷ abc	۲۲۰۵/۰۸ ab	۰/۹۸۶ bc
۳۰	آب	۲/۱۳ e	۷/۴۳ cd	۱۶۹۲/۷۹ abcd	۰/۵۳۹ de
	اسپرمین	۴/۲۸ cde	۱۰/۵۵ ab	۱۹۷۰/۴۰ abc	۱/۳۵۲ a
	اسپرمیدین	۳/۵۲ de	۸/۵۵ abcd	۲۳۱۵/۲۸ a	۰/۷۶۳ cd
	پوترسین	۴/۱۴ cde	۶/۲۷ d	۱۹۱۴/۴۵ abc	۱/۰۸۶ b

میانگین‌هایی که در هر ستون حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون توکی در سطح ۵ درصد می‌باشند.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تنش شوری باعث کاهش صفات ریشه مانند قطر ریشه، طول ریشه، وزن خشک ریشه و حجم ریشه شد، همچنین صفات فیزیولوژیک مانند غلظت کلروفیل و محتوای نسبی برگ را کاهش داد ولی باعث افزایش غلظت پرولین، دمای برگ و غلظت کاروتنوئید گردید. علاوه بر این تنش شوری عملکرد دانه و اجزای عملکرد دانه کاملینا را کاهش داد. محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها هم در شرایط بدون تنش و هم در شرایط تنش شوری باعث بهبود صفات رشد، خصوصیات ریشه، صفات فیزیولوژیک، عملکرد دانه و اجزای عملکرد دانه شد و توانست اثرهای نامطلوب شوری را کاهش دهد. به نظر می‌رسد کاملینا بتواند شوری تا ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر را تحمل کرده و عملکرد دانه مطلوب تولید کند. همچنین محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها به عنوان یک راهکار جهت کاهش اثرهای نامطلوب تنش شوری پیشنهاد می‌گردد.

منابع

- اسدی نسب، نفیسه، حسیبی، پیمان و مسکرباشی، موسی (۱۳۹۱). مطالعه تغییرات فتوسنتز و تنفس در ژنوتیپ‌های مختلف چغندر قند (*Beta vulgaris* L.) تحت تنش شوری. تولیدات گیاهی، ۳۵(۱)، ۵۵-۶۹. URL: https://plantproduction.scu.ac.ir/article_12155.html?lang
- اعلامی، میترا، کرمی، زهرا، ارغوانی، مسعود و صالحی، فهیمه (۱۴۰۰). مطالعه اثر اسپرمین در شرایط تنش شوری بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی گیاه پروانش (*Chatarantus roseus* L.). مجله علوم باغبانی ایران، ۵۲(۳)، ۵۵۳-۵۶۴. DOI: 10.22059/IJHS.2021.291658.1734
- سید شریفی، رضا و قلی نژاد، اسماعیل (۱۴۰۰). ارزیابی صفات زراعی و مورفوفیزیولوژیکی گیاهان زراعی. انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی، ۴۰۰ صفحه.
- قلی نژاد، اسماعیل، درویش زاده، رضا و ابهری، عباس (۱۴۰۱). تنش خشکی و راهکارهای مقابله با آن در گیاهان زراعی. فیزیولوژی محیطی گیاهی، ۱۷(۶۷)، ۱۵۲-۱۸۴. DOI: 10.30495/iper.2022.1966339.1818
- Abdoli, A., Ramezani moghadam, J., Hosseini, Y., Nikpour, M. R., & Dehghan, H. (2021). The effect of salinity stress on tomato root characteristics saint pierre and its yield under irrigation time management. *Journal of Horticultural Science*, 35(2), 223-234. DOI: 10.22067/JHS.2021.61809.0
- Ahanger, M. A., & Agarwal, R. M. (2017). Salinity stress induced alterations in antioxidant metabolism and nitrogen assimilation in wheat (*Triticum aestivum* L.) as influenced by potassium supplementation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 115, 449-460. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.04.017>
- Ahanger, M. A., Qin, C., Maodong, Q., Dong, X. X., Ahmad, P., Abd Allah, E. F., & Zhang, L. (2019). Spermine application alleviates salinity induced growth and photosynthetic inhibition in *Solanum lycopersicum* by modulating osmolyte and secondary metabolite accumulation and differentially regulating antioxidant metabolism. *Plant Physiology Biochemistry*, 144, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.09.021>

