



Evaluation of antioxidant changes in the medicinal plant (*Conyza canadensis*) under cerium and zinc nano-elicitors

Khani Farzaneh¹, Fabriki-Ourang Sedigheh^{2*}, Hossaini Sayyed Mohsen^{3*}, Ahmadi Jafar⁴

¹M.Sc., Dept. of Genetics and Plant Breeding, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

²Associate Professor, Dept. of Genetics and Plant Breeding, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

³Assistant Professor, Department of Genetics and Plant Breeding, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

⁴Professor, Dept. of Genetics and Plant Breeding, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

ABSTRACT INFO

Research Paper

Received: 29 Oct 2025

Accepted: 30 Nov 2025

ABSTRACT

Elicitors are among the most effective strategies for enhancing secondary metabolite production in medicinal plants. This study aimed to evaluate the effects of abiotic elicitors on antioxidant activity and total protein content in different tissues of *Conyza canadensis*. The experiment was conducted in a completely randomized design with three replications. Treatments included cerium dioxide and zinc dioxide solutions at concentrations of 100 and 200 mg/L, applied through irrigation, while water served as the control. After three consecutive treatment periods, plant samples from root, stem, and leaf tissues were collected to determine total soluble protein and antioxidant enzyme levels. Analysis of variance revealed that the treatments had significant effects on total protein content and antioxidant enzyme activity across all three tissue types. Cerium dioxide and zinc dioxide notably increased total protein levels in leaf tissue compared to the control, but no significant changes were observed in root and stem tissues. Both elicitors enhanced catalase (CAT) activity in stem and leaf tissues, while the highest ascorbate peroxidase (APX) activity was observed in root tissue under zinc dioxide treatment. Both elicitors increased superoxide dismutase (SOD) activity but significantly reduced peroxidase (POX) activity in all tissues. Additionally, cerium dioxide and zinc dioxide treatments led to a decrease in glutathione reductase (GR) activity in root, stem, and leaf tissues relative to the control, with a more pronounced reduction under cerium dioxide treatment. The highest glutathione peroxidase (GPX) activity was detected in root tissue treated with zinc dioxide, while the lowest level was recorded in the control.

Key words: Antioxidant, Catalase, Cerium dioxide, Superoxide dismutase, Zinc dioxide.

How to cite this article:

Khani F, Fabriki-Ourang S, Hossaini SM, Ahmadi J. 2025. Evaluation of antioxidant changes in the medicinal plant (*Conyza canadensis*) under cerium and zinc nano-elicitors. Journal of Advanced Researches in Medicinal Plants 2 (3): 69-82. (In Farsi)

DOI: 10.30479/armp.2025.22977.1052

©The Author(s).
Publisher: Imam Khomeini International University
ARMp is an open access journal under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

*Corresponding Author Email: ourang@eng.ikiu.ac.ir

*Corresponding Author Email: hossaini_sm@eng.ikiu.ac.ir



ارزیابی تغییرات آنتی‌اکسیدانی گیاه دارویی علف اسب (*Conyza canadensis*) تحت تأثیر نانو الیسیتورهای سریم و روی

فرزانه خانی^۱، فابریکی-اورنگ صدیقه^{۲*}، حسینی سید محسن^{۳*}، احمدی جعفر^۴

^۱ کارشناسی ارشد، گروه ژنتیک و به‌نژادی گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین
^۲ دانشیار، گروه ژنتیک و به‌نژادی گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین
^۳ استادیار، گروه ژنتیک و به‌نژادی گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین
^۴ استاد، گروه ژنتیک و به‌نژادی گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

اطلاعات مقاله	چکیده
علمی-پژوهشی دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹	الیستورها معمولاً یکی از موفق‌ترین استراتژی‌ها در افزایش سطح تولید متابولیت‌های ثانویه گیاهان دارویی هستند. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر الیسیتورهای غیر زیستی در بافت‌های مختلف علف اسب بر افزایش انواع آنتی‌اکسیدان‌ها و پروتئین کل انجام شد. بدین منظور، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیماردهی با محلول‌های دی‌اکسید سریم و دی‌اکسید روی با غلظت ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌صورت ترکیب با آبیاری اعمال و برای تیمار شاهد، از آب مقطر استفاده شد. پس از سه دوره متوالی اعمال تیمارها، نمونه‌های گیاهی از سه بافت ریشه، ساقه و برگ برای سنجش غلظت پروتئین محلول کل و میزان آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، تهیه شد. نتایج تجزیه واریانس معنی‌دار بودن اثر تیمارهای مختلف بر میزان پروتئین کل و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در سه بافت ریشه، ساقه و برگ را نشان داد. دی‌سریم اکسید و دی‌اکسید روی سبب افزایش معنی‌دار میزان پروتئین کل در بافت برگ، نسبت به تیمار شاهد شدند؛ اما تأثیر معنی‌داری در افزایش پروتئین کل در بافت‌های ریشه و ساقه، نسبت به شاهد نشان ندادند. دی‌سریم اکسید و دی‌اکسید روی سبب افزایش میزان آنزیم کاتالاز (CAT) در بافت‌های ساقه و برگ شدند و بیشترین میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX) در اثر تیمار دی‌اکسید روی در بافت ریشه مشاهده شد. هر دو الیسیتور سبب افزایش میزان آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و کاهش معنی‌دار میزان آنزیم پراکسیداز (POX) در هر سه بافت ریشه، ساقه و برگ شدند. هر دو الیسیتور نسبت به تیمار شاهد، سبب کاهش آنزیم گلوتاتیون ردوکتاز (GR) در بافت‌های ریشه، ساقه و برگ شدند؛ به‌طوری که کاهش گلوتاتیون ردوکتاز در تیمار دی‌سریم اکسید نسبت به دی‌اکسید روی شدیدتر بود. بیشترین میزان آنزیم گلوتاتیون پراکسیداز (GPX) در اثر تیمار دی‌اکسید روی و کمترین میزان آن در تیمار شاهد در بافت ریشه حاصل شد. کلمات کلیدی: آنتی‌اکسیدان، دی‌اکسید روی، دی‌اکسید سریم، سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز.

استناد به این مقاله

Khani F, Fabriki-Ourang S, Hossaini SM, Ahmadi J. 2025. Evaluation of antioxidant changes in the medicinal plant (*Conyza canadensis*) under cerium and zinc nano-elicitors. Journal of Advanced Researches in Medicinal Plants 2 (3): 69-82. (In Farsi)

DOI: 10.30479/armp.2025.22977.1052

حقوق مؤلف © نویسندگان
 ناشر: دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

* نشانی پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ourang@eng.ikiu.ac.ir

* نشانی پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hossaini_sm@eng.ikiu.ac.ir

مقدمه

با توجه به اینکه بخش اعظم بازار گیاهان دارویی دنیا به تولید و عرضه متابولیت‌های ثانویه مربوط می‌شود، متابولیت‌های ثانویه گیاهان از ارزش اقتصادی و ارزش افزوده بسیار بالایی برخوردارند (Zhao et al., 2005; Pant et al., 2021). شناخت گیاهان دارویی و استفاده از آنها از قدیم مورد توجه محققین قرار گرفته است. شناسایی و بررسی ترکیبات شیمیایی آنها نه تنها به درمان آسان‌تر و ارزان‌تر بیماری‌ها کمک می‌کند، بلکه از خارج شدن بخشی از ثروت کشور به دلیل واردات اینگونه کالاها یا فرآورده‌های آنها نیز جلوگیری می‌کند. علف اسب (*Conyza canadensis*) به عنوان گیاهی دارویی حاوی انواع فلاونوئیدها، ترپنوئیدها و تانن‌ها شناخته می‌شود (Strzelecka and Glinkowska, 1981). برگ‌های *C. canadensis* به عنوان ماده مقوی برای معالجه اسهال، دیابت و خون‌ریزی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Sharma and Kumar, 2014). درمان آلرژی، ورم دهان، گوش‌درد، درد دندان (Parkws and Ahn, 2013)، درمان تنگی نفس، خون‌ریزی رحم، نقرس، علائم رماتیسمی، ورم و تومورها و برونشیت، از جمله موارد کاربرد قسمت‌های مختلف این گیاه هستند (Grunwald et al., 2007; Shakirullah et al., 2011). مطالعات فارموکولوژیک نشان می‌دهد که این گیاه اثر ضد میکروبی، آنتی‌اکسیدانی، ضد انعقاد، ضد التهابی، ضد سرطان و اثر محافظت‌کننده معده دارد. مطالعات فیتوشیمیایی نشان داد که *C. canadensis* شامل ساپونین‌ها، دیترپنوئیدها، ترپنوئیدها، گلیکوزیدها، تانن‌ها، آنتراکینون‌ها، استروئیدها و فلاونوئیدها است (Shakirullah et al., 2011).

