

تأثیر سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم بر شاخص‌های رشدی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) در شرایط کم‌آبیاری

محمد رضا عروجی و الهام دانائی*

گروه علوم باغبانی، واحد گرمسار، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمسار، ایران

چکیده

کم‌آبی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و تولید گیاهان است و شناسایی راهکار جهت افزایش تحمل گیاهان به این تنش از اهمیت کاربردی بالایی برخوردار است. سدیم نیتروپروساید به عنوان دهنده نیتریک اکسید و سیلیکات پتاسیم به عنوان منبع سیلیسیم و پتاسیم نقش مهمی در تحمل گیاه در برابر تنش‌ها دارد. در این پژوهش اثر محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم بر شاخص‌های رشد و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه دارویی رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) تحت سطوح مختلف کم‌آبی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه تجاری واقع در شهرستان کرج انجام شد. تیمارها شامل تنش کم‌آبی (شاهد، ۳۰ و ۷۰ درصد ظرفیت زراعی) و محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید (صفر، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار) و سیلیکات پتاسیم (صفر، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و اثر متقابل آن‌ها بود. اعمال کم‌آبیاری بر اساس روش وزنی و محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم نیز طی سه مرتبه هر دو روز یک‌بار انجام شد. نتایج نشان داد تنش کم‌آبی موجب کاهش معنی‌دار صفات رشدی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی و افزایش نشت یونی و تجمع پرولین شد. در مقابل کاربرد سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم توانست با تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی اثرات مخرب تنش را به‌طور معنی‌داری کاهش دهد. بیشترین وزن تر و خشک اندام هوایی، وزن تر و خشک ریشه، میزان فنل، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز در تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سدیم نیتروپروساید ۵۰ میکرومولار بود. بیشترین طول ریشه، حجم ریشه، ارتفاع گیاه، محتوای کلروفیل کل برگ، میزان فلاونوئید و پروتئین در تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر به‌دست آمد. بیشترین درصد نشت یونی غشاء سلول و میزان پرولین در تیمار ظرفیت زراعی ۳۰ درصد بود. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاربرد سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم می‌تواند به عنوان یک راهکار جهت افزایش تحمل گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) به کم‌آبی و حفظ عملکرد و کیفیت آن در شرایط محدودیت منابع آب مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آنزیم، آنتی‌اکسیدان، سیلیکون، نیتریک اکسید

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲، بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۴، اولین انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲

* نویسنده مسئول، رایانامه: dr.edanaee@iau.ac.ir



حق انتشار این مستند، متعلق به انجمن فیزیولوژی گیاهی ایران است. © ۱۴۰۳

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

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

مقدمه

رززاری (*Rosmarinus officinalis* L.) گیاه چندساله و همیشه سبز از تیره نعناعیان (Lamiaceae) و بومی منطقه مدیترانه است (Novak and Bluthner, 2020). این گیاه به دلیل دارا بودن ترکیبات فنلی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالا، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع غذایی، داروسازی و آرایشی-بهداشتی دارد (Khan et al., 2023). اثر آنتی‌اکسیدانی گیاه رززاری عمدتاً به دلیل وجود دی‌ترپن‌های فنلی مانند متیل کارنوسات، کارنوسول، اسید کارنوسیک و همچنین اسیدهای فنلی مانند اسید کافنیک و اسید رزمارینیک است که این ترکیبات علاوه بر خاصیت آنتی‌اکسیدانی، نقش مهمی در بروز اثرات دارویی رززاری مانند فعالیت‌های ضدالتهابی، ضد میکروبی و محافظت‌کننده عصبی دارند (لطیفی و همکاران، ۱۴۰۳). افزون بر این، رززاری به‌عنوان گیاه پرچینی و پوششی، به دلیل ظاهر همیشه سبز، برگ‌های معطر و گل‌های آبی و بنفش، ارزش زینتی بالایی داشته و در طراحی فضای سبز نیز کاربرد دارد (دانائی و همکاران، ۱۴۰۳).

کم‌آبی یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهان محسوب می‌شود که رشد و عملکرد گیاهان را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. تنش کم‌آبی با کاهش سطح برگ، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش پتانسیل آب سلول، موجب برهم خوردن تعادل اسمزی، تجمع پرولین و محدودیت فتوسنتز می‌شود که این امر افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن را در پی دارد (Kapoor et al., 2020). در پاسخ، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز جهت کاهش تنش اکسیداتیو افزایش می‌یابد. تجمع گونه‌های فعال اکسیژن می‌تواند باعث تخریب غشای سلولی و افزایش نشت یونی شود (Sharma et al., 2020). در نتیجه انتقال الکترون مهارشده و ساختارهای غشایی کلروپلاست و تیلاکوئیدی و رنگدانه‌های فتوسنتزی تخریب می‌شوند که نتیجه آن کاهش شدید فتوسنتز و عملکرد نهایی است (Rady et al., 2020). شدت اثرات تنش کم‌آبی به عواملی مانند مدت و شدت تنش، مرحله رشدی و گونه گیاهی بستگی دارد

(الحوشان و همکاران، ۱۳۹۸). تحقیقات نشان داده است که در گیاه همیشه‌بهار (*Calendula officinalis* L.) تنش کم‌آبی منجر به کاهش وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، ارتفاع گیاه و طول ریشه و محتوای کلروفیل و کاروتنوئید و میزان فنل و فلاونوئید گیاه گردید (Soroori and Danaee, 2023). در گیاه آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) نیز تنش کم‌آبی وزن تر و خشک اندام هوایی ریشه، محتوای کلروفیل کل و کاروتنوئید را کاهش داد درحالی‌که میزان نشت الکترولیت، پرولین، فلاونوئید و آنتوسیانین و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پلی‌فنل اکسیداز را افزایش داد (کامیاب و همکاران، ۱۴۰۴). در پژوهشی دیگر بر گیاه رززاری (*Rosmarinus officinalis* L.) تنش کم‌آبی منجر به کاهش محتوای نسبی آب و کلروفیل کل گردید درحالی‌که میزان کاروتنوئید، اسانس، کربوهیدرات محلول، فنل کل، فلاونوئید، پروتئین، نشت یونی، پرولین و فعالیت آنزیم کاتالاز را افزایش داد (شمسای و همکاران، ۱۳۹۹).

سدیم نیتروپروساید (SNP) یکی از ترکیباتی است که اخیراً به‌منظور کاهش اثرات تنش در گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ترکیب آزادکننده نیتریک اکسید (NO) است که به‌عنوان یک عامل آنتی‌اکسیدانی، موجب پاکسازی گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، توسعه توانایی غشا سلول، بهبود فتوسنتز و وضعیت آب برگ می‌شود که در نتیجه باعث افزایش عملکرد گیاه می‌شود (اصغری و همکاران، ۱۳۹۹). با این حال، نقش حفاظتی نیتریک اکسید در گیاهان بستگی به غلظت آن، گونه گیاهی و نوع تنش دارد (گرگینی‌شبانکاره و خراسانی‌نژاد، ۱۳۹۶). برای مثال در پژوهشی کاربرد سدیم نیتروپروساید در شرایط تنش شوری، درصد ماده خشک، سطح برگ، محتوای کاروتنوئید و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گل مغربی (*Oenothera biennis* L.) را افزایش و میزان نشت الکترولیت را کاهش داد (علیزاده سالطه و همکاران، ۱۴۰۳). همچنین در گیاه مرزنجوش (*Origanum marjorana*) نیز کاربرد سدیم نیتروپروساید موجب بهبود رشد گیاه، حفظ محتوای نسبی آب برگ و افزایش محتوای کلروفیل و کاروتنوئید در شرایط تنش خشکی گردید (Farouk and Al-ghamdi, 2021). در گیاه

مواد و روش‌ها

کاشت گیاه و اعمال تیمارها: به منظور بررسی اثر سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم بر شاخص‌های رشدی و فعالیت آن‌تی‌اکسیدانی گیاه رزماری در شرایط کم‌آبی، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه‌ای تجاری واقع در شهرستان کرج اجرا شد. تیمارها شامل تنش کم‌آبی (شاهد، ۳۰ و ۷۰ درصد ظرفیت زراعی) و محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید (صفر، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار) و سیلیکات پتاسیم (صفر، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و اثر متقابل آن‌ها بود (جدول ۱). برای انجام آزمایش، ابتدا قلمه‌های یکسان و یک اندازه رزماری در بستری سبک و مرطوب حاوی پیت‌ماس و خاک‌برگ به صورت گلدانی کشت شدند. پس از سه ماه قلمه‌ها به گلدان‌هایی با قطر دهانه ۱۹/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر که حاوی ۶ کیلوگرم خاک (۶۰ درصد شن، ۲۸ درصد سیلت و ۱۲ درصد رس) بودند، منتقل شدند. شرایط گلخانه شامل در شرایط نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی با دمای 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد بود. پس از استقرار گیاهان، تیمار کم‌آبیاری براساس روش وزنی اعمال شد. ابتدا سه گلدان به‌طور تصادفی انتخاب و به‌طور کامل آبیاری شد، پس از خروج آب ثقلی و ثابت شدن وزن گلدان، نمونه‌ای از خاک گلدان برداشت (به‌عنوان وزن خاک مرطوب) و توزین شد، سپس نمونه خاک در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفت و وزن خاک خشک اندازه‌گیری شد و طبق فرمول (۱) زیر ظرفیت زراعی اندازه‌گیری شد (سروری و همکاران، ۱۴۰۱).

(۱)

$$\text{ظرفیت زراعی خاک} = \frac{(\text{وزن تر خاک} - \text{وزن خشک خاک})}{\text{وزن خشک خاک}} \times 100$$

محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم طی سه مرتبه هر دو روز یک‌بار بعد از اعمال تنش به میزان ۱۵۰ میلی‌لیتر انجام شد. نمونه‌برداری و ارزیابی صفات حدود ۲ هفته پس از آخرین محلول‌پاشی صورت گرفت.

صفات مورفولوژیک: وزن تر اندام هوایی و ریشه

رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) نیز کاربرد سدیم نیتروپروساید در شرایط تنش شوری ارتفاع گیاه، تعداد برگ و شاخه فرعی و وزن تر ریشه را افزایش داد (قضایی، ۱۴۰۱).