- Akbari, M., Katam, R., Husain, R., Farajpour, M., Mazzuca, S., & Mahna, N. (2020). Sodium chloride induced stress responses of antioxidative activities in leaves and roots of pistachio rootstock. *Biomolecules Preprints*, 10(189), 1-18. <https://doi.org/10.3390/biom10020189>
- Al-Mushhin, A. A. M. (2022). Interactive effect of potassium and spermidine protects growth, photosynthesis and chlorophyll biosynthesis in *Vigna angularis* from salinity induced damage by up-regulating the tolerance mechanisms. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 50(1), 12607. DOI:10.15835/nbha50112607
- Alcázar, R., & Tiburcio, A. F. (2014). Plant polyamines in stress and development: an emerging area of research in plant sciences. *Frontiers in Plant Science*, 5, 319. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00319>
- Aldesuquy, H., Baka, Z., & Mickky, B. (2014a). Kinetin and spermine mediated induction of salt tolerance in wheat plants: Leaf area, photosynthesis and chloroplast ultrastructure of flag leaf at ear emergence. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, 1, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ejbas.2014.03.002>
- Aldesuquy, H., Baka, Z., & Mickky, B. (2014b). Role of kinetin and spermine in the reversal of seawater stress-induced alteration in growth vigor, water relations and nucleic acids of wheat plants. *Phyton-Annales Rei Botanicae*, 54(2), 251-274. WOS:000346682700009
- Alizadeh, A. (2000). The relationship between water, soil and plants. Mashhad: Astan Quds Publications.
- Amiri, H., Banakar, M. H., Ranjbar, G. H., Sarafraz Ardakani, M. R., & Omidvari, M. (2023). Exogenous application of spermidine and methyl jasmonate can mitigate salt stress in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). *Industrial Crops and Products*, 199(1), 116826. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116826>
- Anwar-ul-Haq, M., Iftikhar, I., Akhtar, J., & et al. (2023). Role of exogenous osmolyte supplementation in ameliorating osmotic and oxidative stress and promoting growth in salinity-stressed soybean genotypes. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23, 3682-3694. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01289-1>
- Ashraf, M. (2001). Relationships between growth and gas exchange characteristics in some salt-tolerant amphidiploid Brassica species in relation to their diploid parents. *Environmental and Experimental Botany*, 45, 155-163. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(00\)00090-3](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(00)00090-3)
- Askar, A., & Treptow, H. (2006). Biogene amine in lebensmitteln a Veleg Eugen ulmer, Stuttgart grown in the dark and at different light quanta fluence rates. *Photochemistry Photobiology*, 35, 217e221.
- Azeem, M., Pirjan, K., Qasim, M., Mahmood, A., Javed, T., Muhammad, H., Yang, S., Dong, R., Ali, B., & Rahimi, M. (2023). Salinity stress improves antioxidant potential by modulating physio-biochemical responses in *Moringa oleifera* Lam. *Scientific Reports*, 13, 2895. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29954-6>
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39(1), 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Bencherif, K., Boutekrabt, A., Fontaine, J., Laruelle, F., Dalpè, Y., & Sahraoui A. L. (2015). Impact of soil salinity on arbuscular mycorrhizal fungi biodiversity and microflora biomass associated with *Tamarix articulata* Vahl rhizosphere in arid and semi-arid Algerian areas. *Science Total Environment*, 533, 488-494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.007>
- Boorboori, M. R. (2023). Investigating the role of silicon in reducing the risk of arsenic, cadmium, drought and salinity stresses in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 26, 387-404. <https://doi.org/10.1007/s12892-022-00191-z>
- Bouabdallah, M., Mahmoudi, H., Ghnaya, T., Hannachi, H., Taheri, A., Ouerghi, Z., & Chaffei-Haouari, C. (2022). Spermidine as an elevator of salinity induced stress on two varieties of *Triticum durum* Desf. (Karim and Razzek). *Pakistan Journal of Botany*, 54(3), 771-779. DOI: [http://dx.doi.org/10.30848/PJB2022-3\(3\)](http://dx.doi.org/10.30848/PJB2022-3(3))
- Farzi-Aminabad, R., Nasrullahzade, S., & Ghassemi-Golezani, K. (2022). Response of safflower in water deficit and foliar application of putrescine and 24-epibrassinolide. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(2), 289-302. DOI: 10.22034/SAPS.2021.13110
- Geng, W., Qiu, Y., Peng, Y., Zhang, Y., & Li Z. (2021). Water and oxidative homeostasis, Na⁺/K⁺ transport, and stress-defensive proteins associated with spermine-induced salt tolerance in creeping bentgrass. *Environmental and Experimental Botany*, 192, 104659. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104659>