تولید متابولیت‌های گیاهی با ارزش در ابتدا از طریق کشت سلول، بافت و اندام‌های گیاهی و همچنین کشت ریشه‌های موئین از نظر تجاری موفقیت‌آمیز نبوده و با محدودیت‌هایی مواجه می‌شود. یکی از این موانع، مقادیر کم متابولیت‌های ثانویه تولید شده است؛ اما محققین با به‌کارگیری روش‌هایی که به‌نوعی تحریک‌کننده مسیرهای بیوسنتزی این ترکیبات هستند، به موفقیت‌های قابل توجهی دست یافته‌اند. یکی از این روش‌ها که به‌منظور افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه به‌کار می‌رود، استفاده از الیستورهای زیستی و غیر زیستی است (Zhao et al., 2008; Zhu et al., 2005; al.). الیستورها ترکیباتی با منشأ زیستی یا غیر زیستی هستند که از طریق القای سیستم دفاعی، باعث بیوسنتز و انباشت متابولیت‌های ثانویه و همچنین تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان می‌شوند. برخی عوامل

الیستوری غیر زیستی (اشعه ماورای بنفش، تنش اسمزی و نمک فلزات سنگین) و بعضی ترکیبات شیمیایی هستند (Namdeo et al., 2007; Pathak and Humbal, 2023). رخدادهایی مانند افزایش جریان‌ات یونی از عرض غشای پلاسمایی، تولید اکسیژن فعال ROS¹ و غیره که در گیاهان مختلف متفاوت است، از اثرات اولیه عوامل الیستوری زیستی یا غیر زیستی هستند (Ebel and Scheel, 1997).

به‌کارگیری الیستورها معمولاً یکی از موفق‌ترین استراتژی‌ها در افزایش سطح تولید متابولیت‌های ثانویه است. الیستورها به‌صورت مستقیم و غیر مستقیم با فعال کردن ژن‌های مرتبط یا بیوسنتز ترکیبات ثانویه، سبب افزایش تولید این ترکیبات می‌شوند (Neuman et al., 2009). زمانی که گیاه یا سلول گیاهی توسط الیستور تحریک می‌شود، دسته‌ای از واکنش‌های بیوشیمیایی در چندین مرحله اتفاق می‌افتد. تولید گونه‌های اکسیژن و اکشنگر مانند یون سوپراکسید و پراکسید هیدروژن که ممکن است دارای اثرات مستقیم ضد میکروبی باشند و نیز منجر به تولید مشتقات اسید چرب فعال زیستی شوند، می‌توانند در اتصال عرضی پروتئین‌های غنی از پرولین متصل به دیواره سلول شرکت کنند. پراکسید هیدروژن می‌تواند به‌عنوان پیام‌رسان ثانویه عمل کند و در فعال‌سازی رونویسی ژن‌های دفاعی نقش داشته باشد. آنچه مشخص شده این است که الیستورها از طریق گیرنده‌های موجود در غشای پلاسمایی دریافت می‌شوند و از طریق سیستم‌های سیگنالینگ نسخه‌برداری و ترجمه (بیان) ژن‌های دخیل در بیوسنتز، متابولیت‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Lee et al., 2012).

نانوذرات اکسید سربوم شکل اکسید شده عنصر کمیاب سربوم هستند که به دلیل تغییرات جای خالی اکسیژن سطحی و آرایش ظرفیتی، قادر به تحریک فعالیت سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز هستند؛ بنابراین، این نانوذرات می‌توانند به‌عنوان جاروکننده‌های گونه‌های اکسیژن واکنش‌پذیر، در بسیاری از زمینه‌های بیولوژیک عمل کنند (Celardo et al., 2011). تأثیر معنی‌دار نانو ذره سربیم بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاه ذرت اثبات شده است (Zhao et al., 2005). در پژوهشی دیگر، اثر استفاده از نانوذرات اکسید سربیم بر گیاه گوجه‌فرنگی گزارش شده است (Barrios and Rico, 2016). با توجه به مطالعات انجام‌شده و تأثیرات مثبت و منفی نانوذرات اکسید آهن، اکسید

¹ Reactive Oxygen Species

شده و بلافاصله به فریز ۸۰- درجه سانتی‌گراد منتقل و تا زمان استفاده، نگهداری شدند. برای تهیه غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، ۰/۱ گرم دی‌اکسید سریم و برای تهیه غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، ۰/۲ گرم دی‌اکسید روی در یک لیتر آب مقطر به کمک همزن مغناطیسی حل شد. برای به‌دست آوردن سوسپانسیون یکنواختی از این محلول‌ها، هر محلول به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه الکتروسونیک (20 kHz , 180 W , 30 min) قرار داده شد. از محلول‌های دی‌اکسید سریم و دی‌اکسید روی برای آبیاری گیاهان مورد مطالعه استفاده شد.

تهیه عصاره و سنجش غلظت پروتئین محلول کل

برای عصاره‌گیری از نمونه‌ها، به‌منظور اندازه‌گیری غلظت پروتئین محلول کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی، ابتدا ۰/۲ گرم نمونه ریشه، برگ و ساقه نگهداری‌شده در فریزر ۸۰- درجه، با نیتروژن مایع در هاون چینی خرد و به میکروتیوپ‌های ۲ میلی‌لیتری منتقل شد. برای سنجش غلظت پروتئین محلول کل، مقدار ۱۸۰۰ میکرولیتر محلول برادفورد داخل کووت ریخته و سپس ۱۰ میکرولیتر عصاره گیاهی به همراه ۱۹۰ میکرولیتر آب مقطر به آن اضافه شد. پس از انجام واکنش در دمای اتاق به مدت ۲ دقیقه، میزان جذب در طول موج ۵۹۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Labomed مدل UV-3200، ساخت آمریکا) اندازه‌گیری شد؛ سپس با استفاده از منحنی استاندارد رسم‌شده با غلظت‌های مختلف آلبومین سرم گاوی، غلظت پروتئین محلول کل برای تمام نمونه‌ها به‌دست آمد.

سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD)

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز از طریق اندازه‌گیری توانایی آن در جلوگیری از احیای نوری ماده شیمیایی نیترو بلو تترازولیوم کلراید (NBT) به روش میسرا و فردویچ (Misra and Ferdowich, 1972) اندازه‌گیری شد. مخلوط واکنش شامل بافر فسفات پتاسیم ($\text{pH}=7.8$) ۱۰۰ میلی‌مولار، متیونین ۱۳ میلی‌مولار، NBT) نیترو بلو تترازولیوم کلراید ۷۵ میکرومول، EDTA نیم‌مولار، ریوفلاوین دو میکرومول و عصاره پروتئینی بود. نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در معرض لامپ فلورسنت ۱۵ ولت به فاصله ۳۵ سانتی‌متر قرار داده شدند. پس از انجام واکنش، میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۶۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد و از مخلوط واکنش بدون عصاره آنزیمی نور ندیده به‌عنوان شاهد اسپکتروفتومتر استفاده شد.

سریم، اکسید روی و اکسید مس بر رشد گیاهان مختلف، مکانیزم قطعی و روند دقیق و قابل پیش‌بینی برای توجیه رفتار نانوذرات مختلف وجود ندارد. در این میان، برای نانوذرات اکسید آهن و اکسید سریم اثرات مثبت بیشتری گزارش شده است (Rico *et al.*, 2019; Hossain *et al.*, 2016; Rui *et al.*, 2015; *al.*، اگرچه نتایج برخی پژوهش‌ها حاکی از کاهش برخی از پارامترهای رشد گیاهان مختلف در حضور نانوذرات اکسید آهن و اکسید سریم است (Zhao *et al.*, 2005; Rico *et al.*, 2015).

نانوذرات اکسید روی یکی از پرکاربردترین و پرمصرف‌ترین نانوذرات در کشاورزی استفاده می‌شود و می‌تواند توسط گیاهان جذب شود (Sharma and Dubey, 2005). عنصر روی در بسیاری از سیستم‌های آنزیمی گیاه نقش فعال‌کننده، کاتالیزوری و یا ساختمانی دارد. عنصر روی، نقش مهمی در تولید پروتئین دارد و به‌عنوان کاتالیزور در بسیاری از واکنش‌های شیمیایی اکسیداسیون و احیا، در سیستم‌های آنزیمی نیز حضور فعال دارد (Geraham *et al.*, 1992). مارشتر گزارش کرد که عنصر روی نقش بسیار مهمی در سنتز پروتئین و کربوهیدرات‌ها، اعمال متابولیکی سلول، محافظت غشا در مقابل رادیکال‌های آزاد اکسیژن و سایر فرایندهای مرتبط با سازگاری گیاهان به تنش‌ها دارد (Marschner, 1995). این پژوهش با هدف بررسی تأثیر محرک‌های غیر زیستی دی‌اکسید سریم و دی‌اکسید روی در بافت‌های مختلف گیاه علف اسب بر افزایش انواع آنتی‌اکسیدان‌ها و پروتئین کل انجام شد.

