

القای مقاومت به نیکل با نیتروپروساید سدیم در گیاه گوجه فرنگی

عطیه اورعی، متینه مرادیان، یحیی سلاح ورزی*، علی تهرانی فر و امیرعلی صلواتی

گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۲، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵)

چکیده

انباشت فلزات سنگین در سراسر اکوسیستم مشکلات زیست محیطی بزرگی است که کیفیت زندگی همه موجودات زنده را تهدید می کند. در آزمایشی به صورت فاکتوریل بر مبنای طرح بلوک کاملاً تصادفی، اثر نیتروپروساید سدیم بر پاسخ های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گوجه فرنگی تحت تنش نیکل مورد بررسی قرار گرفت. گیاهان گوجه فرنگی در دو سطح نیتروپروساید سدیم (صفر و ۱۰۰ میکرومولار) و سه سطح مختلف نیکل (صفر، ۲۵، ۵۰ میکرومولار) همراه با سه تکرار تحت شرایط هیدروپونیک کشت داده شدند. نتایج نشان داد که ۵۰ میکرومولار سولفات نیکل تحت عدم کاربرد نیتروپروساید سدیم به طور قابل توجهی باعث کاهش محتوای آب نسبی برگ (۴۳/۱ درصد) در مقایسه با شرایط کاربرد نیتروپروساید سدیم شد. افزایش نشت یونی و مالون دی آلدئید، به عنوان شاخص آسیب اکسیداتیو در گیاهان تحت تنش سولفات نیکل مشاهده شد. در پاسخ به اکسیداتیو ناشی از تنش سولفات نیکل، میزان کلروفیل روندی نزولی و کربوهیدرات و غلظت پرولین نسبت به شاهد روندی صعودی داشتند. کاربرد ۱۰۰ میکرومولار نیتروپروساید سدیم سبب افزایش کلروفیل b (۴/۵۴ درصد) و کلروفیل کل (۳/۵۷ درصد) در شرایط عدم تنش سولفات نیکل نسبت به شاهد شد. فعالیت آنتی اکسیدانی، پراکسیداز و کاتالاز در تیمار ۱۰۰ میکرومولار نیتروپروساید سدیم نسبت به گیاهان بدون این ماده به ترتیب، ۶۲، ۳۷ و ۳۸ درصد تحت تنش ۵۰ میکرومولار سولفات نیکل افزایش یافت. با توجه به نتایج، نیتروپروساید سدیم در غلظت ۱۰۰ میکرومولار، اثرات منفی تنش نیکل را بر صفات رشدی گیاه گوجه فرنگی نظیر تعداد برگ و وزن خشک گیاه با افزایش فعالیت آنتی اکسیدانی (افزایش فعالیت آنزیم های کاتالاز و پراکسیداز) و همچنین تأثیر مثبت تجمع پرولین بر محتوای نسبی آب، کاهش داد، لذا کاربرد این ماده برای گیاه گوجه فرنگی تحت رشد در شرایط نیکل توصیه می شود.

کلمات کلیدی: گوجه فرنگی، تنش غیرزیستی، فلزات سنگین، نیتریک اکسید

مقدمه

اسید آلی و عناصر معدنی است، که انسان به آن نیاز دارد (Gerszberg et al., 2015). به منظور بهبود عملکرد گیاهان در شرایط تنش زا به جای اصلاح نژاد، کاربرد موادی در دسترس تر، روشی مقرون به صرفه است (Hu et al., 2021). امروزه انباشت فلزات سنگین در سراسر اکوسیستم

گوجه فرنگی گیاهی است که به طور گسترده کشت می شود و در کل تولید جهانی رتبه هفتم را دارد. گوجه فرنگی محبوبیت زیادی در بین مصرف کنندگان به دست آورده است که حاوی مواد مغذی فراوانی مانند پروتئین، کربوهیدرات ها، ویتامین C،

نشانه ایجاد خسارت اکسیداتیو در گیاهان، پراکسیداسیون لیپیدها است که در نتیجه آن از بین رفتن انسجام غشای سلولی سپس افزایش نفوذپذیری غشا می‌گردد (Khalique *et al.*, 2016). گیاهان با مکانیسم‌های دفاعی متفاوت از جمله، تثبیت فلزات در ریشه، تولید فیتوکلاتین‌ها (PCs) و تحریک سیستم‌های آنزیمی، اثرات نامطلوب ناشی از سمیت فلزات را کاهش می‌دهند (Rizwan *et al.*, 2019). از طرفی استفاده از موادی مانند نیتریک اکسید به افزایش مکانیسم‌های دفاعی برای بهبود بقای گیاهان در شرایط تنش‌زا کمک می‌کند. اثر مثبت نیتریک اکسید خارجی در افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش‌هایی مانند فلزات سنگین، شوری و خشکی اثبات شده است (Nabi *et al.*, 2019).

سدیم نیتروپروسیاید (SNP) یک ترکیب رهاکننده نیتریک اکسید (NO) است که در حالت محلول به شدت به نور حساس است، تجزیه آن توسط اکسیژن و دمای زیاد تسریع می‌شود (Floryszak-Wieczorek *et al.*, 2006). نیتریک اکسید مولکولی است که در برخی فعالیت‌های بیولوژیکی گیاهان مانند: جوانه‌زنی بذر، رشد و نمو گیاهان، بلوغ و پیری، حرکات روزنه‌ای نقش دارد. کاربرد خارجی نیتریک اکسید، موجب تحریک فرآیند بسته‌شدن روزنه‌ها می‌شود (Vishwakarma *et al.*, 2019; Hussain *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2019). از طرف دیگر، نیتریک اکسید به‌عنوان واسطه در عمل تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی؛ متابولیسم ROSها، انتقال پیام و پاسخ به تنش‌های زیستی و غیرزیستی نقش مهمی ایفا می‌نماید (Freschi, 2013). همچنین اعتقاد بر این است که این ماده نقشی دوگانه دارد و این بستگی به غلظت آن، نوع گیاه، بافت گیاهی، سن گیاه و نوع تنش وارد شده به گیاه دارد (Del Rio *et al.*, 2004).

اگرچه اثرات غلظت‌های مختلف نیکل بر رشد گیاهان مختلف به‌طور جداگانه بررسی شده است، اما اثر نیتروپروسیاید بر جذب این عنصر و اثرات آن بر گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط هیدروپونیک مورد مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین، در این مطالعه، آزمایشی گلدانی به‌منظور بررسی اثرات استفاده از نیکل

مشکلات زیست‌محیطی بزرگی است که کیفیت زندگی همه موجودات زنده را تهدید می‌کند (Mitra *et al.*, 2022). هر چند نیکل (Ni) جایگاه بیست و دوم را در میان عناصر بسیار فراوان در پوسته زمین به خود اختصاص داده است، اما غلظت‌های بالای آن نه تنها برای گیاهان، بلکه برای علف‌خوران (دام‌ها) سمی است (Genchi *et al.*, 2020). به‌عنوان ریزمغذی ضروری، نیکل (۰/۰۱ تا ۱۰ میکروگرم در گرم وزن خشک) برای تکمیل چرخه زندگی گیاه ضروری است (Kastori *et al.*, 2022). نیکل همچنین به‌عنوان کوفاکتور آنزیم‌های متعددی از جمله گلی و اکسیلازها، پپتید دفورمیللازها، هیدروژنازها، سوپراکسید دیسموتازها و متیل کوآنزیم ردوکتاز عمل می‌کند (Ahmad and Ashraf, 2011). اوره‌آز نیکل را در محل فعال خود نگه می‌دارد که اوره را برای تولید بی‌کربنات و آمونیاک هیدرولیز می‌کند (Rodriguez-Jimenez *et al.*, 2016).

از طرفی نیکل به دلیل عملکردهای بیولوژیکی متفاوت، به‌عنوان یکی از ریزمغذی‌های مهم گیاهی در نظر گرفته می‌شود (Shivay and Prasad, 2019). علائم کمبود نیکل مانند 'کوچکی برگ' در گیاهانی که در محلول‌های مغذی با کمبود نیکل رشد می‌کنند، مشاهده شده است (Siqueira Freitas *et al.*, 2018). غلظت‌های بالای نیکل، سبب انباشتگی رادیکال‌های آزاد اکسیژن، اکسیداسیون لیپیدهای غشا و تخریب پروتئین‌ها، اختلال در فعالیت آنزیم‌ها، تخریب فعالیت غشا و رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌شود. سمیت نیکل در گیاه سبب اختلال در مسیرهای متابولیک و با شرکت در فرآیندهای انتقال الکترون در غشا باعث ایجاد یا تشدید خسارت اکسیداتیو می‌شود (Amjad *et al.*, 2019; Ashraf and همکاران (2011)، و Gurpreet و همکاران (2012)، Czapka (2018)، Gajewska *et al.*, 2006). بر طبق گزارش (2018)، Ashraf و همکاران (2011)، و Gurpreet و همکاران (2012)، غلظت‌های سمی نیکل سبب کاهش جوانه‌زنی بذر، کاهش رشد گیاه، جلوگیری از توسعه سیستم ریشه، ایجاد زردی، کلروز و بافت‌مردگی برگ، تخریب مولکول کلروفیل و کاهش فتوسنتز و تنفس گیاه می‌شود. اولین

و نیتروپروساید بر رشد گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط هیدروپونیک انجام شد.

