

The effect of changes in antioxidant enzymes on yield of chickpea with application of zinc, silicon and zinc immobilized on SBA-15 under different moisture conditions

Maryam Mohammadzadeh^{1*}, Amin Abbasi², Mohsen Janmohammadi³,
Saleh Vahdati-Khajeh⁴

¹ PhD Student in Agrotechnology- Crop Physiology, Faculty of Agriculture, Maragheh University, Maragheh, Iran,
Email: mohammadzadeh.m73@gmail.com

² Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Maragheh University, Maragheh, Iran,
Email: a.abbasi25@yahoo.com

³ Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Maragheh University, Maragheh, Iran,
Email: jmohamad@ut.ac.ir

⁴ PhD in Organic Chemistry, Department of Chemistry, Faculty of Science, Maragheh University, Maragheh, Iran,
Email: saleh_vahdati_xoca@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2021/12/21
Revised: 2022/04/14
Accepted: 2022/04/20

Keywords:
Antioxidant enzymes
Catalase
Irrigation regime
Oxidative stress
Silicon

ABSTRACT

Background and objectives: Water stress as the most important environmental stress in arid and semi-arid regions of the world, reduces the quantitative and qualitative yield of crops through affecting on the physiology and biochemistry of plants. Chickpea as an important protein plant is also exposed to Water stress under dryland condition. Damages caused by environmental stresses can partially be reduced with proper nutritional management. The form of nano-fertilizers can be beneficial due to improving plant uptake and accessibility to the fertilizer. The present study was conducted to investigate the effect of mesoporous zinc and silicon (zinc nanoparticles immobilized on SBA-15) on the defense system of chickpea in Water stress.

Materials and methods: The research was carried out in Research Farm of Maragheh University with geographical coordinates 37°23' N; 46°16' E and 1485 meters above sea surface in northwest of Iran, during 2018-2019 growing season as Split-plot experiment conducted based on a randomized complete block design with three replications. The main factor included Water stress (W1: 90% of field capacity, W2: 60% of field capacity, W3: 30% of field capacity) and sub factors included fertilizer treatments F₁: control (no application of elements), F₂: zinc sulfate, F₃: silicon, F₄: zinc sulfate+silicon, F₅: mesoporous zinc- silicon. Parameters such as Plant height, grain yield, activity of Catalase, Ascorbate peroxidase, Guaiacol peroxidase enzymes, H₂O₂, Malondialdehyde, chlorophyll a, chlorophyll b and Carotenoid were evaluated.

Results: According to the results of this study, with increasing Water stress intensity, plant height and chlorophyll b significantly decreased and foliar application of mesoporous zinc-silicon height increased chlorophyll b about 50% compared to the control. Also the results showed that the catalase, ascorbate peroxidase, Guaiacol peroxidase, hydrogen peroxide, malondialdehyde, chlorophyll a, carotenoid, plant height and grain yield were affected by interaction effect of fertilizer × Water stress. With increasing stress intensity, the amount of hydrogen peroxide increased significantly compared to non-stress. On the other hand, in all of the traits,

the application of fertilizer treatments, especially mezopor zinc- silicon in Water stress (90%, 60% and 30% of field capacity) had the highest amount. Also mezopor zinc- silicon significantly increased antioxidant enzymes catalase, ascorbate peroxidase and guaiacol peroxidase, which reduced malondialdehyde by 50% compared to no foliar application in 30% of field capacity. Also, a significant increase in chlorophyll a and carotenoids was observed with the application of this treatment in all three levels of Water stress.

Conclusion: In general, the results of this study showed that foliar application of zinc and silicon, especially at high stress intensities is the best treatment composition due to its effect on reducing the amount of hydrogen peroxide and subsequently reducing the amount of malondialdehyde, as well as a positive effect on the plant defense system and reducing Water stress damage and finally increasing grain yield.

Cite this article: Mohammadzadeh, M., Abbasi, A., Janmohammadi, M., Vahdati-Khajeh, S. 2022. The effect of changes in antioxidant enzymes on yield of chickpea with application of zinc, silicon and zinc immobilized on SBA-15 under different moisture conditions. *Crop Production Journal*, 15(3), 159-178.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJCP.2022.19776.2478

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



تأثیر تغییرات آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان بر روی عملکرد نخود با کاربرد عنصر روی، سیلیکون و روی تثبیت شده بر روی SBA-15 تحت شرایط مختلف رطوبتی

مریم محمدزاده^{۱*}، امین عباسی^۲، محسن جان محمدی^۳، صالح وحدتی خواجه^۴

۱. دانشجوی دکتری آگرو تکنولوژی - فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران، رایانامه: mohammadzadeh.m73@gmail.com
۲. استادیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران، رایانامه: a.abbasi25@yahoo.com
۳. استاد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران، رایانامه: jmohamad@ut.ac.ir
۴. دکتری شیمی آلی، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران، رایانامه: saleh_vahdati_xoca@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۳۰ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۳۱</p> <p>واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تنش اکسیداتیو رژیم آبیاری سیلیکون کاتالاز</p>	<p>سابقه و هدف: تنش آبی به‌عنوان مهم‌ترین تنش محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، به‌دلیل اینکه از لحاظ فیزیولوژی و بیوشیمیایی گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، موجب کاهش عملکرد کمی و کیفی محصولات زراعی می‌شود. گیاه نخود نیز به‌عنوان یک گیاه پروتئینی مهم، در شرایط دیم اغلب در معرض تنش آبی قرار می‌گیرد که می‌توان با مدیریت تغذیه‌ای صحیح تا حدودی خسارت ناشی از تنش‌های محیطی بر آن را جبران کرد. فرم نانو کودها به‌دلیل افزایش جذب و دسترسی گیاه به کود می‌تواند سودمند باشد. بر این اساس، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر مزوحفره روی و سیلیکون (نانو روی تثبیت شده بر روی SBA-15) بر روی سیستم دفاعی نخود در تنش آبی انجام گرفت.</p> <p>مواد و روش‌ها: آزمایش حاضر در مزرعه پژوهشی دانشگاه مراغه به مختصات ۳۷ درجه و ۲۳ دقیقه عرض شمالی، ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی و ۱۴۸۵ متر ارتفاع از سطح آب‌های آزاد در سال زراعی ۹۷-۹۸ به‌صورت اسپلیت پلات بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. فاکتور اصلی شامل تنش آبی (W₁: ۹۰ درصد ظرفیت زراعی، W₂: ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و W₃: ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) و فاکتور فرعی نیز شامل F₁: شاهد (عدم مصرف عناصر)، F₂: سولفات روی، F₃: سیلیکون، F₄: سولفات روی + سیلیکون، F₅: مزوحفرات روی و سیلیکون می‌باشد. صفات ارتفاع بوته، عملکرد دانه، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز و تغییرات هیدروژن پراکسید، مالون دی‌آلدهید کلروفیل a و b و کاروتنوئید مورد بررسی قرار گرفت.</p> <p>یافته‌ها: طبق نتایج این پژوهش با افزایش شدت تنش آبی، ارتفاع بوته و کلروفیل b به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و محلول‌پاشی با تیمار مزوحفرات روی و سیلیکون ۵۰ درصد کلروفیل b را نسبت به شاهد افزایش داد. همچنین، نتایج نشان داد صفات کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز، هیدروژن پراکسید، مالون دی‌آلدهید، کلروفیل a، کاروتنوئید، ارتفاع بوته و عملکرد دانه تحت تأثیر برهم‌کنش تنش و محلول‌پاشی با عناصر قرار گرفت. با افزایش شدت تنش میزان تولید هیدروژن پراکسید نسبت به حالت عدم تنش به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. از طرفی، در تمامی صفات کاربرد تیمارهای کودی بخصوص مزوحفرات روی و سیلیکون در تنش آبی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) بیش‌ترین مقدار را داشت. همچنین، مزوحفره روی و سیلیکون با افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز، آسکوربات</p>

پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز در نهایت موجب کاهش ۵۰ درصدی مالون دی‌آلدئید نسبت به عدم محلول‌پاشی در سطح تنش ۳۰ درصد ظرفیت زراعی گردید. همچنین، افزایش معنی‌داری در کلروفیل a و کاروتنوئید با کاربرد این تیمار در هر سه سطح تنش آبی مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: به‌طوری کلی نتایج این پژوهش نشان داد که محلول‌پاشی با مزوحفره روی و سیلیکون بخصوص در شدت‌های بالای تنش به دلیل تأثیر آن در کاهش میزان هیدروژن پراکسید و به دنبال آن کاهش میزان مالون دی‌آلدئید و همچنین، تأثیر مثبت بر روی سیستم دفاعی گیاه و کاهش خسارت‌های ناشی از تنش آبی و در نهایت افزایش عملکرد دانه برترین ترکیب تیماری می‌باشد.

استناد: محمدزاده، م.، عباسی، ا.، جان‌محمدی، م.، وحدتی‌خواجه، ص. (۱۴۰۱). تأثیر تغییرات آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان بر روی عملکرد نخود با کاربرد عنصر روی، سیلیکون و روی تثبیت شده بر روی SBA-15 تحت شرایط مختلف رطوبتی. مجله تولید گیاهان زراعی، ۱۵ (۳)، ۱۷۸-۱۵۹.