مواد و روش‌ها

طرح آزمایش و تهیه نمونه‌های گیاهی

بذرهای گیاه دارویی *C. canadensis* در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی با شرایط دمایی ۲۵ درجه سلسیوس و دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی، کشت شدند. به‌منظور بررسی اثرات محرک‌های غیر زیستی دی‌اکسید سریم و دی‌اکسید روی بر افزایش انواع آنتی‌اکسیدان‌ها و پروتئین کل، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار طراحی و اجرا شد. اعمال تیماردهی با محلول‌های دی‌اکسید سریم و دی‌اکسید روی با غلظت ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌صورت ترکیب با آبیاری اعمال و برای گیاهان شاهد، از آب مقطر استفاده شد. پس از سه دوره متوالی اعمال تیمارها، نمونه‌های گیاهی برای سه بافت ریشه و ساقه و برگ، برای سنجش صفات مورد نظر در ازت مایع تثبیت

سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)

فعالیت آنزیم کاتالاز به روش آبی (Aebi, 1984) اندازه‌گیری شد. سه میلی‌لیتر مخلوط واکنش حاوی بافر فسفات پتاسیم ($\text{pH}=7.4$) ۵۰ میلی‌مولار، پراکسید هیدروژن ۰/۱ درصد، عصاره آنزیمی ۵۰ میکرولیتر بود. از مخلوط واکنش بدون عصاره آنزیمی به عنوان شاهد استفاده شد.

سنجش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX)

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز به روش ناکاتو و آسادا (Nakato and Asada, 1981) اندازه‌گیری شد. مخلوط واکنش، حاوی بافر فسفات پتاسیم ($\text{pH}=7.8$) (۵۰ میلی‌مولار)، آسکوربیت (یک میلی‌مولار)، پراکسید هیدروژن (۰/۱ درصد) و عصاره آنزیمی (۲۰ میکرولیتر) بود. از مخلوط واکنش بدون عصاره آنزیمی به عنوان شاهد استفاده شد.

سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز (POX)

فعالیت آنزیم پراکسیداز به روش گولن و اریس (Gulen and Eris, 2004) اندازه‌گیری شد. مخلوط واکنش شامل بافر فسفات پتاسیم ($\text{pH}=6.6$) (۱۰ میلی‌مولار)، گلیکول (۱ درصد)، پراکسید هیدروژن (۰/۳ درصد) و عصاره آنزیمی (۱۰۰ میلی‌مولار) بود. از مخلوط واکنش بدون عصاره آنزیمی به عنوان شاهد استفاده شد.

سنجش فعالیت آنزیم گابکول پراکسیداز (GPX)

فعالیت ویژه آنزیم گابکول پراکسیداز به روش پادیا (Upadhyaya *et al.*, 1985) اندازه‌گیری شد. میزان مخلوط واکنش سه میلی‌لیتر شامل بافر فسفات پتاسیم ($\text{pH}=6.1$) (۱۰۰ میلی‌مولار)، گابکول، پراکسید هیدروژن (۰/۱ درصد) و عصاره آنزیمی (۲۰ میلی‌مولار) بود.

سنجش فعالیت آنزیم گلوتاتیون ردوکتاز (GR)

فعالیت آنزیم گلوتاتیون ردوکتاز به روش مهلن (Mahlan *et al.*, 1990) و بر اساس احیای گلوتاتیون اکسید شده (GSSG) توسط آنزیم گلوتاتیون ردوکتاز با مصرف NADPH بود. مخلوط واکنش شامل ۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم ($\text{pH}=7$) (۵۰ میلی‌مولار)، ۵۰ میکرولیتر گلوتاتیون اکسید شده (GSSG)، ۵۰ میکرولیتر NADPH، ۴۰۰ میکرولیتر H_2O و ۱۲/۵ میکرولیتر عصاره استخراج شده بود. پس از اضافه کردن آنزیم مخلوط، واکنش کاملاً به هم زده شد؛ سپس کاهش جذب در طول موج

۳۴۰ نانومتر به مدت ۶۰ ثانیه توسط دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. میزان NADPH مصرف شده با استفاده از ضریب خاموشی ($\epsilon=6.22 \text{ Mm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) محاسبه شد.

تجزیه آماری

تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد. برای ترسیم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل شده از جدول تجزیه واریانس نشان از معنی‌دار بودن اثر تیمارهای دی‌سیریم اکسید و دی‌اکسید روی در سطح احتمال یک درصد بر میزان پروتئین کل بافت ریشه و ساقه و برگ داشت (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر تیمارها نشان داد که بیشترین میزان پروتئین کل در اثر تیمار دی‌سیریم اکسید، در بافت برگ و کمترین میزان در اثر تیمار دی‌اکسید روی، در بافت ریشه حاصل شد (شکل ۱). نتایج مقایسه میانگین میزان پروتئین کل، تحت تأثیر محرک‌های مورد مطالعه نشان داد که دی‌سیریم اکسید و دی‌اکسید روی سبب افزایش معنی‌دار میزان پروتئین کل در بافت برگ نسبت به تیمار شاهد شدند؛ اما تأثیر معنی‌داری در افزایش پروتئین کل در بافت‌های ریشه و ساقه نسبت به شاهد نشان ندادند (شکل ۱). در توافق با این یافته، گزارش‌های پیشین برای تیمار دی‌اکسید روی بر گیاه ریحان نشان داد میزان پروتئین کل بخش هوایی این گیاه نسبت به تیمار شاهد افزایش یافته است. این احتمال وجود دارد که یون دی‌اکسید روی به میزان زیادی گونه‌های اکسیژن فعال تولید کند و باعث تحریک سنتز دسته خاصی از پروتئین‌ها شود که برای مقابله با تنش، سنتز می‌شوند (Turgut *et al.*, 2004)؛ همچنین مطالعات انجام شده بر گیاه لوبیا نشان داده است که مقدار پروتئین کل و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز و پراکسیداز در گیاهان تیمار شده با غلظت‌های مختلف نانوذرات اکسید روی و دی‌اکسید سریم افزایش یافته است. محتوای پروتئین محلول، شاخص مهم برای رشد گیاه است و مشخص شده است که عنصر روی بر میزان پروتئین در گیاهان تأثیر می‌گذارد. گزارش‌هایی از اثرات مثبت نانوذرات اکسید روی در کاهش سطح پراکسید هیدروژن در گوجه‌فرنگی وجود دارد که ممکن است به خاطر افزایش در جذب مغذی‌های کلیدی مانند نیتروژن باشد که نقش مهمی را در سنتز پروتئین، مسیرهای متابولسمی و هوموستازی یون‌ها دارد (Włodarczyk *et al.*, 2016).

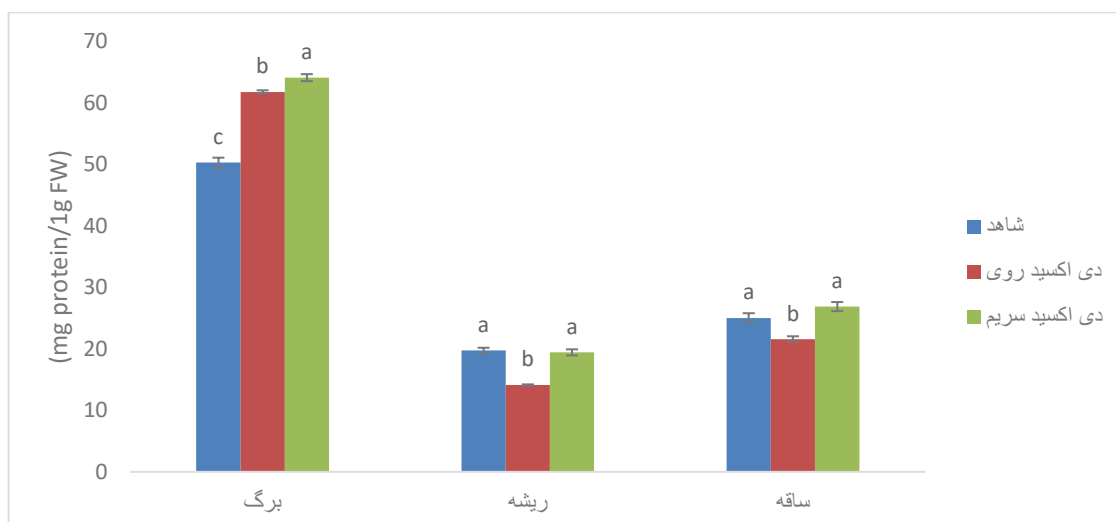
جدول ۱- نتایج تجزیه و راناس صفات فیزیکی شیمیایی علف اسب؛ تحت تاثیر محرک های دی اکسید سریم و دی اکسید روی