مواد و روش‌ها

بذر گوجه‌فرنگی از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه و به مدت ۱۵ دقیقه در حمام آب در ۵۴ درجه سانتی‌گراد استریل شد و سپس در پتری‌دیش‌ها در دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد در تاریکی به مدت ۲۴ ساعت جوانه زد. بذره‌های جوانه‌زده در بستر متشکل از پیت، ورمیکولیت و پرلیت (۲:۱:۱ حجمی) کشت شدند و در گلخانه قرار گرفتند. دما در طول روز ۲۰ در شب ۱۵ درجه سانتی‌گراد بود. هنگامی که برگ‌های سوم رشد کردند، نهال‌های یکنواخت در گلدان‌های پلاستیکی سایز ۱۰، حاوی پیت‌ماس، ورمیکولیت و پرلیت کاشته شدند محلول هوگلند طبق مقادیر زیر تهیه شد:

۲۳۶ گرم بر لیتر نترات کلسیم ۱ میلی‌مولار؛ ۱۰۱ گرم بر لیتر نترات پتاسیم، ۱۱۵ گرم بر لیتر پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات، ۲۴۶ گرم بر لیتر سولفات منیزیم ۱ میلی‌مولار، ۰/۷۷ گرم بر لیتر اسید بوریک ۱۲ میلی‌مولار، ۱/۸۶ گرم بر لیتر کلرید منگنز ۲۵ میلی‌مولار، ۰/۱۶۹ گرم بر لیتر سولفات منگنز ۱ میلی‌مولار، ۰/۰۶۲ گرم بر لیتر سولفات مس ۰/۲۵ میلی‌مولار، ۰/۰۴ گرم بر لیتر سدیم مولیبدات ۲۵ میلی‌مولار، ۳۰ گرم بر لیتر سدیم فریک دی‌اتیلن تری‌آمین ۶۴ میلی‌مولار.

pH محلول روزانه با اسید کلریدریک و هیدورکسید سدیم تنظیم شد. پس از استقرار کامل بوته‌ها (۸-۱۰) برگ‌ها، با سه سطح مختلف سولفات نیکل (صفر، ۲۵، ۵۰ میکرومولار) تحت تیمار قرار گرفتند (استفاده از غلظت‌های پایین نیکل به دلیل از بین رفتن گیاهان در غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار در آزمایش حاضر بود). پس از یک هفته بوته‌ها با سدیم نیتروپروساید (صفر و ۱۰۰ میکرومولار) به‌صورت محلول همراه با محلول هوگلند تیمار شدند، این تیمار سه بار در طول سه هفته تا ظاهر شدن اولین میوه تکرار شد. چهار هفته پس از تیمار گیاهان برداشت شدند. برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته جمع‌آوری شدند و بلافاصله در نیتروژن مایع و سپس در دمای

۸۰- درجه سانتی‌گراد منجمد شدند. سپس میزان کلروفیل، کربوهیدرات، پرولین، فنول، نشت الکترولیت، محتوای نسبی آب، مالون دی‌آلدهید، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، آنزیم کاتالاز، پراکسیداز، تعداد برگ اندازه‌گیری شد. سپس گیاهان بلافاصله در آن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و وزن خشک اندام هوایی اندازه‌گیری شد. برای سنجش نیکل برگ‌ها خشک، به صورت پودر آسیاب شدند و از یک الک ۲۰ مش عبور داده شدند. غلظت نیکل در برگ نمونه‌ها با روش ICP تعیین شد.

اندازه‌گیری رنگدانه‌های برگ‌ها: برای استخراج و اندازه‌گیری رنگدانه‌های گیاهی (کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل)، یک گرم برگ با ۵ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد در هاون چینی ساییده شد و به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۸۰۰۰ سانتریفیوژ شد. سرعت جذب نور توسط عصاره در طول موج‌های ۶۴۵، ۶۶۳ نانومتر با استفاده از اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شد. غلظت رنگدانه‌های گیاهی برحسب میلی‌گرم در گرم وزن تر محاسبه شد (Arnon, 1949).

اندازه‌گیری کربوهیدرات و پرولین: میزان کربوهیدرات به روش پیشنهادی McCready و همکاران (۱۹۵۰) اندازه‌گیری شد. عصاره‌گیری از برگ‌ها توسط ۱۰۰ میلی‌گرم از نمونه‌ها در ۲۵ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد انجام شد. پس از سانتریفیوژ در ۳۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه، محلول رویی جدا شده و توسط آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانیده شد. پس از این مرحله، به یک میلی‌لیتر از روش‌نویاری محلول مذکور ۱۰ میلی‌لیتر محلول آنترون ۰/۱۵ درصد افزوده شد و در نهایت نمونه‌ها در دمای ۹۵ درجه سلسیوس حرارت داده شده، بلافاصله به حمام یخ منتقل شدند. آنگاه میزان جذب نور نمونه‌ها، توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۶۲۵ نانومتر خوانده و ثبت شده و غلظت فنل کل نمونه‌ها با استفاده از منحنی استاندارد گلوکز براساس میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه شد. محتوای پرولین براساس روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) برآورد شد. پرولین آزاد از ۰/۱ گرم نمونه برگ تازه در ۳ درصد (وزن: حجم) اسید سولفوسالیسیلیک آبی استخراج

شد و توسط معرف ناین هیدرین تخمین زده شد. جذب کسر توسط تولوئن از فاز مایع در ۵۲۰ نانومتر خوانده شد. غلظت پرولین با استفاده از یک منحنی استاندارد تعیین و به صورت میکرومول گرم وزن تر بیان شد.

نشت الکترولیت، پراکسیداسیون لیپیدهای غشا و محتوای نسبی آب: نشت الکترولیت همان طور که توسط Lutts و همکاران (۱۹۹۶) توضیح داده شد، با استفاده از شش دیسک برگ جوان (با قطر ۱۰ میلی متر) برای هر تیمار تعیین شد. نمونه‌ها سه بار با آب دیونیزه شسته شدند، در یک لوله دربسته حاوی ۱۰ میلی لیتر آب دیونیزه قرار داده شدند و در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار گرفتند. پس از آن، هدایت الکتریکی محلول اولیه تعیین شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب در دمای ۹۵ درجه سانتی گراد قرار گرفتند و آخرین رسانایی الکتریکی پس از تعادل در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد به دست آمد، سپس نشت الکترولیت محاسبه شد. برای سنجش پراکسیداسیون لیپیدهای غشا، غلظت مالون دی آلدئید (MDA) به عنوان محصول پراکسیده شدن اسیدهای چرب غشاها اندازه گیری شد. در ابتدا ۰/۱ گرم از بافت تازه برگ با نیتروژن مایع آسیاب و به آن ۵ میلی لیتر تری کلرو استیک اسید (TCA) یک درصد اضافه شد. عصاره به مدت ۲۰ دقیقه با دستگاه سانتریفیوژ دور ۱۴۰۰ در دمای چهار درجه سلسیوس سانتریفیوژ شد سپس، به یک میلی لیتر از محلول رویی، ۵ میلی لیتر محلول ۲۰ درصد TCA حاوی ۰/۵ درصد تیوباربیتریک اسید (TBA) اضافه شد. مخلوط حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی گراد قرار گرفت و سپس نمونه‌ها مجدداً سانتریفیوژ شدند. ماده قرمز رنگ مالون دی آلدئید تیوباربیتریک اسید (MDA-TBA) تولید شده، با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۳۲ نانومتر اندازه گیری شد و جذب سایر رنگیزه‌های اختصاصی نیز، در طول موج ۶۰۰ نانومتر خوانده شد. تعیین غلظت مالون دی آلدئید از ضریب خاموشی معادل $155 \text{ cm}^{-1} \text{ mM}^{-1}$ ، برحسب نانو مول بر گرم بافت تازه محاسبه شد (Heath and Parker, 1968).

به منظور تعیین محتوای نسبی آب برگ، از هر واحد آزمایشی تعدادی برگ کاملاً توسعه یافته جدا شد و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شد. از هر برگ پنج دیسک به قطر یک سانتی متر تهیه و وزن تازه آن اندازه گیری شد. سپس دیسک‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر غوطه‌ور شدند و آب مقطر تخلیه شده و رطوبت اضافی با استفاده از کاغذ صافی حذف شد. وزن دیسک‌ها (وزن اشباع شده) اندازه گیری و داخل آون با دمای ۶۵ درجه سانتی گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک شد. سپس محتوای نسبی برحسب درصد گزارش شد (Dhopte and Livera-Munoz, 1989).

فعالیت آنتی اکسیدانی، سنجش کاتالاز و پراکسیداز: ظرفیت آنتی اکسیدانی نمونه‌ها با استفاده از خاصیت خنثی کنندگی رادیکال‌های آزاد، ۲،۲-دی فنیل-۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH) صورت گرفت. در این روش ۰/۱ میلی لیتر عصاره (۱۰۰ میلی گرم ماده برگ تازه را در نیتروژن مایع به صورت کامل هموژنایز کرده و عصاره گیری با ۵ میلی لیتر اتانول ۹۶ درصد انجام شد. جهت جداسازی مواد جامد نامحلول به مدت ۲ دقیقه با ۲۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ انجام شد. پس از سانتریفیوژ به یک میلی لیتر DPPH (۵۰۰ میکرومولار در متانول) افزوده شد. پس از ۳۰ دقیقه در شرایط تاریکی و دمای اتاق میزان جذب نور در طول موج ۵۱۷ نانومتر خوانده شد و براساس معادله زیر محاسبه شد (Yi et al., 2008).

$$\text{DPPH} = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100$$

DPPH = درصد تخریب رادیکال‌های، A_0 = جذب نمونه

شاهد، A_1 = جذب نمونه مورد ارزیابی

فعالیت کاتالاز براساس میزان اولیه ناپدید شدن پراکسید هیدروژن مطابق با روش Velikova و همکاران (۲۰۰۰) ارزیابی شد. یک میلی لیتر محلول واکنش کاتالاز حاوی بافر فسفات پتاسیم ۱۰ میلی مولار pH=۷ با مقدار متناسبی از آنزیم استخراجی و پراکسید هیدروژن ۳۳ میلی مولار بود. کاهش میزان جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر در یک دقیقه و میکرومول پراکسید هیدروژن مصرف شده در دقیقه به عنوان

مقدار بیشتری از فلز نیکل در برگ‌های پایین‌تر گیاه گوجه‌فرنگی تجمع پیدا کرده و به برگ‌های بالاتر منتقل نشده است که می‌تواند یکی از دلایل کاهش تعداد برگ‌ها باشد. نیکل از تقسیم سلول‌های منطقه مرستمی و رشد سلول‌های منطقه رشد جلوگیری می‌کند. کاهش در وزن ممکن است در ارتباط با سمیت سولفات نیکل باشد. بدین‌صورت که این ماده سمی می‌تواند مکانیسم‌های فیزیولوژیکی نرمال را مختل کرده و درنهایت از این طریق اثرات منفی بر بیوماس داشته باشد (Pavlova, 2017). کاهش وزن خشک به جهت اختلال در فرآیند فتوسنتز و تنفس در اثر غلظت‌های سمی نیکل رخ می‌دهد (Khaliq et al., 2016). بهبود در رشد و عملکرد می‌تواند ناشی از حفظ محتوای رطوبت نسبی برگ و کاهش محتوای پراکسید هیدروژن تولیدشده و بهبود سیستم آنزیمی گیاه در اثر کاربرد سدیم نیتروپروساید باشد (Sheokand et al., 2008). همچنین سدیم نیتروپروساید موجب بهبود وضعیت کلروفیل سلول‌های گیاهی در شرایط تنش می‌شود و با افزایش فتوسنتز گیاه می‌تواند افزایش ماده خشک تولیدی را در پی داشته باشد و نیز با محافظت اندام‌های هوایی گیاه در شرایط تنش، درنهایت به افزایش تجمع ماده خشک تحت این شرایط منجر می‌شود (Farooq et al., 2009).