- Gholamian, S. M., Ghamarnia, H., & Kahrizy, D. (2017). Effects of saline water on *Camelina (Camelina sativa)* yield in Greenhouse condition. *Water and Irrigation Management*, 7(2), 333-348. DOI: 10.22059/jwim.2018.248556.582
- Guo, J., Wang, S., Yu, X., Dong, R., Li, Y., Mei, X., & Shen, Y. (2018). Polyamines Regulate Strawberry Fruit Ripening by Abscisic Acid, Auxin, and Ethylene. *Plant physiology*, 177(1), 339-351. DOI: 10.1104/pp.18.00245
- Hosseini Sanehkooari, F., Pirdashti, H., & Bakhshandeh E. (2022). Effect of environmental factors on *Camelina sativa* seed germination and emergence. *Acta Physiologiae Plantarum*, 45(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s11738-022-03487-3>
- Hussain, M. I., & Al-Dakheel, A. J. (2018). Effect of salinity stress on phenotypic plasticity, yield stability, and signature of stable isotopes of carbon and nitrogen in safflower. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(24), 23685-23694. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2442-z>
- Iqbal, M., & Basra, S. (2006). Wheat seed priming in relation to salt tolerance: Growth, yield and levels of free salicylic acid and polyamines. *Annales Botanici Fennici*, 43, 250-259. <https://www.jstor.org/stable/23727218>
- Izadi, Z., & Tadayan, M. R. (2016). Effect of salicylic acid and spermine on yield and yield components of castor bean (*Ricinus communis* L.) under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 8(2), 159-167. <https://doi.org/10.22077/escs.2016.212>
- Jaleel, C. A., Sankar, B., Sridharan, R., & Panneerselvam, R. (2008). Soil salinity alters growth, chlorophyll content, and secondary metabolite accumulation in *Catharanthus roseus*. *Turkish Journal of Biology*, 32, 79-83. <https://journals.tubitak.gov.tr/biology/vol32/iss2/2>
- Jamei, R., Heidari, R., Khara, J., & Zare S. (2008). The interaction effects of flooding and kinetin on growth criteria, chlorophyll content, and 5-aminolevulinic acid dehydratase activity in corn seedlings. *Turkish Journal of Biology*, 32(4), 253-257. <https://journals.tubitak.gov.tr/biology/vol32/iss4/4>
- James, R. A., & Sirault, X. R. (2012). Infrared thermography in plant phenotyping for salinity tolerance. *Methods Molecular Biology*, 913, 173-189. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-986-0_11
- Jangra, A., Chaturvedi, S., Kumar, N., Singh, H., Sharma, V., Thakur, M., Tiwari, S., & Chhokar, V. (2022). Polyamines: the gleam of next-generation plant growth regulators for growth, development, stress mitigation, and hormonal crosstalk in plants—a systematic review. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(2), 1-25. DOI: 10.1007/s00344-022-10846-4
- Kaya, C., Ashraf, M., Alyemeni, M. N., & Ahmad, P. (2020). The role of endogenous nitric oxide in salicylic acid-induced up-regulation of ascorbate-glutathione cycle involved in salinity tolerance of pepper (*Capsicum annuum* L.) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 147, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.11.040>
- Kesahvarznia, R., Shahbazi, M., Mohammadi, V., Hosseini Salekdeh, G., Ahmadi, A., & Mohseni-Fard, E. (2014). The impact of barley root structure and physiological traits on drought response. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 45(4), 553-563. DOI: 10.22059/IJFCS.2014.53565
- Khodabakhshi, L., Seyedi, A., Mazaheri-Tirani, M., & Parsa Motlagh, B. (2023). Morphological and physiological responses of *Indigofera tinctoria* L. to putrescine under drought stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 70, 43. <https://doi.org/10.1134/S102144372260252X>
- Khoshbakht, D., Asghari, M. R., & Haghghi, M. (2018). Influence of foliar application of polyamines on growth, gas-exchange characteristics, and chlorophyll fluorescence in Bakraii citrus under saline conditions. *Photosynthetica*, 56(2), 731-742. <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0723-2>
- Khosravinejad, F., Heydari, R., & Farboodnia, T. (2008). Effects of salinity on photosynthetic pigments, respiration, and water content in two barley varieties. *Pakistan Journal of Biology Science*, 11(20), 2438-2442. DOI: 10.3923/pjbs.2008.2438.2442.
- Kurasiak-Popowska, D., Graczyk, M., & Stuper-Szablewska, K. (2020). Winter camelina seeds as a raw material for the production of erucic acid-free oil. *Food Chemistry*, 330, 127265. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127265>
- Kusano, T., Berberich, T., Tateda, C., & Takahashi, Y. (2008). Polyamines: essential factors for growth and survival. *Planta*, 228, 367-381. <https://doi.org/10.1007/s00425-008-0772-7>
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *In Methods in Enzymology*, 148, 350-382. Academic Press. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)