DOI: 10.22069/EJCP.2022.19776.2478



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

از جمله عواملی که منجر به بهبود رشد و نمو گیاهان به‌خصوص در شرایط تنش‌های محیطی می‌شود، می‌توان به عنصر روی و سیلیکون اشاره کرد. عنصر روی به‌عنوان یکی از عناصر ضروری به‌دلیل نقش کاتالیزوری که دارد سبب حذف گونه‌های اکسیژن فعال در شرایط تنش‌های محیطی مانند تنش خشکی می‌شود (۶). سیلیکون نیز علاوه بر افزایش جذب مواد غذایی و تغییر در تبادلات گازی، با بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بخصوص در تنش خشکی موجب کاهش اثرات زیانبار این تنش می‌گردد (۷، ۸). تغذیه مطلوب گیاهی همواره به‌عنوان عاملی مهم برای دستیابی به حداکثر تولید مطرح بوده است. در همین راستا محلول‌پاشی با ذرات نانو به‌عنوان یکی از تکنیک‌های سازگار با محیط زیست به‌عنوان ساده‌ترین و تاثیرگذارترین روش همواره روشی امید بخش برای کشاورزان بوده است (۹). نانو ذرات به‌دلیل واکنش‌پذیری بالا در مقایسه با فرم‌های معمولی خود (بالک)^۲ امروزه بسیار سودمندتر تشخیص داده شده‌اند. به‌گونه‌ای که این فرم در مقایسه با فرم بالک عناصر غذایی، منجر به افزایش معنی‌دار رشد نمو گیاه و عملکرد کمی و کیفی گیاهان می‌گردند (۱۰). در این میان نانو ذرات مزوحفره سیلیکایی SBA-15^۳ به‌دلیل سطح ویژه بالا و توانایی اصلاح سطح، با امکان پدید آوردن نانوحامل‌هایی با عملکرد بالا، پتانسیل بسیار زیادی برای جذب و بارگذاری در حفرات نانوذره ایجاد می‌کند (۱۱). به‌عنوان نمونه می‌توان به نقش نانو ذرات مزوحفره سیلیکایی در کپسوله‌سازی زیستی و SBA-15 اشاره کرد که در آن از SBA-15 به‌عنوان حامل زیستی استفاده می‌شود. با استفاده از روش تثبیت عناصری مانند روی در حفرات مزوحفره سیلیکایی می‌توان به

تنش خشکی به‌عنوان مهم‌ترین تنش محیطی مطرح می‌باشد که گیاهان زراعی در طول دوره رشد خود مخصوصاً در شرایط کشت دیم با آن مواجه هستند. این تنش سهم به‌سزایی در کاهش عملکرد کمی و کیفی گیاهان زراعی دارد و بر روی سنتز و آسمیلایسیون متابولیت‌ها، فتوسنتز و رفتار روزنه‌ای نیز تاثیر می‌گذارد (۱). در این میان نخود به‌عنوان یک گیاه سرما دوست، هرچند نسبت به سایر حبوبات مقاومت بالایی نسبت به خشکی دارد ولی نسبت به سایر گیاهان زراعی از تنش خشکی تاثیر بیش‌تری می‌پذیرد. در تنش خشکی به دلیل انتقال الکترون‌ها به اکسیژن و احیای ناقص آن، گونه‌های اکسیژن فعال^۱ تولید می‌شود. (۲). در شرایط طبیعی بین تولید انواع اکسیژن فعال و میزان جمع‌آوری آن در سلول‌های گیاهی تعادل نسبی وجود دارد. در شرایط تنش‌های شدید محیطی، به دلیل افزایش میزان تولید گونه‌های اکسیژن فعال میزان تولید از میزان جمع‌آوری پیشی می‌گیرد، لذا گیاه علاوه بر تنش خشکی با تنش ثانویه‌ای به‌نام تنش اکسیداتیو نیز روبه‌رو می‌شود (۳). گونه‌های اکسیژن فعال تولید شده در تنش اکسیداتیو با لیپیدها، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و آنزیم‌ها واکنش داده و مرگ برنامه‌ریزی شده سلولی را القا می‌کند که در نهایت منجر به خسارت به گیاهان می‌شود (۴). گیاهان جهت مقابله با گونه‌های اکسیژن فعال از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی بهره می‌برند. از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان فعال در گیاهان زراعی می‌توان به کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، گایاکول پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز و از آنتی‌اکسیدان‌های مهم می‌توان به گلووتاتیون، آسکوربیک اسید، فلاونوئیدها و کاروتنوئیدها اشاره نمود (۵).

2. Balk

3. Santa Barbara type

1. Reactive oxygen species

فرم جدیدی از نانوکودهایی حاوی روی و سیلیکون با عملکرد بالا دست یافت (۱۲).

مطالعات متعددی در خصوص کاربرد بیرونی عناصر مختلف در شرایط تنش خشکی انجام شده است. در مطالعه‌ای بر روی گندم گزارش شد تنش خشکی موجب کاهش ۶۶/۲۹ درصدی فعالیت کاتالاز، ۷۳/۴۹ درصدی سوپراکسید دیسموتاز و ۴۳/۲۲ درصدی پراکسیداز نسبت به شاهد گردید. در حالی که کاربرد سیلیکون در تنش خشکی توانست فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز را افزایش دهد (۱۳). در مطالعه دیگری نیز محلول‌پاشی نانو روی در تنش خشکی موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز گردید به گونه‌ای که با افزایش شدت تنش و کاربرد نانو روی، میزان هیدروژن پراکسید و مالون دی‌آلدهید نیز کاهش یافت (۱۴).

با توجه به قرارگیری ایران بر روی کمربند مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان و وقوع تنش خشکی به‌عنوان بارزترین ویژگی این مناطق و همچنین، تاثیر نانو ذرات بر کاهش تاثیرات تنش خشکی و افزایش میزان جذب و انتقال عناصر به درون گیاه، لذا تاکنون تاثیر انواع فرم‌ها و سایزهای مختلف عناصر غذایی بر روی تعدیل رشد و نمو گیاهان زراعی مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهش حاضر نیز با هدف بررسی تغییر در میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نخود و تأثیر این تغییرات بر روی عملکرد و اجزای آن با کاربرد فرم‌های مختلف روی و سیلیکون به‌ویژه نانو ذرات مزوحفره روی و سیلیکون انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به صورت اسپلینت پلات در قالب

طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار بر روی نخود (رقم آزاد) در ۱۸ فروردین ۱۳۹۸ در کشت‌زار پژوهشی دانشگاه مراغه با ۳۷ درجه و ۲۳ دقیقه عرض شمالی، ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی و ۱۴۸۵ متر ارتفاع از سطح آب‌های آزاد اجرا گردید. این پژوهش در ۴۵ کرت با اندازه ۲×۲ متر و تراکم ۲۰ بوته در مترمربع و عمق کاشت چهار سانتی‌متر اجرا شد. ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک محل آزمایش در عمق ۳۰ سانتی‌متر در جدول ۱ ذکر شده است. طبق نتایج به‌دست آمده از آزمون خاک و آستانه نیاز نخود، طبق توصیه کارشناسان جهت جبران کسری فسفر حدود ۷۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفره به خاک اضافه گردید. فاکتور اصلی شامل تنش آبی (W₁: ۹۰ درصد ظرفیت زراعی، W₂: ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و W₃: ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) و فاکتور فرعی نیز شامل F₁: شاهد (عدم مصرف عناصر)، F₂: سولفات روی (۱ میلی‌مولار)، F₃: سیلیکون (۱/۵ میلی‌مولار)، F₄: سولفات روی + سیلیکون (۱ و ۱/۵ میلی‌مولار)، F₅: مزوحفره روی و سیلیکون (۱ میلی‌مولار) بود. محلول‌پاشی کودها در مراحل گلدهی، غلاف‌بندی و پرشدن دانه انجام گردید. برای اعمال تنش آبی، تمامی تیمارها تا ابتدای گلدهی به صورت کامل آبیاری شدند. سپس زمان‌های آبیاری با اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌وسیله دستگاه رطوبت سنج و سپس با استفاده از رابطه زیر (۱۵) میزان آب آبیاری برای هر سطح تنش محاسبه گردید.

$$In = \frac{(Fci - \Theta i) \times D \times A}{100}$$

در این رابطه In: حجم آب مصرفی، Fci: رطوبت خاک در شرایط ظرفیت زراعی، Θi : مقدار رطوبت خاک در شرایط نمونه‌برداری، D: عمق مناسب نفوذ ریشه و A: سطح کرت مورد استفاده می‌باشند.

جدول ۱- خواص فیزیکی و شیمیایی خاک.

Table 1- Soil physical and chemical properties.

هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) EC(dS.m^{-1})	کربن آلی (درصد) Organic carbon (%)	سیلیسیم (درصد) Si(%)	روی قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Available Zn(mg.kg^{-1})	آهن قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Available Fe(mg.kg^{-1})	فسفر در دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Available P(mg.kg^{-1})	پتاسیم در دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Available K(mg.kg^{-1})	نیترژن کل (درصد) Total N (%)	بافت texture
1.06	4.26	0.28	0.14	3.12	4.46	360	0.03	لوم شنی loam Sandy

۱۱۸ روز بعد از تاریخ کاشت می‌باشد. پیش از تجزیه واریانس، نرمال بودن توزیع داده‌ها و خطاها و افزایشی بودن اثر بلوک در تیمار بررسی گردید. برای مقایسه‌ی میانگین‌ها از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد و برای انجام تجزیه‌ی داده‌ها و رسم نمودارها، از نرم‌افزارهای Genstat نسخه ۱۴ و Excel نسخه ۲۰۱۳ استفاده شد. برش‌دهی برای اثر متقابل با دستور Slice در برنامه SAS انجام گرفت.