یکی دیگر از راهکارهای مؤثر در کاهش اثرات منفی ناشی از تنش کم‌آبی، استفاده از سیلیکات پتاسیم است. سیلیسیم با تقویت دیواره سلولی، افزایش فعالیت آنزیم‌های آن‌تی‌اکسیدانی، تشکیل کمپلکس‌های پایدار با عناصر سمی و بهبود دسترسی گیاه به عناصر غذایی از طریق اصلاح خصوصیات خاک، اثرات تنش‌های زیستی و غیرزیستی را کاهش می‌دهد (Pavlovic et al., 2021). پتاسیم نیز به‌عنوان یکی از عناصر ضروری پرمصرف، در تنظیم تعادل آب در سلول، حفظ فشار اسمزی، فعال‌سازی بسیاری از آنزیم‌های متابولیکی، افزایش کارایی مصرف آب و بهبود انتقال مواد فتوسنتزی نقش اساسی دارد (Fang et al., 2022). در پژوهشی تیمار سیلیکات پتاسیم در گیاه برگ نو (*Ligustrum vulgare* L.) موجب بهبود رشد رویشی و افزایش محتوای کلروفیل کل، فعالیت آن‌تی‌اکسیدانی، میزان فنل و کربوهیدرات کل در شرایط تنش کم‌آبی گردید و نشأت الکترولیت و میزان پرولین را کاهش داد (محمدعباس الوای و همکاران، ۱۴۰۳). همچنین در گیاه مینا چمنی (*Bellis perennis*) نیز کاربرد سیلیکات پتاسیم فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز و محتوای کلروفیل کل، میزان پروتئین، فنل، فلاونوئید و کربوهیدرات کل را در شرایط تنش کم‌آبی افزایش داد (Oraee et al., 2024).

با وجود مطالعات متعدد درباره اثر این ترکیبات در گیاهان مختلف، اطلاعات کافی در مورد تأثیر سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه رزماری تحت شرایط تنش کم‌آبی وجود ندارد. لذا با توجه به نقش ترکیبات سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم در افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی، پژوهش حاضر به‌منظور مطالعه اثر سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم بر خصوصیات رویشی و بیوشیمیایی گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) انجام شد.

جدول ۱- تیمارها و سطوح آنها

| ردیف | تیمار |
|------|---|
| ۱ | شاهد (ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد) |
| ۲ | سدیم نیتروپروساید ۲۵ میکرومولار |
| ۳ | سدیم نیتروپروساید ۵۰ میکرومولار |
| ۴ | سدیم نیتروپروساید ۱۰۰ میکرومولار |
| ۵ | سیلیکات پتاسیم ۲۵ میلی گرم در لیتر |
| ۶ | سیلیکات پتاسیم ۵۰ میلی گرم در لیتر |
| ۷ | سیلیکات پتاسیم ۱۰۰ میلی گرم در لیتر |
| ۸ | ظرفیت زراعی ۷۰ درصد |
| ۹ | ظرفیت زراعی ۳۰ درصد |
| ۱۰ | ظرفیت زراعی ۷۰ درصد + سدیم نیتروپروساید ۲۵ میکرومولار |
| ۱۱ | ظرفیت زراعی ۷۰ درصد + سدیم نیتروپروساید ۵۰ میکرومولار |
| ۱۲ | ظرفیت زراعی ۷۰ درصد + سدیم نیتروپروساید ۱۰۰ میکرومولار |
| ۱۳ | ظرفیت زراعی ۷۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۲۵ میلی گرم در لیتر |
| ۱۴ | ظرفیت زراعی ۷۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۵۰ میلی گرم در لیتر |
| ۱۵ | ظرفیت زراعی ۷۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۱۰۰ میلی گرم در لیتر |
| ۱۶ | ظرفیت زراعی ۳۰ درصد + سدیم نیتروپروساید ۲۵ میکرومولار |
| ۱۷ | ظرفیت زراعی ۳۰ درصد + سدیم نیتروپروساید ۵۰ میکرومولار |
| ۱۸ | ظرفیت زراعی ۳۰ درصد + سدیم نیتروپروساید ۱۰۰ میکرومولار |
| ۱۹ | ظرفیت زراعی ۳۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۲۵ میلی گرم در لیتر |
| ۲۰ | ظرفیت زراعی ۳۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۵۰ میلی گرم در لیتر |
| ۲۱ | ظرفیت زراعی ۳۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۱۰۰ میلی گرم در لیتر |

آن‌ها (EC_2) اندازه‌گیری شد و در نهایت مقادیر نشت یونی (Membrane stainability index, MSI) از طریق رابطه (۲) محاسبه شد (الهویردی زاده و دانائی، ۱۴۰۲).

(۲)

$$MSI = [1 - (EC_1/EC_2)] \times 100$$

کلروفیل کل: جهت اندازه‌گیری محتوای کلروفیل کل، از محلول دی‌متیل سولفوکساید (DMSO) استفاده شد. جذب محلول به دست آمده با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۶۶۳ نانومتر برای کلروفیل a، ۶۴۵ نانومتر برای کلروفیل b خوانده شد. در نهایت کلروفیل کل از طریق رابطه (۳) برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه شد (Danaee

بلافاصله پس از برداشت و وزن خشک پس از ۷۲ ساعت قرارگیری در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد با دقت ۰/۰۱ گرم توزین شد. ارتفاع گیاه و طول ریشه توسط متر فلزی اندازه‌گیری شد. همچنین تعداد برگ و گل‌های گیاهان از طریق شمارش محاسبه و میانگین آن‌ها ثبت گردید. حجم ریشه با استفاده از استوانه مدرج، اندازه‌گیری و برحسب سانتی‌متر مکعب محاسبه شد (محمدعباس الوای و همکاران، ۱۴۰۳).

نشت یونی غشاء سلول: برای اندازه‌گیری نشت یونی، با استفاده از EC متر رسانایی الکتریکی عصاره (EC_1) اندازه‌گیری شد و سپس نمونه‌ها در اتوکلاو به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و مجدداً رسانایی الکتریکی

(and Abdossi, 2021).

(۳)

$$\text{Chl } t = [20.2 (A645) + 8.02 (A663)] \times V / (1000 \times W)$$

A = طول موج، V = حجم نمونه و W = وزن نمونه

فنل کل: میزان فنل کل با استفاده از عصاره متانولی و معرف فولین- سیکالچو اندازه‌گیری شد و میزان جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی نوری در طول موج ۷۶۰ خوانده شد و برحسب میلی‌گرم (گالیک اسید) بر گرم وزن تر محاسبه شد (Mohammadi et al., 2024).

فلاونوئید: میزان فلاونوئید با استفاده از عصاره متانولی به روش Chang و همکاران (۲۰۰۲)، اندازه‌گیری و جذب نمونه‌ها در طول موج ۴۱۵ نانومتر خوانده شد و در نهایت برحسب میلی‌گرم (کوئرستین) بر گرم وزن تر بیان شد.

پرولین: میزان پرولین گیاه رزماری براساس روش شرح داده‌شده توسط Shabani Fard و همکاران (۲۰۲۴) استخراج شد و جذب محلول رویی در طول موج ۵۲۰ نانومتر به‌وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر، خوانده گردید و برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر بیان شد.

پروتئین: اندازه‌گیری پروتئین با استفاده از روش Bradford (۱۹۷۶) انجام شد و میزان جذب در طول موج ۵۹۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. میزان پروتئین برحسب میکروگرم در میلی‌گرم وزن تر محاسبه شد.

فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز: فعالیت آنزیم کاتالاز با استفاده از محلول واکنش شامل ۲۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی، ۹۸۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم حاوی آب اکسیژنه ۲ میلی‌مولار مخلوط شد و تغییرات جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز از طریق توانایی مهار فتوشیمیایی نیتروبلوترازولیوم به فومازان توسط رادیکال‌های سوپراکسید ارزیابی شد. در ابتدا به ۲۰ میکرولیتر عصاره آنزیم، ۱ میلی‌لیتر از محلول محتوی (بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH=۷/۸)، متیونین ۹/۹ میلی‌مولار، نیتروبلوترازولیوم ۵۷ میکرومولار و تریتون ۰/۰۲۵ درصد)، به یک

تیوپ شیشه‌ای کوچک افزوده و واکنش با اضافه نمودن ریبولوین ۱۰ میکرولیتر و قراردادن نمونه‌ها در جعبه حاوی دو لامپ فلوروسنت برای ۷ دقیقه انجام شد. نمونه شاهد نیز در نظر گرفته شد و در نهایت توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۶۰ میزان جذب نور خوانده شد. فعالیت آنزیم پراکسیداز نیز با استفاده از ۴۹۰ میکرولیتر آب اکسیژنه ۲۲۵ میلی‌مولار و ۴۹۰ میکرولیتر محلول گایاکول ۴۵ میلی‌مولار با هم مخلوط گردید و به آن ۲۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی اضافه شد و در نهایت تغییرات جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷). فعالیت آنزیم‌ها برحسب واحد آنزیم در گرم وزن تر محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل آماری در این مطالعه به‌وسیله نرم‌افزار آماری SPSS23 و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت. برای رسم نمودار از نرم‌افزار Excel 16 استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد، اثر تنش کم‌آبایی بر ارتفاع گیاه، محتوای کلروفیل کل برگ و میزان پروتئین در سطح ۵ درصد و وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، طول بلندترین ریشه، حجم ریشه، درصد نشت یونی غشاء سلول، میزان پرولین، میزان فنل و فلاونوئید، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. اثر تیمار محلول‌پاشی نیز بر طول بلندترین ریشه، حجم ریشه، محتوای کلروفیل کل برگ، میزان فنل و فلاونوئید در سطح ۵ درصد و وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، درصد نشت یونی غشاء سلول، میزان پرولین، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز در سطح ۱ درصد، معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل تنش کم‌آبایی و تیمار محلول‌پاشی نیز بر کلیه صفات مورد ارزیابی در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲).

