نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۲۰، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۵، ص. ۳۸-۲۶

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.1, Vol. 20, Apr.-May. 2026, p. 26-38

مقاله علمی-پژوهشی

نقش سدیم نیتروپروساید در بهبود رشد و پاسخ‌های تنشی گل قرنفل تحت آبیاری با آب شور

مهناز کریمی*[۱]، منیژه اسلامی[۲]، فاطمه قربانعلی‌زاده سعادت آباد[۳]، نگار حیدری رئیسی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

چکیده

افزایش شوری منابع آبی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان و ایران، یکی از چالش‌های اساسی در تولیدات کشاورزی است که رشد و عملکرد گیاهان را محدود می‌کند. با این حال، استفاده از ترکیباتی نظیر سدیم نیتروپروساید به‌عنوان دهنده نیتریک‌اکسید می‌تواند مقاومت گیاهان به تنش شوری را افزایش دهد. در این پژوهش اثر سطوح مختلف شوری (۰، ۳، ۶ و ۹ دسی‌زیمنس بر متر) و کاربرد ۱۰۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید بر صفات مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه قرنفل (*Dianthus barbatus*) بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش شوری به طور معنی‌داری رشد و عملکرد گیاه را کاهش داد، به ویژه در سطوح بالاتر (۶ و ۹ دسی‌زیمنس بر متر). کاربرد سدیم نیتروپروساید توانست اثرات منفی شوری را در سطوح شوری پایین تا متوسط (۰، ۳ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر) به طور مؤثری تعدیل کند، اما در بالاترین سطح شوری (۹ دسی‌زیمنس بر متر) اثرات حفاظتی آن کاهش یافت. همچنین، سدیم نیتروپروساید موجب افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی، کاهش نشت یونی، حفظ محتوای آب نسبی برگ و پتاسیم برگ، و افزایش تجمع پرولین، پروتئین محلول و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز شد. این نتایج نشان می‌دهد که سدیم نیتروپروساید می‌تواند بخشی از آثار منفی شوری را در گیاه قرنفل تعدیل نماید.

واژه‌های کلیدی: پتاسیم، پرولین، تنش محیطی، کلرید سدیم، گیاه زینتی

مقدمه

افزایش شوری منابع آبی یکی از چالش‌های اساسی قرن حاضر به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان از جمله ایران است. تغییرات اقلیمی، بهره‌برداری بیش ازحد از منابع آب زیرزمینی، نفوذ آب‌های شور و استفاده ناپایدار از خاک، از مهم‌ترین دلایل افزایش شوری آب‌های کشاورزی به شمار می‌روند. بالا رفتن سطح نمک در منابع آبی، کارایی آبیاری و حاصلخیزی خاک را به‌شدت کاهش داده و به محدودیت جدی در رشد و تولید گیاهان تبدیل شده است. برآوردها نشان می‌دهد که شوری یکی از اصلی‌ترین عوامل غیرزیستی کاهش عملکرد محصولات کشاورزی است و در دهه‌های آینده به دلیل کمبود آب شیرین، اثرات مخرب آن بیش از پیش آشکار خواهد شد (Gull et al., 2019; Arif et al., 2020).

تنش شوری با ایجاد اختلال در تعادل یونی و جذب آب، اثرات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گسترده‌ای بر گیاهان بر جای می‌گذارد. افزایش سدیم و کلر در ناحیه ریشه باعث سمیت یونی، کاهش جذب عناصر غذایی و اختلال در تعادل سلولی می‌شود. این تنش همچنین با تولید بیش‌ازحد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند سوپراکسید و پراکسید هیدروژن، در صورت مهار نشدن، موجب آسیب به غشاء، پروتئین‌ها و کلروفیل شده و فتوسنتز و رشد گیاه را مختل می‌کند (Gull et al., 2019).

به‌منظور مقابله با این شرایط، گیاهان از سازوکارهای دفاعی متنوعی شامل تنظیم روزنه‌ها، تغییرات هورمونی، یونی، و فعال‌سازی سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی بهره می‌برند. سیستم آنتی‌اکسیدانی شامل آنزیم‌هایی همچون کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز است که با تجزیه ROS، از بروز آسیب‌های اکسیداتیو جلوگیری کرده و پایداری متابولیک گیاه را حفظ می‌کنند (Iqbal et al., 2020). با وجود مکانیسم‌های طبیعی دفاعی، شدت و طولانی بودن تنش شوری غالباً

۱- دانشیار،گروه علوم باغبانی، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، نویسنده مسئول
۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی،دانشکده علوم زراعی، گروه علوم باغبانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۳- دانشجوی دکتری، گروه علوم باغبانی،دانشکده علوم زراعی، گروه علوم باغبانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی،دانشکده علوم زراعی، گروه علوم باغبانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
(*- نویسنده مسئول: Email: karimi@sanru.ac.ir)

DOI: 10.22034/idj.2025.543094.2624

فراتر از ظرفیت ذاتی گیاهان است؛ ازاین‌رو استفاده از ترکیبات کمکی می‌تواند نقش مؤثری در تقویت مقاومت گیاهان داشته باشد. از میان این ترکیبات، نیتریک اکسید (NO) به‌عنوان یک پیام‌رسان درون‌زاد توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. این مولکول گازی و محلول در آب، در طیف وسیعی از فرآیندهای فیزیولوژیک شامل جوانه‌زنی بذر، رشد ریشه، گل‌دهی، فتوسنتز و پاسخ به تنش‌های زیستی و غیرزیستی مشارکت دارد (Mostofa et al., 2015; Corpas and Palma, 2023). سدیم نیتروپروساید (SNP) به‌عنوان دهنده نیتریک اکسید، در مطالعات متعددی موجب بهبود تحمل به شوری از طریق تنظیم هموستاز یونی، کاهش تجمع ROS و تقویت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گزارش شده است (Ramadan et al., 2019; Tabrizi Dooz et al., 2023).

اگرچه کاربرد SNP در گیاهان زراعی به خوبی بررسی شده است، مطالعات محدود و پراکنده‌ای در زمینه تأثیر آن بر گیاهان زینتی، به‌ویژه گونه‌های حساس مانند قرنفل (*Dianthus barbatus*) وجود دارد. قرنفل، از خانواده میخک (Caryophyllaceae)، گیاهی زینتی و دارویی با ارزش اقتصادی و زیبایی‌شناسی بالا است (Chandra and Rawat, 2015) که به‌دلیل حساسیت به تنش‌های محیطی، به ویژه شوری، نیازمند راهکارهای علمی برای بهبود مقاومت و پایداری آن است. با توجه به نقش مهم این گیاه در صنعت گلکاری و محدودیت‌های موجود در مطالعات پیشین، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات تنش شوری و تیمار سدیم نیتروپروساید بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک و بیوشیمیایی قرنفل انجام شده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در گلخانه گروه علوم باغبانی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شد. نشاءهای یکنواخت و عاری از آفات و بیماری قرنفل در گلدان‌های پلاستیکی با قطر دهانه ۱۲ سانتی‌متر حاوی بستر کوکوپیت و پرلیت به نسبت مساوی کشت شدند. شرایط محیطی گلخانه شامل دمای ۲۲ ± ۲ درجه سانتی‌گراد در روز و ۲۰ ± ۲ درجه سانتی‌گراد در شب، رطوبت نسبی حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد و نور طبیعی بود. شدت نور طبیعی گلخانه در طول روز حدود ۳۰۰۰۰ لوکس بود. طول روز برابر با نور طبیعی محیط و بین ۱۰ تا ۱۲ ساعت متغیر بود که با توجه به فصل انجام آزمایش (فصل پاییز) در نظر گرفته شد.