اثر نیتروپروساید سدیم و نیکل بر میزان نیکل برگ و ریشه: نتایج نشان داد که اثرات متقابل نیتروپروساید سدیم و نیکل بر مقدار نیکل برگ و اثرات ساده نیتروپروساید سدیم و نیکل بر میزان نیکل ریشه مؤثر بود (جدول ۱). بین ۲۵ و ۵۰ میکرومولار سولفات نیکل تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد، اما با کاربرد نیتروپروساید سدیم در تیمار ۵۰ میکرومولار نیکل میزان نیکل برگ کاهش یافت (شکل ۲a). شکل ۲b، نشان می‌دهد با کاربرد نیتروپروساید سدیم میزان نیکل ریشه روندی نزولی داشت، به‌نحوی‌که به ۱۶/۴ میکروگرم بر گرم وزن خشک رسید. همچنین کاربرد سولفات نیکل سبب افزایش میزان نیکل در ریشه شد و در ۵۰ میکرومولار سولفات نیکل به ۳۳ میکروگرم بر گرم وزن خشک رسید (شکل ۲c). غلظت نیکل برگ بسته به حضور این عنصر در محیط‌کشت، متفاوت

یک واحد کاتالاز تعریف شد. براساس روش Srinivas و همکاران (۱۹۹۹) متعاقب شکل‌گیری تترآگایاکول با جذب در ۴۷۱ نانومتر استفاده از ضریب خاموشی ۲۶/۶ میلی‌مولار برای محاسبه مقدار تترآگایاکول اندازه‌گیری شد. یک میلی‌لیتر از مخلوط واکنش حاوی بافر فسفات پتاسیم ۲۰ میلی‌مولار گایاکول ۵ میلی‌مولار و پراکسید هیدروژن یک میلی‌مولار با مقدار متناسبی از آنزیم استخراجی بود.

آزمایش به‌صورت فاکتوریل بر مبنای طرح بلوک کاملاً تصادفی همراه با سه تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار JMP و مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون توکی در سطح ۵ درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

اثر نیتروپروساید سدیم و نیکل بر تعداد برگ و وزن خشک اندام هوایی: تعداد برگ و وزن خشک اندام هوایی نیز تحت تأثیر اثرات متقابل نیتروپروساید سدیم و نیکل قرار گرفتند (جدول ۱). در شرایط عدم کاربرد نیتروپروساید سدیم با افزایش غلظت سولفات نیکل به ۵۰ میکرومولار تعداد برگ روندی نزول داشت اما با کاربرد نیتروپروساید سدیم با افزایش غلظت تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۱a). وزن خشک بخش هوایی در شرایط نیتروپروساید و عدم کاربرد آن با افزایش غلظت سولفات نیکل به ۵۰ میکرومولار روندی نزولی به ثبت رسانید. بیشترین میزان وزن خشک در تیمار نیتروپروساید سدیم و عدم وجود نیکل (۴/۸ گرم) و کمترین این شاخص در تیمار ۵۰ میکرومولار سولفات نیکل و عدم کاربرد نیتروپروساید سدیم مشاهده شد (شکل ۱b).

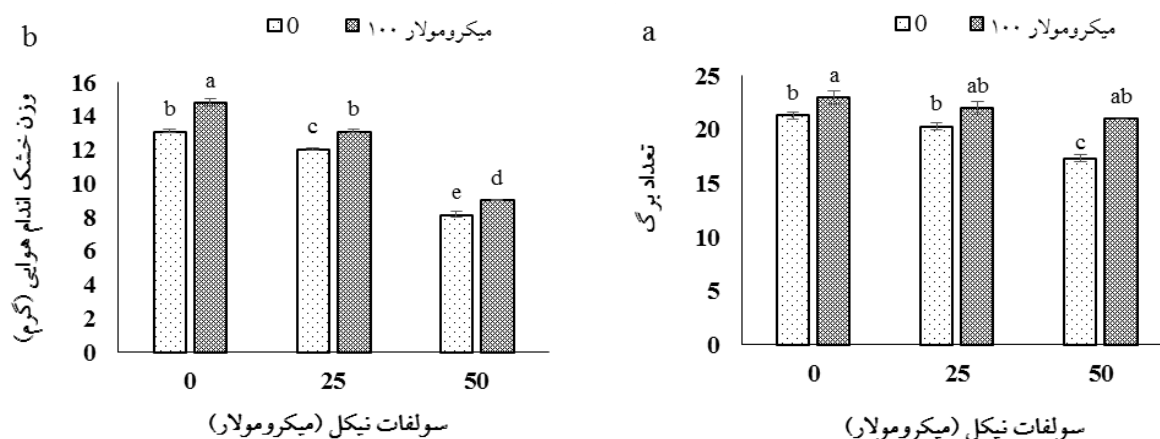
نتایج این تحقیق نشان داد که نیکل به‌عنوان یک عامل بازدارنده تأثیری منفی بر روی رشد گیاه گوجه‌فرنگی داشته است. این یافته‌ها با نتایج بسیاری از تحقیقات انجام‌شده در رابطه با اثر نیکل بر محدودیت و کاهش رشد گونه‌های گیاهی مطابقت دارد (Rahman et al., 2005). انباشت فلزات در برگ‌های پیر و ریزش برگ‌های پیر در بسیاری از گونه‌های تحت تنش فلز دیده شده است (Shah et al., 2010) احتمالاً

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر نیتروپروساید سدیم و سولفات نیکل بر برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه گوجه‌فرنگی

منابع تغییر	درجه آزادی	تعداد برگ	وزن خشک	نیکل ریشه	نیکل برگ	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کربوهیدرات	پرولین
تکرار	۲	۰/۱۷	۰/۰۴	۰/۱۷	۱/۶۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۷	۰/۰۰۱
(A)	۱	۲۴/۵**	۶/۶۰**	۵۳/۴*	۹/۳۰**	۰/۰۴**	۰/۰۰۵**	۰/۰۹۸**	۳/۰۳**	۰/۰۳۸**
(B)	۲	۱۴**	۴۶/۷**	۱۲۰/۶**	۱۰/۶**	۰/۰۵**	۰/۰۰۵**	۰/۰۷۹**	۳/۹۳**	۰/۰۱۸**
(B) × (A)	۲	۲/۰۰*	۰/۳۱*	۸/۷۲ ns	۳/۴۳*	۰/۰۰۱ ns	۰/۰۰۰۱*	۰/۰۰۱*	۰/۱۶۳**	۰/۰۱۲**
خطا	۱۲	۰/۵۰	۰/۷۹۱	۸/۴۴	۰/۷۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات		۹/۲۰	۲۰/۸	۶/۷۸	۷/۵	۴/۸۸	۴/۵۹	۵/۱	۵/۳	۲/۱۶

ns و ** به ترتیب نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی‌داری است.

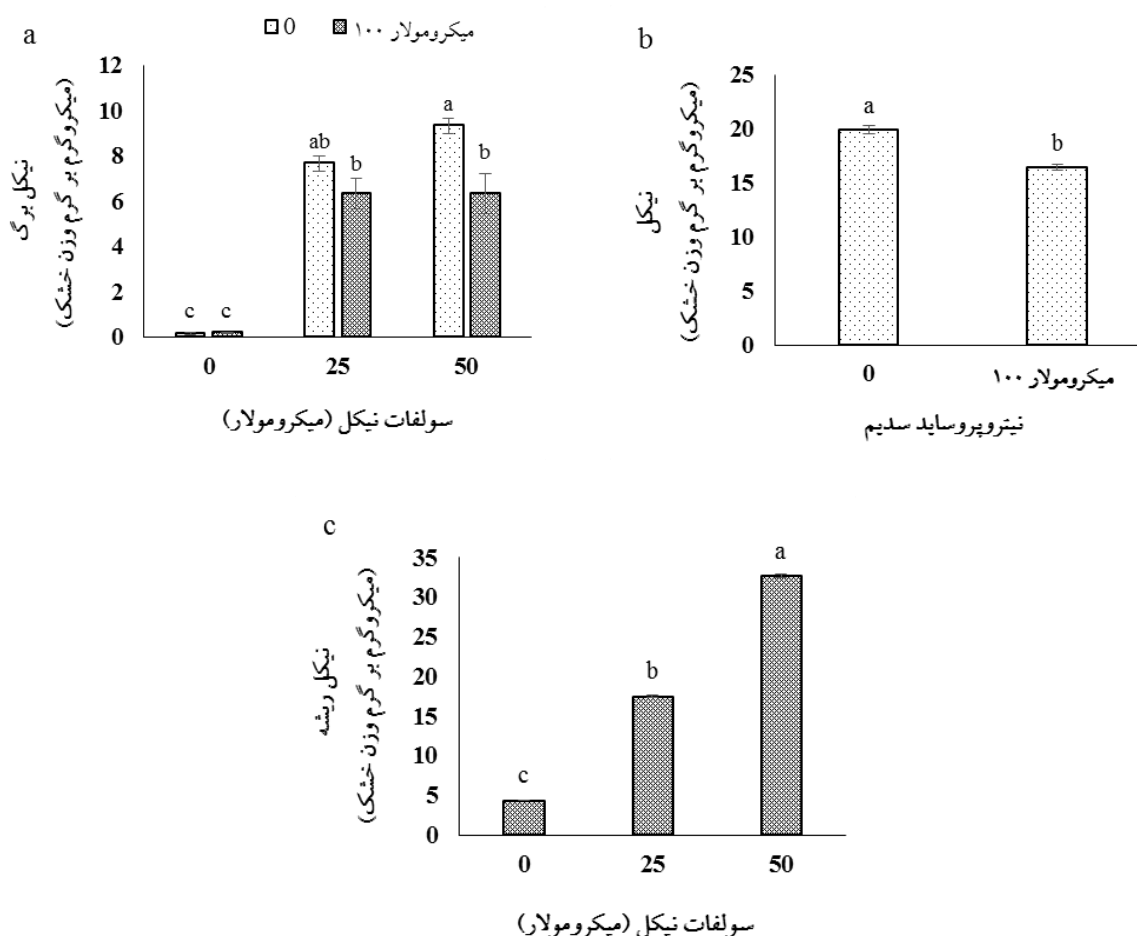
(A): نیتروپروساید سدیم، (B): سولفات نیکل



شکل ۱- اثر نیتروپروساید سدیم و سولفات نیکل بر تعداد برگ (a)، و وزن خشک هوایی (b) برگ‌گی گوجه‌فرنگی. میانگین‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