- Liu, X., Chai, J., Zhang, Y., Zhang, C., Lei, Y., Li, Q., & Yao, T. (2022). Halotolerant rhizobacteria mitigate the effects of salinity stress on maize growth by secreting exopolysaccharides. *Environmental and Experimental Botany*, 204, 105098. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105098>
- Moghaddam, A., Larijani, H., Oveysi, M., & et al. (2023). Alleviating the adverse effects of salinity stress on *Salicornia persica* using sodium nitroprusside and potassium nitrate. *BMC Plant Bioliology*, 23, 166. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04179-x>
- Munns, R., Guo, J., Passioura, J. B., & Cramer, G. (2000). Leaf water status controls day-time but not daily rates of leaf expansion in salt-treated barley. *Functional Plant Biology*, 27, 949-957. <https://doi.org/10.1071/PP99193>
- Nandy, S., Das, T., Tudu, C. K., Mishra, T., Ghorai, M., Gadekar, V. Sh., Anand, U., Kumar, M., Behl, T., Shaikh, U. K., Jha, N. K., Shekhawat, M. S., Pandey, D. K., Dwivedi, P. R., & Dey, A. (2022). Unravelling the multi-faceted regulatory role of polyamines in plant biotechnology, transgenics and secondary metabolomics. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106, 905-929. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11748-3>
- Noor, M., Fan, J., Zhang, J., Zhang, C., Sun, S., Gan, L., & Yan, X. B. (2023). Bermudagrass responses and tolerance to salt stress by the physiological, molecular mechanisms and proteomic perspectives of salinity adaptation. *Agronomy*, 13(1), 174. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010174>
- Ouda, S., Khalil, F., & Tantawy, M. (2006). Predicting the impact of water stress on the yield of different maize hybrids. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 2(6), 369-374. <http://www.aensiweb.com/RJABS/>
- Parida, A. K., & Das, A. B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324-349. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.06.010>
- Qian, R., Ma, X., Zhang, X., Hu, Q., Liu, H., & Zheng, J. (2021). Effect of exogenous spermidine on osmotic adjustment, antioxidant enzymes activity, and gene expression of gladiolus gandavensis seedlings under salt stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(4), 1353-1367. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10198-x>
- Quarrie, S. A., & Jones, H. G. (1979). Genotypic variation in leaf water potential, stomatal conductance and abscisic acid concentration in spring wheat subjected to artificial drought stress. *Annals of Botany*, 44(3), 323-332. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a085736>
- Ramadan, M. E., El-Saber, M. M., Adelhamid, A. E., & El-Sayed, A. A. (2022). Effect of nano-chitosan encapsulated spermine on growth, productivity and bioactive compounds of chili pepper (*Capsicum annum* L.) under salinity stress. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(8), 197-207. DOI: 10.21608/EJCHEM.2021.105793.4870
- Raziq, A., Mohi Ud Din, A., Anwar, S., Wang, Y., Jahan, M. S., He, M., . . . & Guo, S. (2022). Exogenous spermidine modulates polyamine metabolism and improves stress responsive mechanisms to protect tomato seedlings against salt stress. *Plant Physiology Biochemistry*, 187, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.07.005>
- Russo, R., & Reggiani, R. (2015). Salt sensitivity in camelina sativa seedlings and polyamine content. *International Journal of Plant and Soil Science*, 8, 1-7. DOI: 10.9734/IJPSS/2015/20270
- Sadeghzadeh, A., Shakiba, M. R., Hassannejad, S., & Zehtab Salmasi, S. (2023). Improvement of grain and oil yield-related traits of marigold (*Calendula officinalis* L.) in response to exogenous application of spermidine under water-deficit and weed infestation conditions. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, 13(1), 17-33. DOI: 10.22034/JPPB.2023.16400
- Saravi, H. B., Gholami, A., Pirdashti, H., Firouzabadi, M. B., & Asghari, H. (2021). The response of stevia (*Stevia rebaudiana bertonii*) photosystem ii photochemistry to fungi symbiosis and spermidine application under saline water irrigation. *Russian Agricultural Sciences*, 47(1), 32-36. <https://doi.org/10.3103/S106836742101016X>
- Shu, S., Yuan, L., Guo, S. R., Sun, J., & Liu, C. J. (2012). Effects of exogenous spermidine on photosynthesis, xanthophyll cycle and endogenous polyamines in cucumber seedlings exposed to salinity. *African Journal of Biotechnology*, 11, 6064-6074. DOI: 10.5897/AJB11.1354