نتایج و بحث

آسکوربات پراکسیداز: براساس تجزیه واریانس صورت گرفته میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در سطح احتمال پنج درصد تحت تاثیر برهم‌کنش تنش در عناصر قرار گرفت (جدول ۲). اثر برش‌دهی در هر سه سطح تنش آبی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) نیز بر روی آسکوربات پراکسیداز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). در تیمار ۹۰ درصد ظرفیت زراعی (شاهد) از نظر میزان فعالیت آسکوربات پراکسیداز بین تیمار عناصر اعمال شده با شاهد اختلاف معنی‌داری مشاهده شد، ولی بین تیمارهای عناصر اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید. در تنش آبی ۶۰ درصد ظرفیت زراعی نیز به غیر از تیمار روی و

برای استخراج آنزیم‌های کاتالاز، گایاکول پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز ۰/۵ گرم نمونه برگی با مقداری نیترژن مایع در هاون چینی هضم و سپس ۵ میلی‌لیتر بافر فسفات (pH=۷) به آن اضافه گردید. نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دور ۱۵۰۰۰ در دقیقه و دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. جهت استخراج آنزیم آسکوربات پراکسیداز از روش فوق به همراه ۵ درصد پلی‌ونیل پیرولیدین و آسکوربات استفاده شد (۱۶). اندازه‌گیری آنزیم‌های کاتالاز به روش اسی (۱۹۸۴)، گایاکول پراکسیداز به روش یوشیمورا و همکاران (۲۰۰۰) و هیدروژن پراکسید به روش چن و همکاران (۲۰۰۰) انجام شد (۱۷، ۱۸ و ۱۹). آسکوربات پراکسیداز به روش سایروم و همکاران (۱۹۹۸) و مالون دی‌آلدئید نیز به روش استوارت و بلی (۱۹۸۰) انجام گرفت (۱۶)، (۲۰). جهت اندازه‌گیری کلروفیل a، b و کارتوئید از معادلات ولبورن (۱۹۹۴) و روش لیچنتالر و همکاران (۱۹۸۳) استفاده شد (۲۱، ۲۲). برای اندازه‌گیری ارتفاع بوته، از هر کرت ۱۰ بوته و قبل از برداشت به صورت تصادفی انتخاب گردید و برای عملکرد دانه نیز یک متر مربع از هر کرت برداشت و اندازه‌گیری گردید. تاریخ‌های نمونه‌برداری جهت اندازه‌گیری صفات آزمایشگاهی و برداشت به ترتیب ۹۹ روز و

در تنش آبی توسط سایر محققین نیز گزارش شده است (۲۷، ۲۸).

کاتالاز: میزان فعالیت آنزیم کاتالاز نیز در سطح احتمال یک درصد تحت تاثیر برهم کنش تنش در عناصر قرار گرفت (جدول ۲). طبق برش دهی اثر متقابل بر اساس تنش آبی، اثر هر سه سطح تنش آبی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) بر روی هیدروژن پراکسید در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۳). در تمام سطوح تنش آبی اختلاف معنی داری بین تیمار عناصر با شاهد مشاهده گردید و به ترتیب در هر سه سطح تنش آبی بیشترین و کمترین میزان آن در تیمار مزوحفره روی و سیلیکون (۰/۳۵، ۱/۰۹ و ۱/۲۲ واحد آنزیمی بر میلی گرم پروتئین) و شاهد (۰/۱۵، ۰/۲۱ و ۰/۱۹ واحد آنزیمی بر میلی گرم پروتئین) به دست آمد (جدول ۴). به طور کلی، آنزیم کاتالاز به عنوان یکی از آنزیم های کلیدی در شرایط تنش بوده و موجب تبدیل هیدروژن پراکسید تولید شده در تنش ها به آب و اکسیژن می شود (۲۹). افزایش فعالیت این آنزیم تحت تنش حاکی از آن است که این آنزیم نقش مهمی در جمع آوری هیدروژن پراکسید دارد (۳۰). گزارشاتی نیز وجود دارد که حاکی از کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز با افزایش شدت تنش خشکی می باشد. عابدی و پاک نیت (۲۰۱۰) بیان کردند با افزایش شدت تنش خشکی به دلیل تغییر در زیرواحدهای آنزیمی یا مهار سنتز آنزیم، میزان فعالیت آنزیم کاتالاز کاهش می یابد که ممکن است مرتبط با تخریب ناشی از پراکسیزومال پروتئازهای القاشده باشد (۳۱). در این پژوهش نیز در شدت تنش بالا، میزان کاتالاز به صورت جزئی کاهش یافت (جدول ۴). به طور کلی، می توان چنین بیان کرد که پاسخ گیاهان بسته به نوع گیاه و مرحله رشدی آن و همچنین، شدت و مدت زمان قرارگیری گیاه تحت تنش آبی، می تواند متفاوت باشد (۳۲). عناصر روی

همچنین، در تنش آبی ۳۰ درصد ظرفیت زراعی نیز به غیر از تیمار روی و تیمار سیلیکون، اختلاف معنی داری بین تیمار عناصر با شاهد مشاهده شد. به ترتیب در هر سه سطح تنش آبی بیشترین و کمترین میزان فعالیت آسکوربات پراکسیداز از تیمار مزوحفره روی و سیلیکون (۱/۹۳، ۲/۳۶ و ۲/۵۴ واحد آنزیمی بر میلی گرم پروتئین) و شاهد (۱/۳۱، ۱/۴۸ و ۱/۵۴ واحد آنزیمی بر میلی گرم پروتئین) به دست آمد (جدول ۴). آنزیم آسکوربات پراکسیداز جزو مهمترین آنزیم های خنثی کننده هیدروژن پراکسید در گیاهان محسوب می شود (۲۳). افزایش میزان فعالیت آنزیم های آسکوربات پراکسیداز و همچنین، گایاکول پراکسیداز در شرایط تنش بیان کننده نقش کلیدی این آنزیم ها در خنثی سازی گونه های اکسیژن فعال می باشد. این آنزیم ها از هیدروژن پراکسید به عنوان سوسترا جهت انجام واکنش استفاده می کند. از طرفی، میل ترکیبی آسکوربات پراکسیداز جهت واکنش با هیدروژن پراکسید بیش تر از آنزیم گایاکول پراکسیداز می باشد و با افزایش میزان تولید هیدروژن پراکسید، میزان فعالیت این آنزیم نیز افزایش می یابد. لذا با افزایش میزان تنش به دلیل افزایش گونه های اکسیژن فعال، فعالیت آسکوربات پراکسیداز افزایش می یابد (۲۴) که در این پژوهش نیز هم سو با افزایش تولید هیدروژن پراکسید میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز نیز افزایش یافت (جدول ۴). از طرفی، در شرایط کمبود روی به دلیل اینکه این عنصر نقش مهمی در بیان ژن های مسئول کد گذاری آنزیم های آنتی اکسیدان از جمله آسکوربات پراکسیداز دارد، میزان فعالیت این آنزیم کاهش می یابد (۲۵). همچنین، افزایش بیان ژن های کدکننده آنزیم آسکوربات پراکسیداز با کاربرد سیلیکون در شرایط تنش نیز گزارش شده است (۲۶). افزایش در میزان فعالیت آسکوربات پراکسیداز با کاربرد نانو روی و سیلیکون

و سیلیکون نیز به‌عنوان عناصر محافظ و تعدیل‌کننده در تنش‌ها، به‌دلیل نقشی که در فعال‌سازی آنزیم کاتالاز دارند، می‌توانند با افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز موجب تعدیل رادیکال‌های آزاد و اثرات مخرب ناشی از آن شوند. نقش این عناصر در افزایش کارایی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش آبی (۳۳) به‌خصوص به فرم نانو به اثبات رسیده است (۳۴، ۳۵).

