فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۲، شماره ۵۷، آذر و دی‌ماه ۱۴۰۲ صفحه:۱۰۹-۱۲۵
https://doi.org/10.22034/12.57.109

مقاله پژوهشی

القای مقاومت به نیکل با نیتروپروساید سدیم در گیاه گوجه‌فرنگی

عطیه اورعی، متینه مرادیان، یحیی سلاح ورزی*، علی تهرانی‌فر 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 زیست‌محیطی بزرگی است که کیفیت زندگی همه موجودات زنده را تهدید می‌کند. در آزمایشی به صورت فاکتوریل بر مبنای طرح بلوک کاملاً تصادفی، اثر نیتروپروساید سدیم بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گوجه‌فرنگی تحت تنش نیکل مورد بررسی قرار گرفت. گیاهان گوجه‌فرنگی 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 قابل‌توجهی باعث کاهش محتوای آب نسبی برگ (۴۳/۱ درصد) در مقایسه با شرایط کاربرد نیتروپروساید سدیم شد. افزایش نشت یونی و مالون دی‌آلدهید، به‌عنوان 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 کربوهیدارت 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 آنتی‌اکسیدانی، پراکسیداز و کاتالاز در تیمار ۱۰۰ میکرومولار نیتروپروساید سدیم نسبت به گیاهان بدون این ماده به‌ترتیب، ۶۲، ۳۷ و ۳۸ درصد تحت تنش ۵۰ میکرومولارسولفات نیکل افزایش یافت. با توجه به نتایج، نیتروپروساید سدیم در غلظت ۱۰۰ میکرومولار، اثرات منفی تنش نیکل را بر صفات رشدی گیاه گوجه‌فرنگی نظیر تعداد برگ و وزن خشک گیاه با افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی (افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز) و همچنین تأثیر مثبت تجمع پرولین بر محتوای نسبی آب، کاهش داد، لذا کاربرد این ماده برای گیاه گوجه‌فرنگی تحت رشد در شرایط نیکل توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: گوجه‌فرنگی، تنش غیرزیستی، فلزات سنگین، نیتریک اکسید

مقدمه

گوجه‌فرنگی گیاهی است که به‌طور گسترده کشت می‌شود و در کل تولید جهانی رتبه هفتم را دارد. گوجه‌فرنگی محبوبیت زیادی در بین مصرف‌کنندگان به دست آورده است که حاوی مواد مغذی فراوانی مانند پروتئین، کربوهیدرات‌ها، ویتامین C، اسید آلی و عناصر معدنی است، که انسان به آن نیاز دارد (Gerszberg *et al.*, 2015). به‌منظور بهبود عملکرد گیاهان در شرایط تنش‌زا به‌جای اصلاح‌نژاد، کاربرد موادی در دسترس‌تر، روشی مقرون به‌صرفه است (Hu *et al.*, 2021).

امروزه انباشت فلزات سنگین در سراسر اکوسیستم

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: selahvarzi@um.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

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 دفورمیلازها، هیدروژنازها، سوپراکسید دیسموتازها و متیل کوآنزیم ردوکتاز عمل می کند (Ahmad and Ashraf, 2011). اوره‌آز نیکل را در محل فعال خود نگه می‌دارد که اوره را برای تولید بی‌کربنات و آمونیاک هیدرولیز می‌کند (Rodriguez-Jimeneze *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; Gajewska *et al*., 2006). بر طبق گزارش Czajka (۲۰۱۸)، Ashraf و همکاران (۲۰۱۱)، و Gurpreet و همکاران (۲۰۱۲)، 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 نشانه ایجاد خسارت اکسیداتیو در گیاهان، پراکسیداسیون لیپیدها است که در نتیجه آن از بین‌رفتن انسجام غشای سلولی سپس افزایش نفوذپذیری غشا می‌گردد (Khaliq *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 نیتروپروساید (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 وغیرزیستی 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 وارده به گیاه دارد (Del Rio *et al*., 2004).