گیاهان در طول یک هفته استقرار با محلول غذایی کامل هوگلند هر دو روز یک‌بار تغذیه شدند. پس از سازگاری، تیمار سدیم نیتروپروساید (شرکت سیگما) در دو سطح صفر و ۱۰۰ میکرومولار به‌صورت محلول‌پاشی سه‌مرحله‌ای با فاصله هفت روز روی گیاهان اعمال شد. دو هفته بعد از آخرین محلول‌پاشی، تیمار شوری با کلرید سدیم در چهار سطح (۰، ۳، ۶ و ۹ دسی‌زیمنس بر متر) آغاز و طی چهار هفته با فواصل چهار روز اجرا گردید. به‌منظور جلوگیری از تنش ناگهانی، کلیه گیاهان ابتدا با غلظت ۳ دسی‌زیمنس بر متر آبیاری شدند و در مراحل بعدی غلظت‌های موردنظر اعمال گردید. آبیاری به‌گونه‌ای انجام شد که آب کافی به بستر کشت داده شود تا رطوبت مورد نیاز گیاه به طور کامل تامین گردد؛ به طوری که آب اضافی از سوراخ‌های زهکشی زیر گلدان خارج شود. این روش تضمین می‌کند که بستر به طور یکنواخت اشباع شده و تنش آبی ایجاد نشود. همچنین، برای اطمینان از یکنواختی و کنترل دقیق غلظت شوری، مقدار EC (هدایت الکتریکی) آب ورودی و آب خروجی از بستر با استفاده از EC متر اندازه‌گیری شد و تنظیم گردید تا تقریباً برابر باشند. این کار باعث شد که مقدار آب مصرفی و غلظت نمک در بستر در شرایط پایدار و کنترل‌شده حفظ شود و تنها تنش وارد بر گیاه ناشی از شوری تنظیم‌شده باشد.

دو هفته پس از اعمال تنش، صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی شامل فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (CAT) و سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، محتوای پرولین و نشت یونی برگ ارزیابی شد. همچنین صفات مورفولوژیک نظیر ارتفاع گیاه، تعداد شاخه جانبی، تعداد برگ و سطح برگ بررسی گردید. برای محاسبه سطح برگ، برگ‌ها اسکن شده و با نرم‌افزار ImageJ اندازه‌گیری شدند. زیست‌توده تازه از طریق توزین مستقیم ساقه‌ها و برگ‌ها ثبت شد و سپس نمونه‌ها در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا وزن ثابت خشک گردیدند تا زیست‌توده خشک محاسبه شود. محتوای نسبی آب (RWC) برگ‌ها بر اساس اختلاف وزن تازه، اشباع و خشک برگ‌ها محاسبه گردید.

میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها) پس از استخراج با حلال متانول ۱۰۰٪ و قرائت جذب نوری در طول‌موج‌های ۶۶۵، ۶۵۲ و ۴۷۰ نانومتر با اسپکتروفتومتر تعیین شد (Lichtenthaler and Buschmann, 2001). برای بررسی نشت یونی، دیسک‌های برگی در آب دیونیزه قرار داده شده و رسانایی الکتریکی اولیه و نهایی اندازه‌گیری و درصد نشت الکترولیت محاسبه شد (Dionisio-Sese and Tobita, 1998). فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از عصاره حاصل از بافت برگ تازه استخراج‌شده در نیتروژن مایع سنجش شد. فعالیت کاتالاز بر اساس تجزیه پراکسید هیدروژن در طول موج ۲۴۰ نانومتر (Aebi, 1984) و فعالیت سوپراکسید دیسموتاز با روش احیای نوری نیتروبلو تترازولیوم در طول موج ۵۶۰ نانومتر (Beauchamp and Fridovich, 1971) تعیین گردید. میزان پرولین برگی نیز با استفاده از واکنش با معرف نین‌هیدرین و قرائت جذب در ۵۲۰ نانومتر محاسبه شد (Bates et al., 1973). برای تعیین عناصر معدنی سدیم و پتاسیم، نمونه‌های برگ پس از خشک شدن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خاکسترگیری

شدند. خاکستر حاصل با اسید هیدروکلریک حل و پس از صاف‌کردن محلول، غلظت عناصر با استفاده از دستگاه فتومتر شعله اندازه‌گیری شد (Williams and Twine, 1960).

در نهایت، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و مقایسه میانگین‌ها با آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

خصوصیات مورفولوژیکی و زیست توده

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر تنش شوری، محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید و اثر متقابل آن‌ها بر ارتفاع، تعداد شاخه جانبی، تعداد برگ، سطح برگ و وزن تر و خشک اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۱).

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر غلظت‌های مختلف سدیم نیتروپروساید بر خصوصیات مورفولوژیکی و زیست توده قرنفل تحت تنش شوری

منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع	تعداد شاخه جانبی	تعداد برگ	سطح برگ	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی
شوری (A)	۳	۱۹/۹۸ **	۱۹/۰۴**	۴۲/۴۸ **	۰/۷۵ **	۳/۰۶**	۱/۳۱**
سدیم نیتروپروساید (B)	۱	۰/۰۵ **	۰/۰۴ns	۳۰/۳۷ **	۰/۴۹ **	۰/۰۴**	۰/۰۳**
A*B	۳	۲/۹۲ **	۴/۰۴**	۱/۵۲ **	۰/۰۱۳ **	۰/۱۱**	۰/۰۳**
خطا	۱۶	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۲۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات(٪)		۴/۳۶	۷/۸۳	۵/۱۴	۱/۵۷	۳/۶۲	۴/۵۰

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

بررسی تأثیر شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر ارتفاع بوته و تعداد شاخه‌های جانبی نشان داد که افزایش شوری موجب کاهش معنی‌دار هر دو شاخص گردید. در شرایط بدون شوری، کاربرد ۱۰۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید باعث افزایش ارتفاع بوته تا ۹/۱۶ سانتی‌متر و تعداد شاخه‌ها تا ۸/۲۵ شاخه شد، که به ترتیب حدود ۲۸٪ و ۳۳٪ افزایش نسبت به شاهد بدون سدیم نیتروپروساید را نشان می‌دهد. در شوری ۳ دسی‌زیمنس بر متر، ارتفاع بوته در گیاهان شاهد به ۷/۱۶ سانتی‌متر کاهش یافت و کاربرد سدیم نیتروپروساید موجب افزایش آن به ۸/۲۶ سانتی‌متر شد. تعداد شاخه‌های جانبی نیز در این شرایط از ۴ شاخه در شاهد به ۵ شاخه با سدیم نیتروپروساید افزایش یافت. در شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر، کاهش ارتفاع بوته در شاهد مشهود بود (۶/۱۶ سانتی‌متر)، و کاربرد سدیم نیتروپروساید موجب جبران جزئی شد (۷/۱۶ سانتی‌متر). تعداد شاخه‌های جانبی نیز در شاهد به حداقل ۳/۱۵ شاخه رسید، در حالی که کاربرد سدیم نیتروپروساید تعداد شاخه‌ها را به ۴ شاخه افزایش داد. در بالاترین سطح شوری، ارتفاع بوته در شاهد به ۵/۱۶ سانتی‌متر کاهش یافت و تعداد شاخه‌ها به ۲ رسید. کاربرد سدیم نیتروپروساید در این شرایط موجب افزایش تعداد شاخه‌ها شد در حالیکه روی ارتفاع گیاه تاثیری نداشت (شکل ۱- الف، ب).

بررسی نتایج نشان داد که افزایش شوری به‌طور معنی‌داری تعداد برگ را کاهش داد؛ به‌طوری که در شوری ۹ دسی‌زیمنس بر متر تعداد برگ بیش از ۵۵ درصد کمتر از شرایط بدون شوری بود. استفاده از سدیم نیتروپروساید در شرایط بدون شوری تعداد برگ را به ۱۳ عدد افزایش داد که حدود ۲۰ درصد بیشتر از شاهد است. در شوری ۳ دسی‌زیمنس بر متر نیز این ترکیب باعث افزایش حدود ۱۶ درصدی تعداد برگ شد. در شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر تفاوتی بین تیمارها مشاهده نشد و تعداد برگ در حد مشابه باقی ماند، اما در بالاترین سطح شوری کاربرد سدیم نیتروپروساید تعداد برگ را به میانگین ۵/۶ عدد رساند که نسبت به شاهد همان سطح حدود ۲۱ درصد افزایش داشت.

در شوری ۹ دسی‌زیمنس بر متر سطح برگ نسبت به شرایط کنترل بیش از ۶۵ درصد کاهش یافت. کاربرد سدیم نیتروپروساید در سطح بدون شوری باعث افزایش حدود ۱۸ درصدی نسبت به شاهد گردید. در شوری ۳ دسی‌زیمنس بر متر نیز این ترکیب موجب افزایش نزدیک به ۱۵ درصدی سطح برگ شد. در شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر اثر مثبت سدیم نیتروپروساید محدود بود و تنها افزایش جزئی در سطح برگ ایجاد شد. در شوری شدید، این ترکیب نتوانست کاهش سطح برگ را جبران کند و تفاوت محسوسی با شاهد مشاهده نشد (شکل ۱- ج، د).