- Sydor, M., Kurasiak-Popowska, D., Stuper-Szablewska, K., & Rogoziński, T. (2022). *Camelina sativa*. Status quo and future perspectives. *Industrial Crops and Products*, 187, 115531. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115531>
- Talaat, N. B. (2020). 24-Epibrassinolide and spermine combined treatment sustains maize (*Zea mays* L.) drought tolerance by improving photosynthetic efficiency and altering phytohormones profile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(2), 516-529. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00138-4>
- Talaat, N. B., Ibrahim, A. S., & Shawky, B. T. (2022a). Enhancement of the expression of *zmbzr1* and *zmbes1* regulatory genes and antioxidant defense genes triggers water stress mitigation in maize (*Zea mays* L.) plants treated with 24-Epibrassinolide in combination with spermine. *Agronomy*, 12(10), 2517. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102517>
- Talaat, N. B., Mahmoud, A. W. M., & Hanafy, A. M. A. (2022b). Co-application of salicylic acid and spermine alleviates salt stress toxicity in wheat: growth, nutrient acquisition, osmolytes accumulation, and antioxidant response. *Acta Physiologiae Plantarum*, 45(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s11738-022-03485-5>
- Weier, T. E., & Benson, A. A. (1967). The molecular organization of chloroplast membranes. *American Journal of Botany*, 54, 389-402. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1967.tb10656.x>
- Wikenz, J. E., & Norfolk, I. (2010). *Eco-Physiology of economic plants in arid and semi-arid regions, Adaptations for desert living creatures*. Tehran Tehran University.
- Wu, J., Shu, S., Li, C., Sun, J., & Guo, S. (2018). Spermidine-mediated hydrogen peroxide signaling enhances the antioxidant capacity of salt-stressed cucumber roots. *Plant Physiology and Biochemistry*, 128, 152-162. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.05.002>
- Xiong, F., Liao, J., Ma, Y., Wang, Y., Fang, W., & Zhu, X. (2018). The Protective Effect of Exogenous Putrescine in the Response of Tea Plants (*Camellia sinensis*) to Salt Stress. *HortScience Horts*, 53(11), 1640-1646. DOI: 10.21273/HORTSCI13283-18
- Younessi-Hamzekhanlu, M., Dibazarnia, Z., Oustan, S., Vinson, T., Katam, R., & Mahna, N. (2021). Salinity stimulates biochemical activities and metabolites associated with anticancer activities in *Black horehound* (*Ballota nigra* L.). *Agronomy*, 11, 2538. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122538>
- Zhiwei, W., Wang, J., Yan, D., Yuan, H., Wang, Y., He, Y., . . . & Zheng, B. (2020). Exogenous spermidine improves salt tolerance of pecan-grafted seedlings via activating antioxidant system and inhibiting the enhancement of Na⁺/K⁺ ratio. *Acta Physiologiae Plantarum*, 42, 83. <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03066-4>
- Zlatev, Z., & Yordanov, I. (2004). Effects of soil drought on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in bean plants. *Journal of Plant Physiology*, 30(3), 3-4.