ROS، منجر به کاهش قابل توجهی در رشد و عملکرد گیاهان می‌شوند. بنابراین، کاهش اثرات نامطلوب سمیت نیکل با اتخاذ تکنیک‌های مدیریت کارآمد برای تقویت مکانیسم‌های تحمل به تنش امری ضروری است، و در این ارتباط، ما نقش نیتروپروساید سدیم به صورت برون‌زا در کاهش میزان جذب نیکل را مورد بررسی قرار دادیم. نتایج نشان داد که غلظت نیکل بوته‌های تغذیه‌شده با ۵۰ میکرومولار نیکل به ۹ و ۳۳ میکروگرم در گرم وزن خشک به ترتیب، در برگ و ریشه افزایش یافت. از طرفی کاربرد نیتروپروساید سدیم در غلظت‌های بالاتر تجمع این عنصر را در برگ و ریشه کاهش

بود. نتایج نشان داد که نیکل موجود در محلول غذایی توسط گیاهان جذب می‌شود زیرا غلظت نیکل برگ به طور قابل توجهی با افزایش غلظت نیکل مکمل در محلول غذایی افزایش می‌یابد. جذب این عنصر توسط ریشه گیاه از خاک به طور عمده از طریق انتقال غیرفعال و به مقدار کمتری از طریق انتقال فعال صورت می‌گیرد. نشان داده شده که جذب نیکل توسط گیاهان به غلظت این عنصر، گونه گیاه، مرحله رشد، اندام گیاهی، متابولیسم گیاه، اسیدیته خاک یا محلول غذایی، حضور سایر فلزات و ترکیب مواد آلی بستگی دارد (Ahmad and Ashraf, 2011). غلظت‌های بالاتر نیکل با القای تولید بیش از حد



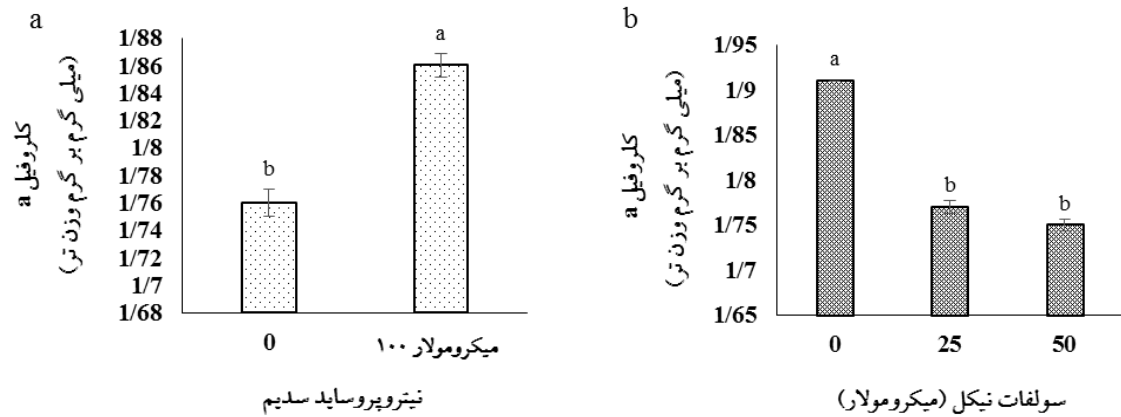
شکل ۲- اثر نیتروپروساید سدیم و سولفات نیکل بر نیکل برگ (a)، اثر نیتروپروساید سدیم (b) و اثر سولفات نیکل بر نیکل ریشه (c) گوجه‌فرنگی. میانگین‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

نیکل را کاهش داده است. که متعاقباً این عناصر در تنظیم عملکردهای مختلف گیاه از جمله سیگنال‌دهی استرس و تحمل به تنش نیکل نقش دارند.

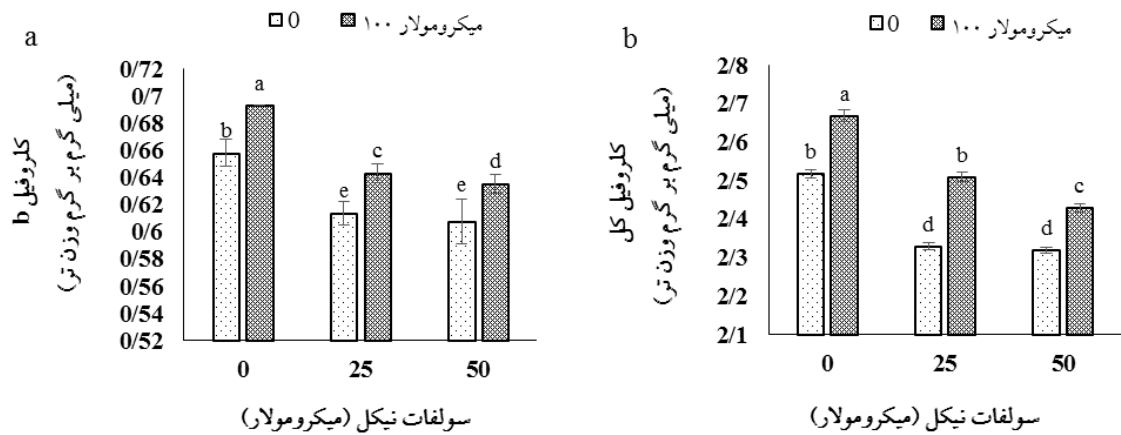
اثر نیتروپروساید سدیم و نیکل بر کلروفیل a، کلروفیل b، و کلروفیل کل: براساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر نیتروپروساید سدیم و نیکل بر کلروفیل b و کلروفیل a معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج نشان داد که کلروفیل a تحت تأثیر اثرات ساده نیتروپروساید سدیم و نیکل قرار گرفت، به‌نحوی که با افزایش شدت غلظت نیکل از میزان این شاخص کاسته شد اما کاربرد نیتروپروساید سدیم مقدار کلروفیل را افزایش داد (شکل ۳).

براساس نتایج به‌دست‌آمده در بررسی میزان کلروفیل در

داد. کاربرد نیتروپروساید سدیم خارجی بر کاهش جذب عناصری چون نیکل (Rizwan *et al.*, 2018) و مس (رئیزی و همکاران، ۱۳۸۹) مؤثر است. انتقال کمتر نیکل به اندام‌های هوایی ناشی از کاهش سرعت تعرق است (Chen *et al.*, 2004). گزارش شده که نیتروپروساید سدیم به گیاهان کمک می‌کند تا با تغییراتی در برابر تنش عناصر سنگین مقاومت نماید و چنین تغییراتی به نقش کلیدی آن در سیگنال‌دهی و ایجاد مکانیسم‌های تحمل نسبت داده شده است (Ahmad *et al.*, 2018). از طرفی، کاربرد این ماده با تعامل با فیتوهورمون‌هایی مانند اسید سالیسیلیک، اثرات مضر ناشی از نیکل را کاهش می‌دهد (Kotapati *et al.*, 2017). Soliman و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که کاربرد خارجی این ماده سبب افزایش جذب نیتروژن، پتاسیم و کلسیم گردیده و میزان جذب



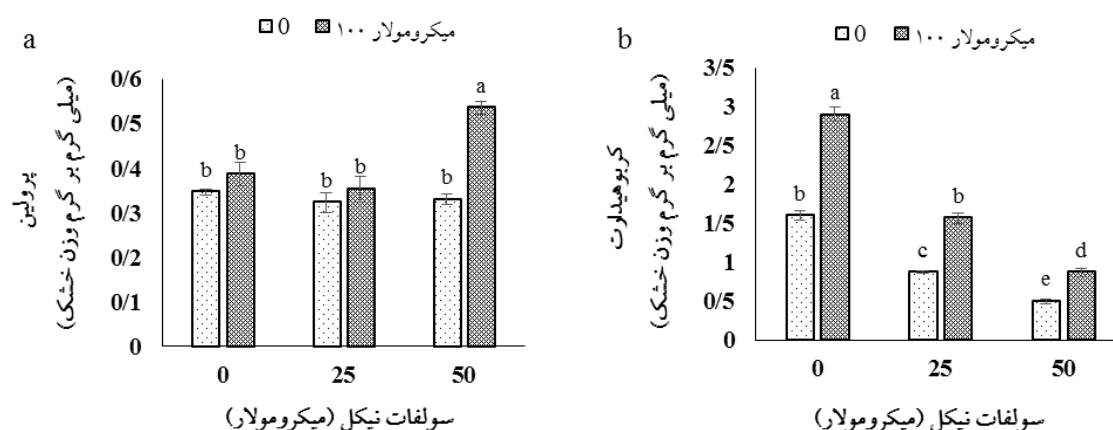
شکل ۳- اثر ساده نیتروپروکساید سدیم بر کلروفیل a (a) و اثر ساده سولفات نیکل بر کلروفیل a (b) برگ گوجه‌فرنگی. میانگین‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.



شکل ۴- اثر نیتروپروکساید سدیم و سولفات نیکل بر کلروفیل b (a) و کلروفیل کل (b) برگ گوجه‌فرنگی. میانگین‌های دارای حروف مشابه بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

محتوای کلروفیل یک شاخص مفید برای تحمل تنش است و اغلب به عنوان پارامتر توسعه کلروپلاست و ظرفیت فتوسنتزی استفاده می‌شود. در شرایط تنش محیطی، محتوای کلروفیل در گونه‌های مختلف گیاهی بسته به مدت و شدت تنش‌ها متفاوت است (Javed et al., 2022). در این مطالعه تنش نیکل باعث مهار شدید رنگدانه‌های فتوسنتزی شد (شکل ۴) و نتایج مطابق با یافته‌های Sirhindi و همکاران (۲۰۱۶) بر روی گیاه سویا (*Glycine max*) و Mosa و همکاران (۲۰۱۶) بر روی گوجه‌فرنگی است. در شرایط تنش نیکل میزان فتوسنتز خالص و هدایت روزنه‌ای به دلیل تغییر زیاد در زیرساخت‌های کلروفیل کاهش داد (Raju and Prasad, 2023). از سوی دیگر،

تمام تیمارهای حاوی نیکل روند کاهشی مشاهده شده است. در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ میکرومولار سولفات نیکل کاربرد نیتروپروکساید سدیم میزان کلروفیل b را به ترتیب، ۱۲/۴ و ۳/۹ درصد افزایش داد (شکل ۴a). کلروفیل کل نیز روندی مشابه به ثبت رسانید، تفاوت معنی‌داری بین گیاهان تیمار شده با ۲۵ و ۵۰ میکرومولار نیکل بدون تیمار نیتروپروکساید مشاهده نشد، اما با افزایش غلظت سولفات نیکل به ۵۰ میکرومولار نسبت به شاهد در گیاهان بدون نیتروپروکساید کلروفیل کل ۸/۲۴ درصد کاهش یافت. کلروفیل کل در گیاهان تیمار شده با نیتروپروکساید سدیم در مقایسه با شاهد ۶/۳۷ درصد افزایش یافت (شکل ۴b).