گایاکول پراکسیداز: طبق تجزیه واریانس داده‌ها برهم‌کنش کاربرد عناصر مورد مطالعه و اعمال تنش رطوبتی بر روی میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). طبق برش‌دهی اثرات متقابل، میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در هر سه سطح تنش آبی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). براساس مقایسات میانگین صورت گرفته، در هر سه سطح تنش آبی بین تیمار عناصر با تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری وجود داشته و به‌ترتیب در هر سه سطح تنش آبی، بیش‌ترین و کم‌ترین میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز از مزوحفره روی و سیلیکون (۲/۲۵، ۳/۹۳ و ۴/۵۵ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین) و شاهد (۱/۲۰، ۱/۵۲ و ۱/۱۵ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین) به‌دست آمد (جدول ۴). گایاکول پراکسیداز از جمله آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی موجود در گیاهان می‌باشد که در خنثی‌سازی و کاهش انواع اکسیژن فعال نقش مهمی دارد (۳۶) و افزایش فعالیت آن در شرایط تنش به‌عنوان یک سیستم حفاظتی موجب افزایش مقاومت گیاه و کاهش آسیب به گیاه در شرایط تنش آبی می‌شود (۳۷). افزایش در میزان فعالیت گایاکول پراکسیداز در اثر تنش آبی در گیاه کلزا نیز گزارش شده است (۳۱). نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر نیز نشان داد که افزایش تنش آبی

تا سطح مشخصی موجب افزایش سطح فعالیت کاتالاز و گایاکول پراکسیداز می‌شود (جدول ۴) و با افزایش شدت تنش از حد مشخصی به بعد به‌دلیل اینکه سنتز پروتئین‌ها دچار آسیب می‌شود، فعالیت آنزیم‌هایی مانند کاتالاز و پراکسیداز هرچند جزئی کاهش می‌یابد. در این زمینه، میکا و لوسجه (۲۰۰۳) کاهش فعالیت گایاکول پراکسیداز با افزایش شدت تنش را به افزایش میزان فعالیت آسکوربات پراکسیداز مرتبط دانسته و بیان کرده‌اند که ممکن است وجود مقادیر زیاد آسکوربات بر گایاکول پراکسیداز اثر بازدارندگی داشته باشد (۳۸). دلیل این امر استفاده از آسکوربات به‌عنوان سوبسترا بجای گایاکول می‌باشد. در این پژوهش نیز در سطح بالای تنش میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز کاهش و در مقابل، میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز افزایش یافته است (جدول ۴). کمبود عناصر روی و سیلیکون به‌دلیل نقشی که در سنتز و ساختار رنگدانه‌های فتوسنتزی دارند، موجب از بین رفتن کلروفیل و تخریب ساختمان کلروپلاست و کاهش فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسیداز می‌شود (۳۹). در پژوهش حاضر کاربرد این عناصر به‌خصوص مزوحفرات روی و سیلیکون در سطوح تنش بالا (۳۰ درصد ظرفیت زراعی)، موجب افزایش قابل توجه فعالیت این آنزیم نسبت به عدم کاربرد این عناصر گردید (جدول ۴). افزایش میزان فعالیت گایاکول پراکسیداز با کاربرد نانو روی در گیاه سویا (۴۰) و همچنین سیلیکون در گیاه کلزا (۴۱) نیز گزارش شده است.

هیدروژن پراکسید: این صفت نیز در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر برهم‌کنش تنش در عناصر قرار گرفت (جدول ۲) و طبق برش‌دهی اثر متقابل بر اساس تنش آبی، اثر هر سه سطح تنش آبی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) بر روی هیدروژن پراکسید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). در تمام

روی و سیلیکون (۲۱/۷۲، ۲۲/۳۶ و ۲۷/۳۳ نانو مول بر گرم وزن تر) به دست آمد (جدول ۴). مالون دی آلدئید به عنوان محصول نهایی پراکسیداسیون لیپیدهای غشا شاخصی برای سنجش میزان آسیب به غشا در تنش‌های محیطی محسوب می‌شود (۴۴). با ایجاد تنش و به دنبال آن تنش اکسیداتیو و تولید انواع اکسیژن فعال، آسیب به پروتئین‌ها، ماکرومولکول‌ها و لیپیدها منجر به کاهش کارایی سلول می‌شوند. در این میان آسیب به غشا از رایج‌ترین خسارت‌ها در طول تنش در گیاهان می‌باشد به طوری که بین میزان تولید مالون دی آلدئید و شدت تنش رابطه مستقیمی وجود دارد (۴۵). در این پژوهش نیز با افزایش شدت تنش آبی، میزان مالون دی آلدئید با افزایش میزان تولید هیدروژن پراکسید، افزایش یافت (جدول ۴). علت این افزایش در میزان مالون دی آلدئید را می‌توان به افزایش میزان تولید انواع اکسیژن فعال و کافی نبودن سیستم‌های دفاعی در شدت‌های بالای تنش عنوان کرد (۴۶) به طوری که با افزایش شدت تنش، میزان هیدروژن پراکسید نیز بیش‌ترین مقدار را داشت (جدول ۴). کاربرد روی و سیلیکون به خصوص فرم نانو ذرات مزوحفرات سیلیکایی به دلیل نقشی که در بهبود یکپارچگی غشای پلاسمایی و ساختار تونوپلاست و افزایش سیستم آنتی‌اکسیدانی دارد، موجب کاهش خسارت به لیپیدهای غشا می‌شود. گزارش شده است که کاربرد روی و سیلیکون با افزایش پایداری غشا و جلوگیری از تخریب ساختار آن منجر به کاهش میزان مالون دی آلدئید می‌شود (۴۷، ۴۲) که در این پژوهش نیز با کاربرد تیمار مزوحفرات روی و سیلیکون در سطوح مختلف تنشی به دلیل افزایش قابل توجه میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و به دنبال آن کاهش میزان هیدروژن پراکسید، میزان مالون دی آلدئید نیز به طور معنی‌داری کاهش یافت.

سطوح تنش آبی اختلاف معنی‌داری بین تیمار عناصر با شاهد مشاهده گردید و به ترتیب در هر سه سطح تنش آبی بیش‌ترین و کم‌ترین میزان هیدروژن پراکسید در شاهد (۱/۷۵، ۵/۱۱ و ۷/۳۶ میلی مول بر گرم وزن تر) و تیمار مزوحفره روی و سیلیکون (۱/۱۳، ۱/۹۶ و ۲/۲۹ میلی مول بر گرم وزن تر) به دست آمد (جدول ۴). افزایش میزان هیدروژن پراکسید در شرایط تنش‌های محیطی به خصوص با افزایش شدت آن اجتناب ناپذیر می‌باشد. کاهش معنی‌دار هیدروژن پراکسید در حضور روی (۴۲) و سیلیکون در تنش خشکی (۴۳) در سایر مطالعات نیز گزارش شده است. در توجیه کاهش هیدروژن پراکسید با کاربرد مزوحفرات روی و سیلیکون می‌توان چنین بیان کرد که به دلیل نقش ساختاری این عناصر در افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به عنوان حذف‌کننده‌های هیدروژن پراکسید (کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز) به ویژه به فرم نانو به دلیل جذب بالا، میزان هیدروژن پراکسید کاهش یافت. به طوری که کاربرد مزوحفرات روی و سیلیکون به دلیل افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز و همچنین کاروتنوئیدها، تولید هیدروژن پراکسید کاهش داد (جدول ۴).

مالون دی آلدئید: تاثیر برهم کنش تنش در عناصر بر روی میزان مالون دی آلدئید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). طبق برش‌دهی اثر متقابل بر اساس تنش آبی، اثر هر سه سطح تنش آبی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) بر روی هیدروژن پراکسید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). در سطوح تنش آبی اختلاف معنی‌داری بین تیمار عناصر با شاهد مشاهده گردید و به ترتیب در هر سه سطح تنش آبی بیش‌ترین و کم‌ترین میزان هیدروژن پراکسید در شاهد (۲۸/۵۲، ۴۷/۷۱ و ۵۴/۱۸ نانو مول بر گرم وزن تر) و تیمار مزوحفره

جدول ۲- میانگین مربعات مورفوفیزیولوژیک حاصل از تجزیه واریانس فرم‌های مختلف روی و سیلیکون بر روی خصوصیات مورفوفیزیولوژیک نخود (رقم آزاد) تحت تنش خشکی.

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase	کاتالاز Catalase	گایاکول پراکسیداز Guaiacol peroxidase	هیدروژن پراکسید H ₂ O ₂	مالون دی‌آلدئید Malon dialdehyde	کلروفیل a chlorophyll a	کلروفیل b chlorophyll b	کلروئید Carotenoid	ارتفاع بوته Plant height	عملکرد دانه Grain yield
بلوک Block	2	0.03	0.02	0.02	0.41	34.88	0.11	0.05	1.02	0.383	12720
تنش آبی Water stress	2	0.27**	0.50**	7.55**	30.78**	883.14**	8.63**	0.63**	23.84**	235.41**	6385092**
خطای اصلی B × W	4	0.05	0.01	0.05	1.74	18.44	0.06	0.02	0.11	0.21	10669
عناصر Elements	4	0.90**	0.69**	7.15**	11.16**	451.99**	5.24**	0.30**	10.44**	139.95**	1420933**
W × E	8	0.07*	0.09**	0.89**	234**	55.33**	0.06*	0.01 ^{ns}	0.48**	5.01**	143186**
خطا Error	24	0.03	0.005	0.02	0.31	7.80	0.02	0.01	0.09	1.55	8686
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	6.2	15.3	9.1	19.1	8.4	4.9	8.9	4.9	7.2	8.2

*, **, ns به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم معنی دار.

*, **, and ns: significant at 5 and 1 % probability level, and no significant, respectively.

افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلز و به دنبال آن تجزیه کلروفیل مربوط دانست (۵۱). به گونه‌ای که با افزایش شدت تنش و مدت زمان مواجهه گیاه با تنش خشکی، تخریب رنگ‌دانه‌های کلروفیل افزایش می‌یابد (۵۲). به‌طور کلی، تاثیر مثبت سیلیکون و روی در افزایش میزان کلروفیل را می‌توان به افزایش استحکام برگ و رسوب آن در دیواره برگ‌ها (۵۳) و همچنین، نقش این عناصر در کاهش سمیت انواع اکسیژن فعال با افزایش غلظت آنتی‌اکسیدان‌ها عنوان کرد (۵۴) که در پژوهش حاضر نیز نتایج به‌دست آمده نشان داد با کاربرد سیلیکون و روی به‌دلیل افزایش فعالیت آنزیم‌هایی مانند کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز و همچنین کارتنوئیدها و در نتیجه حذف هیدروژن پراکسید، از تجزیه رنگدانه‌های فتوسنتزی جلوگیری به عمل آمده و منجر به تعویق تخریب آن‌ها می‌شود (جدول ۴). نانو ذرات به‌علت سطح ویژه بالا و چگالی بیش‌تر، از نواحی واکنش‌پذیری بالایی برخوردارند که در نهایت منجر به جذب بالا و آسان توسط گیاه می‌شود (۵۵).