اگرچه اثرات غلظت‌های مختلف نیکل بر رشد گیاهان مختلف به‌طور جداگانه بررسی شده است، اما اثر نیتروپروساید 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

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. بذرهای 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 نیترات کلسیم ۱ میلی‌مولار؛ ۱۰۱ گرم بر لیتر نیترات 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 در 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) برگی، 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 آون 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 برگی: 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 اسپکتروفتومتر 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 آب‌مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانیده شد. پس از این مرحله، به یک میلی‌لیتر از روشناوری 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 اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۶۲۵ نانومتر خوانده و ثبت شده و غلظت قند 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

شد و توسط معرف نایِن‌هیدرین 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 همان‌طور که توسط Lutts و همکاران (۱۹۹۶) توضیح داده شد، با استفاده از شش دیسک برگ جوان (با قطر ۱۰ میلی‌متر) برای هر تیمار تعیین شد. نمونه‌ها سه بار با آب دیونیزه شسته شدند، در یک لوله دربسته حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه قرار داده شدند و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد 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 سانتی‌گراد قرار گرفتند و آخرین رسانایی الکتریکی پس از تعادل در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد، سپس نشت الکترولیت محاسبه شد. برای سنجش پراکسیداسیون لیپیدهای غشا، غلظت مالون دی‌آلدئید (MDA) به‌عنوان محصول پراکسیده شدن اسیدهای چرب غشاها اندازه‌گیری شد. در ابتدا ۰/۱ گرم از بافت تازه برگ با نیتروژن مایع آسیاب و به آن ۵ میلی‌لیتر تری‌کلرو 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 میلی‌لیتر از محلول رویی، ۵ میلی‌لیتر محلول ۲۰ درصد TCA حاوی ۰/۵ درصد تیوباربیتوریک اسید (TBA) اضافه شد. مخلوط حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و سپس نمونه‌ها مجدداً سانتریفیوژ شدند. ماده قرمزرنگ مالون دی‌آلدئید تیوباربیوتریک اسید (MDA-TBA) تولیدشده، با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۵۳۲ نانومتر اندازه‌گیری شد و جذب سایر رنگیزه‌های اختصاصی نیز، در طول‌موج ۶۰۰ نانومتر خوانده شد. تعیین غلظت مالون دی‌آلدئید از ضریب خاموشی معادل ۱۵۵ $cm^{-1}\ mM^{-1}$، 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 توسعه‌یافته جدا شد و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شد. از هر برگ پنج دیسک به قطر یک سانتی‌متر تهیه و وزن تازه آن اندازه‌گیری شد. سپس دیسک‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب‌مقطر غوطه‌ور شدند و آب‌مقطر تخلیه شده و رطوبت اضافی با استفاده از کاغذ صافی حذف شد. وزن دیسک‌ها (وزن اشباع‌شده) اندازه‌گیری و داخل آون با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک شد. سپس محتوای نسبی برحسب درصد گزارش شد (Dhopte and Livera-Munoz, 1989).

فعالیت آنتی‌اکسیدانی، سنجش کاتالاز و پراکسیداز: ظرفیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها با استفاده از خاصیت خنثی‌کنندگی رادیکال‌های آزاد، ۲،۲- دی فنیل-۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH) صورت گرفت. در این روش ۰/۱ میلی‌لیتر عصاره (۱۰۰ میلی‌گرم ماده برگی تازه را در نیتروژن مایع به‌صورت کامل هموژنایز کرده و عصاره‌گیری با ۵ میلی‌لیتر 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 میلی‌لیتر DPPH (۵۰۰ میکرومولار در متانول) افزوده شد. پس از ۳۰ دقیقه در شرایط تاریکی و دمای اتاق میزان جذب نور در طول‌موج ۵۱۷ نانومتر خوانده شد و براساس معادله زیر محاسبه شد (Yi *et al.*, 2008).