[illegible]

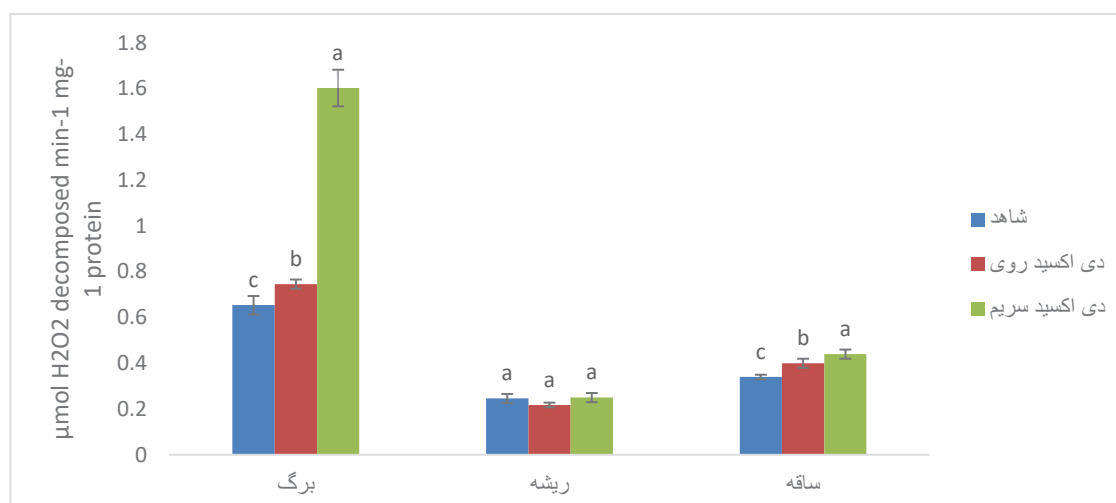
و ρ : به ترتیب، غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال یک درصد است.

نتایج حاصل شده از جدول تجزیه واریانس نشان از معنی دار بودن اثر تیمارهای دی سریم اکسید و دی اکسید روی در سطح احتمال یک درصد بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در بافت ساقه و برگ (به جز ریشه) داشت (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر تیمارها نشان داد که بیشترین میزان آنزیم کاتالاز در اثر تیمار دی سریم اکسید در بافت برگ و کمترین میزان در اثر تیمار دی اکسید روی در بافت ریشه حاصل شد؛ یعنی با اعمال تیمارهای انجام شده، بر میزان آنزیم کاتالاز افزوده شد (شکل ۲). نتایج مقایسه میانگین فعالیت آنزیم کاتالاز تحت تأثیر محرک‌های مورد مطالعه نشان داد که دی سریم اکسید و دی اکسید روی سبب افزایش معنی داری بر میزان آنزیم کاتالاز در بافت‌های ساقه و برگ شدند (شکل ۲). در این رابطه، گزارش شده است که با افزایش شدت تنش دی اکسید روی، آنزیم‌های آنتی اکسیدانی، از جمله کاتالاز، افزایش می‌یابد (Hosseini and Poorakbar, 2013). کاتالاز آنزیم مهمی است که در سیستم دفاعی برای تبدیل H_2O_2 به H_2O و O_2 به کار می‌رود. بدین شکل، از تولید ROSها جلوگیری می‌کند و بنابراین، با بالا رفتن سطح فعالیت این آنزیم، گیاه کمتر مورد تهاجم ROSها قرار می‌گیرد. افزایش میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در غلظت‌های بالای عنصر روی در گیاه ذرت نیز به اثبات رسیده است (Lee et al., 2012). در آزمایشی بر گیاه دارویی *Fogopyrum esculentom* (تحت تیمارهای مختلف نانو اکسید روی) مشاهده شد که میزان فعالیت آنزیم کاتالاز تا غلظت‌های بالای ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، نانو اکسید روی افزایش می‌یابد (Pandey et al., 2012)؛ همچنین نتایج حاصل شده از سنجش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در گیاه ریحان تحت تأثیر غلظت‌های مختلف دی اکسید روی افزایش نشان داد. این افزایش می‌تواند به دلیل نقش عملکردی این فلز در فعال‌سازی پروتئین سنتتازهای مسیر بیوسنتز کلروفیل و نیز برخی از آنزیم‌های آنتی اکسیدانت، مانند گلوکاتایون ردوکتاز^۲، در مسیر حفاظت از تخریب کلروفیل توسط رادیکال‌های فعال اکسیژن باشد (Murtic et al., 2014). نانوذرات اکسید روی سنتز شده به روش سبز توسط گیاه *Amaranthus cruentus* دارای فعالیت آنتی اکسیدانی، آنتی باکتریایی و ضد سرطانی است. دانشمندان نشان داده‌اند که نانوذرات اکسید روی با آزاد کردن zn^{+2} ، سبب افزایش گونه‌های فعال اکسیژن و در نتیجه، مرگ سلول‌ها می‌شوند (Badkoobeh et al., 2013). آنتی اکسیدان‌ها

² Glutathione reductase



شکل ۱- تأثیر دی اکسید سریم و دی اکسید روی بر میزان پروتئین کل بافت‌های مختلف گیاه علف اسب (در هر بافت، ستون‌هایی که دارای حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند).



شکل ۲- تأثیر دی اکسید سریم و دی اکسید روی بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در بافت‌های مختلف گیاه علف اسب (در هر بافت، ستون‌هایی که دارای حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند).

به کمک آزمون DPPH نشان داد که درصد مهار رادیکالی با افزایش غلظت نانوذرات افزایش یافته است؛ به‌طوری که در ۱/۵ میلی‌مولار، ۸۰ درصد از رادیکال‌های DPPH مهار شدند (Kumar *et al.*, 2014). یافته‌های مطالعه اخیر نشان داد که با افزایش غلظت نانوذرات اکسید روی، فعالیت آنتی‌اکسیدانی کاتالاز روند افزایشی داشته است.

در این تحقیق تغییرات فعالیت آنزیم کاتالاز در بافت برگ و ریشه در تیمار نانوذرات دی اکسید سریم در مقایسه با نانوذرات

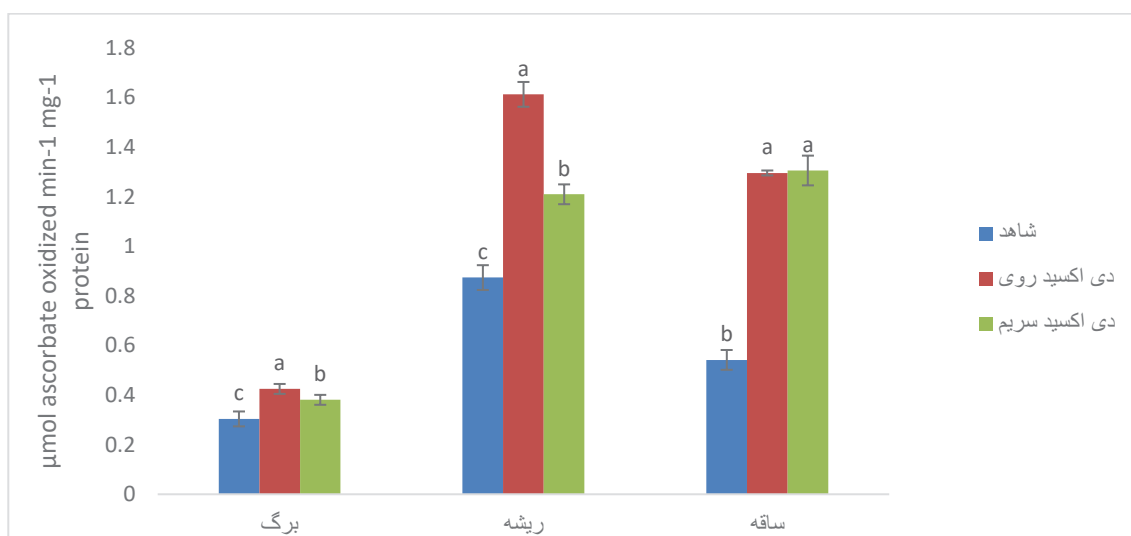
مانع از تشکیل رادیکال‌های آزاد در سلول‌ها می‌شوند و حضور نداشتن آنتی‌اکسیدان به میزان کافی باعث بر هم خوردن تعادل بین رادیکال‌های آزاد و گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن با آنتی‌اکسیدان می‌شود (Kizhakekuttu and Widlansky, 2010). در تحقیقی مشابه، فعالیت آنتی‌اکسیدانی نانوذرات اکسید روی استخراج‌شده از میوه گریپ‌فروت^۳ در اندازه ۱۲-۷۲ نانومتر،