صفات مورفولوژیک: مقایسه میانگین داده‌ها در جدول ۳

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم بر خصوصیات مورفولوژیک و بیوشیمیایی رزماری (*Rosmarinus officinalis L.*) در شرایط تنش کم آبی

| میانگین مربعات | | | | | | | | | |
|------------------|------------|---------------------|--------------------|--------------|-------------|-------------|----------|-------------------|--------------------|
| منبع تغییرات | درجه آزادی | وزن خشک اندام هوایی | وزن تر اندام هوایی | وزن خشک ریشه | وزن تر ریشه | ارتفاع گیاه | حجم ریشه | طول بلندترین ریشه | نشت یونی غشاء سلول |
| تیمار | ۶ | ۱۱/۲۶** | ۴۷/۳۲** | ۵/۴۷** | ۱۷/۳۴** | ۹۳/۴۶** | ۱۴/۹۶* | ۱۰۲/۶۳* | ۹۸/۶۸** |
| کم آبیاری | ۲ | ۳/۳۹** | ۷/۲۵** | ۱/۰۳** | ۳/۴۷** | ۱۹/۵۶* | ۲/۸۵** | ۱۹/۲۶** | ۲۱/۱۷** |
| تیمار×کم آبیاری | ۱۲ | ۷/۱۸** | ۱۹/۸۶** | ۲/۶۴** | ۸/۵۳** | ۳۸/۷۲** | ۶/۳۴** | ۴۸/۷۵** | ۴۱/۹۱** |
| اشتباه آزمایشی | ۴۲ | ۰/۴۳۷ | ۱/۱۳۵ | ۰/۰۷۵ | ۰/۶۶۸ | ۱/۱۲۵ | ۰/۵۱۲ | ۱/۶۶۴ | ۱/۳۶۵ |
| ضربت تغییرات (%) | - | ۱۰/۳۹ | ۱۰/۸۶ | ۱۱/۲۶ | ۹/۳۵ | ۱۰/۶۹ | ۱۱/۷۶ | ۱۰/۴۲ | ۱۰/۴۵ |

**،* به ترتیب، معنی دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد

ادامه جدول ۲-

| میانگین مربعات | | | | | | | | | |
|------------------|------------|----------------|-----------|---------|---------|----------|---------|--------------------|-----------|
| منبع تغییرات | درجه آزادی | کلروفیل کل برگ | فلاونوئید | فنل | پرولین | پروتئین | کاتالاز | سوپراکسید دیسموتاز | پراکسیداز |
| تیمار | ۶ | ۲۷/۳۹* | ۱۳/۴۳* | ۳۸/۱۸* | ۱۰/۴۶** | ۲۱۲/۵۶** | ۲۳/۷۱** | ۱۳/۲۶** | ۸۷/۴۸** |
| کم آبیاری | ۲ | ۷/۲۱* | ۲/۸۵** | ۷/۴۲** | ۲/۱۷** | ۴۳/۷۸* | ۳/۳۸** | ۲/۱۶** | ۱۶/۹۲** |
| تیمار×کم آبیاری | ۱۲ | ۱۱/۴۵** | ۶/۷۹** | ۱۶/۳۸** | ۶/۳۸** | ۹۷/۱۶** | ۹/۴۷** | ۵/۴۹** | ۳۵/۴۷** |
| اشتباه آزمایشی | ۴۲ | ۰/۶۲۸ | ۰/۴۱۶ | ۰/۸۷۳ | ۰/۳۹۶ | ۲/۱۱۳ | ۰/۵۲۱ | ۰/۴۶۴ | ۱/۰۱۳ |
| ضربت تغییرات (%) | - | ۱۱/۲۳ | ۱۱/۶۹ | ۹/۴۱ | ۱۰/۲۴ | ۱۱/۰۹ | ۹/۷۸ | ۱۰/۸۳ | ۱۰/۵۶ |

**،* به ترتیب، معنی دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد

بیشترین طول ریشه با ۲۵/۳۲ سانتی متر و کمترین با ۱۶/۸۱ سانتی متر به ترتیب در تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۱۰۰ میلی گرم در لیتر و ظرفیت زراعی ۳۰ درصد مشاهده شد. حجم ریشه نیز با ۳/۶۵ سانتی متر مکعب در تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۱۰۰ میلی گرم در لیتر و کمترین با ۱/۹۲ سانتی متر مکعب در تیمار ظرفیت زراعی ۳۰ درصد بود. بیشترین ارتفاع گیاه نیز با ۲۱/۷۳ سانتی متر در تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۱۰۰ میلی گرم در لیتر و کمترین با ۱۴/۱۱ سانتی متر در تیمار ظرفیت زراعی ۳۰ درصد به دست آمد. در شرایط تنش کم آبی، کاهش جذب آب و بسته شدن روزنه ها منجر به کاهش

نشان داد، افزایش سطوح تنش کم آبی موجب کاهش معنی دار صفات رویشی گیاه گردید درحالی که محلول پاشی گیاه توسط سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم توانست از شدت آسیب تنش بر رشد رویشی گیاه بکاهد. به طوری که بیشترین وزن تر و خشک اندام هوایی (۱۵/۳۲-۴/۸۵ گرم) در تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سدیم نیتروپروساید ۵۰ میکرومولار و کمترین (۷/۳۹-۲/۶۳ گرم) در تیمار ظرفیت زراعی ۳۰ درصد به دست آمد. همچنین بیشترین وزن تر و خشک ریشه (۴/۱۲-۱/۰۴ گرم) در تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سدیم نیتروپروساید ۵۰ میکرومولار و کمترین (۲/۳۲-۰/۴۲ گرم) در تیمار ظرفیت زراعی ۳۰ درصد حاصل شد.

جدول ۳- مقایسه میانگین غلظت‌های مختلف سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم بر شاخص‌های رشدی رزماری (*Rosmarinus officinalis L.*) در شرایط تنش کم‌آبی

| ظرفیت زراعی (درصد) | محل پانته | غلظت | وزن تر اندام هوایی (گرم) | وزن خشک اندام هوایی (گرم) | وزن تر ریشه (گرم) | وزن خشک ریشه (گرم) | ارتفاع گیاه (سانتی‌متر) | طول ریشه (سانتی‌متر) | حجم ریشه (سانتی‌متر مکعب) | |
|--------------------|--------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|---------------------|
| شاهد (۱۰۰) | شاهد | صفر | ۱۴/۰۲ ^f | ۳/۵۲ ^f | ۳/۷۱ ^f | ۰/۸۹ ^e | ۳/۳۹ ^e | ۲۲/۶۸ ^f | ۱۹/۴۵ ^{cd} | |
| | سدیم | ۲۵ میکرومولار | ۱۴/۷۸ ^{cd} | ۳/۶۹ ^d | ۳/۹۲ ^{cd} | ۰/۹۷ ^{bc} | ۳/۴۹ ^{bc} | ۲۳/۸۷ ^{cd} | ۲۰/۴۸ ^b | |
| | نیتروپروساید | ۵۰ میکرومولار | ۱۵/۳۲ ^a | ۳/۸۳ ^a | ۴/۱۲ ^a | ۱/۰۴ ^a | ۳/۶۱ ^a | ۲۴/۸۹ ^b | ۲۱/۵۵ ^a | |
| | | ۱۰۰ میکرومولار | ۱۴/۱۸ ^e | ۳/۵۵ ^e | ۳/۷۵ ^e | ۰/۹۲ ^d | ۳/۳۶ ^d | ۲۳/۲۱ ^e | ۱۹/۶۷ ^d | |
| | سیلیکات | ۲۵ میلی‌گرم در لیتر | ۱۴/۷۱ ^d | ۳/۷۵ ^b | ۳/۸۶ ^d | ۰/۹۶ ^c | ۳/۴۳ ^c | ۲۳/۷۶ ^d | ۲۰/۱۳ ^c | |
| | پتاسیم | ۵۰ میلی‌گرم در لیتر | ۱۴/۸۹ ^c | ۳/۷۱ ^c | ۳/۹۷ ^c | ۰/۹۸ ^b | ۳/۵۴ ^b | ۲۴/۰۱ ^c | ۲۰/۸۹ ^b | |
| | | ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر | ۱۵/۲۵ ^b | ۳/۸۱ ^a | ۴/۰۷ ^b | ۱/۰۳ ^a | ۳/۶۵ ^a | ۲۵/۳۲ ^a | ۲۱/۷۳ ^a | |
| | ۷۰ | شاهد | صفر | ۱۱/۶۳ ^m | ۲/۹۲ ^m | ۳/۰۴ ^l | ۰/۶۹ ^l | ۲/۵۸ ^l | ۲۰/۳۷ ^k | ۱۶/۰۶ ^j |
| | | سدیم | ۲۵ میکرومولار | ۱۳/۰۱ ^j | ۳/۲۳ ^j | ۳/۲۲ ^k | ۰/۷۸ ⁱ | ۲/۹۲ ^h | ۲۱/۱۳ ⁱ | ۱۸/۲۵ ^{gh} |
| | | نیتروپروساید | ۵۰ میکرومولار | ۱۳/۸۶ ^g | ۳/۴۸ ^g | ۳/۵۷ ^h | ۰/۸۴ ^g | ۳/۱۶ ^f | ۲۲/۲۶ ^g | ۱۹/۱۶ ^f |
| | | | ۱۰۰ میکرومولار | ۱۱/۹۴ ^l | ۲/۹۷ ^l | ۳/۰۶ ^l | ۰/۷۱ ^k | ۲/۷۴ ^k | ۲۰/۱۱ ^k | ۱۶/۴۵ ⁱ |
| | | سیلیکات | ۲۵ میلی‌گرم در لیتر | ۱۲/۷۵ ^k | ۳/۱۶ ^k | ۳/۳۱ ^j | ۰/۷۴ ^j | ۲/۸۶ ^j | ۲۰/۶۷ ^j | ۱۷/۱۸ ^h |
| پتاسیم | | ۵۰ میلی‌گرم در لیتر | ۱۳/۲۱ ⁱ | ۳/۳۱ ⁱ | ۳/۴۲ ⁱ | ۰/۸۱ ^h | ۲/۹۸ ⁱ | ۲۱/۴۵ ^h | ۱۷/۵۷ ^g | |
| | | ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر | ۱۳/۶۴ ^h | ۳/۴۲ ^h | ۳/۶۴ ^g | ۰/۸۶ ^f | ۳/۲۵ ^g | ۲۲/۳۸ ^g | ۱۸/۷۳ ^e | |
| ۳۰ | | شاهد | صفر | ۹/۴۳ ^r | ۲/۳۱ ^r | ۲/۳۲ ^r | ۰/۴۲ ^r | ۱/۹۲ ^q | ۱۶/۸۱ ^p | ۱۴/۱۱ ^p |
| | | سدیم | ۲۵ میکرومولار | ۱۰/۱۹ ^{op} | ۲/۵۱ ^{op} | ۲/۷۸ ⁿ | ۰/۵۰ ^{op} | ۲/۳۱ ⁿ | ۱۸/۲۷ ^{mn} | ۱۵/۲۳ ^{mn} |
| | | نیتروپروساید | ۵۰ میکرومولار | ۱۰/۹۸ ⁿ | ۲/۷۲ ⁿ | ۲/۹۴ ^m | ۰/۶۱ ^m | ۲/۴۳ ^m | ۱۹/۱۲ ^l | ۱۵/۸۵ ^l |
| | | | ۱۰۰ میکرومولار | ۹/۶۱ ^q | ۲/۳۵ ^q | ۲/۴۷ ^q | ۰/۴۵ ^q | ۲/۱۲ ^p | ۱۷/۲۶ ^o | ۱۴/۴۲ ^o |
| | | سیلیکات | ۲۵ میلی‌گرم در لیتر | ۹/۹۷ ^p | ۲/۴۶ ^p | ۲/۵۶ ^p | ۰/۴۹ ^p | ۲/۲۶ ^o | ۱۷/۸۵ ⁿ | ۱۴/۷۹ ⁿ |
| | پتاسیم | ۵۰ میلی‌گرم در لیتر | ۱۰/۳۴ ^o | ۲/۵۷ ^o | ۲/۶۹ ^o | ۰/۵۲ ^o | ۱۵/۰۲ ^{no} | ۱۸/۳۲ ^m | ۲/۳۵ ^m | |
| | | ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر | ۱۰/۸۷ ⁿ | ۲/۷۵ ⁿ | ۲/۹۱ ^m | ۰/۵۹ ⁿ | ۱۵/۷۶ ^m | ۱۹/۲۵ ^l | ۲/۵۱ ^k | |

حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح $P \leq 0.05$ است.

Catharanthus roseous) را در شرایط تنش کم‌آبی شدید گزارش نمودند. در این پژوهش کاربرد سدیم نیتروپروساید موجب افزایش وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه گیاه رزماری در شرایط تنش کم‌آبی شد که نشان‌دهنده نقش حفاظتی نیتریک اکسید در کاهش اثرات منفی تنش است. این

فتوستز و محدودیت در تولید مواد فتوسنتزی می‌شود همچنین در این شرایط تقسیم سلولی نیز کاهش پیدا کرده و در نتیجه موجب به کاهش خصوصیات رویشی گیاه می‌گردد (Seleiman et al., 2021). مشاهدات الهویردی و دانائی (۱۴۰۲) نیز کاهش خصوصیات رویشی گیاه پروانش

یافته با نتایج گزارش شده در گیاه مرزه (*Satureja hortensis*) همسو است که در آن کاربرد سدیم نیتروپروساید سبب بهبود رشد رویشی تحت تنش کم آبی گردید. این اثر مثبت احتمالاً به توانایی نیتریک اکسید در کاهش تنش اکسیداتیو، حفظ یکپارچگی غشای سلولی و بهبود کارایی فتوسنتز مرتبط است (Salachna and Zawadzinska, 2018). همچنین کاربرد سیلیکات پتاسیم در پژوهش حاضر موجب افزایش طول و حجم ریشه و ارتفاع گیاه شد که نشان دهنده نقش مؤثر این ترکیب در بهبود رشد ریشه و توسعه اندام هوایی در شرایط کم آبی است. این نتایج با یافته‌های محمدعباس الوای و همکاران (۱۴۰۳) در گیاه پرچینی برگ نو (*Ligustrum vulgare* L.) مطابقت دارد زیرا کاربرد سیلیکات پتاسیم توانست طول و حجم ریشه و ارتفاع گیاه را در شرایط کم آبی بهبود بخشد. سیلیکات پتاسیم از طریق تقویت دیواره سلولی، بهبود جذب آب و کاهش آسیب‌های ناشی از تنش اکسیداتیو، شرایط مناسب‌تری برای توسعه سلولی فراهم می‌کند. علاوه بر این، افزایش فتوسنتز و تجمع کربوهیدرات‌های درون‌یاخته‌ای در اثر حضور سیلیسیم می‌تواند به افزایش نفوذ آب به سلول و تسهیل رشد ریشه و اندام هوایی منجر شود (جلیل‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷).

نشت یونی غشاء سلول: نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد، با افزایش شدت تنش کم آبی نشت یونی غشاء سلول افزایش یافت و کاربرد سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم به‌طور معنی‌داری نشت یونی غشاء سلول را کاهش داد به‌طوری‌که بیشترین نشت یونی غشاء سلول با ۵۴/۰۷ درصد در تیمار ظرفیت زراعی ۳۰ درصد و کمترین با ۲۵/۱۲ درصد در تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد (شکل ۱). افزایش نشت یونی در شرایط کم آبی نشان‌دهنده کاهش پایداری غشای سلولی در اثر شدت بالای تنش در گیاه رزماری است. تنش کم آبی موجب افزایش تولید و تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (رادیکال‌های سوپراکسید، هیدروژن پراکسید و رادیکال‌های هیدروکسیل) می‌شود. در نتیجه موجب آسیب غشا پلاسمایی و

پراکسیداسیون چربی‌ها و پروتئین‌ها می‌شود و تراوایی غشای سلولی و نشت الکترولیت‌ها را افزایش می‌دهد (محمدعباس الوای و همکاران، ۱۴۰۳). در این پژوهش، سیلیکات پتاسیم در مقایسه با سدیم نیتروپروساید اثر کاهنده قوی‌تری بر نشت یونی غشاء سلول، در شرایط کم آبی شدید، نشان داد که بیانگر اولویت مکانیسمی این تیمار در حفظ پایداری غشایی است. سیلیکون موجود در سیلیکات پتاسیم، به عنوان یک عنصر غیرمتحرک در داخل گیاه به ژل پلیمری تبدیل می‌شود و پس از رسوب در داخل سلول نشت یون را کاهش می‌دهد همچنین سیلیکون موجب افزایش سخت‌شدن و استحکام دیواره سلول می‌شود و پتاسیم نیز در تنظیم فشار اسمزی و تعادل یونی نقش دارد (اورعی و همکاران، ۱۴۰۲a). نتایج این آزمایش با نتایج بیژن و همکاران (۱۳۹۷) پیرامون تأثیر سیلیکات پتاسیم بر نشت یونی غشاء سلول در گیاه آلترناترا (*Alternanthera repens* L.) هم‌راستا است.

در مقابل، اگرچه سدیم نیتروپروساید نیز موجب کاهش معنی‌دار نشت یونی شد، اما اثر آن در مقایسه با سیلیکات پتاسیم محدودتر بود که می‌تواند ناشی از تفاوت در مکانیسم اثر این ترکیب باشد، به‌طوری‌که سدیم نیتروپروساید عمدتاً از طریق تنظیم وضعیت اکسید - احیا و کاهش تنش اکسیداتیو عمل می‌کند و نقش ساختاری مستقیمی در تقویت غشاء سلولی ندارد (Salachna and Zawadzinska, 2018).

کلروفیل کل برگ: نتایج نشان داد، محتوای کلروفیل کل در شرایط تنش کم آبی کاهش یافت درحالی‌که در تمام تیمارهای محلول‌پاشی روند افزایشی نشان داد، بیشترین محتوای کلروفیل کل برگ با ۶/۶۵ میلی‌گرم در گرم وزن تر در تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و کمترین با ۴/۱۶ میلی‌گرم در گرم وزن تر در تیمار ظرفیت زراعی ۳۰ درصد مشاهده شد (شکل ۲). کاهش کلروفیل کل در شرایط تنش کم آبی می‌تواند مربوط به بسته شدن روزنه‌ها و یا اختلال و آسیب به پروتئین‌های ساختاری که در فتوسیستم‌ها به کار رفته‌اند؛ باشد. همچنین یکی دیگر از دلایل کاهش کلروفیل در شرایط تنش فعالیت آنزیم کلروفیل‌از



شکل ۱- اثر سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم بر نشت یونی غشاء سلول گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) در شرایط تنش کم‌آبی. ستون‌ها دارای حروف مشابه، براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (میانگین \pm SD).



شکل ۲- اثر سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم بر محتوای کلروفیل کل گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) در شرایط تنش کم‌آبی. ستون‌ها دارای حروف مشابه، براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (میانگین \pm SD).