$$DPPH=\frac{A0-A1}{A0}\times 100$$

DPPH= درصد تخریب رادیکال‌های، A_0= جذب نمونه شاهد، A_1= جذب نمونه مورد ارزیابی

فعالیت کاتالاز براساس میزان اولیه ناپدیدشدن پراکسید هیدروژن مطابق با روش Velikova و همکاران (۲۰۰۰) ارزیابی شد. یک میلی‌لیتر محلول واکنش کاتالاز حاوی بافر فسفات پتاسیم ۱۰ میلی‌مولار pH=۷ با مقدار متناسبی از آنزیم استخراجی و پراکسید هیدروژن ۳۳ میلی‌مولار بود. کاهش میزان جذب در طول‌موج ۲۴۰ نانومتر در یک دقیقه و میکرومول پراکسید هیدروژن مصرف‌شده در دقیقه به عنوان

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

یک واحد کاتالاز تعریف شد. براساس روش Srinivas و همکاران (۱۹۹۹) متعاقب شکل‌گیری تتراگایاکول با جذب در ۴۷۱ نانومتر استفاده از ضریب خاموشی ۲۶/۶ میلی‌مولار برای محاسبه مقدار تتراگایاکول 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 کابرد 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) وکمترین این شاخص در تیمار ۵۰ میکرومولار سولفات نیکل و عدم کابرد نینروپروساید 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 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 مریستمی 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

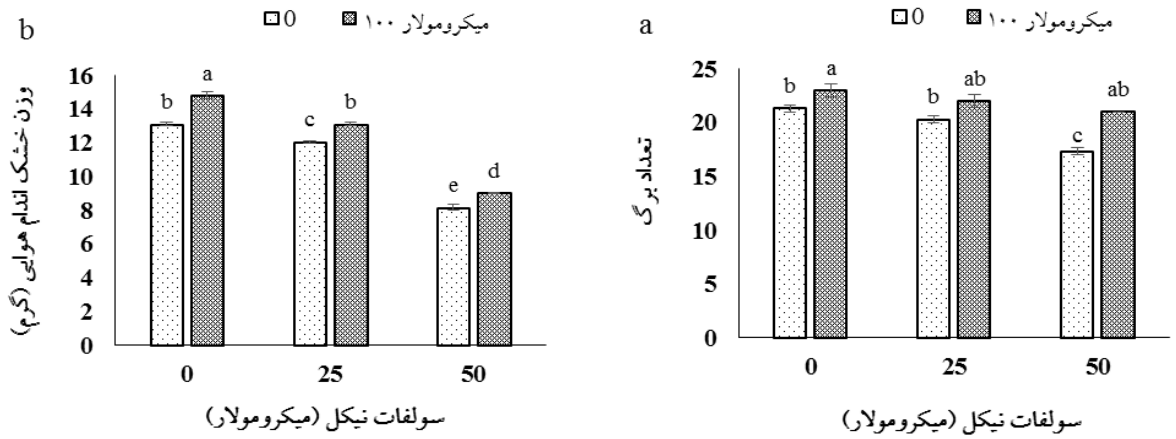
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

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	۰/۰۰۰۰۱	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**	۱۲۰۶**	۱۰۶**	۰/۰۵**	۰/۰۰۵**	۰/۰۷۹**	۳/۹۳**	۰/۰۱۸**
(B) × (A)	۲	۲/۰۰*	۰/۳۱*	۸/۷۲ ns	۳/۴۳*	۰/۰۰۱ns	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