کاروتنوئید: اثر برهم‌کنش تنش در عناصر در سطح احتمال یک درصد بر محتوای کاروتنوئید معنی‌دار بود (جدول ۲). طبق برش‌دهی اثر متقابل بر اساس تنش‌آبی، اثر هر سه سطح تنش‌آبی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) بر روی کاروتنوئید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). در تمام سطوح تنش‌آبی اختلاف معنی‌داری بین تیمار عناصر با شاهد مشاهده گردید و به‌ترتیب در هر سه سطح تنش‌آبی بیش‌ترین و کم‌ترین میزان کاروتنوئید در تیمار مزوحفره روی و سیلیکون (۸/۷۶، ۸/۱۹ و ۶/۸۵ میلی‌مول بر گرم وزن تر) و شاهد (۶/۴۵، ۴/۷۹ و ۳/۴۷ میلی‌مول بر گرم وزن تر) به‌دست آمد (جدول ۴). کاروتنوئیدها نقش حفاظتی از کلروفیل در مقابل گونه‌های اکسیژن فعال دارند. به‌طوری که گونه گیاهی

کلروفیل a و b: طبق نتایج جدول تجزیه واریانس تاثیر برهم‌کنش عناصر در تنش‌آبی بر روی کلروفیل a در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید. همچنین، محتوای کلروفیل b نیز در سطح احتمال یک درصد تحت تاثیر تنش‌آبی و تیمار عناصر قرار گرفت (جدول ۲). طبق برش‌دهی اثر متقابل بر اساس تنش‌آبی، اثر هر سه سطح تنش‌آبی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) بر روی کلروفیل a در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). در تمام سطوح تنش‌آبی اختلاف معنی‌داری بین تیمار عناصر با شاهد مشاهده گردید و به‌ترتیب در هر سه سطح تنش‌آبی بیش‌ترین و کم‌ترین میزان کلروفیل a در تیمار مزوحفره روی و سیلیکون (۵/۱۱، ۴/۳۱ و ۳/۸۶ میلی‌مول بر گرم وزن تر) و شاهد (۳/۱۳، ۲/۴۰ و ۱/۷۰ میلی‌مول بر گرم وزن تر) به‌دست آمد (جدول ۴). طبق شکل ۳ نیز با افزایش شدت تنش میزان کلروفیل b ۳۰ درصد (۱/۳۴۷ و ۰/۹۴۲ واحد آنزیمی بر گرم وزن تر) کاهش یافت. کلروفیل‌ها ۲۰ تا ۳۰ درصد کل لیپیدهای غشا را تشکیل داده و در غشای تیلاکوئیدی با ترکیب با پلی‌پپتیدها، کمپلکس رنگ‌دانه-پروتئین را به‌وجود می‌آورند (۴۸). از آنجایی که در شرایط تنش‌آبی تولید انواع اکسیژن فعال منجر به پراکسیداسیون لیپیدهای غشا می‌شود، زیو و همکاران (۲۰۰۸) بیان کردند که محتوای کلروفیل برگ در تنش‌آبی به‌دلیل تولید گونه‌های اکسیژن فعال و متعاقب آن پراکسیداسیون لیپیدها و در نتیجه تخریب کلروفیل‌ها، کاهش می‌یابد (۴۹). همچنین، در شرایط تنش‌آبی، گلوتامات به‌عنوان پیش‌ماده کلروفیل و پرولین، به جای کلروفیل به پرولین تبدیل می‌شود که در نهایت منجر به کاهش محتوای کلروفیل برگ می‌گردد (۵۰). از طرف دیگر کاهش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی در تنش را می‌توان به افزایش میزان گونه‌های اکسیژن فعال و همچنین

شرایط تنش خشکی مجموعه‌ای از عواملی مانند جلوگیری از انبساط و طولیل شدن سلول در نتیجه کمبود آب (۵۹، ۶۰)، کاهش فشار ترگر و تغییر انرژی از رشد به سمت بیوسنتز متابولیت‌هایی جهت حفظ فشار ترگر سلولی، کاهش جذب آب و به دنبال آن کاهش جذب نیتروژن (۶۱، ۶۲) و همچنین، آسیب به دستگاه فتوسنتزی و آنزیم‌های درگیر در آن و در نهایت کاهش میزان فتوسنتز، منجر به کاهش رشد گیاه می‌شود (۶۳). به طوری که با افزایش شدت تنش، ارتفاع بوته کاهش می‌یابد (جدول ۴). با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش کاهش در ارتفاع بوته با افزایش شدت تنش را می‌توان به آسیب به غشای سلول‌های گیاهی در نتیجه‌ی افزایش میزان تولید هیدروژن پراکسید مربوط دانست. به طوری که با افزایش میزان هیدروژن پراکسید ناشی از تنش، میزان مالون دی‌آلدهید به عنوان شاخصی از میزان آسیب به غشای سلولی نیز افزایش یافت (جدول ۴). اثبات شده است که سیلیکون به دلیل تعدیل روابط آبی گیاه و افزایش میزان کلسانی و محتوای آب سیمپلاستی (۶۴، ۶۵) منجر به افزایش رشد گیاه می‌شود. از طرفی، تأثیر مثبت روی در افزایش رشد گیاه نیز به دلیل نقش این عنصر در تقسیم سلولی، بزرگ شدن و تنظیم رشد گیاه از طریق سنتز تریپتوفان به عنوان پیش‌ماده هورمون اکسین نیز گزارش شده است (۶۶). تریپتوفان یک نوع آمینواسیدی می‌باشد که در چرخه فسفوپیتاز سنتز شده و در مسیر اکسیداسیون مستقیم، با وارد شدن عنصر روی در ساختار آن، به اکسین تبدیل می‌شود (۶۷). هورمون اکسین در گیاهان در تنظیم فرآیندهای مختلف فیزیولوژیکی مانند رشد، نقش محوری دارد (۶۸).

که میزان کاروتنوئید بیش‌تری دارد، به دلیل مقاومت بالا در مقابل انواع رادیکال‌های آزاد، در مقابل تنش آبی نیز مقاومت بیش‌تری دارد (۵۶). به طور کلی، تنش آبی علاوه بر تخریب اکسیداسیون با تحت تأثیر قرار دادن جریان پیش‌ماده گرانیل گرانیل دی‌فسفات بین مسیرهای سنتز کلروفیل، آبسزیک اسید و همچنین کاروتنوئیدها، تولید و تبدیلات آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به گونه‌ای که کاهش در میزان کاروتنوئید با افزایش شدت تنش آبی در سایر مطالعات نیز گزارش شده است (۵۷). در این پژوهش نیز نتایج نشان داد که با افزایش شدت تنش از ۹۰ درصد ظرفیت زراعی (۶/۴۵ نانومول بر گرم وزن تر) به ۳۰ درصد ظرفیت زراعی (۳/۴۷ میلی‌مول بر گرم وزن تر)، میزان کاروتنوئیدها ۴۶ درصد کاهش یافت (جدول ۴). دلیل افزایش میزان کاروتنوئید در تنش آبی با کاربرد سیلیکون و روی، فرایند مقاوم‌سازی^۱ و حفظ ساختار کاروتنوئیدها عنوان شده است (۵۸).

ارتفاع بوته: طبق نتایج جدول تجزیه واریانس، ارتفاع بوته در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر برهم‌کنش تنش در عناصر قرار گرفت (جدول ۲). طبق برش‌دهی اثر متقابل بر اساس تنش آبی، اثر هر سه سطح تنش آبی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) بر روی ارتفاع بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). در تمام سطوح تنش آبی اختلاف معنی‌داری بین تیمار عناصر با شاهد مشاهده گردید و به ترتیب در هر سه سطح تنش آبی بیش‌ترین و کم‌ترین میزان ارتفاع بوته در تیمار مزوحفره روی و سیلیکون (۵۴/۴۳، ۵۰/۴۱ و ۴۸/۱۲ سانتی‌متر) و شاهد (۴۶/۴۴، ۳۸/۹۲ و ۳۶/۳۰ سانتی‌متر) به دست آمد (جدول ۴). رشد اولین فرآیندی است که تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرد. در

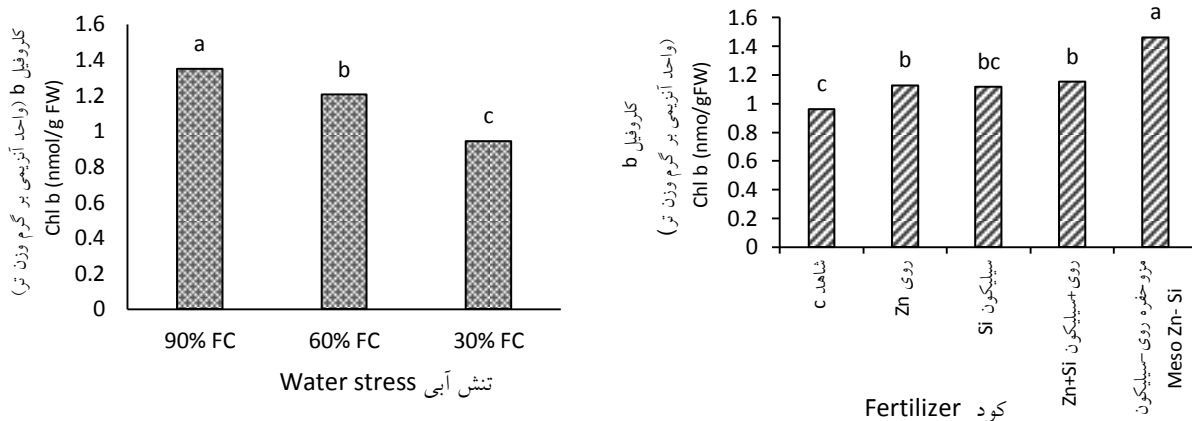
جدول ۳- تجزیه واریانس برش دهی اثرات متقابل صفات مختلف بر اساس تنش آبی.

Table 3- Slice of interaction effect of different traits by water stress.

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase	کاتالاز Catalase	گایاکول پراکسیداز Guaiacol peroxidase	هیدروژن پراکسیداز H ₂ O ₂	مالون دی آلدئید Malon dialdehyde	کلروفیل chlorophyll a	کاروتنوئید Carotenoid	ارتفاع بوته Plant height	عملکرد دانه Grain yield
۹۰٪ ظرفیت زراعی	4	0.16**	0.02**	0.53**	0.18**	18.11**	1.62**	2.19**	24.62**	1015323**
۶۰٪ ظرفیت زراعی	4	0.32**	0.35**	2.61**	4.07**	244.22**	1.67**	4.74**	61.98**	507963**
۳۰٪ ظرفیت زراعی	4	0.56**	0.51**	5.78**	11.59**	300.32**	2.05**	4.47**	63.37**	184018**

ns, **, * : به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم معنی دار.

*, ** and ns: significant at 5 and 1 % probability level, and no significant, respectively.



شکل ۱- الف و ب به ترتیب از سمت راست، تاثیر عناصر و تنش آبی بر روی کلروفیل b.

Figures 1- A and B respectively, from the right, the effect of elements and water stress on chlorophyll b.

و سیلیکون در ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، اختلاف معنی داری بین تیمار عناصر با شاهد مشاهده گردید و به ترتیب در هر سه سطح تنش آبی بیشترین و کمترین میزان عملکرد دانه در تیمار مزوحفره روی و سیلیکون (۳۰۱۷، ۲۱۹۳ و ۱۳۱۹ کیلوگرم در هکتار) و شاهد (۱۴۵۲، ۱۲۱۳ و ۶۹۴ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد (جدول ۴).

عملکرد دانه: تاثیر برهم کنش تنش در عناصر در سطح احتمال یک درصد بر روی عملکرد دانه معنی دار گردید (جدول ۲). طبق برش دهی اثر متقابل بر اساس تنش آبی، اثر هر سه سطح تنش آبی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) بر روی عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۳). در تمام سطوح تنش آبی به غیر از کاربرد تیمارهای روی

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل فرم‌های مختلف روی و سیلیکون و تنش خشکی بر روی صفات مورفوفیزیولوژیک نخود (رقم آزاد).
Table 4- Mean comparison of effect of different forms of Zinc and Silicon on morphophysiological traits of chickpea (Azad cultivar) under drought stress.

تنش آبی Water stress	عناصر Elements	آسکوربات پراکسیداز (واحد) APX (Unit mg ⁻¹ protein)	آزیمی بر میلی‌گرم پروتئین CAT (Unit mg ⁻¹ protein)	آزیمی بر میلی‌گرم پروتئین GPX (Unit mg ⁻¹ protein)	هیدروژن پراکسید (میلی-مول بر گرم وزن تر) H ₂ O ₂ (mmol g ⁻¹ FW)	مالون دی‌آلدهید (میلی-کلروفیل a مول بر گرم وزن تر) MDA (nmol g ⁻¹ FW)	کلروفیل a (میلی-مول بر گرم وزن تر) Chl a (mmol g ⁻¹ FW)	کاروتنوئید (میلی‌مول بر گرم وزن تر) Car (mmol g ⁻¹ FW)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height (Cm)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Y (kg/ha)
70% ظرفیت زراعی 90% FC	شاهد	1.31b	0.15d	1.20d	1.75a	28.52a	3.13d	6.45c	46.44c	1452e
	روی Zn	1.70a	0.18c	1.27c	1.29ab	24.68b	3.8c	7.12b	49.43b	2487c
	سیلیکون Si	1.75a	0.20c	1.37c	1.23ab	25.92ab	3.65c	7.09b	50.67b	2258d
	سولفات روی+سیلیکون Zn+Si	1.82a	0.26b	1.49b	1.19ab	24.70b	4.15b	7.46b	50.18b	2628b
60% ظرفیت زراعی 30% FC	مزوحفره روی و سیلیکون Mesopor Zn- Si	1.93a	0.35a	2.25a	1.13ab	21.72c	5.11a	8.76a	54.43a	3017a
	شاهد	1.48c	0.21d	1.52d	5.11a	47.71a	2.40e	4.79d	38.92d	1213c
	روی Zn	1.79cb	0.39c	2.55c	3.49bc	35.54b	3.04c	6.98c	42.43c	1355c
	سیلیکون Si	1.98b	0.41c	2.75c	3.61b	34.41b	2.73d	7.04bc	46.65b	1400c
70% ظرفیت زراعی 30% FC	سولفات روی+سیلیکون Zn+Si	2.07ab	0.63b	3.53b	2.79c	32.86b	3.55b	7.31b	47.71b	1875b
	مزوحفره روی و سیلیکون Mesopor Zn- Si	2.36a	1.09a	3.93a	1.96d	22.36c	4.31a	8.19a	50.41a	2193a
	شاهد	1.54c	0.19c	1.15e	7.36a	54.18a	1.70d	3.47c	36.30d	694c
	روی Zn	1.63c	0.35c	1.67d	4.14b	44.83b	2.21bc	5.14b	39.85c	116ab
60% ظرفیت زراعی 30% FC	سیلیکون Si	1.72c	0.32c	2.12c	3.55bc	39.06bc	2.08c	4.59b	42.52c	960b
	سولفات روی+سیلیکون Zn+Si	2.22b	0.62b	3.44b	2.99bc	36.10c	2.41b	4.86b	45.24b	1215a
	مزوحفره روی و سیلیکون Mesopor Zn- Si	2.54a	1.22a	4.55a	2.29c	27.33d	3.86a	6.85a	48.12a	1319a
	شاهد	1.54c	0.19c	1.15e	7.36a	54.18a	1.70d	3.47c	36.30d	694c
30% ظرفیت زراعی 30% FC	روی Zn	1.63c	0.35c	1.67d	4.14b	44.83b	2.21bc	5.14b	39.85c	116ab
	سیلیکون Si	1.72c	0.32c	2.12c	3.55bc	39.06bc	2.08c	4.59b	42.52c	960b
	سولفات روی+سیلیکون Zn+Si	2.22b	0.62b	3.44b	2.99bc	36.10c	2.41b	4.86b	45.24b	1215a
	مزوحفره روی و سیلیکون Mesopor Zn- Si	2.54a	1.22a	4.55a	2.29c	27.33d	3.86a	6.85a	48.12a	1319a

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد ندارند.

In each column there is no significant difference between means with the same letters by LSD ($P \leq 0.05$).

افزایش یافت.

نتیجه‌گیری کلی

سازگاری به تنش‌های آبی ممکن است به مکانیسم‌های مختلفی از جمله حفظ آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در سطح بالا بستگی داشته باشد که در این میان با استفاده از فرم‌های مناسب کودی می‌توان با افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش میزان تولید انواع اکسیژن فعال از شدت خسارت وارده بر گیاه کاست. با توجه به نتایج به‌دست آمده از این مطالعه می‌توان اذعان کرد که با استفاده از کاربرد سیلیکون و روی به‌خصوص به فرم نانوذرات مزوحفرات روی و سیلیکون می‌توان خسارت‌های ناشی از تنش آبی را به‌طور قابل توجهی کاهش داد که افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز و به موازات آن کاهش میزان هیدروژن پراکسید و مالون دی‌آلدهید به عنوان شاخص میزان آسیب به غشا، مبین همین امر می‌باشد. به‌طوری که با کاربرد روی و سیلیکون به‌خصوص به فرم مزوحفرات در شدت‌های بالای تنش، به‌دلیل کارایی بالای این فرم از کودها در جذب و انتقال، میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و به دنبال آن میزان تولید هیدروژن پراکسید و مالون دی‌آلدهید نیز کاهش یافت. از سوی دیگر، کاربرد این فرم از عناصر با افزایش میزان کاروتنوئیدها و محتوای کلروفیل برگ به‌عنوان رنگدانه‌های فتوسنتزی، موجب افزایش رشد و در نهایت عملکرد دانه گردید. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان اظهار داشت که کاربرد مزوحفره روی و سیلیکون تاثیر مثبتی بر روی رشد، عملکرد و اجزای عملکرد گیاه و همچنین، کاهش اثرات تنش آبی در گیاه نخود داشت.

با وقوع تنش آبی میزان عملکرد دانه به‌طور قابل توجهی کاهش یافت به‌طوری که با افزایش شدت تنش میزان عملکرد دانه ۵۲ درصد (۱۴۵۲ و ۶۹۴ کیلوگرم در هکتار) کاهش یافت (جدول ۴). نخود در ابتدای گلدهی رشد سریعی دارد و در صورت فراهمی رطوبت، طول دوره رشد زایشی و به‌دنبال آن میزان فتوسنتز جاری افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به افزایش تعداد گل و تشکیل دانه‌های بیش‌تر می‌شود (۶۹). عدم تأمین مواد فتوسنتزی لازم برای رشد جنین و تکامل بذر از جمله مهمترین عوامل دخیل در کاهش عملکرد و اجزای عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی می‌باشد. به‌طوری که ماهروکاشانی (۲۰۱۷) در بررسی خود بر روی گیاه گندم بیان کردند که تنش آبی باعث کاهش معنی‌دار تعداد دانه می‌گردد (۷۰). علاوه بر این در تنش آبی به دلیل آسیب به رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی و عدم تعادل بین میزان گونه‌های اکسیژن فعال و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی میزان عملکرد کاهش می‌یابد (۷۱). از طرفی، افزایش عملکرد دانه با کاربرد روی و سیلیکون را می‌توان ناشی از افزایش مقدار کلروفیل برگ، صفات عملکردی و نواحی فعال از نظر فتوسنتزی و نقش آن‌ها در گرده‌افشانی و افزایش تلقیح و دانه‌بندی عنوان کرد (۶۴، ۷۲). گزارش شده است نانو سیلیکون با افزایش تبادلات گازی، کارایی مصرف آب و همچنین، درصد فتوسنتز خالص، رشد و نمو گیاه و عملکرد دانه را افزایش می‌دهد (۷۳). در پژوهش حاضر نیز با افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاروتنوئیدها و در نتیجه کاهش میزان هیدروژن پراکسید و مالون دی‌آلدهید و افزایش میزان کلروفیل هم‌سو با تغییرات موارد ذکر شده و در نهایت افزایش رشد گیاه، عملکرد دانه نیز

References

1. Saud, S., Li, X., Chen, Y., Zhang, L., Fahad, S., Hussain, S., Sadiq, A. and Chen, Y. 2014. Silicon application increases drought tolerance of Kentucky bluegrass by improving plant water relations and morphophysiological functions. *Sci. World J.* 2014: 368694. 1-10.
2. Arora, A., Sairam, R.K. and Srivastava, G.C. 2002. Oxidative stress and antioxidative system in plants. *Curr Sci.* 82: 10. 1227-1238.
3. Orcutt, D.M., Nilsen, E.T. 2000. The physiology of plants under stress, soil and biotic factors. John Wiley and Sons. Inc. New York. Pp. 684-705.
4. Gill, S.S. and Tuteja, N. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem.* 48: 12. 909-930.
5. Kaur, N., Kaur, J., Grewal, S.K. and Singh, I. 2019. Effect of heat stress on antioxidative defense system and its amelioration by heat acclimation and salicylic acid pre-treatments in three pigeonpea genotypes. *Indian J. Agric. Biochem.* 32: 1. 106-110.
6. Mousavi, S.R., Galavi, M. and Rezaei, M. 2013. Zinc (Zn) importance for crop production—a review. *Int. J. Agron. Plant Prod.* 4: 1. 64-68.
7. Rizwan, M., Ali, S., Ibrahim, M., Farid, M., Adrees, M., Bharwana, S.A. and Abbas, F. 2015. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22: 20. 15416-15431.
8. Merwad, A.R.M., Desoky, E.S.M. and Rady, M.M. 2018. Response of water deficit-stressed *Vigna unguiculata* performances to silicon, proline or methionine foliar application. *Sci. Hortic.* 228: 132-144.
9. Shireen, F., Nawaz, M.A., Chen, C., Zhang, Q., Zheng, Z., Sohail, H., Sun, J., Cao, H., Huang, Y. and Bie, Z. 2018. Boron: functions and approaches to enhance its availability in plants for sustainable agriculture. *Int. J. Mol. Sci.* 19: 7. 1-20.
10. Dimkpa, C.O., Singh, U., Bindraban, P.S., Adisa, I.O., Elmer, W.H., Gardea-Torresdey, J.L. and White, J.C. 2019. Addition-omission of zinc, copper, and boron nano and bulk oxide particles demonstrate element and size-specific response of soybean to micronutrients exposure. *Sci Total Environ.* 665: 606-616.
11. Hu, Y., Wang, J., Zhi, Z., Jiang, T. and Wang, S. 2011. Facile synthesis of 3D cubic mesoporous silica microspheres with a controllable pore size and their application for improved delivery of a water-insoluble drug. *J. Colloid Interface Sci.* 363: 1. 410-417.
12. Pavel-Licsandru, I. 2018. Silica based materials for the encapsulation of β -Galactosidase. Doctoral thesis. Department of sciences and technologies. Scientific center of molecular physical chemistry. Lorraine. France.
13. Sattar, A., Cheema, M.A., Sher, A., Ijaz, M., Ul-Allah, S., Nawaz, A., Abbas, T. and Ali, Q. 2019. Physiological and biochemical attributes of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings are influenced by foliar application of silicon and selenium under water deficit. *Acta Physiol. Plant.* 41: 8. 1-11.
14. El-Zohri, M., Al-Wadaani, N.A. and Bafeel, S.O. 2021. Foliar Sprayed Green Zinc Oxide Nanoparticles Mitigate Drought-Induced Oxidative Stress in Tomato. *Plants.* 10: 11. 1-15.
15. Martin, D., Stegman, E. and Fereres, E. 1990. Irrigation scheduling principles. IN: Management of Farm Irrigation Systems. Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI. 155-203, 19: 9-81.
16. Sairam, R.K., Deshmukh, P.S. and Saxena, D.C. 1998. Role of antioxidant systems in wheat genotypes tolerance to water stress. *Biol. Plant.* 41: 3. 387-394.
17. Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. *Methods Enzymol.* 105: 1984. 121-126.
18. Yoshimura, K., Yabuta, Y., Ishikawa, T. and Shigeoka, S. 2000. Expression of spinach ascorbate peroxidase isoenzymes in response to oxidative stresses. *Plant physiol.* 123: 1. 223-234.

19. Chen, L.M., Lin, C.C. and Kao, C.H. 2000. Copper toxicity in rice seedlings: changes in antioxidative enzyme activities, H₂O₂ level, and cell wall peroxidase activity in roots. Bot. Bull. Acad. Sin. 41: 2000. 99-103.
20. Stewart, R.R. and Bewley, J.D. 1980. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. Plant Physiol. 65: 2. 245-248.
21. Wellburn, A.R. 1994. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. J. Plant Physiol. 144: 3. 307-313.
22. Lichtenthaler, H.K. and Wellburn, A.R. 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. Biochem. Soc. Trans. 11: 5. 591-592.
23. Shigeoka, S., Ishikawa, T., Tamoi, M., Miyagawa, Y., Takeda, T., Yabuta, Y. and Yoshimura, K. 2002. Regulation and function of ascorbate peroxidase isoenzymes. J. Exp. Bot. 53: 372, 1305-1319.
24. Mittler, R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. Trends Plant Sci. 7: 9. 405-410.
25. Alscher, R.G., Donahue, J.L. and Cramer, C.L. 1997. Reactive oxygen species and antioxidants: relationships in green cells. Physiol. Plant. 100: 2. 224-233.
26. Khan, A., Khan, A. L., Imran, M., Asaf, S., Kim, Y.H., Bilal, S., Numan, M., Harrasi, A.A.L., Rawahi, A.A.L. and Lee, I.J. 2020. Silicon-induced thermotolerance in *Solanum lycopersicum* L. via activation of antioxidant system, heat shock proteins, and endogenous phytohormones. BMC Plant Biol. 20: 1. 1-18.
27. Farghaly, F.A., Radi, A.A., Al-Kahtany, F.A. and Hamada, A.M. 2020. Impacts of zinc oxide nano and bulk particles on redox-enzymes of the *Punica granatum* callus. Sci. Rep. 10: 1. 1-13.
28. Zhang, W., Xie, Z., Wang, L., Li, M., Lang, D. and Zhang, X. 2017. Silicon alleviates salt and drought stress of *Glycyrrhiza uralensis* seedling by altering antioxidant metabolism and osmotic adjustment. J. Plant Res. 130: 3. 611-624.
29. Yang, T.P.B.W. and Poovaiah, B.W. 2002. Hydrogen peroxide homeostasis: activation of plant catalase by calcium/calmodulin. Proc. Natl. Acad. Sci. 99: 6. 4097-4102.
30. Ahmad, P. and Prasad, M.N.V. (eds.). 2011. Abiotic stress responses in plants: metabolism, productivity and sustainability. Springer Science & Business Media. Pp: 425-553.
31. Abedi, T. and Pakniyat, H. 2010. Antioxidant enzymes changes in response to drought stress in ten cultivars of oilseed rape (*Brassica napus* L.). Czech J. Genet. Plant Breed. 46: 1. 27-34.
32. Chaves, M.M., Maroco, J.P. and Pereira, J.S. 2003. Understanding plant responses to drought from genes to the whole plant. Funct. Plant Biol. 30: 3. 239-264.
33. Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Anee, T.I., Khan, M.I.R. and Fujita, M. 2018. Silicon-mediated regulation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress tolerance in *Brassica napus* L. S. Afr. J. Bot. 115: 2018. 50-57.
34. Seyed Sharifi, R., Khalilzadeh, R., Pirzad, A. and Anwar, S. 2020. Effects of biofertilizers and nano zinc-iron oxide on yield and physicochemical properties of wheat under water deficit conditions. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 51: 19. 2511-2524.
35. Elshayb, O.M., Nada, A.M., Ibrahim, H.M., Amin, H.E. and Atta, A.M. 2021. Application of silica nanoparticles for improving growth, yield, and enzymatic antioxidant for the hybrid rice EHR1 growing under water regime conditions. Mater. 14: 5. 1150.
36. Ashraf, M.P.J.C. and Harris, P.J.C. 2004. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. Plant Sci. 166: 1. 3-16.
37. Rostami, A.A., and Rahemi, M. 2013. Screening drought tolerance in Caprifig varieties in accordance to Responses of