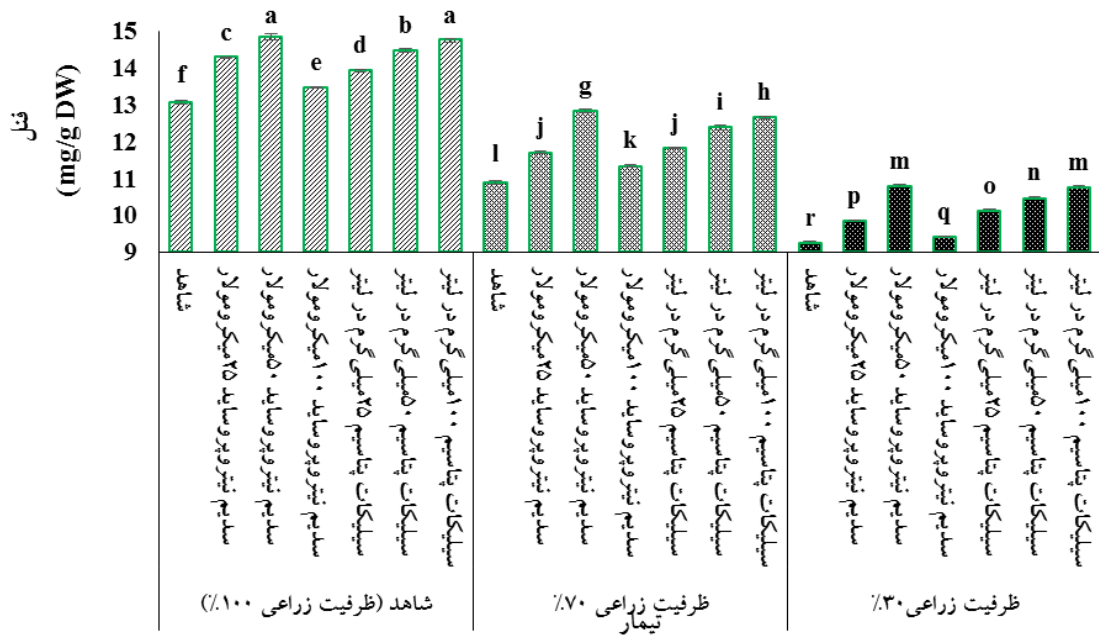
است که در این شرایط بیان ژن این آنزیم القا می‌شود (سروری و همکاران، ۱۴۰۱). در گیاه بگونیا پرگل (*Begonia*

semperflorens) نیز کاهش محتوای کلروفیل کل در شرایط تنش کم‌آبی شدید گزارش شده است (Zhao et al., 2024). در این پژوهش، کاربرد سیلیکات پتاسیم و سدیم نیتروپروساید، اثر تقریباً مشابهی در افزایش کلروفیل کل برگ داشتند. اما با این حال، کاربرد سیلیکات پتاسیم تأثیر بیشتری بر محتوای کلروفیل کل رزماری نشان داد، زیرا سیلیکات پتاسیم با تأمین هم‌زمان سیلیکون و پتاسیم، از چند مسیر به افزایش کلروفیل در برگ‌ها کمک می‌کند. سیلیکون با رسوب در دیواره و اپیدرم برگ موجب پایداری غشاء و کاهش تخریب رنگ‌دانه‌ها می‌شود. همچنین تقویت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی توسط سیلیکون باعث کاهش استرس اکسیداتیو و جلوگیری از اکسیداسیون کلروفیل می‌گردد (Khan et al., 2019). علاوه بر این، سیلیکون جذب و جابجایی عناصر کلیدی مانند آهن و پتاسیم را بهبود می‌بخشد و شرایط زیست‌متابولیکی لازم برای سنتز کلروفیل را فراهم می‌آورد (مهربان‌جوینی و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین پتاسیم موجود در سیلیکات پتاسیم نیز با نقش اساسی در فعال‌سازی آنزیم‌ها، تنظیم فشار اسمزی و بهبود عملکرد روزه‌ها، به‌طور مستقیم فرآیند فتوسنتز و در نتیجه تولید و پایداری کلروفیل را حمایت می‌کند (Mohammadi et al., 2024). از سوی دیگر، سدیم نیتروپروساید نیز از طریق آزادسازی نیتریک اکسید و کاهش تنش اکسیداتیو، حفظ کلروفیل و بهبود کارایی فتوسنتز را تسهیل می‌کند (Salachna and Zawadzinska, 2018). مشابه یافته‌های این پژوهش، اثر سیلیکات پتاسیم در افزایش محتوای کلروفیل کل در گیاه کاسنی (*Cichorium intybus* L.) در شرایط تنش شوری گزارش شده است (Mohammadi et al., 2024).

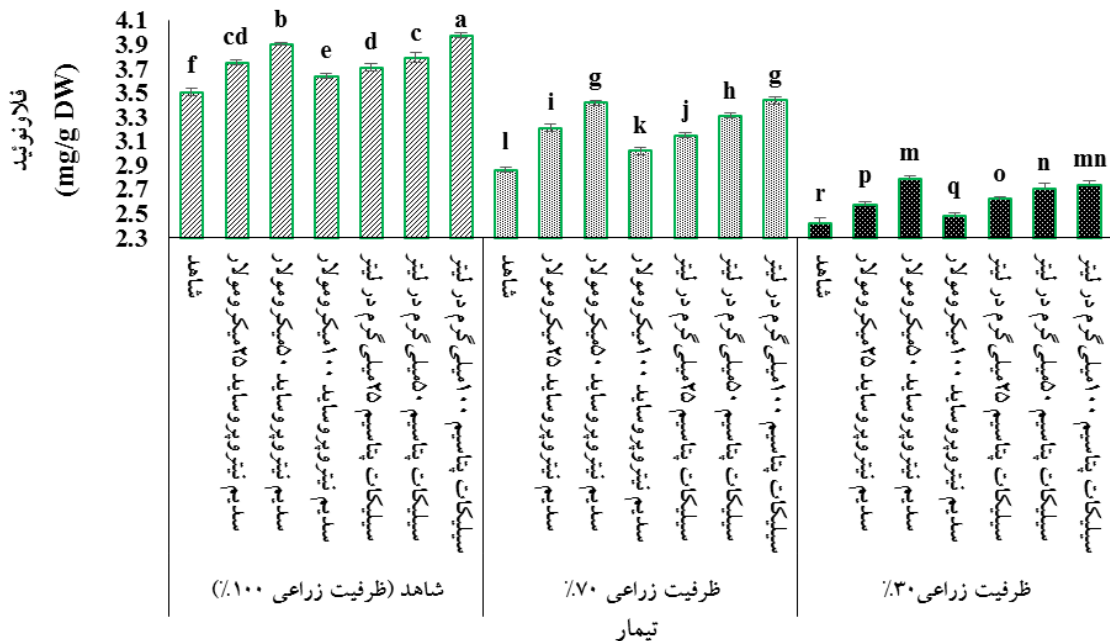
فنل: مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد، تنش کم‌آبی میزان فنل گیاه را کاهش داد و محلول‌پاشی گیاه توسط سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم تأثیر مثبتی بر میزان فنل گیاه رزماری نشان داد. بیشترین میزان فنل به ترتیب با ۱۴/۸۴ میلی‌گرم در گرم وزن خشک در تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سدیم نیتروپروساید ۵۰ میکرومولار بود که با تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌گرم

در لیتر اختلاف معنی‌داری نداشت و کمترین با ۹/۲۵ میلی‌گرم در گرم در تیمار ظرفیت زراعی ۳۰ درصد به دست آمد (شکل ۳). در شرایط تنش کم‌آبی، کاهش دسترسی گیاه به آب موجب اختلال در متابولیسم کربوهیدرات‌ها و مسیرهای تولید پیش‌ماده‌های ترکیبات فنلی مانند فنیل‌آلانین می‌شود و در نتیجه تولید ترکیبات فنلی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، خشکی می‌تواند منجر به افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن شود که با اکسیداسیون ترکیبات فنلی موجود، میزان فنل محلول گیاه را کاهش می‌دهد (Hosseini and Heidari, 2025). در بررسی سروری و همکاران (۱۴۰۱) نیز با افزایش شدت تنش کم‌آبی میزان ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی همیشه‌بهار (*Calendula officinalis* L.) را کاهش داد. در این پژوهش به‌کارگیری سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم مقدار ترکیبات فنلی را به‌طور معنی‌داری افزایش داد که دلیل آن می‌تواند مربوط به نقش آن در القای ژن‌های مسیر فنیل پروپانوئید و فراهم کردن پیش‌سازهای لازم برای سنتز فنل‌ها باشد (Dar et al., 2022) و علاوه بر این سدیم نیتروپروساید با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه به کاهش تنش اکسیداتیو کمک می‌کند و بدین ترتیب تجزیه فنل را کاهش می‌دهد (Farouk and Al-Huqail, 2020). مطالعات پیشین در گیاه مرزنجوش (*Origanum marjorana*) و همیشه‌بهار (*Calendula officinalis* L.) نشان داد که تیمار سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم می‌تواند میزان فنل را در شرایط تنش افزایش دهند، با این تفاوت که شدت اثر و مسیرهای مکانیسمی ممکن است به گونه گیاهی و شدت تنش بستگی داشته باشد (اورعی و همکاران، ۱۴۰۲a؛ Farouk and Al-Huqail, 2020).

فلاونوئید: همان‌طور که از شکل ۴ نمایان است، تنش کم‌آبی به‌طور معنی‌داری میزان فلاونوئید گیاه را کاهش داد و محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم میزان فلاونوئید را بهبود بخشید به‌طوری‌که بیشترین میزان فلاونوئید با ۳/۹۸ میلی‌گرم در گرم وزن خشک در تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و کمترین با ۲/۴۲ میلی‌گرم در گرم وزن خشک در تیمار ظرفیت زراعی



شکل ۳- اثر سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم بر میزان فنل گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) در شرایط تنش کم‌آبی. ستون‌ها دارای حروف مشابه، براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (میانگین \pm SD).



شکل ۴- اثر سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم بر میزان فلاونوئید گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) در شرایط تنش کم‌آبی. ستون‌ها دارای حروف مشابه، براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (میانگین \pm SD).

۳۰ درصد مشاهده شد (شکل ۴). مشاهدات Hosseini و Heidari (۲۰۲۵) نشان داد که تنش کم‌آبی می‌تواند از طریق

پتاسیم در گیاه برگ نو (*Ligustrum vulgare* L.) (محمد عباس الوادی و همکاران، ۱۴۰۳) و همچنین افزایش میزان پرولین با کاربرد سدیم نیتروپروساید نیز در گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) در شرایط تنش گزارش شده است (ارشان و همکاران، ۱۴۰۲).