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

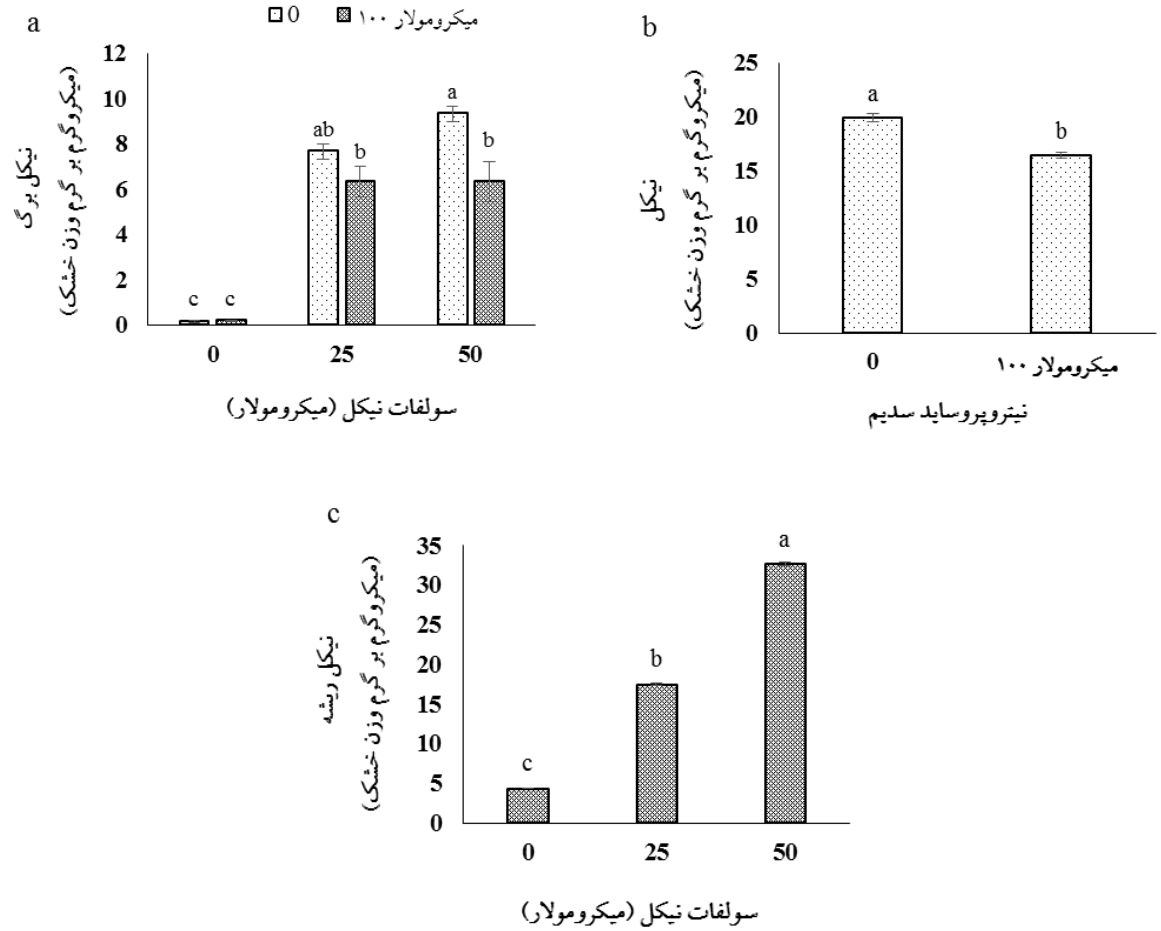
(A): نیتروپروساید سدیم، (B): سولفات نیکل



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

بود. نتایج نشان داد که نیکل موجود در محلول غذایی توسط گیاهان جذب می‌شود زیرا غلظت نیکل برگ به‌طور قابل توجهی با افزایش غلظت نیکل مکمل در محلول غذایی افزایش می‌یابد. جذب این عنصر توسط ریشه گیاه از خاک به‌طور 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 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 به‌ترتیب، در برگ و ریشه افزایش یافت. از طرفی کاربرد نیتروپروساید سدیم در غلظت‌های بالاتر تجمع این عنصر را در برگ و ریشه کاهش

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]