شکل ۵- اثر نیتروپروساید سدیم و سولفات نیکل بر پرولین (a) و کربوهیدرات (b) برگ گیاه گوجه‌فرنگی. میانگین‌های دارای حروف مشابه بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

شرایط کاربرد نیتروپروساید سدیم (۰/۵۰ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) و صفر میکرومولار نیکل تحت شرایط کاربرد نیتروپروساید سدیم (۱/۶ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) به ثبت رسید (شکل ۵b).

گیاهان در شرایط تنش فلز سنگین بیشتر مواد فتوسنتزی خود را صرف تولید ترکیبات تنظیم‌اسمزی از جمله پرولین، گلیسین بتائین و ترکیبات فنلی می‌کند تا بتواند شرایط لازم برای ادامه حیات را در این شرایط فراهم کند، بنابراین افزایش میزان پرولین در شرایط تنش نیکل نشان از افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش است. بسیاری از تحقیقات افزایش میزان کربوهیدرات را تحت تنش نیکل نشان دادند، اما Duan و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که در غلظت‌های بالاتر نیکل میزان کربوهیدرات کاهش یافت، آنها پیشنهاد کردند که فلزات سنگین بر کاهش کربوهیدرات بیشتر از میزان فتوسنتز مؤثر هستند. پرولین در گیاهان تحت شرایط نامناسب رشد، از جمله تنش فلزات سنگین تجمع می‌یابد. افزایش محتوای پرولین در برگ‌ها با کاهش بیشتر در محتوای نسبی آب در این اندام‌ها مطابقت دارد. کم‌آبی بیشتر شاخه‌ها را می‌توان با این واقعیت توضیح داد که فلزات سنگین انتقال آب را از ریشه به برگ‌ها مسدود می‌کنند (Chen et al., 2004). دو غلظت نیکل، میزان محتوای نسبی برگ‌ها را کاهش دادند، که به این معنی است که برگ‌های گوجه‌فرنگی تنش‌اسمزی خفیف را متحمل شدند. از

اثرات منفی تنش نیکل بر رنگدانه‌های فتوسنتزی، با افزودن نیتروپروساید سدیم برون‌زا کاهش یافت. این نتایج نشان داد که نیتروپروساید سدیم به‌عنوان یک مولکول سیگنال‌دهنده می‌تواند تولید و سیر تکاملی (Biogenesis) کلروپلاست‌ها را با افزایش مقدار گرانا لاملا و بیوستز کلروفیل تحریک کند (Chen et al., 2010)، که ممکن است ظرفیت فتوسنتزی گیاهان گوجه‌فرنگی تحت نیکل را افزایش دهد.

اثر نیتروپروساید سدیم و نیکل بر پرولین و کربوهیدرات: پرولین و کربوهیدرات نیز تحت تأثیر اثرات متقابل نیتروپروساید سدیم و نیکل قرار گرفتند (جدول ۱). کاربرد نیتروپروساید سدیم در شرایط بدون نیکل و ۲۵ میکرومولار تفاوت معنی‌داری بر میزان پرولین نسبت به شرایط عدم کاربرد نیتروپروساید سدیم نداشت. اما در شرایط ۵۰ میکرومولار سولفات نیکل ۱۸/۲ درصد این شاخص را افزایش داد. همچنین سولفات نیکل تا ۵۰ میکرومولار میزان پرولین را نسبت به شاهد تغییر نداد (شکل ۵a). با افزایش غلظت نیکل در شرایط کاربرد نیتروپروساید سدیم و عدم کاربرد نیتروپروساید سدیم نسبت به گیاهان بدون تیمار سولفات نیکل میزان کربوهیدرات به ترتیب، به میزان ۶۹ و ۷۰ درصد کاهش یافت. کاربرد نیتروپروساید سدیم در تیماری تیمارهای حاوی نیکل سبب افزایش میزان کربوهیدرات گردید، کمترین و بیشترین میزان این شاخص در تیمارهای ۵۰ میکرومولار تحت

گرم وزن تر) به ثبت رسید (شکل ۶b). میزان محتوای نسبی آب در گیاهان تیمار شده با نیتروپروساید سدیم به بیشترین میزان خود (۸۰/۴ درصد) رسید، اما با افزایش غلظت سولفات نیکل به ۵۰ میکرومولار میزان محتوای نسبی ۳/۸۶ درصد در گیاهان تیمار شده با نیتروپروساید نسبت به تیمار بدون سولفات نیکل رسید. در گیاهان تیمار شده با ۲۵ میکرومولار سولفات نیکل تفاوت معنی داری بین تیمارهای حاوی نیتروپروساید سدیم و بدون نیتروپروساید سدیم به ثبت نرسید (شکل ۶c).

برای برآورد تنش اکسیداتیو، محتوای MDA بافت به عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپید و آسیب اکسیداتیو گیاهان در معرض فلزات سنگین بررسی می‌گردد. فلزات سنگین موجب پراکسیداسیون شدید لیپید از طریق برداشت هیدروژن توسط ROS از اسیدهای چرب غیراشباع شده، موجب تشکیل رادیکال‌های لیپیدی می‌شوند. مشخص شده یون‌های آزاد نیکل که قادرند با مولکول‌های آب واکنش داده رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل را تولید کنند و از این طریق، موجب پراکسیداسیون لیپیدهای غشا می‌شوند (Helaoui et al., 2022). از طرفی پراکسیداسیون لیپید در گیاه خیار تحت تنش نیکل توسط زیاری و همکاران (۱۳۹۱) به اثبات رسیده است. نیتریک اکسید حاصل از نیتروپروساید سدیم مقدار MDA حاصل از تنش نیکل را در گیاهان گوجه‌فرنگی کاهش داد. واکنش NO با ROS موجب جلوگیری از آسیب غشا و کاهش نشت الکترولیت می‌شود. واکنش NO با آلکوکسی لیپیدها و رادیکال‌های پراکسیل سریع است و می‌تواند گسترش رادیکال و اکسیداسیون لیپید ناشی از آن را مستقیماً متوقف کند. NO به عنوان جاروکننده گونه‌های فعال اکسیژن مثل H_2O_2 در اندام‌های گیاه تحت تنش فلز سنگین است (Hsu and Kao, 2004). گزارش شده است که نقش NO در جلوگیری از پراکسیداسیون لیپید مربوط به توانایی این ماده برای واکنش با رادیکال‌های آلکوکسی لیپید (LO^{\cdot}) و پراکسیل لیپید (LOO^{\cdot}) که به توقف زنجیر پراکسیداسیون به روش مستقیم منجر می‌شود (Kazemi et al., 2010). همچنین، طبق بررسی‌ها مشخص شده است که

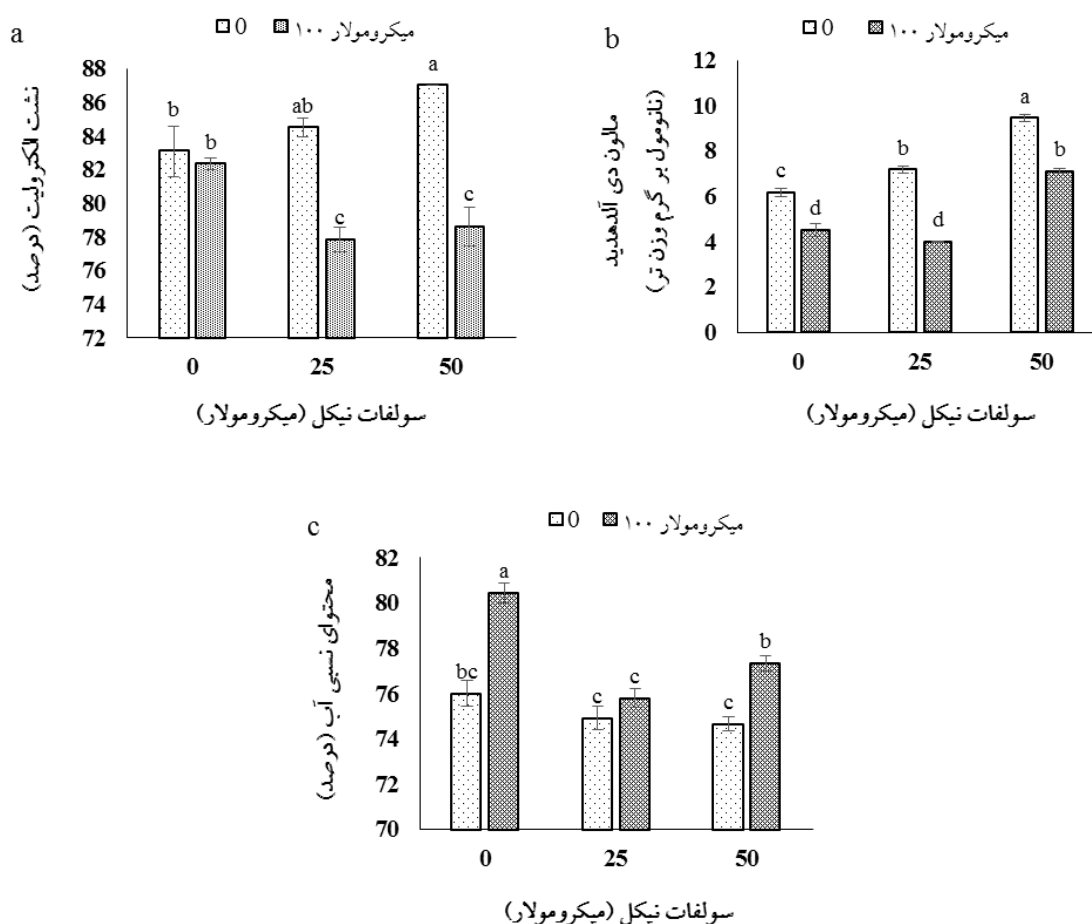
آنجایی که تجمع پرولین با کاهش محتوای نسبی مرتبط بود، می‌توان پیشنهاد کرد که در گوجه‌فرنگی تحت تنش نیکل، افزایش محتوای اسیدآمینو ممکن است با فرآیندهای تغییرات اسمزی مرتبط باشد. ترکیبات اسمزی در شرایط تنش برای بسیاری از گونه‌های گیاهی، به میزان مقاومت آنها در برابر تنش بستگی دارد و غلظت پرولین در گیاهان مقاوم بیشتر از گیاهان حساس است (Maheshwari and Dubey, 2007). کاربرد نیتروپروساید سدیم سبب افزایش پرولین و قند در گیاهان گوجه‌فرنگی در شرایط بدون تنش نیکل و تنش نیکل گردید. استفاده NO باعث افزایش تجمع پرولین در گیاه خردل در شرایط تنش شوری (Jahan et al., 2020) و مرزه در شرایط تنش کادمیوم (Azizi et al., 2021) شد. تیمار گیاهان با نیتروپروساید سدیم مقدار پرولین را تحت تنش نیکل افزایش می‌دهد که ممکن است به دلیل افزایش سنتز این اسیدآمینو باشد. نیتروپروساید سدیم سبب افزایش فعالیت پرولین سنتز کربوکسیلات اسپولر (PSCS) که آنزیمی کلیدی در بیوسنتز پرولین است، می‌شود (Lei et al., 2007).