نتایج نشان داد که افزایش شوری تأثیر منفی چشمگیری بر وزن تر و خشک اندام هوایی داشت؛ به‌طوری که در شوری ۹ دسی‌زیمنس بر متر وزن تر و خشک به‌ترتیب حدود ۵۴ و ۶۰ درصد کاهش یافت. کاربرد سدیم نیتروپروساید در شرایط بدون شوری سبب افزایش اندک وزن تر و خشک شد (به‌ترتیب حدود ۴ و ۲ درصد). در شوری ۳ دسی‌زیمنس بر متر، این ترکیب وزن تر را حدود ۱۶ درصد بهبود داد، در حالی که وزن خشک تغییر کمی نشان داد. در سطح شوری ۶

دسی‌زیمنس بر متر، سدیم نیتروپروساید تنها وزن تر را بهبود بخشید و وزن خشک کاهش اندکی داشت. در شوری ۹ دسی‌زیمنس بر متر، این ترکیب نتوانست اثر منفی شوری را جبران کند و وزن تر و خشک نسبت به شاهد همان سطح کاهش بیشتری نشان داد (شکل ۱- ه، و).

تنش شوری به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و عملکرد گیاهان، از طریق افزایش سمیت یونی، اثرات اسمزی و ایجاد استرس اکسیداتیو، پارامترهای رشد از جمله طول ساقه، وزن تر و خشک ساقه و ریشه و همچنین تولید محصول را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد (Iqbal et al., 2015). این اثرات منفی ناشی از تجمع یون‌های سدیم و کلراید در بافت‌های گیاهی است که باعث اختلال در جذب و تعادل سایر عناصر معدنی ضروری و کاهش توانایی گیاه در حفظ تعادل آب می‌شود (Munns, 2002). به علاوه، تولید بیش از حد رادیکال‌های آزاد اکسیژن تحت شرایط شوری، موجب آسیب اکسیداتیو به غشاها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک می‌شود که در نهایت منجر به کاهش کارایی فتوسنتزی و کاهش رشد گیاه می‌گردد (Hasanuzzaman et al., 2014). نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های عزیزی و همکاران (Azizi et al., 2011) که اثرات منفی شوری را بر جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاه قرنفل گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد. آنها نشان دادند که تنش شوری باعث کاهش طول ریشه و ساقه، وزن تر و خشک گیاه و درصد جوانه‌زنی می‌شود که نشانگر حساسیت این گونه به افزایش غلظت نمک در محیط رشد است.

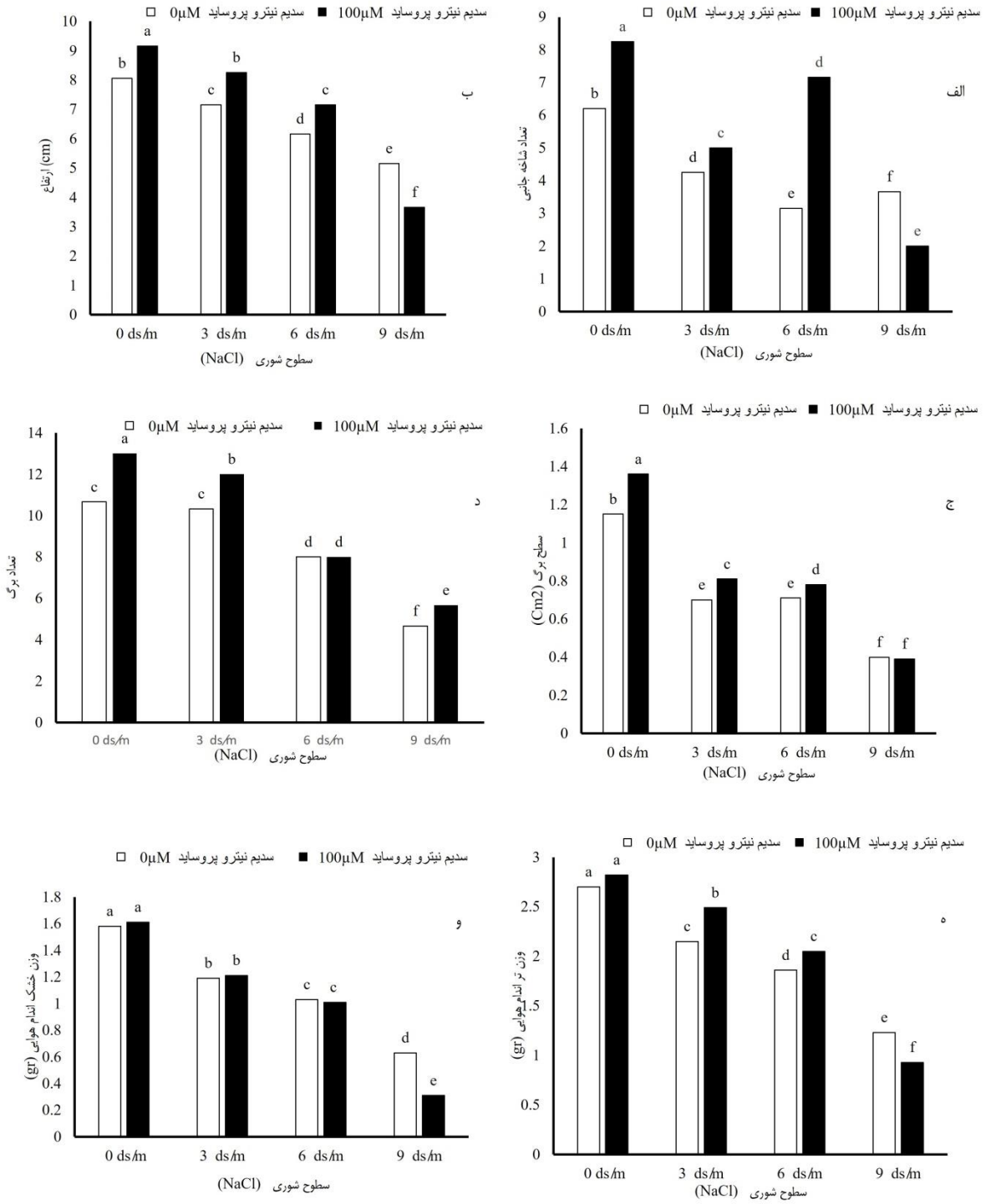
نتایج این پژوهش نشان داد که محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید در غلظت ۱۰۰ میکرومولار می‌تواند اثرات منفی شوری را تا حد قابل توجهی کاهش دهد و پارامترهای رشد مانند ارتفاع بوته و تعداد شاخه‌های جانبی را بهبود بخشد. این یافته‌ها با مطالعات پیشین همسو است که نقش SNP به عنوان منبع آزادسازی نیتریک اکسید را در تنظیم پاسخ‌های گیاه به تنش‌های زیستی و غیرزیستی تأیید می‌کند (Tahjib-Ul-Arif et al., 2022).

سدیم نیترو پروساید با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز به کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از ROS کمک می‌کند که این موضوع در نتایج آزمایش‌های آنزیمی این مطالعه نیز به روشنی مشاهده شد. افزایش این فعالیت‌ها منجر به بهبود وضعیت زیستی برگ‌ها، حفظ سطح رنگدانه‌های فتوسنتزی و کاهش نشت یونی می‌شود که در نهایت باعث حفظ رشد بهتر گیاه تحت شرایط شوری می‌گردد (Arasimowicz-Jelonek & Floryszak-Wieczorek, 2014). مطالعات نشان داده‌اند که کاربرد SNP می‌تواند موجب حفظ آب درون سلولی و افزایش سطح برگ شود، حتی در شرایط تنش شوری، که این امر با یافته‌های این پژوهش در مورد بهبود سطح برگ و زیست‌توده گیاه سازگار است (Ramadan et al., 2019; Tahjib-Ul-Arif et al., 2022). همچنین، اثرات متفاوت SNP بر صفات مورفولوژیکی در گونه‌های مختلف، همانند گل مغربی (*Oenothera biennis*) که در برخی موارد اثر متقابل معنی‌داری با شوری نشان نداده است، می‌تواند به تفاوت‌های گونه‌ای، شدت تنش، غلظت SNP و شرایط محیطی نسبت داده شود (Alizadeh et al., 2024).

محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی

طبق جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) اثر مستقل شوری و سدیم نیتروپروساید و برهمکنش آن‌ها بر کلروفیل a، کلروفیل کل و کارتنوئید در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. در خصوص کلروفیل b اثر مستقل تیمارها بر این صفت معنی‌دار و برهمکنش تیمارها معنی‌دار نبود. بیشترین مقدار کلروفیل a، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها در شرایط بدون شوری و در حضور ۱۰۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید مشاهده شد؛ به‌طوری که این ترکیب نسبت به شاهد همان سطح موجب افزایش حدود ۱۵ درصدی کلروفیل a، ۲۵ درصدی کلروفیل کل و ۱۳ درصدی کاروتنوئیدها گردید. در شوری ۳ دسی‌زیمنس بر متر، کاربرد سدیم نیتروپروساید تأثیر مثبتی بر مقدار کلروفیل کل و کاروتنوئیدها داشت به طوریکه نسبت به شاهد همان سطح به ترتیب حدود ۲۷٪ و ۳۶٪ درصد افزایش یافتند. در شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر، کاهش بیشتری در کلروفیل‌ها مشاهده شد و اثر سدیم نیتروپروساید محدود بود. در نهایت، در شوری ۹ دسی‌زیمنس بر متر همه رنگدانه‌ها به حداقل مقدار رسیدند و مصرف سدیم نیتروپروساید تنها در کلروفیل کل و کاروتنوئیدها اثر جبرانی نسبی داشت، اما در کلروفیل a تأثیر مثبتی مشاهده نشد (شکل ۲- الف، ب و ج).

تنش شوری با اختلال در ساختار و عملکرد کلروپلاست، عملکرد فتوسنتزی را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (Sotiras et al., 2019). نتایج این پژوهش نشان داد که کمترین مقادیر رنگدانه‌ها شامل کلروفیل a، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها در بالاترین سطح شوری و در تیمار شاهد به ثبت رسید. این یافته‌ها با نتایج الوان و همکاران (Alvan et al., 2011) نیز همخوانی دارد؛ آن‌ها گزارش کردند که شوری شدید در گیاه قرنفل سبب کاهش معنی‌دار رنگدانه‌های فتوسنتزی شد. در پژوهش‌های متعددی نشان داده شده است که سدیم نیتروپروساید با جلوگیری از تخریب کلروفیل، حفظ آهن و افزایش جذب آن توسط گیاه، نقش حفاظتی مؤثری در حفظ رنگدانه‌ها در شرایط تنش ایفا می‌کند.



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر برهمکنش سدیم نیتروپروساید بر خصوصیات مورفولوژیکی و زیست توده قرنفل تحت تنش شوری؛ ستون‌های با حروف متفاوت در سطح احتمال ۵٪ بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار دارند. (الف- تعداد شاخه جانبی، ب- ارتفاع گیاه، ج- سطح برگ، د- تعداد برگ، ه- وزن تر اندام هوایی و و- وزن خشک اندام هوایی)

جدول ۲- تجزیه واریانس سدیم نیتروپروساید بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، نشت یونی و محتوای رطوبت نسبی قرنفل تحت تنش شوری

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئید	نشت یونی	محتوای رطوبت نسبی
شوری (A)	۳	۰/۲۱۶ **	۰/۲۴۹ **	۰/۰۳۵ **	۴۱۲۵۴/۶۴**	۴۸۱/۸۱**	۷۱۳/۳۶**
سدیم نیتروپروساید (B)	۱	۰/۰۰۴ **	۰/۰۷۹ **	۰/۰۱۶**	۵۱۱۸/۳۵**	۰/۳۱ ns	۲۰۰۵/۲۹**
A*B	۳	۰/۰۰۶ **	۰/۰۰۴۴ ns	۰/۰۰۰۳**	۵۷/۶۸ **	۶۷/۰۱**	۴۳۶/۹۷**
خطا	۱۶	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۳	۴/۱۶	۱۵/۰۷
ضریب تغییرات(٪)		۶/۵۴	۱۴/۵۰	۵/۳۳	۳/۱۹	۳/۳۵	۴/۹۷

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

همچنین این ترکیب با فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در کلروپلاست و کاهش تشکیل اتیلن، روند تخریب کلروفیل را کند می‌سازد (Hancock, 2020; Neill et al., 2003). در مطالعه حاضر، نتایج مشابهی به‌دست آمد در سطوح پایین تا متوسط شوری، اعمال سدیم نیتروپروساید منجر به حفظ معنی‌دار کلروفیل کل و کاروتنوئیدها شد، اما در شوری شدید، این اثر محدودتر بود و به‌ویژه در کلروفیل a اثری قابل توجه مشاهده نشد.

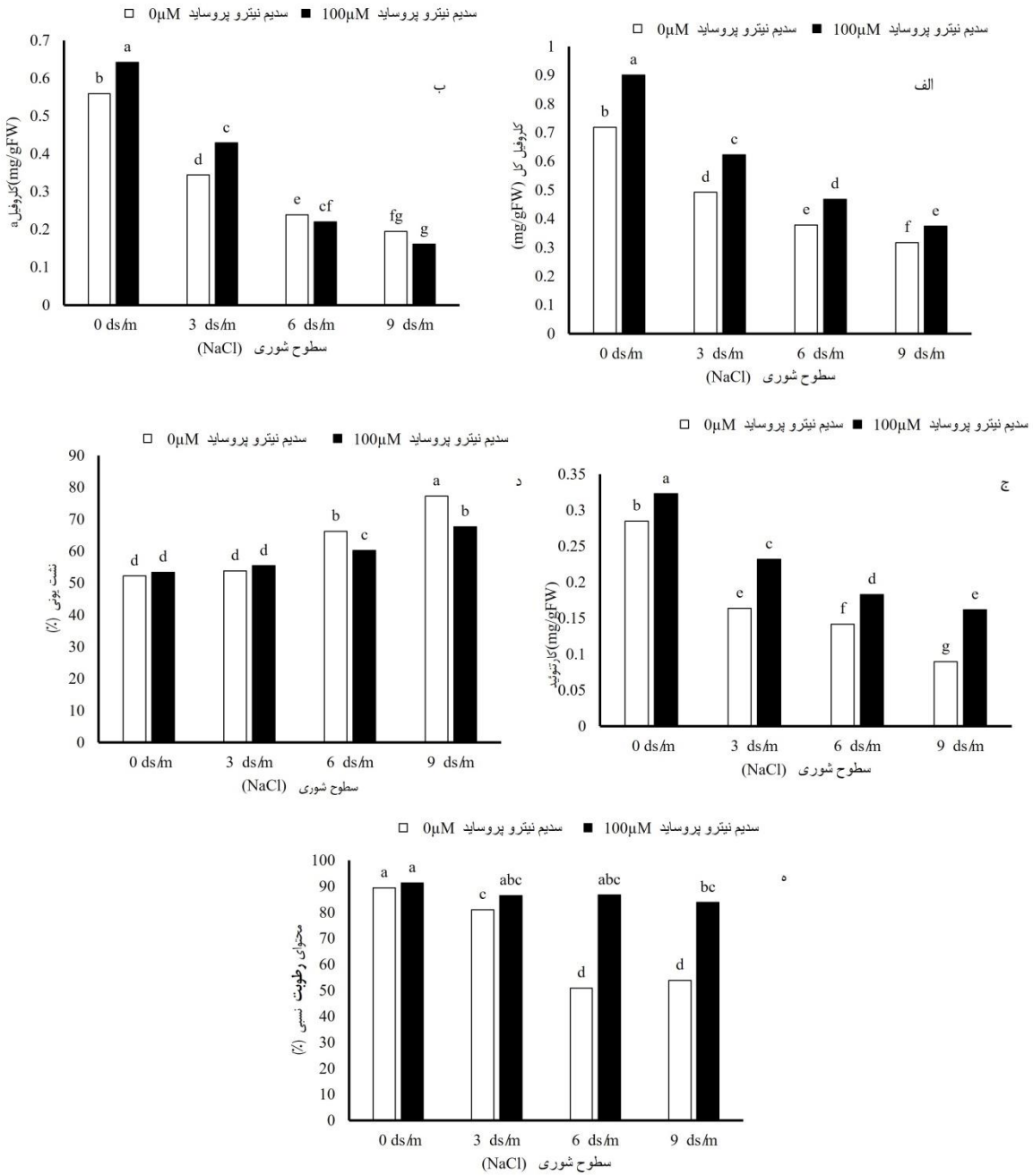
این یافته‌ها با سایر پژوهش‌ها هم‌راستا هستند؛ به‌طوری که در پژوهشی تنش شوری سبب کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی در گیاه بنفشه شد (اسکندری و همکاران، ۱۴۰۳). در گیاهانی مانند خار مریم، گلرنگ و گل مغربی، نقش سدیم نیتروپروساید در کاهش تنش اکسیداتیو و حفظ رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی تأیید شده است (Asadi-Sanam et al., 2018; Chavoushi et al., 2019; Alizadeh et al., 2024). مطالعه‌ای نشان داده است که کاربرد سدیم نیتروپروساید در گیاه خار مریم (*Silybum marianum*) تحت شرایط تنش شوری، باعث افزایش معنی‌دار محتوی کلروفیل، بهبود ظرفیت فتوسنتزی و فعالیت آنزیم‌های حفاظتی می‌شود؛ به‌ویژه شاخص‌هایی همچون Fv/Fm و محتوای کلروفیل به‌طور محسوسی بهبود یافتند (Zangani et al., 2023).