^۳ *Cirus paradise*

انجام‌شده، بر میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز افزوده شد (شکل ۳). نتایج مقایسه میانگین فعالیت آسکوربات پراکسیداز تحت تأثیر محرک‌های مورد مطالعه نشان داد که دی سریم اکسید و دی اکسید روی به‌طور کلی سبب افزایش معنی‌داری بر میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز در بافت‌های ساقه، برگ و ریشه شد (شکل ۳). در تطابق با نتایج این تحقیق، در پژوهشی، تیمار نانوذرات اکسید روی منجر به افزایش فعالیت آنزیم APX و GPX در غلظت‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ پی‌پی‌ام نانوذرات شده است (Nair and Chung, 2015). این نتایج حاکی از این است که افزایش تیمار نانو اکسید روی موجب القای تنش اکسیداتیو و در نتیجه، تولید بیشتر گونه‌های فعال اکسیژن در گیاه پریوش شده است؛ همچنین در مطالعه تأثیر نانو ذره دی اکسید روی بر گیاه آراییدوپسیس، محققان دریافتند که نانوذرات اکسید روی بین نانوذرات دیگر، بیشترین سمیت را نشان داد. افزایش غلظت نانوذرات اکسید روی بر فعالیت آنزیم کاتالاز اثر معنی‌داری نداشت، در حالی که فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز به‌طور معنی‌داری افزایش یافت؛ همچنین فعالیت آنزیم گلوکاتایون پراکسیداز نسبت به شاهد افزایش یافت (Lee *et al.*, 2012). ریکو و همکاران (Rico *et al.*, 2013) اظهار داشتند نانوذره سریم بر سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه برنج مؤثر بوده و موجب افزایش هم‌زمان فعالیت سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز و کاهش گونه‌های فعال اکسیژن شده است. افزایش هماهنگ فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات

اکسید روی مشهودتر و افزایشی‌تر بود. در توافق با این نتایج، در تحقیق انجام‌شده بر گیاه لوبیا، میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در غلظت‌های ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر نانوذرات دی اکسید روی تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت؛ اما فعالیت آنزیم کاتالاز در غلظت ۲۰۰۰ میلی گرم بر لیتر، دی اکسید روی در مقایسه با گروه شاهد، ۲۹ درصد افزایش یافت. در حالی که میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در برگ‌های گیاه لوبیا، در تیمار با بالاترین غلظت نانوذرات دی اکسید سریم و در مقایسه با تیمار شاهد، ۵۸ درصد افزایش یافت. با وجود برخی گزارش‌ها در مورد سمیت نانوذرات در گیاهان، مطالعات بسیار اندکی در مورد اثرات بهبوددهنده احتمالی نانوذرات بر رشد و پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهان انجام شده است (Li *et al.*, 2015). برخی گزارش‌ها نشان داده‌اند که نانوذرات فلزی باعث القای تنش اکسیداتیو و تغییر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌شوند (Dimkpa *et al.*, 2012) که با نتایج به‌دست آمده ما در تحقیق روی گیاه علف اسب مطابقت دارد.

نتایج حاصل‌شده از جدول تجزیه واریانس نشان از معنی‌دار بودن اثر تیمارهای دی سریم اکسید و دی اکسید روی در سطح احتمال یک درصد بر میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز بافت برگ، ساقه و ریشه داشت (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر تیمارها نشان داد که بیشترین میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز در اثر تیمار دی اکسید روی، در بافت ریشه و کمترین میزان در نمونه شاهد، در بافت برگ حاصل می‌شود؛ یعنی با اعمال تیمارهای

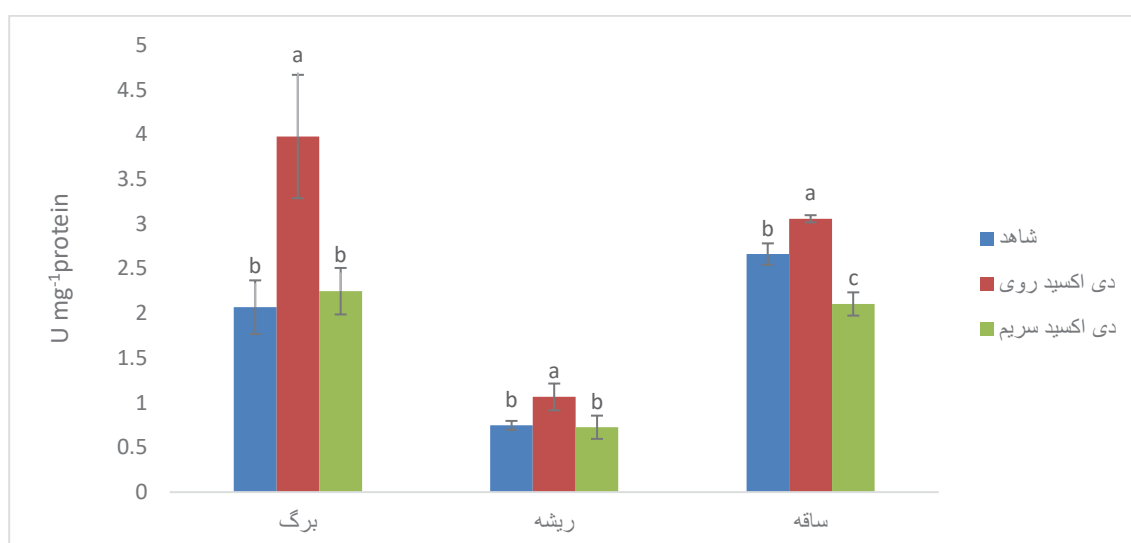


شکل ۳- تأثیر دی اکسید سریم و دی اکسید روی بر میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در بافت‌های مختلف گیاه علف اسب (در هر بافت، ستون‌هایی که دارای حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند).

شد که میزان فعالیت SOD با افزایش غلظت نانو اکسید روی افزایش یافته است و این افزایش در غلظت ۱۵ میکرومولار نانو اکسید روی نسبت به شاهد در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. فراوان‌ترین ایزوزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاهان عالی، نوع واجد روی و مس (Cu/Zn SOD) است که در آن روی، نقش ساختاری و مس، نقش کاتالیتیکی دارد. روی به همراه مس بخش اصلی آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را به‌عنوان جاروکننده رادیکال‌های آزاد تشکیل می‌دهد. با افزودن روی، تولید اکسیژن رادیواکتیو و مراحل فتواکسیداسیون کاهش پیدا می‌کند؛ زیرا فعالیت سوپراکسید دیسموتاز در حضور روی افزایش می‌یابد (Lo'pez-Milla'n et al., 2005). مشاهده شده است تحت شرایط تنش روی، میزان فعالیت SOD در گیاه توت^۴ افزایش می‌یابد (Tewari et al., 2008)؛ همچنین گزارش‌های انجام‌شده بر گیاه ریحان، نشان داد آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز در حضور روی به‌طور معنی‌داری در مقایسه با گیاه شاهد افزایش یافته است. آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در تبدیل رادیکال سوپراکسید به پراکسید هیدروژن نقش اساسی دارد و کاتالاز یکی از آنزیم‌های اصلی در تجزیه پراکسید هیدروژن است (Del-Rio et al., 1983). افزایش فعالیت این آنزیم‌ها بیانگر تولید ROSها ناشی از جذب این فلزات است (Fabre et al., 2000). افزایش تجمع H_2O_2 حالت احیایی سلول را

پراکسیداز نقش مهمی در بهبود کارایی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه دارد (Liu et al., 2007). ژائو و همکاران (Zhao et al., 2005) گزارش داده‌اند که نانو سریم موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز در گیاه ذرت شده است. مطالعات اخیر نشان می‌دهد خاصیت آنتی‌اکسیدانی نانو ذره سریم به وجود اکسیژن آزاد در سطح آن مربوط می‌شود. این ویژگی موجب حذف گونه‌های فعال اکسیژن شده و سبب افزایش مقاومت سلولی در برابر تنش اکسیداتیو می‌شود (Kumar Keshari et al., 2020) که با نتایج ما در گیاه علف اسب مطابقت دارد.

نتایج حاصل‌شده از جدول تجزیه واریانس نشان از معنی‌دار بودن اثر تیمارهای دی سریم اکسید و دی اکسید روی در سطح احتمال یک درصد بر میزان آنزیم سوپراکسید دیسموتاز بافت برگ، ساقه و ریشه داشت (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر تیمارها نشان داد که بیشترین میزان آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در اثر تیمار دی اکسید روی در بافت برگ و کمترین میزان در نمونه شاهد در بافت ریشه حاصل شد؛ یعنی با اعمال تیمارهای انجام‌شده، بر میزان آنزیم سوپراکسید دیسموتاز افزوده شد (شکل ۴). نتایج مقایسه میانگین فعالیت سوپراکسید دیسموتاز تحت تأثیر محرک‌های مورد مطالعه نشان داد که دی سریم اکسید و دی اکسید روی سبب افزایش معنی‌داری بر میزان آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در بافت‌های ساقه، برگ و ریشه شد (شکل ۴). در مطالعه انجام‌شده بر گیاه پرپوش مشاهده



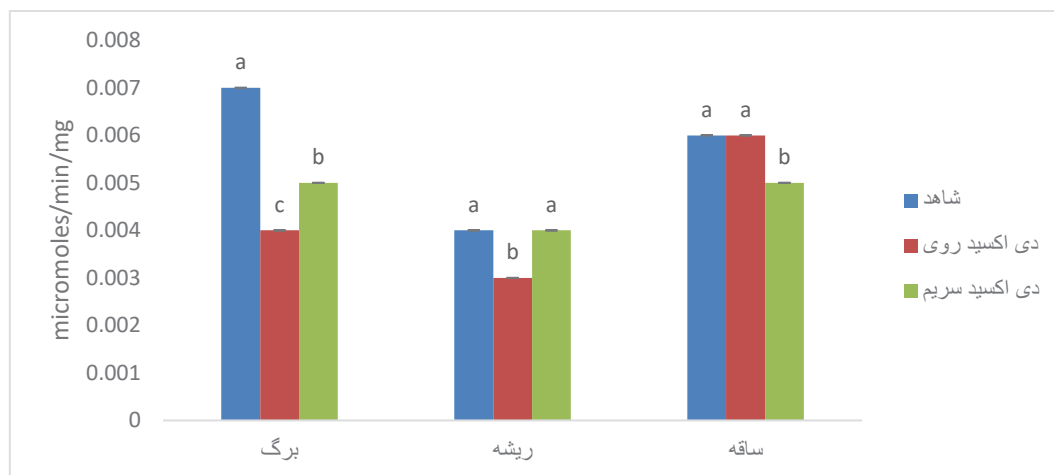
شکل ۴- تأثیر دی اکسید سریم و دی اکسید روی بر میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در بافت‌های مختلف گیاه علف اسب (در هر بافت، ستون‌هایی که دارای حرف مشترک هستند، براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند).

پراکسیداز تحت تأثیر محرک‌های مورد مطالعه نشان داد که دی سریم اکسید و دی اکسید روی سبب کاهش معنی‌دار میزان آنزیم پراکسیداز در هر سه بافت ریشه، ساقه و برگ شد (شکل ۵). با توجه به اینکه فعال شدن آنزیم‌های آنتی اکسیدانی نظیر کاتالاز و پراکسیداز یکی از ساز و کارهای دفاعی گیاهان در مواجهه با تنش اکسیداتیو است؛ بنابراین، بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان بیان کرد که به کارگیری دی سریم اکسید و دی اکسید روی مورد استفاده در این پژوهش به گونه‌ای نبوده است که افزایش فعالیت پراکسیداز را به دنبال داشته باشد. در تعدادی از تحقیقات نیز نتیجه مشابهی مشاهده شده است (Zhang et al., 2006). از طرفی، فعال شدن این آنزیم‌ها در مواجهه با تنش‌های فلزات سنگین همیشه حالت افزایشی نداشته است، بلکه بسته به نوع گونه گیاهی، این آنزیم‌ها عکس‌العمل‌های متفاوتی را نشان می‌دهند که نتیجه‌اش در سایر تحقیقات نیز مشاهده شده است (Wong et al., 2006). تحقیقات نشان داده‌اند که تغذیه بهینه عناصر کم‌مصرف نقش مهمی در تشکیل ترکیبات شیمیایی فعال موجود در گیاهان دارد؛ برای مثال، عناصر روی جزو عناصر کم‌مصرف ضروری برای رشد گیاهان هستند که در غلظت‌های پایین، رشد گیاه را افزایش داده‌اند؛ اما در غلظت‌های بالا برای گیاه سمی هستند (Sheng, 2007).

نتایج حاصل‌شده از جدول تجزیه واریانس، معنی‌دار بودن اثر تیمارهای دی سریم اکسید و دی اکسید روی در سطح احتمال یک درصد بر میزان آنزیم پراکسیداز بافت برگ، ساقه و ریشه را نشان داد (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر تیمارها

تغییر می‌دهد و تولید آنتی اکسیدانت‌ها را القا و فعالیت مکانیسم آنتی اکسیدانتی را تنظیم می‌کند (Maksymiec and Krupa, 2006)؛ بنابراین، به نظر می‌رسد رشد گیاهان در حضور این فلزات منجر به رهاسازی ROSهایی از قبیل سوپراکسید و H_2O_2 می‌شود؛ علاوه بر این، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز جهت خنثی کردن رادیکال‌های سوپراکسید منجر به تولید بیشتر H_2O_2 می‌شود که این مولکول می‌تواند به عنوان سیگنالی برای تحریک سیستم آنتی اکسیدانت آنزیمی و غیر آنزیمی از طریق افزایش بیان ژن‌های مربوط شود و این مسئله می‌تواند دلیلی بر افزایش محتوی فلاونوئید کل و همچنین فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانت باشد؛ به علاوه، دی اکسید روی بخش اصلی آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را به عنوان جاروکننده‌های رادیکال‌های آزاد تشکیل می‌دهند. سوپر اکسید دیسموتاز اولین آنزیم در فرایند سمیت‌زدایی ROS به شمار می‌رود. این آنزیم نقش حیاتی در دفاع آنتی اکسیدانی ایفا می‌کند؛ زیرا تبدیل O_2^- را به H_2O_2 کاتالیز می‌کند، در حالی که کاتالاز و پراکسیداز، H_2O_2 را تخریب می‌کنند (Stroinski and Kozłowska, 1997).

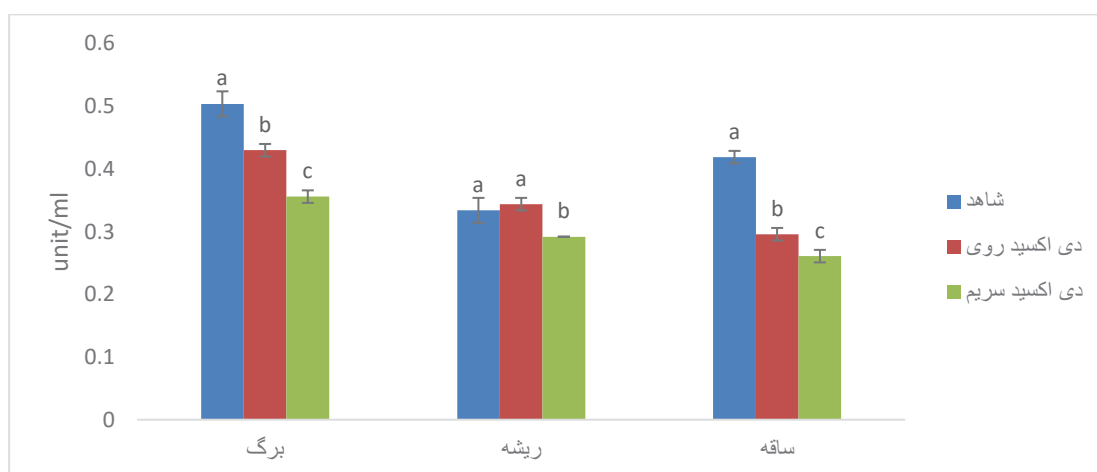
نتایج حاصل‌شده از جدول تجزیه واریانس، معنی‌دار بودن اثر تیمارهای دی سریم اکسید و دی اکسید روی در سطح احتمال یک درصد بر میزان آنزیم پراکسیداز بافت برگ، ساقه و ریشه را نشان داد (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر تیمارها نشان داد که بیشترین میزان آنزیم پراکسیداز در نمونه شاهد در بافت برگ و کمترین میزان، در اثر تیمار روی اکسید در بافت ریشه حاصل شد. نتایج مقایسه میانگین فعالیت آنزیم