پروتئین: نتایج نشان داد، تنش کم آبی میزان پروتئین گیاه را کاهش داد و کاربرد سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم بر میزان پروتئین گیاه مؤثر بود بطوریکه بیشترین میزان پروتئین با ۵۶/۴۷ میکروگرم در میلی گرم وزن تر در تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۱۰۰ میلی گرم در لیتر بود که با تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سدیم نیتروپروساید ۵۰ میکرومولار اختلاف معنی داری نداشت و کمترین با ۳۹/۱۵ میکروگرم در میلی گرم وزن تر در تیمار ظرفیت زراعی ۳۰ درصد است (شکل ۶). در شرایط تنش کم آبی، بیان ژن های کدکننده پروتئین های درون سلولی القا می شود و سبب تجزیه پروتئین ها و تحرک مجدد نیتروژن و متعاقب آن سنتز مواد محلول سازگار می شود. از این رو کاهش محتوای پروتئین در شرایط فوق موجب کاهش سنتز پروتئین و همچنین تجمع اسیدهای آمینه آزاد از جمله پرولین و افزایش فعالیت آنزیم های تجزیه کننده پروتئین می شود (Yang et al., 2019). در گیاه سیاه دانه (*Nigella sativa* L.) نیز تنش کم آبی میزان پروتئین را کاهش داد (کبیری و همکاران، ۱۳۹۳). در این پژوهش کاربرد سیلیکات پتاسیم و سدیم نیتروپروساید موجب افزایش محتوای پروتئین گردید. سیلیکون با افزایش رنگیزه های فتوسنتزی، افزایش فعالیت آنزیم روبیسکو و ظرفیت فتوسنتزی، کاهش تنش اکسیداتیو و حفاظت ماکرومولکول هایی نظیر پروتئین ها و غشای کلروپلاستی و غشای سلولی باعث افزایش فتوسنتز شده و در نتیجه میزان قندهای محلول و پروتئین را افزایش داده (Amin et al., 2018). سدیم نیتروپروساید نیز با تنظیم متابولیسم نیتروژن و القای سنتز متابولیت ثانویه، موجب حفظ پروتئین ها و تقویت ترکیبات دفاعی غیر آنزیمی شده و در نتیجه تحمل فیزیولوژیک گیاه را در برابر تنش کم آبی افزایش می دهد

کاهش فعالیت آنزیم های کلیدی مسیر فنیل پروپانوید و همچنین افزایش تولید گونه های فعال اکسیژن موجب اکسیداسیون ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی گردد، آن ها کاهش ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی را در گیاه اسطوخودوس (*Lavandula angustifolia* Mill.) گزارش نمودند. در این پژوهش کاربرد سیلیکات پتاسیم در شرایط تنش کم آبی میزان فلاونوئید گیاه رزماری را افزایش داد که دلیل آن می تواند مربوط به نقش سیلیکات پتاسیم در تغییر الگوی بیان ژن های کدکننده آنزیم های دخیل در مسیر فنیل پروپانوید از جمله فنیل آلانین آمونیا لیا ز باشد (Dar et al., 2022). نتایج اورعی و همکاران (۱۴۰۲a) نیز نشان داد، با افزایش تنش کم آبی میزان فلاونوئیدهای گیاه همیشه بهار (*Calendula officinalis* L.) روند نزولی داشت و کاربرد سیلیکات پتاسیم موجب افزایش میزان فلاونوئیدهای گیاه در شرایط تنش کم آبی گردید.

پرولین: نتایج نشان داد، بیشترین میزان پرولین با ۴/۱۱ در تیمار شاهد در ظرفیت زراعی ۳۰ درصد و کمترین با ۲/۱۴ میلی گرم در گرم وزن تر در تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سیلیکات پتاسیم ۱۰۰ میلی گرم در لیتر بود (شکل ۵).

نتایج نشان داد، افزایش شدت تنش محتوای پرولین را افزایش داد، تجمع پرولین در شرایط تنش موجب افزایش بیان پروتئین های مرتبط با افزایش تحمل تنش در گیاهان می شود و افزایش فعالیت سیستم آنتی اکسیدانی توسط پرولین، گیاهان را در مقابل خسارت های اکسیداتیو ناشی از تنش محافظت می نماید (Maurel and Prado, 2017). اثر محلول پاشی سیلیکات پتاسیم ۲۵ میلی گرم در لیتر و سدیم نیتروپروساید ۱۰۰ میکرومولار بر میزان پرولین تقریباً مشابه بود. افزودن سیلیکات پتاسیم با بهبود تعادل یونی، کاهش جذب سدیم و افزایش پتاسیم در سلول ها، فشار تنش را کاهش داده و در نتیجه سطح پرولین را در گیاه افزایش می دهد (اورعی و همکاران، ۱۴۰۲a) و سدیم نیتروپروساید نیز سبب افزایش آنزیم کربوکسیلات اسپولر (PSCS) می شود که آنزیمی کلیدی در بیوسنتز پرولین است (اورعی و همکاران، ۱۴۰۲b). مطابق با نتایج این آزمایش، افزایش میزان پرولین با کاربرد سیلیکات



شکل ۵- اثر سدیم نیتریت و پتاسید و سیلیکات پتاسیم بر محتوای پرولین گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) در شرایط تنش کم آبی. ستون‌ها دارای حروف مشابه، براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند (میانگین \pm SD).



شکل ۶- اثر سدیم نیتریت و پتاسید و سیلیکات پتاسیم بر میزان پروتئین گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) در شرایط تنش کم آبی. ستون‌ها دارای حروف مشابه، براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند (میانگین \pm SD).

میزان پروتئین میوه فیسالیس (*Physalis peruviana* L.) را در (Fancy et al., 2017). خانی و همکاران (۱۴۰۳)، افزایش

جدول ۴- اثر غلظت‌های مختلف سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان رزماری (*Rosmarinus officinalis L.*) در شرایط کم‌آبی

| ظرفیت زراعی (درصد) | محلول پاشی | غلظت | کاتالاز | SOD | پراکسیداز |
|--------------------|-------------------|----------------------|----------------------------|-------------------|---------------------|
| | | | (واحد آنزیم در گرم وزن تر) | | |
| شاهد (۱۰۰) | سدیم نیتروپروساید | صفر | ۴/۵۴ ^f | ۲/۷۲ ^f | ۱۴/۷۱ ^f |
| | | ۲۵ میکرومولار | ۴/۹۴ ^c | ۲/۹۷ ^c | ۱۶/۴۹ ^c |
| | | ۵۰ میکرومولار | ۵/۰۸ ^a | ۳/۱۸ ^a | ۱۷/۱۹ ^a |
| | سیلیکات پتاسیم | ۱۰۰ میکرومولار | ۴/۶۵ ^e | ۲/۸۵ ^e | ۱۵/۴۲ ^e |
| | | ۲۵ میلی‌گرم در لیتر | ۴/۷۴ ^d | ۲/۹۱ ^d | ۱۵/۵۷ ^{de} |
| | | ۵۰ میلی‌گرم در لیتر | ۴/۷۸ ^d | ۳/۰۷ ^b | ۱۵/۷۷ ^d |
| | | ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر | ۴/۹۶ ^b | ۳/۱۴ ^b | ۱۶/۹۱ ^b |
| ۷۰ | سدیم نیتروپروساید | صفر | ۳/۵۸ ^m | ۲/۰۱ ^m | ۱۱/۸۵ ^l |
| | | ۲۵ میکرومولار | ۳/۸۹ ^j | ۲/۲۵ ⁿ | ۱۲/۸۶ ⁿ |
| | | ۵۰ میکرومولار | ۴/۲۷ ^g | ۲/۴۷ ^h | ۱۴/۴۸ ^g |
| | سیلیکات پتاسیم | ۱۰۰ میکرومولار | ۳/۷۱ ⁱ | ۲/۱۳ ⁱ | ۱۲/۴۲ ^k |
| | | ۲۵ میلی‌گرم در لیتر | ۳/۸۲ ^k | ۲/۱۹ ^k | ۱۲/۷۸ ⁿ |
| | | ۵۰ میلی‌گرم در لیتر | ۴/۰۳ ⁱ | ۲/۳۹ ⁱ | ۱۳/۶۲ ⁱ |
| | | ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر | ۴/۱۶ ^h | ۲/۵۹ ^g | ۱۴/۰۹ ^h |
| ۳۰ | سدیم نیتروپروساید | صفر | ۲/۹۵ ^s | ۱/۶۵ ^s | ۹/۹۵ ^q |
| | | ۲۵ میکرومولار | ۳/۱۸ ^q | ۱/۸۱ ^p | ۱۰/۷۶ ⁿ |
| | | ۵۰ میکرومولار | ۳/۴۱ ^o | ۱/۹۷ ⁿ | ۱۱/۱۸ ^m |
| | سیلیکات پتاسیم | ۱۰۰ میکرومولار | ۳/۱۱ ^r | ۱/۷۱ ^r | ۱۰/۱۱ ^p |
| | | ۲۵ میلی‌گرم در لیتر | ۳/۱۹ ^q | ۱/۷۶ ^q | ۱۰/۱۸ ^p |
| | | ۵۰ میلی‌گرم در لیتر | ۳/۳۱ ^p | ۱/۸۲ ^p | ۱۰/۴۲ ^o |
| | | ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر | ۳/۴۹ ⁿ | ۱/۹۳ ^o | ۱۱/۰۹ ^m |

حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح $P \leq 0.05$ است.

آنتی‌اکسیدان را افزایش داد. بیشترین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز به ترتیب با ۵/۰۸، ۳/۱۸، ۱۷/۱۹ واحد آنزیم بر گرم در تیمار ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد + سدیم نیتروپروساید ۵۰ میکرومولار و کمترین با ۲/۹۵، ۱/۶۵ و ۹/۹۵ واحد آنزیم بر گرم در تیمار ظرفیت زراعی ۳۰ درصد به‌دست آمد (جدول ۴). نتایج نشان داد، پاسخ آنزیمی گیاه رزماری به تیمارهای کاهنده تنش، به‌طور معنی‌داری وابسته به سطح تنش کم‌آبی بوده است. در شرایط تنش خشکی، کاهش

اثر کاربرد سیلیکات پتاسیم گزارش نمودند. همچنین محمدی و همکاران (۱۳۹۷) نشان دادند، کاربرد سدیم نیتروپروساید موجب افزایش میزان پروتئین گیاه سرخارگل (*Chinaceae*) Moench (*purpurea* (L.)) در شرایط تنش شوری گردید.

فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز: مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد، با افزایش تنش کم‌آبی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاهش یافت و کاربرد سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم فعالیت آنزیم‌های

سیلیکات پتاسیم عمدتاً از طریق پایداری ساختاری غشاها و کاهش تولید رادیکال‌های آزاد اثر حفاظتی خود را اعمال می‌کند (Oraee et al., 2024) بنابراین پاسخ آنزیمی آن غیرمستقیم‌تر است. محمدی و همکاران (۱۳۹۷)، اثر کاربرد سدیم نیتروپروساید را بر بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گیاه سرخارگل (*Echinaceae purpurea* (L.) Moench) را در شرایط تنش شوری گزارش نمودند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش کم‌آبی موجب کاهش رشد رویشی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی در گیاه رزماری شد. همچنین موجب ایجاد تنش اکسیداتیو و اختلال در تعادل اسمزی گیاه گردید. محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم توانست اثرات منفی تنش کم‌آبی را کاهش دهد، به طوری که کاربرد این ترکیبات شاخص‌های رشدی، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، یکپارچگی غشا و تعادل اسمزی گیاه را بهبود بخشیدند. با توجه به نتایج به دست آمده کاربرد سدیم نیتروپروساید و سیلیکات پتاسیم به ترتیب با غلظت‌های ۵۰ میکرومولار و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر به عنوان ترکیبات تعدیل‌کننده تنش، نقش مؤثری در بهبود تحمل گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) به شرایط کم‌آبی ایفا کند.

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز احتمالاً به دلیل آسیب اکسیداتیو به ساختار پروتئینی آنزیم‌ها و کاهش بیان ژن‌های مربوطه رخ می‌دهد. تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) در این شرایط موجب غیرفعال‌شدن آنزیم‌ها و اختلال در سیستم دفاعی سلول می‌شود. علاوه بر این، کاهش جذب عناصر فلزی ضروری به عنوان کوفاکتور (مانند Fe و Mn) نیز در افت فعالیت آن‌ها مؤثر است (Hasanuzzaman et al., 2012). کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در پاسخ به افزایش شدت تنش کم‌آبی در گیاه دارویی *Atractylodes lancea* گزارش شده است (Zhang et al., 2021)، که هم‌راستا با نتایج پژوهش حاضر بوده و بیانگر اثر منفی تنش خشکی بر ظرفیت دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه است. در این پژوهش، سدیم نیتروپروساید نسبت به سیلیکات پتاسیم اثرگذاری بیشتری بر افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نشان داد که این تفاوت را می‌توان به نقش مستقیم نیتریک اکسید به عنوان یک مولکول پیام‌رسان نسبت داد. سدیم نیتروپروساید تولید آنزیم‌های پاک‌کننده گونه‌های فعال اکسیژن را تحریک کرده و تجمع پراکسید هیدروژن در میتوکندری‌ها تحت تنش را کاهش می‌دهد. در واقع، نیتریک اکسید حاصل از سدیم نیتروپروساید روی رادیکال‌های آزاد اثر گذاشته و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را برای کاهش غلظت رادیکال آزاد تحریک کرده و تنش اکسیداتیو را در گیاه کاهش می‌دهد (سعادت و صدقی، ۱۴۰۳). در مقابل

منابع

- اصغری، محسن، معصومی، زواریان، ابوالفضل، و یوسفی‌راد، مجتبی (۱۳۹۹). بررسی اثر سدیم نیتروپروساید در کاهش سمیت ناشی از کادمیوم در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.). *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۳(۳)، ۱۰۰۹-۱۰۱۸. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2272.1582>
- ارشان، کلثوم، صمصام‌پور، داود، و پاسالاری، حسین (۱۴۰۲). اثر سدیم نیتروپروساید (SNP) بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیک گیاه دارویی نعناع‌فلغلی (*Mentha piperita* L.) تحت تنش شوری. *پژوهش‌های تولید گیاهی*، ۳۰(۱)، ۸۵-۱۰۲. <https://doi.org/10.22069/jopp.2022.20194.2931>
- اورعی، عطیه، شور، محمود، مروی، آسیه، ابراهیمی، سعید، عمرانی، فاطمه، حسین‌زاده، راحله، شریتی، پوران، و شکوری‌فر، فائزه (۱۴۰۲ا). تأثیر محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم بر رشدونمو همیشه‌بهار در شرایط تنش کم‌آبی. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۲(۵۶)، ۳۴۲-۳۲۵. DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.56.21.5

- اورعی، عطیه، مرادیان، متینه، سلاح‌ورزی، یحیی، تهرانی‌فر، علی، و صلواتی، امیرعلی (۱۴۰۲b). القای مقاومت به نیکل با نیتروپروساید سدیم در گیاه گوجه‌فرنگی. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۲ (۵۷)، ۱۰۹-۱۲۶. <https://doi.org/10.22034/12.57.109>
- الهوریدی‌زاده، صالح، و دانائی، الهام (۱۴۰۲). تأثیر اسید هیومیک و ورمی‌کمپوست بر برخی شاخص‌های رویشی و میزان پرولین گیاه پروانش (*Catharanthus roseous*) تحت تنش کم‌آبی. *محیط‌زیست و مهندسی آب*، ۹ (۱)، ۱۴۱-۱۵۲. <https://doi.org/10.22034/ewe.2022.333951.1745>
- الحوشان، محمد، زاهدی، مرتضی، رامین، علی‌اکبر، و سبزه‌علیان، محمدرضا (۱۳۹۸). تحمل و حساسیت فیزیولوژیکی به تنش کم‌آبی در ارقام سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.). *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۸ (۳۲)، ۴۴۷-۴۶۲. [DOR:20.1001.1.23222727.1398.8.32.13.1](https://doi.org/10.22034/12.57.109)
- جلیل‌زاده، المیرا، جبارزاده، زهره، و نوروزی، پرویز (۱۳۹۷). تأثیر محلول‌پاشی با منابع و غلظت‌های مختلف سیلیسیم بر برخی ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه رز رقم بورلی واتسون. *روابط خاک و گیاه*، ۹ (۳)، ۶۵-۷۸. <https://doi.org/20.1001.1.20089082.1397.9.3.7.1>
- خانی، آرزو، برزگر، طاهر، و نیکبخت، جعفر (۱۴۰۳). تأثیر سیلیکات پتاسیم و ال-سیستین بر عملکرد، کارایی مصرف آب و کیفیت میوه فیسالیس (*Physalis peruviana* L.) تحت شرایط کم‌آبی. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۳ (۵۹)، ۲۵-۴۲. <http://doi.org/10.22034/13.59.25>
- دانائی، الهام، عبدوسی، وحید، و سروری، سوفیا (۱۴۰۳). گیاهان زینتی فضای سبز با کاربرد دارویی (جلد اول). انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرمسار.
- سروری، سوفیا، دانائی، الهام، همتی، خدایار، و لادن‌مقدم، علیرضا (۱۴۰۱). اثر محلول‌پاشی اسپرمیدین بر برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک و متابولیت‌های ثانویه گیاه همیشه‌بهار (*Calendula officinalis* L.) تحت تنش خشکی. *فیزیولوژی محیطی گیاهی*، ۶۶ (۱۷)، ۱۶۸-۱۲۵. <https://doi.org/10.30495/iper.2022.690251>
- سعادت، هانیه، و محمد، صدقی (۱۴۰۳). اثر پیش‌تیمار سدیم نیتروپروساید بر بهبود صفات فیزیولوژیکی و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهچه برنج (*Oryza sativa*) تحت تنش شوری. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۶۲، ۱۴۵-۱۶۰. <http://doi.org/10.22034/13.62.145>
- شمسایی، امین‌اله، آران، مهدی، و فاخری، براتعلی (۱۳۹۹). تأثیر محلول‌پاشی سلنیم بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی رزماری تحت تنش خشکی. *تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک*، ۲ (۲)، ۱۲۷-۱۴۰. <https://doi.org/10.22034/csrr.2021.257878.1069>
- قضایی، سعید (۱۴۰۱). بررسی اثر محلول‌پاشی نیتروپروساید سدیم (SNP) و براسینواستروئید (BNs) بر صفات رویشی ریشه و اندام هوای گیاه دارویی رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) در شرایط تنش شوری. *پژوهش‌های به‌زراعی*، ۱۴ (۴)، ۳۷۳-۴۰۰.
- علیزاده سالطه، سعیده، نوری‌زاد، احمدآباد، آيسان، بلندنظر، صاحبعلی، و امانی، مینا (۱۴۰۳). اثر سدیم نیتروپروساید بر برخی صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی در گیاه دارویی گل مغربی (*Oenothera biennis* L.) تحت تنش شوری. *تولیدات گیاهی*. <https://doi.org/10.22055/ppd.2024.47316.2186>
- کامیاب، افسون، صمصام‌پور، داود، احمدی‌نسب، نوید، و باقری، عبدالنبی (۱۴۰۴). اثر تنش خشکی بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه دارویی آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.). *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۴ (۶۵)، ۱۲۷-۱۴۴. <https://doi.org/10.22034/14.65.127>
- کبیری، رزیتا، فرحبخش، حسن، و نصیبی، فاطمه (۱۳۹۳). اثر تنش خشکی بر خصوصیات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.). *تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران*، ۳۰ (۴)، ۶۰۰-۶۱۰. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2014.9841>
- گرگینی شبانکاره، حسین، و خراسانی‌نژاد، سارا (۱۳۹۶). اثر سدیم نیتروپروساید بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه

- دارویی مرزه (*Satureja khuzestanica*) تحت رژیم‌های کم‌آبیاری. پژوهش‌های تولید گیاهی، ۲۴(۳)، ۷۰-۵۵.
<https://doi.org/10.22069/jopp.2017.11747.2079>
- لطیفی، زهرا، خادمی، فریال، محبی، رومینا، محسن سلطانی، مریم، اسپروبینی، زهرا، و علوی، نیلوفر (۱۴۰۳). مقایسه بین عوامل مختلف جهت استخراج عصاره رزماری: حلال، روش عصاره‌گیری، اندازه ذرات، نسبت گیاه به حلال. *مجله علوم و صنایع غذایی ایران*، ۲۱(۱۵۳)، ۱۳-۲۸.
<https://doi.org/10.22034/FSCT.21.153.13>
- محمدعباس الوای، زینب، سلاح‌ورزی، یحیی، شور، محمود، و کمالی، مریم (۱۴۰۳). اثر کم‌آبیاری (تکنیک PRD و SDI) و محلول‌پاشی با سیلیکات پتاسیم در گیاه پرچینی برگ نو (*Ligustrum vulgare L.*). *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۳(۶۰)، ۴۱۳-۴۲۸.
<http://doi.org/10.22034/13.60.413>
- محمدی، سیده‌محدثه، اسدی، صنم‌سمانه، رامنه، ولی‌اله، گرامی، مهیار، و خوش‌روز، مجید (۱۳۹۷). اثر سدیم نیتروپروساید (SNP) بر برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه دارویی سرخارگل [*Echinacea purpurea (L.) Moench*] تحت تنش شوری. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۷(۲۳)، ۱۲۳-۱۳۸.
 DOR:20.1001.1.23222727.1397.7.23.6.9
- مهربان‌جویی، پویان، عبدالزاده، احمد، صادقی‌پور، حمیدرضا، و اقدسی، مهناز (۱۳۹۳). تحریک رشد، تسهیل جذب آهن و پتاسیم و کاهش جذب کلسیم و منیزیم با تغذیه سیلیکات سدیم در گیاه برنج. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۳(۸)، ۶۷-۷۸.
 DOR: 20.1001.1.23222727.1393.3.8.13.8
- Amin, M., Ahmad, R., Ali, A., Hussain, I., Mahmood, R., Aslam, M., & Lee, D. J. (2018). Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. *Silicon*, 10(2), 177-183. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9372-x>.
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Chang, C. C., Yang, M. H., Wen, H. M., & Chern, J. C. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3), 178-182.
- Danaee, E., & Abdossi, V. (2021). Effect of foliar application of iron, potassium and zinc nano-chelates on morphological, physiological and phytochemical traits of Basil (*Ocimum basilicum L.*). *Food and Health Journal*, 4(4), 13-20.
- Dar, F. A., Tahir, I., Hakeem, K. R., & Rehman, R. (2022). Silicon application enhances the photosynthetic pigments and phenolic/flavonoid content by modulating the phenylpropanoid pathway in common Buckwheat under aluminium stress. *Silicon*, 14, 323-334. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01501-w>
- Fang, S., Yang, H., Wei, G., Shen, T., Wan, Z., Wang, M., Wang, X., & Wu, Z. (2022). Potassium application enhances drought tolerance in sesame by mitigating oxidative damage and regulating osmotic adjustment. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1096606. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1096606>
- Fancy, N. N., Bahlmann, A. K., & Loake, G. J. (2017). Nitric oxide function in plant abiotic stress. *Plant, Cell and Environment*, 40(4), 462-472. <https://doi.org/10.1111/pce.12707>
- Farouk, S., & Al-ghamdi, A. (2021). Sodium nitroprusside application enhances drought tolerance in marjoram herb by promoting chlorophyll biosynthesis and enhancing osmotic adjustment capacity. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 430. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-021-06846-5>
- Farouk, S., & Al-Huqail, A. (2020). Sodium nitroprusside application regulates antioxidant capacity, improves phytopharmaceutical production and essential oil yield of marjoram herb under drought. *Industrial Crops and Products*. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113034>
- Hasanuzzaman, M., Hossain, M., Teixeira da Silva, J., & Fujita, M. (2012). Plant response and tolerance to abiotic oxidative stress: Antioxidant defense is a key factor. *Crop Stress and its Management: Perspectives and Strategies*, 261-315. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2220-0_8
- Hosseini, R., & Heidari, M. (2025). Impact of drought stress on biochemical and molecular responses in lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.): Effects on essential oil composition and antibacterial activity. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1506660. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1506660>
- Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., Sharma, A., Ramakrishnan, M., & Sharma, A. (2020). The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Applied Sciences*, 10(16), 5692. <https://doi.org/10.3390/app10165692>
- Khan, A., Khan, A. L., Muneer, S., Kim, Y. H., Al-Rawahi, A., & Al-Harrasi, A. (2019). Silicon and salinity:

- Crosstalk in crop-mediated stress tolerance mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1429. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01429>
- Khan, S., Abdo, A. A. A., Shu, Y., Zhang, Z., & Liang, T. (2023). The extraction and impact of essential oils on bioactive films and food preservation, with emphasis on antioxidant and antibacterial activities-a review. *Foods*, 12(22), 4169. <https://doi.org/10.3390/foods12224169>
- Maurel, C., & Prado, K. (2017). *Plant Aquaporins*. Springer International Publishing.
- Mohammadi, H., Abdollahi-Bastam, S., Aghaee, A., & Ghorbanpour, M. (2024). Foliar-applied silicate potassium modulates growth, phytochemical, and physiological traits in *Cichorium intybus* L. under salinity stress. *BMC Plant Biology*, 24, 288. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05015-6>
- Novak, J., & Bluthner, W. D. (2020). *Rosmarinus officinalis* L.: Rosemary. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 501-521. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38792-1_15
- Oraee, A., Tehranifar, A., Ghorbani, Z., & Sayad-Amin, P. (2024). Potassium silicate enhances drought tolerance of *Bellis perennis* by improving antioxidant activity and osmotic regulators. *Advances in Horticultural Science*, 37, 377-389. <https://doi.org/10.36253/ahsc-14732>
- Pavlovic, J., Kostic, L., Bosnic, P., Kirkby, E. A., & Nokolic, M. (2021). Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 697592. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>
- Rady, M. O., Semida, W. M., Abd El-Mageed, T. A., Howladar, S. M., & Shaaban, A. (2020). Foliage applied selenium improves photosynthetic efficiency, antioxidant potential and wheat productivity under drought stress. *International Journal of Agriculture and Biology*, 24(5), 1293-1300. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1562>
- Salachna, P., & Zawadzinska, A. (2018). Effect of nitric oxide on growth, flowering and bulb yield of *Eucomis autumnalis*. VII International Conference on Managing Quality in Chains (MQUIC2017) and II International Symposium on Ornamentals in 1201.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Shabani Fard, R., Aghaee Hanjani, E., & Danaee, E. (2024). Effects of polyamines on morphophysiological traits of *Calendula officinalis* L. under salinity stress caused by potassium chloride and sodium chloride salts. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 11(2), 189-200. <https://doi.org/10.22059/ijhst.2023.357306.630>
- Sharma, A., Wang, J., Xu, D., Tao, S., Chong, S., Yan, D., Li, Z., Yuan, H., & Zheng, B. (2020). Melatonin regulates the functional components of photosynthesis, antioxidant system, gene expression, and metabolic pathways to induce drought resistance in grafted *Carya cathayensis* plants. *Science of the Total Environment*, 713, 136675. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136675>
- Soroori, S., & Danaee, E. (2023). Effects of foliar application of citric acid on morphological and phytochemical traits of *Calendula officinalis* L. under drought stress conditions. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 10(3), 361-374. <https://doi.org/10.22059/ijhst.2022.341462.555>
- Yang, M., Geng, M., Shen, P., Chen, X., Li, Y., & Wen, X. (2019). Effect of post-silking drought stress on the expression profiles of genes involved in carbon and nitrogen metabolism during leaf senescence in maize (*Zea mays* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 135, 304-309. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.12.025>
- Zhang, A., Liu, M., Gu, W., & Chen, Z. (2021). Effect of drought on photosynthesis, total antioxidant capacity, bioactive component accumulation, and the transcriptome of *Atractylodes lancea*. *BMC Plant Biology*, 21, 293. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03048-9>
- Zhao, Z., Liu, A., Zhang, Y., Yang, X., Yang, S., & Zhao, K. (2024). Effects of progressive drought stress on the growth, ornamental values, and physiological properties of *Begonia semperflorens*. *Horticulturae*, 10(4), 405. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040405>

The effect of sodium nitroprusside and potassium silicate on growth indices and antioxidant activity of Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) under deficit irrigation conditions

Mohammad Reza Orooji and Elham Danaee*

Department of Horticulture, Ga. C., Islamic Azad University, Garmsar, Iran

Abstract

Water deficit is one of the most critical factors limiting plant growth and production, and identifying strategies to increase plant tolerance to this stress is of high practical importance. Sodium nitroprusside, as a nitric oxide donor, and potassium silicate, as a source of silicon and potassium, play important roles in plant tolerance to stress. In this study, the effect of foliar application of sodium nitroprusside and potassium silicate on growth indices and antioxidant activity of the medicinal plant rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) under different levels of drought stress was investigated. The experiment was conducted as a factorial completely randomized design with three replications in a commercial greenhouse located in Karaj, Iran. The treatments included water deficit levels (control, 30%, and 70% of field capacity) and foliar application of sodium nitroprusside (0, 25, 50, and 100 μ M) and potassium silicate (0, 25, 50, and 100 mg/L), along with their interactions. Deficit irrigation was applied using the gravimetric method, and foliar spraying with sodium nitroprusside and potassium silicate was conducted three times every other day. The results showed that drought stress significantly reduced growth traits and antioxidant activity while increasing ion leakage and proline accumulation. In contrast, the application of sodium nitroprusside and potassium silicate significantly reduced the harmful effects of stress by enhancing the antioxidant defense system. The highest fresh and dry weight of shoots, fresh and dry weight of roots, phenol content, and activities of catalase, superoxide dismutase, and peroxidase enzymes were observed in the treatment with 100% field capacity + 50 μ M sodium nitroprusside. The most significant root length, root volume, plant height, total chlorophyll content, flavonoid content, and protein content were obtained in the treatment with 100% field capacity + 100 mg/L potassium silicate. The highest percentage of cell membrane ion leakage and proline content were recorded in the 30% field capacity treatment. Overall, the results of this study indicate that the application of sodium nitroprusside and potassium silicate can be used as a strategy to increase the tolerance of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) to drought and maintain its yield and quality under water-limited conditions.

Keywords: Antioxidant, Enzyme, Nitric Oxide, Silicon

Received: Oct. 14, 2025; Revised: Jan. 21, 2026; Accepted: Feb. 03, 2026; Published Online: June. 02, 2026

*Corresponding Author: dr.edanaee@iau.ac.ir



Copyright © 2025 Iranian Society of Plant Physiology, Published by Isfahan University of Technology press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited