



Effect of Water Limitation, Biofertilizers, and Nano Silicon on Compatible Osmolytes and Biochemical Traits of X *Triticosecale*

Zhila Nazari¹✉ | Raouf Seyed Sharifi² | Hamed Narimani³ | Sara Mohammadi Kale Sarlou⁴

1. Corresponding Author, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: zhilanazari@uma.ac.ir
2. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: raouf_ssharifi@uma.ac.ir
3. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: hamed.narimani.72@uma.ac.ir
4. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: mohammadisara1@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 10 November 2021
Received in revised form:
27 February 2022
Accepted: 10 March 2022
Published online:
17 December 2022

Keywords:

Anthocyanins,
antioxidant enzymes,
drought stress,
mycorrhiza,
vermicompost.

ABSTRACT

In order to study the effects of water limitation, biofertilizers, and nanosilicon on compatible osmolytes and biochemical traits of triticale, an experiment has been conducted as factorial based on randomized complete block design with three replications in research greenhouse faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabil during 2020. The experimental factors include irrigation (full irrigation as control; irrigation withholding at 50% of heading as moderate water limitation and irrigation withholding at 50% of booting stages as severe water imitation), application of bio fertilizers (no application of bio fertilizers as control, application of vermicompost, *Mycorrhiza*, both application vermicompost and *Mycorrhiza*), foliar application of nano silicon (foliar application with water as control and foliar application of 2 g.L⁻¹ nano silicon). The results show that both application of vermicompost, *Mycorrhiza* and foliar application nano silicon under irrigation withholding in booting stage have increased the activity of catalase, polyphenol oxidase enzymes, proline, and soluble sugar content (49.17%, 50.64%, 44.92%, and 52.22%, respectively) compared to no application of bio fertilizers and nano silicon under normal irrigation conditions. Also, both application of vermicompost, *Mycorrhiza*, and foliar application of nano silicon in normal irrigation condition are capable of decreasing hydrogen peroxide and malondialdehyde content (55.34% and 53.64%, respectively) and raising grain yield by 59.52%, compared to no application of bio fertilizers and nano silicon under irrigation withholding in the booting stage condition. It seems that the application of biofertilizers and nano silicon can increase grain yield triticale under water limitation due to improving the biochemical traits.

Cite this article: Nazari, Zh., Seyed Sharifi, R., Narimani, H., & Mohammadi Kale Sarlou, S. (2022). Effect of Water Limitation, Biofertilizers, and Nano Silicon on Compatible Osmolytes and Biochemical Traits of X *Triticosecale*. *Journal of Crops Improvement*, 24 (4), 1199-1215. DOI: <http://doi.org/10.22059/jci.2022.333768.2639>





تأثیر محدودیت آبی، کودهای زیستی و نانوسیلیکون بر محتوای اسمولیت‌های سازگار و صفات بیوشیمیایی تربیتکاله

ژیلا نظری^۱ | رئوف سیدشریفی^۲ | حامد نریمانی^۳ | سارا محمدی کله‌سرلو^۴

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: zhilanazari@uma.ac.ir
۲. استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: raouf_ssharifi@uma.ac.ir
۳. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: hamed.narimani.72@uma.ac.ir
۴. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: mohammadiisara@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

به منظور بررسی تأثیر محدودیت آبی، کودهای زیستی و نانوسیلیکون بر محتوای اسمولیت‌های سازگار و صفات بیوشیمیایی تربیتکاله، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در گلخانه پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۹۹-۱۳۹۸ اجرا شد. فاکتورهای موردبررسی شامل آبیاری (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد، محدودیت ملایم آبی با قطع آبیاری در ۵۰ درصد مرحله آبستنی، محدودیت شدید آبی یا قطع آبیاری در ۵۰ درصد مرحله سنبله‌دهی)، کاربرد کودهای زیستی (عدم کاربرد به‌عنوان شاهد، کاربرد ورمی‌کمپوست، میکوریزا، کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست و میکوریزا) و محلول‌پاشی نانوسیلیکون (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد و محلول‌پاشی دو گرم در لیتر نانوسیلیکون) بود. نتایج نشان داد که کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی نانوسیلیکون تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پلی‌فنل‌اکسیداز، محتوای پرولین و قندهای محلول را به ترتیب ۴۹/۱۷، ۵۰/۶۴، ۴۴/۹۲ و ۵۲/۲۲ درصد نسبت به عدم کاربرد ورمی‌کمپوست، میکوریزا و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل افزایش داد. هم‌چنین کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید را به ترتیب ۵۵/۳۴ و ۵۳/۶۴ درصد کاهش و عملکرد دانه را ۵۹/۵۲ درصد نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی افزایش داد. به نظر می‌رسد کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون می‌تواند با بهبود صفات بیوشیمیایی، عملکرد دانه را در شرایط محدودیت آبی افزایش دهد.