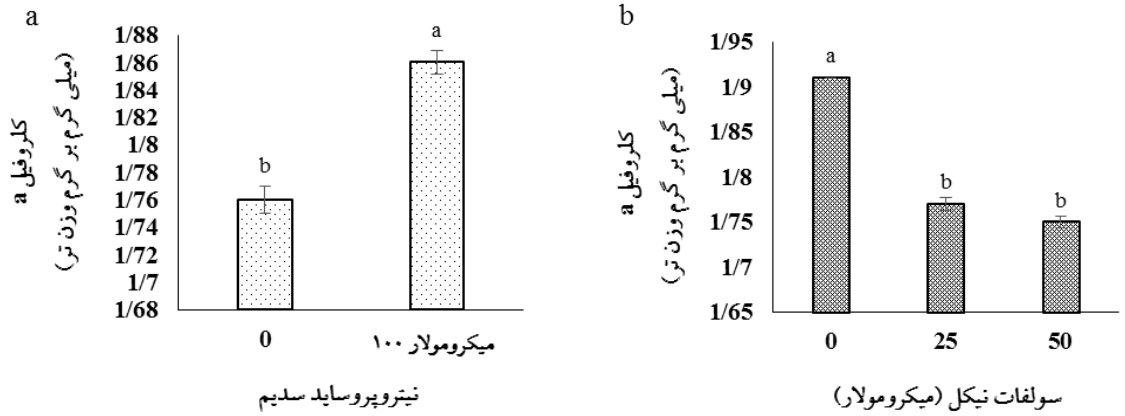
شکل ۲- اثر نیتروپروساید سدیم و سولفات نیکل بر نیکل برگ (a)، اثر نیتروپروساید سدیم (b) و اثر سولفات نیکل بر نیکل ریشه (c) گوجه‌فرنگی. میانگین‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

داد. کاربرد نیتروپروساید سدیم خارجی بر کاهش جذب عناصری چون نیکل (Rizwan *et al.*, 2018) و مس (رئیسی 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 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.

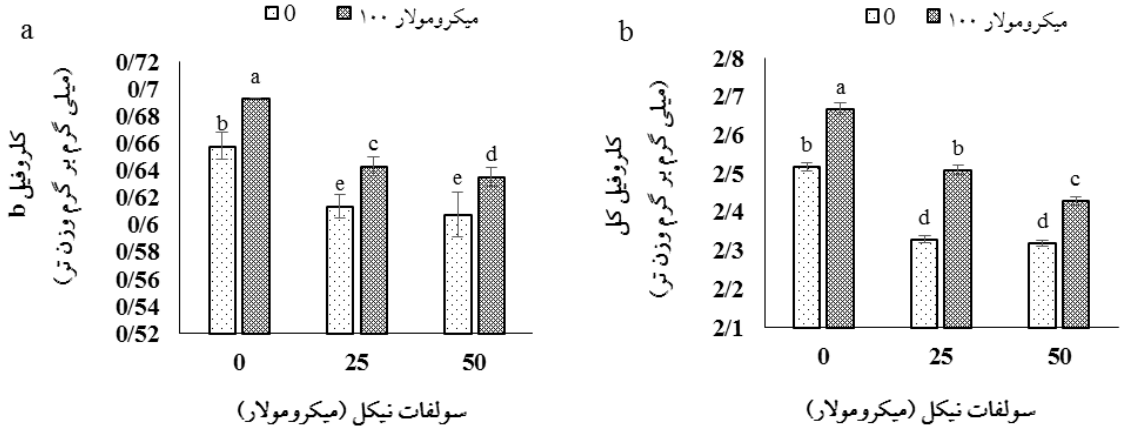
اثر نیتروپروساید سدیم و نیکل بر کلروفیل a، کلروفیل b، و کلروفیل کل: براساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر نیتروپروساید سدیم و نیکل بر کلروفیل b و کل معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج نشان داد که کلروفیل a تحت تأثیر اثرات ساده نیتروپروساید سدیم و نیکل قرار گرفت، به‌نحوی‌که با افزایش شدت غلظت نیکل از میزان این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

براساس نتایج به‌دست‌آمده در بررسی میزان کلروفیل در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]



شکل ۳- اثر ساده نیتروپروساید 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 نیتروپروساید 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.

تمام تیمارهای حاوی نیکل روند کاهشی مشاهده شده است. در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ میکرومولار سولفات نیکل کاربرد نیتروپروساید 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 تیمارشده با ۲۵ و ۵۰ میکرومولار نیکل بدون تیمار نیتروپروساید مشاهده نشد، اما با افزایش غلظت سولفات نیکل به ۵۰ میکرومولار نسبت به شاهد در گیاهان بدون نیتروپروساید کلروفیل کل ۸/۲۴ درصد کاهش یافت. کلروفیل کل در گیاهان تیمارشده با نیتروپروساید سدیم در مقایسه با شاهد ۶/۳۷ درصد افزایش یافت (شکل ۴b).

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،

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]



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

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 بیوسنتز 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 کربوهیدارت به ترتیب، به میزان ۶۹ و ۷۰ درصد کاهش یافت. کاربرد نیتروپروساید سدیم در تیمامی تیمارهای حاوی نیکل سبب افزایش میزان کربوهیدرات گردید، کمترین و بیشترین میزان این شاخص در تیمارهای ۵۰ میکرومولار تحت شرایط کاربرد نیتروپروساید سدیم (۰/۵۰ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) و صفر میکرومولار نیکل تحت شرایط کاربرد نیتروپروساید سدیم (۱/۶ میلی گرم بر گرم وزن خشک) به ثبت رسید (شکل ۵b).

گیاهان در شرایط تنش فلز سنگین بیشتر مواد فتوسنتزی خود را صرف تولید ترکیبات تنظیم اسمزی از جمله پرولین، گلیسین بتائین و ترکیبات قندی 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 تنش اسمزی خفیف را متحمل شدند. از

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

آنجایی که تجمع پرولین با کاهش محتوای نسبی مرتبط بود، می‌توان پیشنهاد کرد که در گوجه‌فرنگی تحت تنش نیکل، افزایش محتوای اسیدآمینه 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 اسیدآمینه باشد. نیتروپروساید سدیم سبب افزایش فعالیت پرولین سنتز کربوکسیلات اسپویلر (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 معنی‌دار 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 ننمود (شکل ۶a). میزان مالون دی‌آلدهید در کاربرد نیکل ۲۵ میکرومولار تفاوت معنی‌داری با گیاهان بدون نیکل تحت تیمار نیتروپروساید سدیم نداشت، افزایش سولفات نیکل سبب افزایش مالون دی-آلدهید 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 گرم وزن تر) به ثبت رسید (شکل ۶b). میزان محتوای نسبی آب در گیاهان تیمارشده 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 تیمارشده با نیتروپروساید نسبت به تیمار بدون سولفات نیکل رسید. در گیاهان تیمارشده با ۲۵ میکرومولار سولفات نیکل تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای حاوی نیتروپروساید سدیم و بدون نیتروپروساید سدیم به ثبت نرسید (شکل ۶c).