- antioxidant enzymes. World Appl. Sci. J. 21: 8. 1213-1219.
38. Mika, A. and Luthje, S. 2003. Properties of guaiacol peroxidase activities isolated from corn root plasma membranes. Plant Physiol. 132: 3. 1489-1498.
39. Zuo, Y. and Zhang, F. 2011. Soil and crop management strategies to prevent iron deficiency in crops. Plant Soil. 339: 1-2. 83-95.
40. Yusefi-Tanha, E., Fallah, S., Rostamnejadi, A. and Pokhrel, L.R. 2020. Zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) as nanofertilizer: improvement on seed yield and antioxidant defense system in soil grown soybean (*Glycine max* cv. Kowsar). Bio Rxiv. 14: 2020. 1-39.
41. Habibi, G. 2014. Silicon supplementation improves drought tolerance in canola plants. Russ. J. Plant Physiol. 61: 6. 784-791.
42. Ma, D., Sun, D., Wang, C., Ding, H., Qin, H., Hou, J., Hung, X., Xie, Y. and Guo, T. 2017. Physiological responses and yield of wheat plants in zinc-mediated alleviation of drought stress. Front Plant Sci. 8: 860, 1-12.
43. Ma, D., Sun, D., Wang, C., Qin, H., Ding, H., Li, Y. and Guo, T. 2016. Silicon application alleviates drought stress in wheat through transcriptional regulation of multiple antioxidant defense pathways. J. Plant Growth Regul. 35: 1. 1-10.
44. Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R.D., Govindarajan, R., Kuriakose, S.V. and Prasad, M.N.V. 2006. Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri* L. Plant Physiol. Biochem. 44: 1. 25-37.
45. Sofo, A., Dichio, B., Xiloyannis, C. and Masia, A. 2004. Lipxygenase activity and proline accumulation in leaves and roots of olive trees in response to drought stress. Physiol. Plant. 121: 1. 58-65.
46. Allen, D.J. and Ort, D.R. 2001. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants. Trends Plant Sci. 6: 1. 36-42.
47. Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S. and Zhang, C. 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. Plant Sci. 169: 2. 313-321.
48. Jones, R. Ougham, H., Thomas, H. and Waaland, S. 2012. Molecular life of plants. Wiley-Blackwell. 581p.
49. Xiao, X., Xu, X. and Yang, F. 2008. Adaptive responses to progressive drought stress in two *Populus cathayana* populations. Silva Fenn. 42: 5. 705-719.
50. Lawlor, D.W. and Cornic, G. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. Plant Cell Env. 25: 2. 275-294.
51. Loggini, B., Scartazza, A., Brugnoli, E. and Navari-Izzo, F. 1999. Antioxidative defense system, pigment composition, and photosynthetic efficiency in two wheat cultivars subjected to drought. Plant Physiol. 119: 3. 1091-1100.
52. Jiang, Y. and Huang, B. 2001. Drought and heat stress injury to two cool-season turfgrasses in relation to antioxidant metabolism and lipid peroxidation. Crop Sci. 41: 2. 436-442.64.
53. Nabati, J., Kafi, M., Masoumi, A. and Mehrjerdi, M.Z. 2013. Effect of salinity and silicon application on photosynthetic characteristics of sorghum (*Sorghum bicolor* L.). Int. J. Agric. Sci. 3: 4. 483-492.
54. Kamaei, H., Eisvand, H.R., Daneshvar, M. and Nazarian, F. 2017. Effect of potassium, zinc and boron foliar application on canopy temperature, physiological traits and yield of two bread wheat cultivars under optimum and late planting dates. Electron. J. Crop Prod. 10: 4. 187-203. (In Persian).
55. Wiswanathan, B. 2009. Nanomaterials. Alpha science international limited, London, 250 p.
56. Taghipoure, Z., Asghari Zakaria, R., Zareh, N. and Shikhzade, P. 2014. The evaluation of some physiological traits in populations of *Aegilops triuncialis* under drought stress. Rangelandforest plant Breed Res. 22: 1. 55-66. (In Persian).

57. Gorgini Shabankareh, H., Khorasaninejad, S., Soltanlo, H. and Shariati, V. 2021. Evaluation of drought stress and foliar application with abscisic acid on yield, physiological and biochemical characteristics of lavender (*Lavandula angustifolia* cv. Organic Munstead). Electron. J. Crop Prod. 14: 2. 62-85. (In Persian).
58. Torabi, F., Majd, A., Enteshari, Sh. and Irian, S. 2013. Study of Effect of Silicon on Some Anatomical and Physiological Characteristics of Borage (*Borago officinalis* L.) in Hydroponic Conditions. Journal of Cell & Tissue. 4: 3. 275-285. (In Persian).
59. Singh, S., Sharma, H., Goswami, A., Datta, S. and Singh, S. 2000. In vitro growth and leaf composition of grapevine cultivars as affected by sodium chloride. Biol. Plant. 43: 2. 283-286.
60. Lee, B.R., Jung, W.J., Kim, K.Y., Avice, J.C., Ourry, A. and Kim, T.H. 2005. Transient increase of de novo amino acid synthesis and its physiological significance in water-stressed white clover. Funct. Plant Biol. 32: 9. 831-838.
61. Kim, T.H., Lee, B.R., Jung, W.J., Kim, K.Y., Avice, J.C. and Ourry, A. 2004. De novo protein synthesis in relation to ammonia and proline accumulation in water stressed white clover. Funct. Plant Biol. 31: 8. 847-855.
62. Lee, B.R., Jin, Y.L., Avice, J.C., Cliquet, J.B., Ourry, A. and Kim, T.H. 2009. Increased proline loading to phloem and its effects on nitrogen uptake and assimilation in water-stressed white clover (*Trifolium repens*). New Phytol. 182: 3. 654-663.
63. Anjum, F. 2003. Water stress in barley (*Hordeum vulgare* L.) effect on morphological characters. Pak. J. Agri. Sci. 40: 1. 43-44.
64. Gang, L. and Jiashu, C. 2001. Effects of silicon on earliness and photosynthetic characteristics of melon. Acta Hort. Sin. 28: 5. 421-424.
65. Emadian, S.F. and Newton, R.J. 1989. Growth enhancement of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seedlings by silicon. J. Plant. Physiol. 134: 1. 98-103.
66. Narendhran, S., Rajiv, P. and Sivaraj, R. 2016. Toxicity of ZnO nanoparticles on germinating *Sesamum indicum* (Co-1) and their antibacterial activity. Bull. Mater. Sci. 39: 2. 415-421.
67. Zahir, A.Z., Malik M.A. and Arshod, M. 2000. Improving crop yield by application of an auxin precursor L. tryptophan. J. Biol. Sc. 3:10. 133-135.
68. Al-Whaili, H.K.K.S. and Al-Rubai'i, B.M.F. 2020. The effect of phosphorus and spraying with tryptophan on some of the shape and physiological characteristics of the coriander plant (*Corianderum Sativum* L.). Plant Arch. 20: 1. 631-638.
69. Goldani, M. and Rezvani, P. 2007. The effect of different irrigation regimes and planting dates on phenology and growth indices of three chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars in Mashhad. J. Agric. Sci. Nature. Resour. 14: 1. 61-74. (In Persian)
70. Mahrookashani, A., Siebert, S., Hüging, H. and Ewert, F. 2017. Independent and combined effects of high temperature and drought stress around anthesis on wheat. J. Agron. Crop Sci. 203: 6. 453-463.
71. Kim, Y.H., Khan, A.L., Waqas, M. and Lee, I.J. 2017. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. Front Plant Sci. 8: 510. 1-10.
72. Estrada-Luna, A.A. and Davies Jr, F.T. 2003. Arbuscular mycorrhizal fungi influence water relations, gas exchange, abscisic acid and growth of micropropagated chile ancho pepper (*Capsicum annuum*) plantlets during acclimatization and postacclimatization. J. Plant Physiol. 160: 9. 1073-1083.
73. Siddique. M.H. Whaibi. M.H. Al. Firoz. M. and Khaishany. M.Y. Al. 2015. Role of nanoparticle in plants in nanotechnology and plant sciences. Springer International Publishing. 123: 19-35.