The Effect of Foliar Spraying of Polyamines on Growth Traits, Seed Yield and Yield Components of Camelina (*Camelina sativa* L.) at Different Levels of Salinity Stress

Esmaeil Gholinezhad¹, Shahryar Kazemi², Bakhtiar Lalehgani²

¹ Associate Professor, Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran

² Assistant Prof., Crop and Horticultural Science Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Sari, Iran.

³ Assistant professor, Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran

*Email: e_gholinejad@pnu.ac.ir

Abstract

This experiment aims to investigate the effect of foliar spraying of polyamines on growth traits, root characteristics, physiological traits and seed yield and yield components of the Camelina plant at different levels of salinity stress, a pot factorial experiment based on a completely randomized design was done in 2021 at Payam Noor University. The first factor was the salinity stress with Urmia lake water at three levels (0, 15 and 30 dS/m) and the second factor was foliar spraying polyamines at four levels (spermine, spermidine, putrescine and control (spraying with water)). The results showed that the salinity stress of 30 and 15 ds/m in comparison with the control decreased root diameter (16 and 4 percent), root dry weight (39 and 17 percent), root volume (43 and 31 percent), relative leaf water content (60 and 23 percent), chlorophyll a concentration (57 and 13 percent), chlorophyll b concentration (61 and 21 percent), the number of capsules per plant (52 and 25 percent), the weight of 100 seeds (30 and 5 percent), seed yield (52 and 10 percent), and biological yield (38 and 10 percent), respectively. But salinity stress at 30 and 15 ds/m increased leaf temperature (12 and 6%), carotenoid concentration (56 and 46%), and leaf proline concentration (44 and 40%), respectively. Foliar spraying with spermine, spermidine and putrescine in comparison with no foliar spraying, enhanced the number of capsules per plant (26, 23 and 24%), weight of 100 seeds (28, 17 and 12%) and seed yield (38, 8 and 21 percent), respectively. On the other hand, it reduced the effects of salinity stress. Therefore, it seems that the Camelina plant can tolerate salinity up to 15 dS/m. Foliar spraying with polyamines can be a good approach to improving the tolerance, growth and yield of Camelina under salinity stress conditions.

Keywords: Leaf temperature, Putrescine, Root volume, Spermidine, Spermine