نتایج نشت یونی و محتوای رطوبت نسبی برگ

طبق جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) برهمکنش سدیم نیترو پروساید و شوری بر درصد نشت یونی و محتوای رطوبت نسبی برگ در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. افزایش شوری موجب افزایش معنی‌دار نشت یونی در برگ‌های قرنفل گردید. در تیمار شاهد (بدون شوری و بدون کاربرد سدیم نیتروپروساید)، نشت یونی در کمترین مقدار خود (۵۲/۲۱ درصد) قرار داشت، در حالی که بیشترین مقدار آن در شوری ۹ دسی‌زیمنس بر متر بدون سدیم نیتروپروساید مشاهده شد (۷۷/۲۹ درصد) که حدود ۴۸٪ بیشتراز شاهد بود. کاربرد سدیم نیتروپروساید در شرایط شوری تا حدودی این روند افزایشی را مهار نمود؛ به‌طوری که در شوری ۹ دسی‌زیمنس بر متر، استفاده از سدیم نیتروپروساید نشت یونی را نسبت به تیمار مشابه بدون آن حدود ۱۲٪ کاهش داد. همچنین در شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر نیز مصرف سدیم نیتروپروساید منجر به کاهش حدود ۹ درصدی نشت یونی شد (شکل ۲- د).

بیشترین مقدار محتوای رطوبت نسبی در شوری صفر همراه با سدیم نیتروپروساید مشاهده شد که تفاوت معنی داری با شاهد، شوری ۳ و ۶ دسی زیمنس در ترکیب با سدیم نیتروپروساید نداشت. در مقابل، کمترین مقدار رطوبت نسبی در تیمار بدون سدیم نیتروپروساید در شوری ۶ و ۹ دسی زیمنس ثبت شد. در همه سطوح شوری کاربرد سدیم نیترو پروساید سبب حفظ رطوبت نسبی در مقایسه با شاهد همان سطح شوری شد (شکل ۲- ه).

تنش شوری با ایجاد فشار اسمزی و تجمع یون‌های سمی مانند Na^+ و Cl^- در سلول‌ها، موجب اختلال در فعالیت‌های بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و مولکولی گیاه می‌شود (Arif et al., 2020). این تجمع یون‌ها باعث کاهش توانایی گیاه در جذب آب و برهم خوردن تعادل اسمزی سلول می‌شود، که در نهایت با افزایش نشت یونی و کاهش محتوای نسبی آب برگ همراه است (Isayenkov and Maathuis, 2019). در پژوهش حاضر، افزایش سطوح شوری موجب افزایش معنی‌دار نشت یونی و کاهش محتوای نسبی آب برگ شد، که نشان‌دهنده آسیب غشای سلولی و کاهش توانایی حفظ آب در برگ‌هاست. این یافته‌ها تأیید کننده گزارش‌های قبلی هستند که شوری با آسیب به غشای سلولی و اختلال در تنظیم آبیاری داخلی گیاه، توانایی آن را در حفظ آب کاهش می‌دهد (Farooq et al., 2015).



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر برهمکنش سدیم نیتروپروساید بر رنگدانه‌های فتوسنتزی، نشت یونی و محتوای رطوبت نسبی قرنفل تحت تنش شوری؛ ستون‌های با حروف متفاوت در سطح احتمال ۵٪ بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار دارند. (الف- کلروفیل کل، ب- کلروفیل a ، ج- کارتنوئید ، د- نشت یونی، ه- محتوای رطوبت نسبی)

گزارش شده است که NO با سرکوب آسیب اکسیداتیو و تحریک فعالیت ATPase غشایی، از تخریب ساختار غشا و نشت یونی جلوگیری می‌کند و به حفظ یکپارچگی غشایی گیاهان تحت تنش کمک می‌کند (Izadi and Mirazi, 2022). در این مطالعه، استفاده از سدیم نیتروپروساید موجب کاهش نشت یونی شد، که بیانگر حفظ یکپارچگی غشا و کاهش آسیب ناشی از رادیکال‌های آزاد اکسیژن است. با این حال در بالاترین سطح شوری اثر سدیم نیتروپروساید در کاهش نشت یونی کمتر مشهود بود. به علاوه، نیتریک‌اکسید به

تنظیم بسته شدن روزنه‌ها کمک می‌کند که این امر منجر به بهبود کارایی مصرف آب و حفظ رطوبت برگ‌ها در شرایط تنش می‌شود (Duan et al., 2007). یافته‌های حاضر نیز نشان داد که در تمام سطوح شوری، کاربرد سدیم نیتروپروساید توانست میزان رطوبت نسبی برگ‌ها را نسبت به تیمارهای مشابه بدون آن حفظ کند، که با نتایج فاروغ و عرفه (Farouk and Arafa, 2018) و پیله و همکاران (۱۴۰۲) هم‌راستا است.

محتوای پرولین

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که محتوای پرولین در برگ‌های قرنفل تحت تنش شوری و اثر سدیم نیتروپروساید در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد. در شرایط بدون شوری، پرولین پایین و در حدود ۱/۰۴ میلی گرم بر گرم وزن تر بود. با اعمال شوری و با افزایش غلظت کلرید سدیم تجمع پرولین افزایش یافت . کاربرد سدیم نیتروپروساید موجب افزایش بیشتر پرولین در تمام سطوح شوری شد؛ به‌گونه‌ای که در شوری ۹ دسی زیمنس بر متر در ترکیب با سدیم نیترو پروساید بیشترین محتوای پرولین ثبت شد (شکل ۳- د).

این یافته‌ها نشان‌دهنده نقش حیاتی پرولین در حفظ تعادل اسمزی و کاهش آسیب‌های ناشی از استرس یونی است، که با نقش شناخته شده آن به عنوان یک آنتی‌اکسیدان و مولکول تنظیم‌کننده تعادل آب در سلول همخوانی دارد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که اگرچه در برخی گیاهان غلظت پرولین تحت شرایط تنش به اندازه‌ای نیست که به تنهایی پتانسیل اسمزی را کاملاً تنظیم کند، اما این مولکول به دلیل نقش مهمش در مهار گونه‌های فعال اکسیژن و کاهش آسیب اکسیداتیو سلولی، به عنوان یکی از مولفه‌های کلیدی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه عمل می‌کند (Farouk and Arafa, 2018). از سوی دیگر، نیتریک اکسید برون‌زا با افزایش تجمع اجزای اسمزی مانند پرولین و گلیسین بتائین، نقش کلیدی در حفظ پایداری غشاها، بهبود محتوای آب سلول و کاهش شدت تنش شوری ایفا می‌کند (Dawood et al., 2024). پژوهش‌های مشابه نیز نشان داده‌اند که سدیم نیتروپروساید، به عنوان منبع NO، می‌تواند تجمع پرولین را در گیاهان تحت شرایط تنش به طور معنی‌داری افزایش دهد (Zangani et al., 2024).

پروتئین محلول و فعالیت آنزیمی

اثر مستقل و برهمکنش شوری و سدیم نیترو پروساید بر مقدار پروتئین محلول، آنزیم‌های سوپر اکسید دیسموتاز و کاتالاز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین مقدار پروتئین محلول در شوری ۳ دسی‌زیمنس بر متر همراه با مصرف سدیم نیتروپروساید ثبت گردید. همچنین، در سایر سطوح شوری نیز کاربرد سدیم نیتروپروساید به بهبود محتوای پروتئین محلول منجر شد؛ بطوریکه در شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر، مصرف سدیم نیتروپروساید موجب افزایش حدود ۸ درصدی پروتئین نسبت به تیمار مشابه فاقد آن گردید. این امر بیانگر نقش حفاظتی سدیم نیتروپروساید در سنتز و پایداری پروتئین‌های محلول تحت شرایط تنش شوری است (شکل ۳- الف).