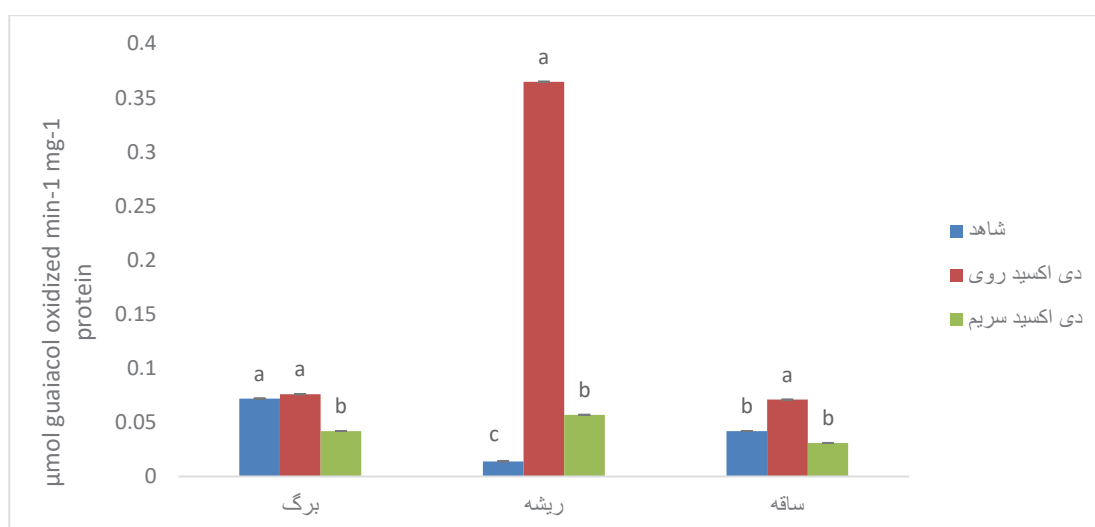
شکل ۵- تأثیر دی اکسید سریم و دی اکسید روی بر میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در بافت‌های مختلف گیاه علف اسب (در هر بافت، ستون‌هایی که دارای حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند).

اکسید نسبت به دی‌اکسید روی شدیدتر بود (شکل ۶). نتایج حاصل‌شده از جدول تجزیه واریانس نشان از معنی‌دار بودن اثر تیمارهای دی‌سیریم اکسید و دی‌اکسید روی در سطح احتمال یک درصد بر میزان آنزیم گلوکاتایون پراکسیداز در هر سه بافت برگ و ساقه و ریشه دارد (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر تیمارها نشان داد که بیشترین میزان آنزیم گلوکاتایون پراکسیداز در اثر تیمار دی‌اکسید روی و کمترین میزان در نمونه شاهد در بافت ریشه حاصل شد؛ یعنی با اعمال تیمارهای انجام‌شده، بر میزان آنزیم گلوکاتایون پراکسیداز افزوده شده است (شکل ۷).

نشان داد که بیشترین میزان آنزیم گلوکاتایون ردوکتاز در نمونه شاهد در بافت برگ و کمترین میزان در اثر تیمار دی‌سیریم اکسید در بافت ساقه حاصل شد؛ یعنی با اعمال تیمارهای انجام‌شده، از میزان آنزیم گلوکاتایون ردوکتاز کاسته شد (شکل ۶). نتایج مقایسه میانگین میزان گلوکاتایون ردوکتاز تحت تأثیر محرک‌های مورد مطالعه نشان داد که هر دو تیمار دی‌سیریم اکسید و دی‌اکسید روی نسبت به تیمار شاهد سبب کاهش معنی‌دار میزان آنزیم گلوکاتایون ردوکتاز در بافت‌های ریشه، ساقه و برگ شد؛ به‌طوری که کاهش گلوکاتایون ردوکتاز در اثر تیمار دی‌سیریم



شکل ۶- تأثیر دی‌اکسید سریم و دی‌اکسید روی بر میزان فعالیت آنزیم گلوکاتایون ردوکتاز در بافت‌های مختلف گیاه علف اسب (در هر بافت، ستون‌هایی که دارای حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند).



شکل ۷- تأثیر دی‌اکسید سریم و دی‌اکسید روی بر میزان فعالیت آنزیم گلوکاتایون پراکسیداز در بافت‌های مختلف گیاه علف اسب (در هر بافت، ستون‌هایی که دارای حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند).

نتیجه‌گیری

دی سریم اکسید و دی‌اکسید روی سبب افزایش میزان پروتئین کل در بافت برگ نسبت به تیمار شاهد شدند؛ اما تأثیر معنی‌داری در افزایش پروتئین کل در بافت‌های ریشه و ساقه نسبت به شاهد نشان ندادند. دی سریم اکسید و دی‌اکسید روی سبب افزایش میزان آنزیم کاتالاز در بافت‌های ساقه و برگ شدند و بیشترین میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز در اثر تیمار دی‌اکسید روی در بافت ریشه مشاهده شد. هر دو الیستور سبب افزایش میزان آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و سبب کاهش معنی‌دار میزان آنزیم پراکسیداز در هر سه بافت ریشه، ساقه و برگ شدند. هر دو الیستور نسبت به تیمار شاهد سبب کاهش آنزیم گلوکاتایون ردوکتاز در بافت‌های ریشه، ساقه و برگ شدند؛ به‌طوری که کاهش گلوکاتایون ردوکتاز در تیمار دی سریم اکسید نسبت به دی‌اکسید روی شدیدتر بود. بیشترین میزان آنزیم گلوکاتایون پراکسیداز در اثر تیمار دی‌اکسید روی و کمترین میزان در تیمار شاهد در بافت ریشه حاصل شد.

نتایج مقایسه میانگین فعالیت گلوکاتایون پراکسیداز تحت تأثیر محرک‌های مورد مطالعه نشان داد که دی سریم اکسید و دی‌اکسید روی به‌طور کلی سبب افزایش معنی‌داری بر میزان آنزیم گلوکاتایون پراکسیداز در بافت‌های ساقه و ریشه شد (شکل ۷). در مطالعه پیشین انجام‌شده روی گیاه ذرت^۵ نیز میزان فعالیت گایاکول پراکسیداز (GPX) با افزایش شدت تنش عنصر دی‌اکسید روی افزایش یافته است و این افزایش نسبت به شاهد در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده است (Hosseini and Poorakbar, 2013)؛ همچنین گزارش شده است در شرایط کمبود دی‌اکسید روی در گونه‌های گندم، لوبیا و برنج، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاهش یافته (Pandey et al., 2012) و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان تیمار شده با نانو اکسید روی نسبت به گیاه کنترل با افزایش غلظت نانو اکسید روی افزایش یافته است.

⁵ *Zea mays*

References

- Aebi H. 1984. Catalase *in Vitro*. Methods Enzymology 105: 121-126. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3).
- Badkoobeh P, Parivar K, Kalantar SM. 2013. Effect of nano-zinc oxide on doxorubicin-induced oxidative stress and sperm disorders in adult male *Wistar* rats. Iranian Journal of Reproductive Medicine 11 (5): 355-364.
- Barrios AC, Rico CM, Trujillo-Reyes J, Medina-Velo IA, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL. 2015. Effects of uncoated and citric acid coated cerium oxide nanoparticles, bulk cerium oxide, cerium acetate, and citric acid on tomato plants. Science of the Total Environment 563-564: 956-964. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.143>.
- Celardo I, Pedersen JZ, Traversa E, Ghibelli L. 2011. Pharmacological potential of cerium oxide nanoparticles. Nanoscale 3 (4): 1411-1420. DOI: <https://doi.org/10.1039/CONR00796A>.
- Del-Rio LA, Lyon DS, Olah I, Glick B. 1983. Immunocytochemical evidence for a peroxisomal localization of manganese superoxide dismutase in leaf protoplasts from a higher plant. Planta 158: 216-224.
- Dimkpa CO, McLean JE, Latta DE, Manangon E, Britt DW, Johnson WP, Boyanov MI, Anderson AJ. 2012. CuO and ZnO nanoparticles: Phytotoxicity, metal speciation, and induction of oxidative stress in sand-grown wheat. Journal of Nanoparticle Research 14: 1125. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11051-012-1125-9>.
- Ebel J, Scheel D. 1997. Signals in host-parasite interactions. In: Carroll GC, Tudzynski P. (Eds.), The Mycota Vol. 5: Plant Relationships Part A (pp. 85-105), Springer-Verlag.
- Fabre N, Urizzi P, Soucard JP, Ferchard A. 2000. An antioxidant sinapic acid ester isolated from *Iberis amara*. Fitoterapia 71 (4): 425-428. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0367-326X\(00\)00159-7](https://doi.org/10.1016/S0367-326X(00)00159-7).
- Graham HN. 1992. Green tea composition, consumption, and polyphenol chemistry. Preventive Medicine 21: 334-350. DOI: [https://doi.org/10.1016/0091-7435\(92\)90041-F](https://doi.org/10.1016/0091-7435(92)90041-F).
- Gruenwald J, Brendler T, Jaenicke C. 2007. PDR for herbal medicines. Thomson Reuters.
- Gulen H, Eris A. 2004. Effect of heat stress on peroxidase activity and total protein content in strawberry plants. Plant Science 166 (3): 739-744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.11.014>.
- Guo Q, Zhao B, Shen S, Hou J, Hu J, Xin W. 1999. ESR study on the structure-antioxidant activity relationship of tea catechins and their epimers. Biochimica et Biophysica Acta 1427: 13-23.
- Hossain A, Hossain A, Mannan SJ. 2019. Evaluation of antioxidant and analgesic activities of three medicinal plants. Pharmacognosy Research 11 (3): 248-253.
- Hosseini Z, Poorakbar L. 2013. Zinc toxicity on antioxidative response in *Zea mays* L. at two different pH. Journal of Stress Physiology and Biochemistry 9 (1): 66-73.
- Keshari A, Srivastava R, Yadav S, Nath G, Gond S. 2020. Synergistic activity of green silver nanoparticles with antibiotics. Nanomedicine Research Journal 5 (1): 44-54. DOI:

<https://doi.org/10.22034/nmrj.2020.01.006>.