اثر نیتروپروساید سدیم و نیکل بر نشت الکترولیت، مالون دی‌آلدهید و محتوای نسبی آبی برگ: براساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر نیتروپروساید سدیم و نیکل بر نشت الکترولیت، مالون دی‌آلدهید و محتوای نسبی آب معنی دار بود (جدول ۲). بیشترین میزان نشت الکترولیت در تیمار ۵۰ میکرومولار نیکل بدون کاربرد نیتروپروساید سدیم (۸۷ درصد) و کمترین میزان این شاخص در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ میکرومولار نیکل تحت کاربرد نیتروپروساید سدیم (۷۸ درصد) مشاهده شد. در شرایط بدون کاربرد نیتروپروساید سدیم میزان نشت الکترولیتی گیاهان شاهد تفاوتی ایجاد نمود (شکل ۶a). میزان مالون دی‌آلدهید در کاربرد نیکل ۲۵ میکرومولار تفاوت معنی داری با گیاهان بدون نیکل تحت تیمار نیتروپروساید سدیم نداشت، افزایش سولفات نیکل سبب افزایش مالون دی‌آلدهید شد اما کاربرد نیتروپروساید میزان این شاخص را کاهش داد. بیشترین میزان مالون دی‌آلدهید در تیمار ۵۰ سولفات نیکل بدون نیتروپروساید سدیم (۹/۴۵ نانومول گرم بر

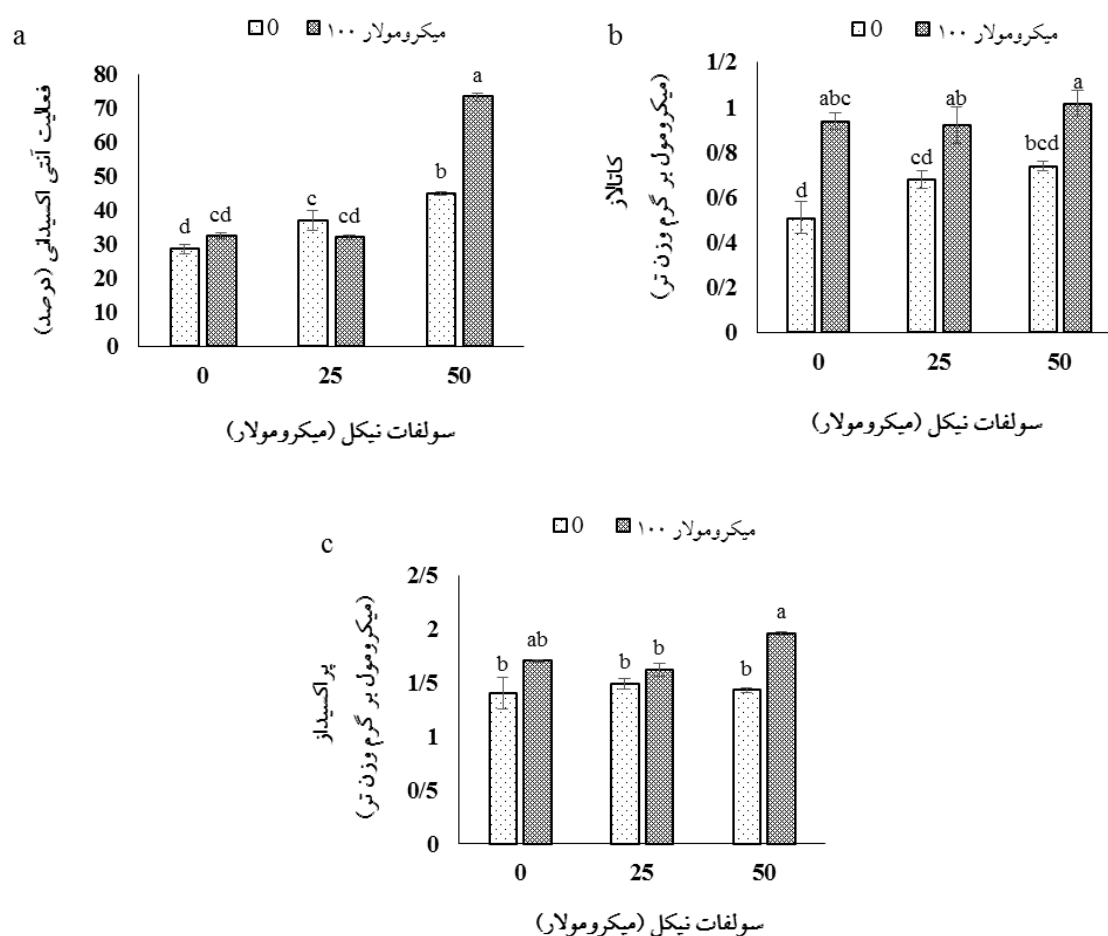
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر نیتروپروساید سدیم و سولفات نیکل بر برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی و رشدی گیاه گوجه‌فرنگی

منابع تغییر	درجه آزادی	نشت الکترولیت	مالون دی‌آلدئید	محتوای نسبی آب	آنتی اکسیدان	کاتالاز	پراکسیداز
تکرار	۲	۰/۱۰۹	۰/۱۲	۰/۶۱۷	۱۰/۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۵
نیتروپروساید سدیم	۱	۱۲۵**	۲۵/۸**	۳۱/۸**	۳۶۵**	۰/۴۵۷**	۰/۴۶۴**
سولفات نیکل	۲	۵/۰۴ ^{ns}	۱۶/۱**	۱۳/۵**	۱۴۴۵**	۰/۰۰۷ ^{ns}	۰/۰۳۷ ^{ns}
نیتروپروساید سدیم × سولفات نیکل	۲	۲۳/۹**	۰/۸۵۴**	۴/۷۴**	۴۴۸**	۰/۰۴۲*	۰/۰۶۸*
خطا	۱۲	۲۳/۲	۰/۰۸۴	۰/۵۸۹	۶/۸۳	۰/۰۰۹	۰/۰۱۴
ضریب تغییرات	۴/۳	۲/۹	۲/۷	۳/۸	۲۴/۷	۱۳/۹	

*, ** و ^{ns} به ترتیب نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی‌داری است.



شکل ۶- اثر نیتروپروساید سدیم و سولفات نیکل بر نشت الکترولیت (a)، محتوای مالون دی‌آلدئید (b) و محتوای نسبی آب (c) برگ گیاه گوجه‌فرنگی. میانگین‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.



شکل ۷- اثر نیتروپروساید سدیم و سولفات نیکل بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی (a)، کاتالاز (b) و پراکسیداز (c) برگ گی گوجه‌فرنگی. میانگین‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

که نیتروپروساید سدیم سبب افزایش ۶۲/۲ درصدی این شاخص نسبت به گیاهان بدن نیتروپروساید سدیم گردید (شکل ۷a). افزایش غلظت سولفات نیکل به ۵۰ میکرومولار در شرایط کاربرد و عدم کاربرد نیتروپروساید سدیم تفاوت معنی‌داری بر فعالیت آنزیم کاتالاز نداشت، اما در شرایط کاربرد نیتروپروساید سدیم در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ میکرومولار به ترتیب، فعالیت این آنزیم ۷۳/۵ و ۸/۵۱ درصد افزایش یافت (شکل ۷b). با افزایش میزان غلظت سولفات نیکل میزان فعالیت پراکسیداز تغییری نمود اما در شرایط کاربرد نیتروپروساید سدیم فعالیت این آنزیم در تیمار ۵۰ سولفات نیکل به بیشترین میزان خود رسید و نسبت به شرایط عدم کاربرد ۱۵/۳ درصد افزایش یافت (شکل ۷c).

NO با احیای Fe^{+3} به Fe^{+2} در جایگاه فعال لپوکسیژناز و غیرفعال کردن آن، می‌تواند نشت الکترولیت را کاهش دهد (Wang et al., 2006).

اثر نیتروپروساید سدیم و نیکل بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی و آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز: فعالیت آنتی‌اکسیدانی، آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز نیز تحت تأثیر اثرات متقابل نیتروپروساید سدیم و نیکل قرار گرفتند (جدول ۲). با کاربرد نیتروپروساید سدیم میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی در گیاهان شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت، اما در گیاهات تحت تیمار ۲۵ و ۵۰ میکرومولار بدون کاربرد نیتروپروساید این شاخص به ترتیب ۲۷/۶ و ۵۵/۲ درصد افزایش یافت. بیشترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی در گیاهان تیمار شده با نیتروپروساید تحت ۵۰ میکرومولار سولفات نیکل (۷۳/۳ درصد) مشاهده شد

کاتالاز و پراکسیداز بر اثر تنش نیکل می‌تواند احتمالاً به علت عدم مقاومت این گیاه به غلظت‌های سمی نیکل است. بسیاری از پژوهش‌ها کارکرد نیتریک اکساید را در کاهش تنش اکسیداتیو به القای فعالیت آنزیم‌های حذف‌کننده رادیکال‌های آزاد نسبت داده‌اند (Azizi et al., 2021). در آزمایش حاضر، فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز تحت تیمار نیتروپروساید سدیم افزایش یافت. از طرفی افزایش فعالیت آنزیم‌ها تحت NO به دلیل سم‌زدایی H_2O_2 است (Rather et al., 2020).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر تیمار نیتروپروساید سدیم بر کاهش اثرات سمی نیکل در گیاه گوجه‌فرنگی مورد بررسی قرار گرفت. وزن خشک و تعداد برگ در گیاهان گوجه‌فرنگی تحت تیمار نیکل کاهش یافت، اما کاربرد نیتروپروساید سدیم با کاهش مالون دی‌آلدئید میزان نشت الکترولیت را کاهش داد، و با افزایش فعالیت آنزیم‌هایی چون کاتالاز و پراکسیداز، فعالیت آنتی‌اکسیدانی را افزایش داد. از طرفی با تجمع پرولین بر محتوای نسبی آب برگ تأثیر مثبتی داشت و اثرات منفی نیکل را بر گیاه گوجه‌فرنگی کاهش داد. همچنین به نظر می‌رسد که گوجه‌فرنگی، گیاهی حساس به نیکل بوده و توانایی تحمل و تجمع نیکل را ندارد. از این رو، رشد و عملکرد آن در مزارعی با آلاینده‌ی نیکل، کاهش می‌یابد و گزینه مناسبی برای اهداف گیاه‌پالایی نیست.