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نیز به‌طور معنی‌داری از تیمارها تأثیر پذیرفت. بیشترین فعالیت سوپراکسید دیسموتاز در شوری ۳ دسی‌زیمنس بر متر همراه با سدیم نیتروپروساید مشاهده شد که نسبت به شاهد حدود ۱۵۸٪ افزایش داشت. همچنین، بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر همراه با مصرف سدیم نیتروپروساید به‌دست آمد که در مقایسه با شاهد حدود ۱۸۳٪ بیشتر بود (شکل ۳- ب، ج).

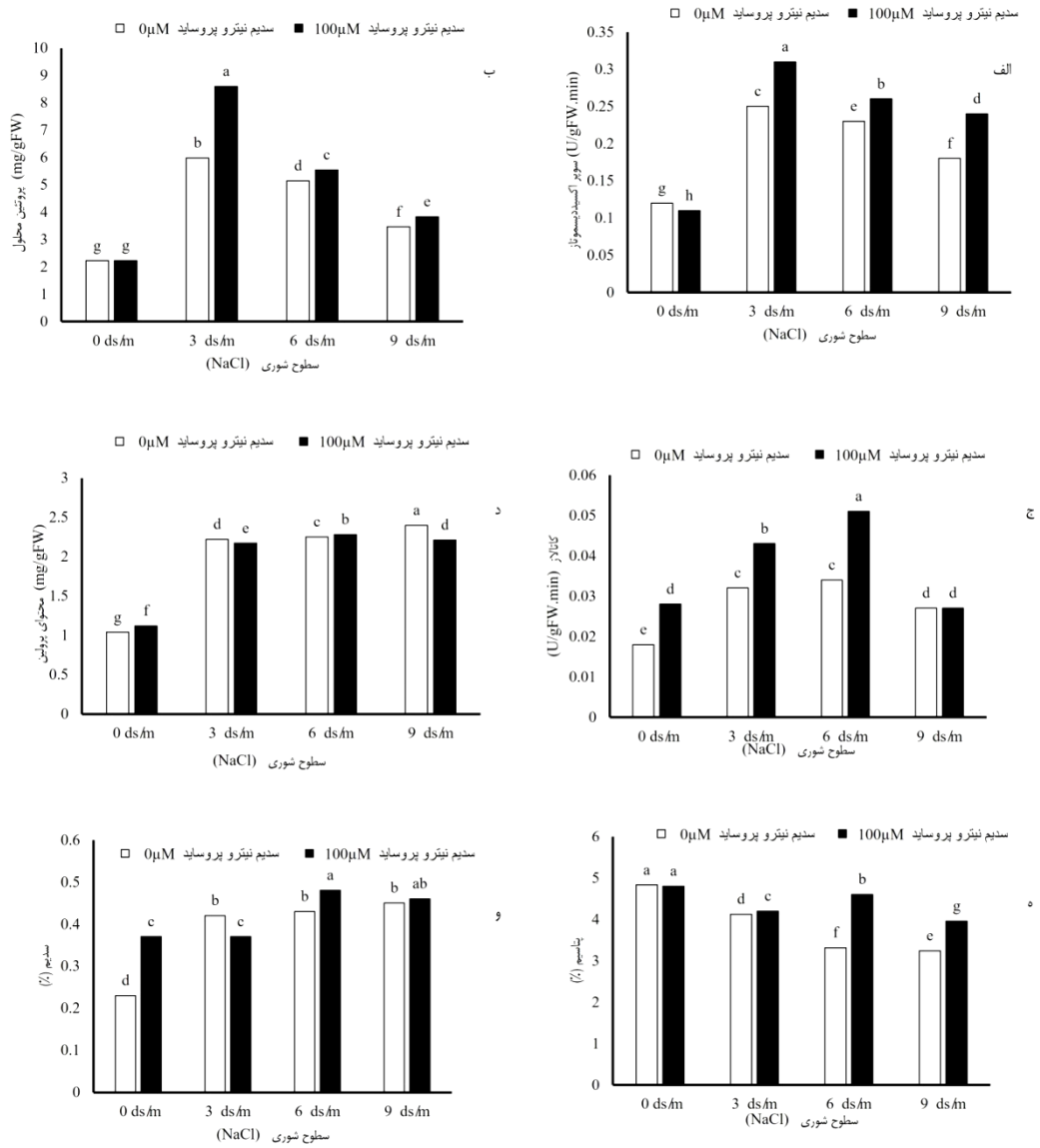
نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد سدیم نیتروپروساید موجب بهبود معنی‌دار محتوای پروتئین محلول و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در گیاه قرنفل تحت تنش شوری گردید. افزایش پروتئین محلول در حضور سدیم نیتروپروساید بیانگر نقش حفاظتی این ترکیب در سنتز و پایداری پروتئین‌ها و حفظ ساختار سلولی در شرایط تنش است. نیتریک اکسید که از تجزیه سدیم نیتروپروساید آزاد می‌شود، بسته به غلظت، نوع گیاه، بافت، سن گیاه و شرایط محیطی، می‌تواند نقش‌های متنوعی از جمله اثرات حفاظتی یا سمی ایفا کند (Nail et al., 2003).

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تیمار با سدیم نیتروپروساید می‌تواند سطح پروتئین در گیاهانی مانند سرخارگل (*Echinacea purpurea*) افزایش دهد (Asadi-Sanam et al., 2018)، اگرچه در غلظت‌های بالا ممکن است اثرات منفی از طریق القای پراکسیداسیون لیپیدی ظاهر شود. در پژوهش حاضر، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در حضور سدیم نیتروپروساید نیز مشاهده شد که می‌تواند ناشی از تحریک بیان ژن‌های مرتبط با آنزیم‌های دفاعی شامل CAT، SOD، APX، GR، GPX و DHAR باشد. این افزایش بیان و فعالیت آنزیم‌ها به بهبود توانایی گیاه در مقابله با آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از شوری کمک می‌کند (Wani et al., 2021). یافته‌های این مطالعه با نتایج گزارش‌شده در گیاه نعنا (*Mentha piperita*) همسو است، جایی که کاربرد NO یا مشتقات آن موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تحت شرایط شوری شده است (Arshan and Pasalari, 2023). همچنین پژوهش‌های دیگری نشان داده‌اند که استفاده از سدیم نیتروپروساید از طریق بهبود وضعیت آنتی‌اکسیدانی و کاهش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن، تحمل گیاهان زراعی مانند گندم را به شوری افزایش می‌دهد (Hasanuzzaman et al., 2018).

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر سدیم نیتروپروساید بر محتوای پرولین، پروتئین محلول، فعالیت آنزیمی و عناصر در گیاه قرنفل تحت تنش شوری

منابع تغییرات	درجه آزادی	محتوای پرولین	پروتئین محلول	سوپر اکسید دیسموتاز	کاتالاز	سدیم	پتاسیم
شوری (A)	۳	۲/۰۹۸۹**	۲۷/۷۸**	۰/۰۳۰۱**	۰/۰۰۰۴۸**	۰/۰۲۵۵ **	۱/۵۸۳**
سدیم نیتروپروساید (B)	۱	۰/۰۰۸۴**	۴/۷۰**	۰/۰۰۹۳**	۰/۰۰۰۵۳**	۰/۰۰۴۵ **	۱/۵۸۱**
A*B	۳	۰/۰۲۵۱**	۱/۹۹**	۰/۰۰۱۵**	۰/۰۰۰۰۸۶**	۰/۰۲۰۴ **	۰/۵۶۵**
خطا	۱۶	۰/۰۰۰۰۶۲	۰/۰۳۸۱	۰/۰۰۰۰۰۲۸	۰/۰۰۰۰۰۲۸	۰/۰۰۰۰۷۰۱	۰/۰۰۱۷۷
ضریب تغییرات(٪)		۰/۴۰	۴/۱۹	۰/۷۷	۵/۱۵	۲/۱۸	۱/۰۱۴