Kizhakekuttu TJ, Widlansky ME. 2010. Natural antioxidants and hypertension: promise and challenges. *Cardiovascular Therapeutics* 28: e20-e32. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1755-5922.2010.00137.x>.

Kumar B, Smita K, Cumbal L, Debut A. 2014. Green approach for fabrication and applications of zinc oxide nanoparticles. *Bioinorganic Chemistry* 11: 83-86.

Lee S, Kim S, Kim S, Lee I. 2012. Assessment of phytotoxicity of ZnO NPs on a medicinal plant, *Fagopyrum esculentum*. *Environmental Science and Pollution Research* 19: 8-12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0663-6>.

Li J, Naeem MS, Wang X, Liu L, Chen C, Ma N, Zhang C. 2015. NanoTiO₂ is not phytotoxic as revealed by the oilseed rape growth and photosynthetic apparatus ultrastructural response. *PLoS ONE* 10 (12): e0144010. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144010>.

LópezMillán AF, Ellis DR, Grusak A. 2005. Effect of zinc and manganese supply on the activities of superoxide dismutase and carbonic anhydrase in *Medicago truncatula* wild type and raz mutant plants. *Plant Science* 168: 1015-1022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.12.015>.

Maksymiec W, Krupa Z. 2000. The effects of shortterm exposition to Cd, excess Cu ions and jasmonate on oxidative stress appearing in *Arabidopsis thaliana*. *Environmental and Experimental Botany* 57 (1): 187-194. DOI: [https://doi.org/10.1016/S00988472\(06\)800074](https://doi.org/10.1016/S00988472(06)800074).

Malan C, Greyling MM, Gressel J. 1990. Correlation between CuZn superoxide dismutase and glutathione reductase, and environmental and xenobiotic stress tolerance in maize inbreds. *Plant Science* 69 (2): 157-166. DOI: [https://doi.org/10.1016/01689452\(90\)901144](https://doi.org/10.1016/01689452(90)901144).

Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants, 2nd edition. Academic Press, Great Britain.

Misra HP, Fridovich I. 1972. The role of superoxide anion in the autoxidation of epinephrine and a simple assay for superoxide dismutase. *Journal of Biological Chemistry* 247 (10): 3170-3175. DOI: [https://doi.org/10.1016/S00219258\(19\)452289](https://doi.org/10.1016/S00219258(19)452289).

Murtić S, Čivić H, Huseinbegović N, Kolečka I, Muminović Š, Asimović Z. 2014. Antioxidant capacity and total phenol content in the extract of leaves of some medicinal plants. *Works of the Faculty of Agricultural and Food Sciences, University of Sarajevo* 64 (2): 7-17.

Nair PMG, Chung IM. 2014. Physiological and molecular level effects of silver nanoparticles exposure in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Chemosphere* 112: 105-113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.050>.

Nakano Y, Asada K. 1986. Purification of ascorbate peroxidase in spinach chloroplasts; its inactivation in ascorbate-depleted medium and reactivation by monodehydroascorbate radical. *Plant and Cell Physiology* 28 (1): 131-140. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a077406>.

Namdeo AG. 2007. Plant cell elicitation for production of

secondary metabolites: a review. *Pharmacognosy Reviews* 1 (1): 69-79. DOI: <https://doi.org/10.4103/09737847.39696>.

Neumann KH, Kumar A, Imani J. 2009. Plant cell and tissue culture: a tool in biotechnology. Berlin: Springer.

Pandey N, Gupta B, Pathak C. 2012. Antioxidant responses of pea genotypes to zinc deficiency. *Journal of Plant Physiology* 169 (2): 195-205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2011.10.001>.

Pant P, Pandey S, Dall'Acqua S. 2021. The influence of environmental conditions on secondary metabolites in medicinal plants: A literature review. *Chemistry & Biodiversity* 18: e2100345. DOI: <https://doi.org/10.1002/cbdv.202100345>.

Park WS, Bae JY, Chun MS, Chung HJ, Han SY, Ahn MJ. 2013. Suppression of gastric ulcer in mice by administration of *Erigeron canadensis* extract. *Proceedings of the Nutrition Society* 72 (OCE4): E108. DOI: <https://doi.org/10.1017/S002966511300120X>.

Pathak B, Humbal A. 2023. Influence of exogenous elicitors on the production of secondary metabolites in plants: A review ("VSI: secondary metabolites"). *Plant Stress* 8: 100166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100166>.

Rico CM, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL. 2015. Chemistry, biochemistry of nanoparticles, and their role in antioxidant defense system in plants. *Nanotechnology in Plant Science* 2: 1-17. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-14502-0_1.

Rico CM, Morales MI, Barrios AC, McCreary R, Hong J, Lee WY, Nunez J, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL. 2013. Effect of cerium oxide nanoparticles on the quality of rice (*Oryza sativa* L.) grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61 (47): 11278-11285. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf4036336>.

Rui M, Ma C, Hao Y, Guo J, Rui Y, Tang X, Zhao Q, Fan X, Zhang Z, Hou T, Zhu S. 2016. Iron oxide nanoparticles as a potential iron fertilizer for peanut (*Arachis hypogaea*). *Frontiers in Plant Science* 7: 1-10. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00122>.

Shakirullah M, Ahmad H, Shah MR, Ahmad I, Ishaq M, Khan N, Badshah A, Khan I. 2011. Antimicrobial activities of Conyzolide and Conyzoflavone from *Conyza canadensis*. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry* 26 (4): 468-471. DOI: <https://doi.org/10.3109/14756366.2010.50013>.

Sharma P, Dubey RS. 2005. Drought induces oxidative stress and enhances the activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. *Plant Growth Regulation* 46 (3): 209-221. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-005-4369-6>.

Sharma RK, Verma N, Jha KK, Singh NK, Kumar B. 2014. Phytochemistry, pharmacological activity, traditional & medicinal uses of *Erigeron* species: A review. *International Journal* 2 (2): 379-383.

Stroński A, Kozłowska M. 1997. Cadmium-induced oxidative stress in potato tuber. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 66: 189-195.

Strzelecka H, Glinkowska G. 1981. Studies on the chemistry

of *Erigeron canadensis*. Part 1. *Herba Polonica* 27: 201-212.

Tewari RK, Kumar P, Sharma PN. 2008. Morphology and physiology of zinc-stressed mulberry plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171: 286-294. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200700047>.

Turgut C, Katie Pepe M, Cutright TJ. 2004. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr, and Ni from soil using *Helianthus annuus*. *Environmental Pollution* 131: 147-154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.01.011>.

Upadhyaya D, Sankhla TD, Davis N, Sankhla BN, Smith J. 1985. Effect of paclobutrazol on the activities of some enzymes of activated oxygen metabolism and lipid peroxidation in senescing soybean leaves. *Plant Physiology* 121: 453-461. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(85\)80081-X](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(85)80081-X).

Włodarczyk K, Smolińska B, Majak I. 2023. The antioxidant potential of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) under nano-ZnO treatment. *International Journal of Molecular*

Sciences 24 (14): 11833. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms241411833>.

Zhang Y, Mian MA, Bouton JH. 2006. Recent molecular and genomic studies on stress tolerance of forage and turf grasses. *Crop Science* 46 (2): 497-511. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.03-0086>.

Zhao J, Davis LC, Verpoorte R. 2005. Elicitor signal transduction leading to production of plant secondary metabolites. *Biotechnology Advances* 23 (4): 283-333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2005.02.001>.

Zhu LW, Zhong JJ, Tang YJ. 2008. Significance of fungal elicitors on the production of ganoderic acid and *Ganoderma* polysaccharides by the submerged culture of medicinal mushroom *Ganoderma lucidum*. *Process Biochemistry* 43 (12): 1359-1370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2008.09.002>.