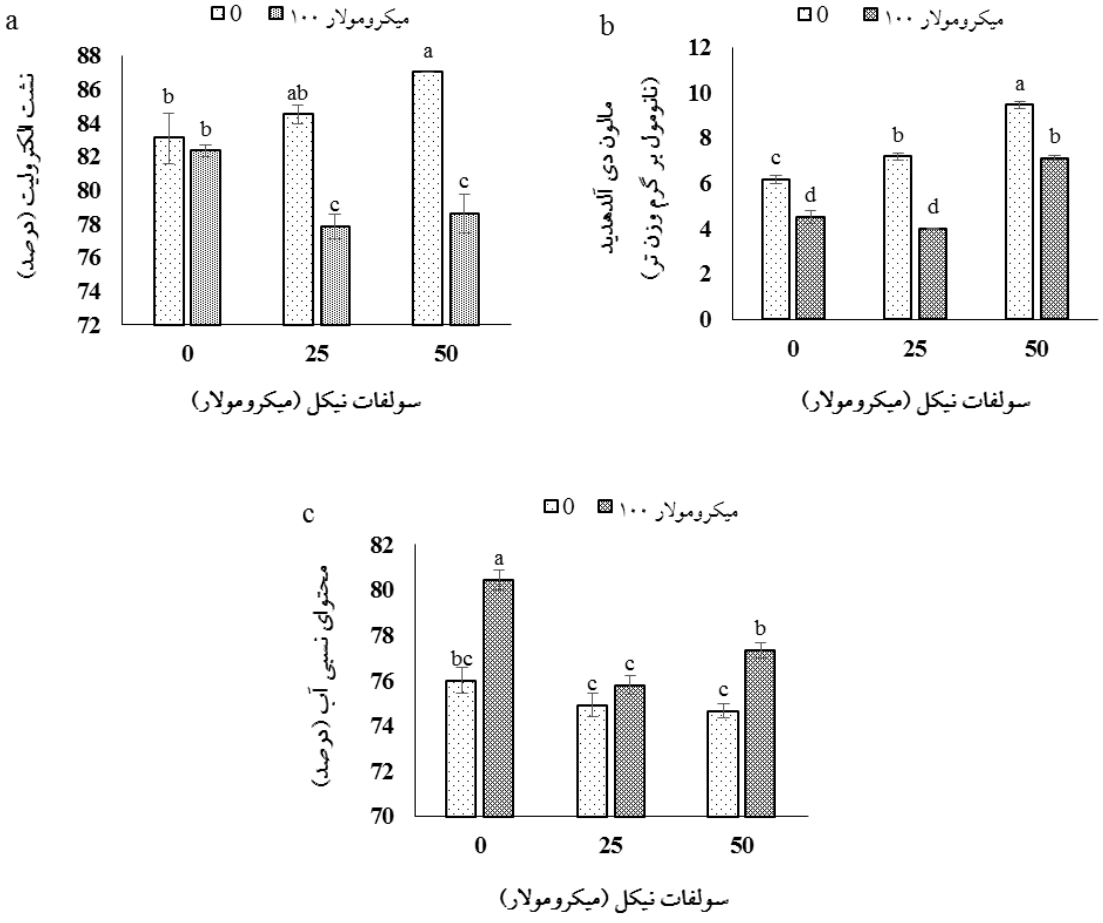
برای برآورد تنش اکسیداتیو، محتوای MDA بافت به عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپید و آسیب اکسیداتیو گیاهان در معرض فلزات سنگین بررسی می‌گردد. فلزات سنگین موجب پراکسیداسیون شدید لیپید از طریق برداشت هیدروژن توسط ROS از اسیدهای چرب غیراشباع شده، موجب تشکیل رادیکال‌های لیپیدی می‌شوند. مشخص شده یون‌های آزاد نیکل 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

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

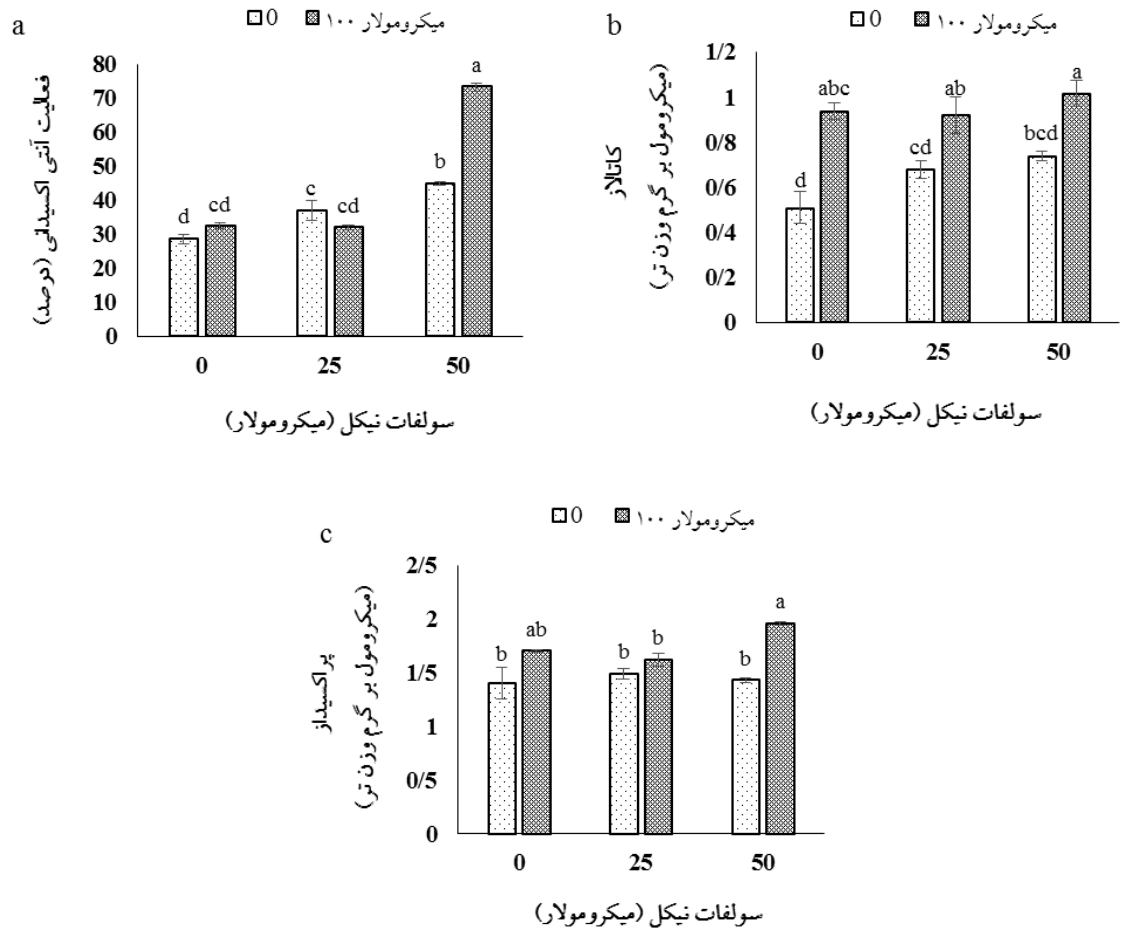
منابع تغییر	درجه آزادی	نشت الکترولیت	مالون دی‌آلدئید	محتوای نسبی آب	آنتی اکسیدان	کاتالاز	پراکسیداز
تکرار	۲	۰/۱۰۹	۰/۱۲	۰/۶۱۷	۱۰/۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۵
نیتروپروساید سدیم	۱	۱۲۵**	۲۵/۸**	۳۱/۸**	۳۶۵**	۰/۴۵۷**	۰/۴۶۴**
سولفات نیکل	۲	۵/۰۴^{ns}	۱۶/۱**	۱۳/۵**	۱۴۴۵**	۰/۰۰۷ ^{ns}	۰/۰۳۷^{ns}
نیتروپروساید سدیم × سولفات نیکل	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} به‌ترتیب 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 دی‌آلدهید (b) و محتوای نسبی آب (c) برگی گوجه‌فرنگی. میانگین‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]



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

NO با احیای Fe^{+3} به Fe^{+2} در جایگاه فعال لیپوکسیژناز 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 ترتیب۲۷/۶ و ۵۵/۲ درصد افزایش یافت. بیشترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی در گیاهان تیمارشده با نیتروپروساید تحت ۵۰ میکرومولار سولفات نیکل (۷۳/۳ درصد) مشاهده شد 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 ننمود 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).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

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 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. ازطرفی 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، 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 وتوانایی تحمل و تجمع نیکل را ندارد. از این رو، رشد و عملکرد آن در مزارعی با آلایندگی نیکل، کاهش می‌یابد و گزینه مناسبی برای اهداف گیاه‌پالایی نیست.

منابع

بهمن زیاری، 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

رئیسی، 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 زیست شناسی گیاهی ایران*، ۱(۱)،۵۵-۷۶.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

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., Esmaielpour, 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 Rıo, 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: 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., Sklodowska, 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

Helaoui, S., Hattab, S., Mkhinini, 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., Silviera, 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

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

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 $NiFe_2O_4$ 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

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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-24]