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



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر برهمکنش سدیم نیتروپروساید بر پرولین، پروتئین محلول، فعالیت آنزیمی و عناصر در گیاه قرنفل تحت تنش شوری؛ ستون‌های با حروف متفاوت در سطح احتمال ۵٪ بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار دارند. (الف- سوپراکسیددسموتاز، ب- پروتئین محلول ، ج- کاتالاز ، د- محتوای پرولین، ه- درصد پتاسیم و و- درصد سدیم)

عناصر سدیم و پتاسیم برگ

اثر مستقل و برهمکنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر میزان سدیم و پتاسیم برگ در سطح احتما یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که با افزایش شوری از ۰ تا ۹ دسی زیمنس برمتر محتوای سدیم در برگ‌های قرنفل به طور پیوسته افزایش یافت؛ به‌طوری که در شرایط بدون سدیم نیتروپروساید، میزان سدیم از حدود ۰/۲۳٪ در شرایط بدون شوری به ۰/۴۵٪ در شوری ۹ دسی زیمنس بر متر رسید و کاربرد سدیم نیتروپروساید تغییر قابل توجهی در مقدار سدیم ایجاد نکرد. در مقابل، محتوای پتاسیم با افزایش شوری کاهش یافت؛ به‌گونه‌ای که در شوری ۹ دسی زیمنس بدون سدیم نیتروپروساید، پتاسیم به حدود ۳/۲۴٪ کاهش یافت. با این حال، استفاده از سدیم نیتروپروساید موجب حفظ یا افزایش نسبی پتاسیم شد؛ به طوری که در شوری ۶ دسی زیمنس بر متر پتاسیم از ۳/۳۱٪ به ۴/۶۰٪ و در شوری ۹ دسی زیمنس به ۳/۲۴٪ به ۳/۹۶٪ رسید.

در پژوهش حاضر با افزایش شدت شوری، محتوای سدیم در برگ‌های قرنفل به طور معنی‌داری افزایش یافت، در حالی که میزان پتاسیم به طور معکوس کاهش یافت. این یافته بیانگر رقابت شدید بین یون‌های سدیم و پتاسیم برای جایگاه‌های جذب و انتقال در گیاه است؛ به گونه‌ای که حضور بالای سدیم موجب محدود شدن دسترسی و انتقال پتاسیم به اندام‌های هوایی می‌شود و در نهایت تعادل یونی گیاه را مختل می‌کند. پتاسیم به عنوان یکی از عناصر کلیدی در تنظیم هموستاز یونی، تنظیم باز و بسته شدن روزنه‌ها، فعال‌سازی آنزیم‌ها و عملکرد بهینه فرآیندهای فتوسنتزی شناخته می‌شود، بنابراین کاهش آن می‌تواند باعث بروز سمیت یونی، افزایش نشت یونی سلولی، کاهش پتانسیل اسمزی و در موارد شدید، مرگ سلولی شود (Safdar et al., 2019).

کاربرد سدیم نیتروپروساید توانست به طور قابل توجهی از اثرات منفی ناشی از شوری بکاهد و در سطوح بالای شوری، از کاهش شدید پتاسیم جلوگیری کند. این نتایج با گزارش‌های پیشین همخوانی دارد. در مطالعه‌ای روی گیاه برنج، نشان داده شد که سدیم نیتروپروساید با محدود کردن جذب و انتقال سدیم و در عین حال تقویت جذب پتاسم موجب افزایش تحمل شوری می‌شود (Iqbal et al., 2015). علاوه بر این، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که اثر محافظتی سدیم نیتروپروساید در گیاهان تحت تنش شوری عمدتاً از طریق افزایش سطح نیتریک‌اکسید درون‌زاد، بهبود تعادل Na^+/K^+ و تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی حاصل می‌شود (Zangani et al., 2023). این مکانیسم‌ها به گیاه کمک می‌کنند تا استرس یونی و اکسیداتیو را کنترل کرده و از اختلالات ناشی از شوری پیشگیری نمایند.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان داد که تنش شوری به طور قابل توجهی رشد مورفولوژیک، عملکرد فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه قرنفل را کاهش می‌دهد، به‌ویژه در غلظت‌های بالای شوری (بیش از ۶ دسی‌زیمنس بر متر) که اثرات منفی شوری شدت می‌یابد. مصرف سدیم نیتروپروساید در غلظت ۱۰۰ میکرومولار توانست به طور مؤثری اثرات منفی شوری را تعدیل کند و رشد گیاه، حفظ سطح برگ و رنگدانه‌های فتوسنتزی، و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را بهبود بخشد. این ترکیب همچنین باعث کاهش نشت یونی، افزایش تجمع پرولین و پروتئین محلول و حفظ تعادل پتاسیم به سدیم در برگ‌ها شد که نشان‌دهنده ارتقای مقاومت گیاه در برابر تنش شوری تا حدود ۶ دسی‌زیمنس بر متر بود. با این حال، در بالاترین سطح شوری (۹ دسی‌زیمنس بر متر)، اثرات حفاظتی سدیم نیتروپروساید کاهش یافت. بنابراین، سدیم نیتروپروساید می‌تواند به عنوان یک ماده مناسب برای بهبود سازگاری گیاه قرنفل در شرایط شوری (تا ۶ دسی زیمنس بر متر) مطرح باشد، با این حال توصیه می‌شود تحقیقات بیشتری روی ارقام و گونه‌های مختلف گیاهان تیره میخک انجام شود تا اثرات و کاربردهای آن به طور کامل‌تر و جامع‌تر ارزیابی گردد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری بدلیل حمایت در اجرای این طرح پژوهشی (کد: ۰۵-۱۴۰۴-۰۱) سپاسگزاری می‌شود.

منابع

اسکندری، س.، کریمی، م. و قربانعلی‌زاده، ف. ۱۴۰۳. تاثیر تنش آب شور و تیمار ملاتونین بر گلدهی و برخی صفات مورفوفیزیولوژیک گیاه بنفشه (*Viloa× wittrockiana*). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۸(۳): ۴۶۵- ۴۷۶.

پیله، ف.، عبادی، ع.، زمانی، ذ. و بابالار، م. ۱۴۰۲. واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی برخی از ارقام و پایه‌های انگور تحت تیمار سدیم نیتروپروساید در شرایط تنش شوری. نشریه علوم باغبانی ایران. ۵۴(۴): ۶۶۱-۶۸۳.

صادقی، س. و جبارزاده، ز. ۱۴۰۱. تأثیر کاربرد برگی سدیم نیتروپروساید بر برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک آلسترومریا (*Alstroemeria aurea*)رقم Orange Queen در شرایط کشت هیدروپونیک. فرایند و کارکرد گیاهی. ۱۱(۵۱): ۳۵-۵۲.

New York, NY. 2642: 97–109. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3044-0_5

Dawood, M.F.A., Tahjib-Ul-Arif, M., Sohag, A. A. M., and Abdel Latef, A.A.H. 2024. Role of Acetic Acid and Nitric Oxide against Salinity and Lithium Stress in Canola (*Brassica napus* L.). Plants. 13(1): 51. https://doi.org/10.3390/plants13010051

Dionisio-Sese, M. L. and Tobita, S. 1998. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. Plant science. 135(1): 1–9.

Farouk, S. and Arafa, S.A. 2018. Mitigation of salinity stress in canola plants by sodium nitroprusside application. Spanish Journal of Agricultural Research. 16(3): e0802. https://doi.org/10.5424/sjar/2018163-13252

Gull, A., Lone, A.A. and Wani, N.U. I. 2019. Biotic and abiotic stresses in plants. Abiotic and biotic stress in plants. IntechOpen.

Hancock, J.T.2020. Nitric oxide signaling in plants. Plants. 9(11):1550.

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M.M., Roychowdhury, R. and Fujita, M. 2018. Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of nitric oxide signaling in plants under abiotic stresses. Plant Cell Reports. 37: 1–17. https://doi.org/10.1007/s00299-017-2236-8

Isayenkov, S.V. and Maathuis, F.J. 2019. Plant salinity stress: many unanswered questions remain. Frontiers in plant science. 10:80. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00080

Iqbal, M. M., Murtaza, G., Saqib, Z. A. and Rashid, A. 2015. Growth and physiological responses of two rice varieties to applied lead in normal and salt-affected soils. International Journal of Agriculture and Biology. 17: 901–910.