کاربرد غلظت ۵۰ میکرومولار نیکل در محیط‌کشت موجب افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی برگ گیاه شد. عنصر نیکل به عنوان یک فلز سنگین در غلظت‌های زیاد، سمی است. سمیت نیکل می‌تواند اثرهای زیانباری بر رشد گیاه داشته باشد. افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در بسیاری از گونه‌های گیاهی در حضور غلظت‌های زیاد فلزات سنگین از جمله مس، سرب، روی، کادمیم و نیکل گزارش شده است. حد بحرانی سمیت نیکل در گیاه، بسته به رقم و مرحله رشد متفاوت است (Ahmad and Ashraf, 2011). گیاهان در مواجهه با تنش اکسیداتیو، دارای سازوکارهای دفاعی متعددی بوده که تغییر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز از جمله آن است. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو در شرایط تنش متفاوت بوده و کاهش یا افزایش یافته و یا بدون تغییر باقی می‌ماند (Amjad et al., 2019; Gajewska and Sklodowska, 2007). Zhang و همکاران (۲۰۱۰) نیز گزارش کردند که در غلظت‌های زیاد فلزات سنگین، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌تواند افزایش یا کاهش یافته و یا بدون تغییر باقی بماند. روند تغییر فعالیت هر یک از این آنزیم‌ها با نوع عنصر ایجادکننده تنش، غلظت عنصر در محیط‌کشت، آنزیم مورد آزمایش، رقم و اندام گیاهی مورد مطالعه متفاوت است. Baccouch و همکاران (۲۰۰۱) نیز افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز ریشه و برگ ذرت در اثر کاربرد نیکل را گزارش کردند. Tombuloglu و همکاران (۲۰۱۹) نیز افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط سمیت نیکل را در ریشه‌های جو گزارش کردند. افزایش سطح نیکل به ۵۰ میکرومولار بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز تأثیرگذار نبود. در هر صورت، عدم تغییر فعالیت آنزیم‌های

منابع

- بهمن‌زیاری، هدی، خوشگفتارمنش، امیرحسین، سنایی استوار، آزاده، شیروانی، مهران، و حقیقی، مریم (۱۳۹۱). تأثیر سطوح مختلف نیکل در محلول غذایی حاوی نیترات آمونیوم بر پراکسیداسیون لیپید و فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان برگ خیار. *مجله روابط خاک و گیاه*، ۳(۴)، ۹۱-۱۰۳. DOR: 20.1001.1.20089082.1391.3.4.6.0
- رئیس، محمدعلی، اسرار، زهرا، و پورسیدی، شهرام (۱۳۸۹). بررسی اثر متقابل سدیم نیتروپروساید و مس بر برخی از پارامترهای رشد و فیزیولوژی گیاه شاهی (*Lepidium sativum L.*). *مجله زیست‌شناسی گیاهی ایران*، ۱(۱)، ۵۵-۷۶.

- Ahmad, M. S. A. & Ashraf, M. (2011). Essential roles and hazardous effects of nickel in plants. In: Reviews of Environmental Contamination and Toxicology (ed. Whitacre, D.). Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0668-6_6
- Ahmad, P., Ahanger, M. A., Alyemeni, M. N., Wijaya, L., & Alam, P. (2018). Exogenous application of nitric oxide modulates osmolyte metabolism, antioxidants, enzymes of ascorbate-glutathione cycle and promotes growth under cadmium stress in tomato. *Protoplasma*, 255, 79-93. <https://doi.org/10.1007/s00709-017-1132-x>
- Amjad, M., Raza, H., Murtaza, B., Abbas, G., Imran, M., Shahid, M., Asif Naeem, M., Zakir, A., & Iqbal, M. M. (2019). Nickel toxicity induced changes in nutrient dynamics and antioxidant profiling in two maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Plants*, 9(1), 5. <https://doi.org/10.3390/plants9010005>
- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant physiology*, 24(1), 1-15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Ashraf, M. Y., Sadiq, R., Hussain, M., Ashraf, M., & Ahmad, M. S. A. (2011). Toxic effect of nickel (Ni) on growth and metabolism in germinating seeds of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Biological trace element research*, 143, 1695-1703. <https://doi.org/10.1007/s12011-011-8955-7>
- Azizi, I., Esmailpour, B., & Fatemi, H. (2021). Exogenous nitric oxide on morphological, biochemical and antioxidant enzyme activity on savory (*Satureja hortensis* L.) plants under cadmium stress. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(6), 417-423. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.05.003>
- Baccouch, S., Chaoui, A., & El Ferjani, E. (2001). Nickel toxicity induces oxidative damage in *Zea mays* roots. *Journal of Plant Nutrition*, 24(7), 1085-1097. <https://doi.org/10.1081/PLN-100103805>
- Bates, L. S., Waldren, R. A., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Chen, C. T., Chen, T. H., Lo, K. F., & Chiu, C. Y. (2004). Effects of proline on copper transport in rice seedlings under excess copper stress. *Plant Science*, 166(1), 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.08.015>
- Chen, F., Wang, F., Sun, H., Cai, Y., Mao, W., Zhang, G., & Wu, F. (2010). Genotype-dependent effect of exogenous nitric oxide on Cd-induced changes in antioxidative metabolism, ultrastructure, and photosynthetic performance in barley seedlings (*Hordeum vulgare*). *Journal of Plant Growth Regulation*, 29, 394-408. <https://doi.org/10.1007/s00344-010-9151-2>
- Czajka, K. M. (2018). Effects of nickel toxicity on seed germination and expression of genes associated with nickel resistance in *Populus tremuloides* (Doctoral dissertation, Laurentian University of Sudbury).
- del Rio, L. A., Corpas, F. J., & Barroso, J. B. (2004). Nitric oxide and nitric oxide synthase activity in plants. *Phytochemistry*, 65(7), 783-792. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2004.02.001>
- Dhopte, A. M. & Livera-Munoz, M. (1989). Useful Techniques for Plant Scientists. Forum for Plant Physiologists.
- Duan, Y., Sangani, C. B., Muddassir, M. & Soni, K. V. (2020). Copper, chromium and nickel heavy metal effects on total sugar and protein content in *Glycine max*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-107829/v1>
- Farooq, M., Basra, S. M. A., Wahid, A., & Rehman, H. (2009). Exogenously applied nitric oxide enhances the drought tolerance in fine grain aromatic rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195(4), 254-261. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2009.00367.x>
- Freschi, L. (2013). Nitric oxide and phytohormone interactions: Current status and perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 4, 398. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00398>
- Gajewska, E. & Skłodowska, M. (2007). Effect of nickel on ROS content and antioxidative enzyme activities in wheat leaves. *Biometals*, 20(1), 27-36. <https://doi.org/10.1007/s10534-006-9011-5>
- Gajewska, E., Skłodowska, M., Slaba, M., & Mazur, J. (2006). Effect of nickel on antioxidative enzyme activities, proline and chlorophyll contents in wheat shoots. *Biologia Plantarum*, 50, 653-659. <https://doi.org/10.1007/s10535-006-0102-5>
- Genchi, G., Carocci, A., Lauria, G., Sinicropi, M. S. & Catalano, A. (2020). Nickel: Human health and environmental toxicology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 679. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030679>
- Gerszberg, A., Hnatuszko-Konka, K., Kowalczyk, T., & Kononowicz, A. K. (2015). Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in the service of biotechnology. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 120, 881-902. <https://doi.org/10.1007/s11240-014-0664-4>
- Gurpreet, S., Rajneesh, K. A., Rajendra, S. R., & Mushtaq, A. (2012). Effect of lead and nickel toxicity on chlorophyll and proline content of Urd (*Vigna mungo* L.) seedlings. *International Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, 4(6), 136-141. <https://doi.org/10.5897/IJPPB12.005>
- Heath, R. L. & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125(1), 189-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)