Iqbal, S., Hussain, S., Qayyaum, M. A. and Ashraf, M. 2020. The response of maize physiology under salinity stress and its coping strategies. Plant Stress Physiology. IntechOpen. https://doi.org/ 10.5772/intechopen.92213

Izadi, Z. and Mirazi, N. 2022. Effect of foliar application of sodium nitroprusside on some morphological, physiological and biochemical properties of marigold plant (*Calendula officinalis* L.) under different irrigation regimes. Journal of Plant Production Technology. 21(1):1-17.

Kopyra, M. and Gwozdz, E.A. 2003. Nitric Oxide stimulates seeds germination and counteracts the inhibitory effect of heavy metals and salinity on root growth of *Lupinus luteus*. Plant Physiology and Biochemistry. 41(11-12):1011-1017.

Laspina, N.V., Groppa, M.D., Tomaro, M.L. and Benavides, M.P. 2005. Nitric oxide protects sunflower leaves against Cd-induced oxidative

Aebi, H. 1984. Catalase in vitro (Methods in enzymology). 105: 121–126. Elsevier.

Alizadeh, S., Nourizad Ahmedabad, A., Bolandnazar, S. and Amani, M. 2024. The Effect of Sodium Nitroprusside on some Morphological and Physiological Traits of Evening Primrose (*Oenothera biennis* L.) under Salt Stress. Plant Productions. 15 (4):150-164.

Alvan, H.A., Jabbarzadeh, Z., Rezapour Fard, J. and Noruzi, P. 2025. Selenium foliar application alleviates salinity stress in sweet william (*Dianthus barbatus* L.) by enhancing growth and reducing oxidative damage. Scientific Reports. 15: 5570. https://doi.org/10.1038/s41598-025-89463-6

Arif, Y., Singh, P., Siddiqui, H., Bajguz, A. and Hayat, S. 2020. Salinity induced physiological and biochemical changes in plants: An omic approach towards salt stress tolerance. Plant Physiology and Biochemistry. 156:64-77.

Arshan, K. and Pasalari, H. 2023. The effect of sodium nitroprusside (SNP) on functional, phytochemical and physiological characteristics of peppermint under salinity stress. Journal of Plant Process and Function.12 (56): 315-324.

Asadi-Sanam, S., Mohammadi, S.M., Rameeh, V., Gerami, M. and Khoshrooz, M. 2018. Effect of sodium nitroprusside (SNP) on some of biochemical characteristics of purple coneflower (*Echinacea purpurea* L.) under salinity stress. Plant Process and Function. 7 (23):123-138.

Azizi, M., Chehrazi, M., and Zahedi, S. M. 2011. Effects of salinity stress on germination and early growth of sweet william (*Dianthus barbatus*). Asian Journal of Agricultural Sciences. 3(6): 453–458.

Bates, L. S., Waldren, R., and Teare, I. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and soil. 39:205–207.

Beauchamp, C., and Fridovich, I. 1971. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. Analytical biochemistry. 44(1): 276–287.

Chandra, S. and Rawat, D. S. 2015. Medicinal plants of the family Caryophyllaceae: a review of ethno - medicinal uses and pharmacological properties. Integrative Medicine Research. 4(3): 123-131.

Chavoushi, M., Najafi, F., Salimi, A. and Angajib, A. 2019. Effects of nitric oxide on reducing oxidative stress induced by drought in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology). 32(3): 535-545.

Corpas, F.J. and Palma, J.M. 2023. Functions of NO and H_2S Signal Molecules Against Plant Abiotic Stress. In: Couée, I. (eds) Plant Abiotic Stress Signaling. Methods in Molecular Biology, vol 2642. Humana,

Tabrizi Dooz, R., Kalateh Jari, S., Naderi, D., Ghanbari Jahromi, M. and Asadi Gharneh, H. A. 2023. Role of foliar application of sodium nitroprusside on induction of antioxidant enzyme activities of narcissus (*Narcissus tazetta* L.) in response to saline water irrigation. Plant Process and Function. 12(54): 73–90.

Tahjib-Ul-Arif, M., Wei, X., Jahan, I., Hasanuzzaman, M., Sabuj, Z.H., Zulfiqar, F., Chen, J., Iqbal, R., Dastogeer, K.M., Sohag, A.A.M. and Tonny, S.H. 2022. Exogenous nitric oxide promotes salinity tolerance in plants: A meta-analysis. Frontiers in Plant Science. 13: 957735. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.957735

Wani, K. I., Naeem, M., Castroverde, C. D. M., Kalaji, H. M., Albaqami, M. andAftab, T. 2021. Molecular mechanisms of nitric oxide (NO) signaling and reactive oxygen species (ROS) homeostasis during abiotic stresses in plants. International Journal of Molecular Sciences. 22(17): 9656 .

Williams, V. and Twine, S. 1960. Flame photometric method for sodium, potassium and calcium. Modern methods of plant analysis. 5: 3–5.

Zangani, E., Angourani, H. R., Andalibi, B., Vaezi Rad, S. and Mastinu, A. 2023. Sodium nitroprusside improves the growth and behavior of the stomata of *Silybum marianum* L. subjected to different degrees of drought. Life.13 (4): 875. https://doi.org/10.3390/life13040875

stress. Plant science. 169(2): 323-330.

Lichtenthaler, H. K. and Buschmann, C. 2001. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV- VIS spectroscopy. Current protocols in food analytical chemistry. 1(1): F4. 3.1–F4. 3.8 .

Mostofa, M. G., Fujita, M. and Tran, L.-S. P. 2015. Nitric oxide mediates hydrogen peroxide-and salicylic acid-induced salt tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. Plant growth regulation. 77: 265–277 .

Neill, S.J., Desikan, R. and Hancock, J.T. 2003. Nitric oxide signalling in plants. New Phytologist. 159(1):11-35.

Ramadan, A.A., Abd Elhamid, E.M. and Sadak, M.S. 2019. Comparative study for the effect of arginine and sodium nitroprusside on sunflower plants grown under salinity stress conditions. Bulletin of the National Research Centre. 43(1):1-12. https://doi.org/10.1186/s42269-019-0156-0

Schweiger, R., Baier, M.C., Persicke, M. and Müller, C., 2014. High specificity in plant leaf metabolic responses to arbuscular mycorrhiza. Nature Communications. 5(1): 3886. https://doi.org/10.1038/ncomms4886

Safdar, H., Amin, A., Shafiq, Y., Ali, A., Yasin, R., Shoukat, A., Hussan, M. U. and Sarwar, M. I. 2019. A review: Impact of salinity on plant growth. Natural sciences. 17: 34-40.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.1, Vol. 20, Apr.-May. 2026, p. 26-38

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۲۰، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۵، ص. ۳۸-۲۶

Role of Sodium Nitroprusside in Improving Growth and Stress Responses of Sweet William under Saline Water Irrigation

M. Karimi*[1], M. Eslami[2], F. Ghorbanalizadeh Saadatabad[3], N. Heydari Raeisi[4]
Recived: Aug. 24, 2025 Accepted: Oct. 18, 2025

Abstract

Increasing salinity of water resources, especially in arid and semi-arid regions of the world and Iran, is a major challenge in agricultural production that limits plant growth and performance. However, the use of compounds such as sodium nitroprusside, a nitric oxide donor, can enhance plant tolerance to salt stress. In this study, the effects of different salinity levels (0, 3, 6, and 9 dS/m) and the application of 100 µM sodium nitroprusside on morphological, physiological, and biochemical traits of sweet william (*Dianthus barbatus*) were investigated. The results showed that increasing salinity significantly reduced plant growth and performance, especially at higher levels (6 and 9 dS/m). Application of sodium nitroprusside effectively mitigated the negative effects of salinity at low to moderate salinity levels (0, 3, and 6 dS/m), but its protective effects decreased at the highest salinity level (9 dS/m). Additionally, sodium nitroprusside increased photosynthetic pigments, reduced ion leakage, maintained relative leaf water content and leaf potassium, and enhanced proline accumulation, soluble protein content, and antioxidant enzyme activities including superoxide dismutase and catalase. These results indicate that sodium nitroprusside can partially alleviate the adverse effects of salinity in sweet william.

Keywords: Environmental stress, Ornamental plant, Proline, Potassium, Sodium chloride

1- Associate Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural ResourcesUniversity, Sari, Iran, ORCID: 0000-0002-9667-2770
2- MSc graduate, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural ResourcesUniversity, Sari, Iran
3- Ph. D Student, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural ResourcesUniversity, Sari, Iran
4- MSc graduate, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural ResourcesUniversity, Sari, Iran
(*- Corresponding Author Email: karimi@sanru.ac.ir)