- Helaoui, S., Hattab, S., Mkhini, M., Boughattas, I., Majdoub, A., & Banni, M. (2022). The effect of nickel exposure on oxidative stress of *Vicia faba* plants. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 108(6), 1074-1080. <https://doi.org/10.1007/s00128-022-03535-1>
- Hsu, Y. T. & Kao, C. H. (2004). Cadmium toxicity is reduced by nitric oxide in rice leaves. *Plant Growth Regulation*, 42, 227-238. <https://doi.org/10.1023/B:GROW.0000026514.98385.5c>
- Hu, E., Liu, M., Zhou, R., Jiang, F., Sun, M., Wen, J., & Wu, Z. (2021). Relationship between melatonin and abscisic acid in response to salt stress of tomato. *Scientia Horticulturae*, 285, 110176. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110176>
- Hussain, A., Shah, F., Ali, F., & Yun, B. W. (2022). Role of nitric oxide in plant senescence. *Frontiers in Plant Science*, 13, 851631. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.851631>
- Jahan, B., AlAjmi, M. F., Rehman, M. T., & Khan, N. A. (2020). Treatment of nitric oxide supplemented with nitrogen and sulfur regulates photosynthetic performance and stomatal behavior in mustard under salt stress. *Physiologia Plantarum*, 168(2), 490-510. <https://doi.org/10.1111/ppl.13056>
- Javed, A., Ahmad, N., Ahmed, J., Hameed, A., Ashraf, M. A., Zafar, S. A., Maqbool, A., & Ali, E. F. (2022). Grain yield, chlorophyll and protein contents of elite wheat genotypes under drought stress. *Journal of King Saud University-Science*, 34(7), 102279. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102279>
- Kastori, R. R., Putnik-Delic, M. I., & Maksimovic, I. V. (2022). Functions of nickel in higher plants: A review. *Acta Agriculturae Serbica*, 27(53), 89-101. <https://doi.org/10.5937/AASer2253089K>
- Kazemi, N., Khavari-Nejad, R. A., Fahimi, H., Saadatmand, S., & Nejad-Sattari, T. (2010). Effects of exogenous salicylic acid and nitric oxide on lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in leaves of *Brassica napus* L. under nickel stress. *Scientia Horticulturae*, 126(3), 402-407. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.07.037>
- Khaliq, A., Ali, S., Hameed, A., Farooq, M. A., Farid, M., Shakoor, M. B., Khalid, M., Wajid, I. & Rizwan, M. (2016). Silicon alleviates nickel toxicity in cotton seedlings through enhancing growth, photosynthesis, and suppressing Ni uptake and oxidative stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(5), 633-647. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1073263>
- Kotapati, K. V., Palaka, B. K., & Ampasala, D. R. (2017). Alleviation of nickel toxicity in finger millet (*Eleusine coracana* L.) germinating seedlings by exogenous application of salicylic acid and nitric oxide. *The Crop Journal*, 5(3), 240-250. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2016.09.002>
- Lei, Y., Yin, C., & Li, C. (2007). Adaptive responses of *Populus przewalskii* to drought stress and SNP application. *Acta Physiologiae Plantarum*, 29, 519-526. <https://doi.org/10.1007/s11738-007-0062-1>
- Lutts, S., Kinet, J. M., & Bouharmont, J. (1996). NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany*, 78(3), 389-398. <https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0134>
- Maheshwari, R. & Dubey, R. S. (2007). Nickel toxicity inhibits ribonuclease and protease activities in rice seedlings: Protective effects of proline. *Plant Growth Regulation*, 51, 231-243. <https://doi.org/10.1007/s10725-006-9163-x>
- McCready, R. M., Guggolz, J., Silveira, V., & Owens, H. S. (1950). Determination of starch and amylose in vegetables. *Analytical Chemistry*, 22, 1156-1159. <https://doi.org/10.1021/ac60045a016>
- Mitra, S., Chakraborty, A. J., Tareq, A. M., Emran, T. B., Nainu, F., Khusro, A., Idris, A. A., & Simal-Gandara, J. (2022). Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University-Science*, 34(3), 101865. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>
- Mosa, A., El-Banna, M. F., & Gao, B. (2016). Biochar filters reduced the toxic effects of nickel on tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) grown in nutrient film technique hydroponic system. *Chemosphere*, 149, 254-262. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.104>
- Nabi, R. B. S., Tayade, R., Hussain, A., Kulkarni, K. P., Imran, Q. M., Mun, B. G., & Yun, B. W. (2019). Nitric oxide regulates plant responses to drought, salinity, and heavy metal stress. *Environmental and Experimental Botany*, 161, 120-133. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.003>
- Pavlova, D. (2017). Nickel effect on root-meristem cell division in *Plantago lanceolata* (Plantaginaceae) seedlings. *Australian Journal of Botany*, 65(5), 446-452.
- Rahman, H., Sabreen, S., Alam, S., & Kawai, S. (2005). Effects of nickel on growth and composition of metal micronutrients in barley plants grown in nutrient solution. *Journal of Plant Nutrition*, 28(3), 393-404. <https://doi.org/10.1081/PLN-200049149>
- Raju, A. D. & Prasad, S. M. (2023). Hydrogen sulfide regulates NaCl tolerance in brinjal and tomato seedlings by Na^+/K^+ homeostasis and nitrogen metabolism. *Plant Stress*, 7, 100129. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100129>
- Rather, B. A., Masood, A., Sehar, Z., Majid, A., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2020). Mechanisms and role of nitric oxide in phytotoxicity-mitigation of copper. *Frontiers in Plant Science*, 11, 675. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00675>
- Rizwan, M., Mostofa, M. G., Ahmad, M. Z., Imtiaz, M., Mehmood, S., Adeel, M., & Tu, S. (2018). Nitric oxide induces rice tolerance to excessive nickel by regulating nickel uptake, reactive oxygen species detoxification and defense-related gene expression. *Chemosphere*, 191, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.068>

- Rizwan, M., Mostofa, M. G., Ahmad, M. Z., Zhou, Y., Adeel, M., Mehmood, S., Ahmad, M. A., & Liu, Y. (2019). Hydrogen sulfide enhances rice tolerance to nickel through the prevention of chloroplast damage and the improvement of nitrogen metabolism under excessive nickel. *Plant Physiology and Biochemistry*, *138*, 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.02.023>
- Rodriguez-Jimenez, T. D. J., Ojeda-Barrios, D. L., Blanco-Macias, F., Valdez-Cepeda, R. D., & Parra-Quezada, R. (2016). Urease and nickel in plant physiology. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, *22*(2), 69-82. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2014.11.051>
- Shah, F. U. R., Ahmad, N., Masood, K. R., Peralta-Videa, J. R., & Ahmad, F. U. D. (2010). Heavy metal toxicity in plants. In: *Plant Adaptation and Phytoremediation*. (eds. Ashraf, M., Ozturk, M. and Ahmad, M.). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9370-7_4
- Sheokand, S., Kumari, A., & Sawhney, V. (2008). Effect of nitric oxide and putrescine on antioxidative responses under NaCl stress in chickpea plants. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *14*, 355-362. <https://doi.org/10.1007/s12298-008-0034-y>
- Shivay, Y. S. & Prasad, R. (2019). Nickel in environment and plant nutrition: A mini review. *International Journal of Plant and Environment*, *5*(04), 239-242. <https://doi.org/10.18811/ijpen.v5i04.2>
- Siqueira Freitas, D., Wurr Rodak, B., Rodrigues dos Reis, A., de Barros Reis, F., Soares de Carvalho, T., Schulze, J., Carbone Carneiro, M. A. & Guimaraes Guilherme, L. R. (2018). Hidden nickel deficiency? Nickel fertilization via soil improves nitrogen metabolism and grain yield in soybean genotypes. *Frontiers in Plant Science*, *9*, 614. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00614>
- Sirhindi, G., Mir, M. A., Abd-Allah, E. F., Ahmad, P., & Gucel, S. (2016). Jasmonic acid modulates the physio-biochemical attributes, antioxidant enzyme activity, and gene expression in *Glycine max* under nickel toxicity. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 591. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00591>
- Soliman, M., Alhaithloul, H. A., Hakeem, K. R., Alharbi, B. M., El-Esawi, M., & Elkelish, A. (2019). Exogenous nitric oxide mitigates nickel-induced oxidative damage in eggplant by upregulating antioxidants, osmolyte metabolism, and glyoxalase systems. *Plants*, *8*(12), 562. <https://doi.org/10.3390/plants8120562>
- Srinivas, N. D., Rashmi, K. R., & Raghavarao, K. S. M. S. (1999). Extraction and purification of a plant peroxidase by aqueous two-phase extraction coupled with gel filtration. *Process Biochemistry*, *35*(1-2), 43-48. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(99\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(99)00030-8)
- Sun, L. R., Yue, C. M., & Hao, F. S. (2019). Update on roles of nitric oxide in regulating stomatal closure. *Plant Signaling and Behavior*, *14*(10), e1649569. <https://doi.org/10.1080/15592324.2019.1649569>
- Tombuloglu, H., Slimani, Y., Tombuloglu, G., Almessiere, M., Baykal, A., Ercan, I., & Sozeri, H. (2019). Tracking of NiFe₂O₄ nanoparticles in barley (*Hordeum vulgare* L.) and their impact on plant growth, biomass, pigmentation, catalase activity, and mineral uptake. *Environmental nanotechnology, Monitoring and Management*, *11*, 100223. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100223>
- Velikova, V., Yordanov, I., & Edreva, A. J. P. S. (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: Protective role of exogenous polyamines. *Plant Science*, *151*(1), 59-66. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(99\)00197-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00197-1)
- Vishwakarma, A., Wany, A., Pandey, S., Bulle, M., Kumari, A., Kishorekumar, R., Igamberdiev, A. U., Mur, L. A. J., & Gupta, K. J. (2019). Current approaches to measure nitric oxide in plants. *Journal of Experimental Botany*, *70*(17), 4333-4343. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz242>
- Wang, J. W., Zheng, L. P., Wu, J. Y., & Tan, R. X. (2006). Involvement of nitric oxide in oxidative burst, phenylalanine ammonia-lyase activation and Taxol production induced by low-energy ultrasound in *Taxus yunnanensis* cell suspension cultures. *Nitric Oxide*, *15*(4), 351-358. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2006.04.261>
- Floryszak-Wieczorek, J., Milczarek, G., Arasimowicz, M., & Ciszewski, A. (2006). Do nitric oxide donors mimic endogenous NO-related response in plants?. *Planta*, *224*, 1363-1372. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0321-1>
- Yi, Z., Yu, Y., Liang, Y., & Zeng, B. (2008). In vitro antioxidant and antimicrobial activities of the extract of *Pericarpium Citri Reticulatae* of a new Citrus cultivar and its main flavonoids. *LWT-Food Science and Technology*, *41*(4), 597-603. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.04.008>
- Zhang, H., Tan, Z. Q., Hu, L. Y., Wang, S. H., Luo, J. P., & Jones, R. L. (2010). Hydrogen sulfide alleviates aluminum toxicity in germinating wheat seedlings. *Journal of Integrative Plant Biology*, *52*(6), 556-567. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.00946.x>

Induction of nickel resistance by sodium nitroprusside in tomato plant

Atiyeh Oraee, Matineh Moradian, Yahya Selahvarzi*, Ali Tehrnifar, Amir Ali Salavati

Department of Horticultural Science and Landscape Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 2023/03/23, Accepted: 2023/05/15)

Abstract

The accumulation of heavy metals throughout the ecosystem is now a major environmental problem that threatens the quality of life of all living organisms. In a factorial experiment based on a completely randomized design, the effect of sodium nitroprusside on the physiological and biochemical responses of tomatoes under nickel stress was investigated. Tomato plants were grown in two concentrations of sodium nitroprusside (zero and 100 μM) and three different nickel concentrations (zero, 25, and 50 μM) with three replications under hydroponic conditions. The results showed that 50 μM nickel sulfate without sodium nitroprusside significantly reduced the relative water content of leaves (43.1%) compared to the same treatment with-sodium nitroprusside. An increase in electrolyte leakage and malondialdehyde were observed as an indicator of oxidative damage in plants under nickel sulfate stress. In response to oxidative stress caused by nickel sulfate, the amount of chlorophyll decreased and carbohydrate and proline concentrations increased compared to the control. Application of sodium nitroprusside resulted in higher concentrations of chlorophyll b (4.54%) and total chlorophyll (3.57%) under non-nickel sulfate stress than the control. Antioxidant, peroxidase, and catalase activity increased by 62, 37, and 38%, respectively, under nickel sulfate stress when treated with 100 μM sodium nitroprusside compared to non-sodium nitroprusside treatment. According to the results, sodium nitroprusside at a concentration of 100 μM can reduce the negative effects of nickel exposure on the growth characteristics of tomato plants such as the number of leaves and dry weight of the plant, by increasing the antioxidant activity (increasing the activity of the enzymes catalase and peroxidase) and also the positive effect of proline accumulation on the RWC, so the use of this substance is recommended for tomato plants growing under nickel conditions.

Keywords: Tomato, Abiotic stress, Heavy metals, Nitric oxide

Corresponding author, Email: selahvarzi@um.ac.ir