کلیدواژه‌ها:

آنتوسیانین، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، تنش خشکی، میکوریزا، ورمی‌کمپوست.

استناد: نظری، ژ، سیدشریفی، ر، نریمانی، ح. و محمدی کله‌سرلو، س (۱۴۰۱). تأثیر محدودیت آبی، کودهای زیستی و نانوسیلیکون بر محتوای اسمولیت‌های سازگار و صفات بیوشیمیایی تربیتکاله. *به زراعی کشاورزی*، ۲۴ (۴)، ۱۱۹۹-۱۲۱۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jci.2022.333768.2639>



۱. مقدمه

غلات یکی از اجزای اصلی رژیم غذایی انسان بوده و نقش مهمی در شکل‌گیری تمدن بشری ایفا کرده‌اند (Yang, 2018). تریتیکاله^۱ غله دانه‌ریزی است که توسط انسان از تلاقی گندم به‌عنوان والد مادری و چاودار به‌عنوان والد پدری به‌وجود آمده است تا ویژگی‌های عملکرد و کیفیت دانه از گندم و مقاومت به بیماری‌ها و تنش‌های محیطی از چاودار، در یک گیاه ظهور پیدا کند (Bezabih *et al.*, 2019). خشکی به‌عنوان مهم‌ترین تنش تأثیرگذار در کاهش رشد و عملکرد گیاهان زراعی است (Hu *et al.*, 2014)، که منجر به بروز تغییرات مورفولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی در گیاهان می‌شود. از جمله تغییرات مهم بیوشیمیایی در گیاهان در معرض محدودیت آبی، تولید گونه‌های فعال اکسیژن است که با پیوندهای دوگانه اسیدهای چرب غیراشباع در غشا، واکنش‌های زنجیره‌ای پراکسیداسیون را هدف گرفته و منجر به تخریب اسیدهای چرب می‌شوند (Heshmati *et al.*, 2016). گیاهان جهت مواجهه با تنش و جلوگیری از پراکسیداسیون لیپیدی و افزایش مالون‌دی‌آلدئید ناشی از افزایش گونه‌های فعال اکسیژن (پراکسیدهدروژن)، سازوکارهای آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی دارند که از سازوکارهای آنزیمی می‌توان به افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز تحت شرایط محدودیت آبی اشاره کرد (Ebadi, 2018). همچنین در شرایط خشکی به‌منظور ادامه جذب آب، گیاه از طریق تجمع ترکیبات اسمزی از جمله کربوهیدرات‌های محلول و پرولین، پتانسیل اسمزی خود را کاهش می‌دهد تا به‌وسیله فرایند تنظیم اسمزی، اثر خشکی را کاهش دهد (Muscolo *et al.*, 2016).

کاربرد کودهای زیستی همانند قارچ میکوریزا برای تعدیل اثر ناشی از محدودیت آبی، تولید هورمون‌های گیاهی و کاهش آسیب‌های ریشه‌ای در گیاهان مفید است. البته قارچ‌های میکوریزا به‌طور طبیعی در خاک وجود دارند، اما تعداد و تراکم آن‌ها ممکن است در خاک پایین باشد، از این‌رو کاربرد آن‌ها می‌تواند جمعیت این قارچ‌ها را به حد مطلوب رسانده و منجر به بروز اثر مفید آن‌ها در خاک شوند (Seyed Sharifi & Namvar, 2016).

Khalafaiiah *et al.* (2008) گزارش کردند که کاربرد میکوریزا تحت شرایط تنش خشکی با افزایش تولید و تجمع محتوای پرولین و قندهای محلول در تنظیم اسمزی و همچنین افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز، موجب بهبود سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گندم شد. Aghaei (2019) اظهار داشت کاربرد میکوریزا تحت شرایط تنش با افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول و همچنین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی موجب کاهش محتوای پراکسیدهدروژن و مالون‌دی‌آلدئید گندم شد.

استفاده از کودهای آلی به‌منظور بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک، می‌تواند در تحمل به شرایط تنش خشکی در گیاهان، مدنظر قرارگیرد. ورمی‌کمپوست یک کود آلی بیولوژیک است که از طریق تبدیل ضایعات آلی، طی یک فرایند توسط عمل مشترک کرم‌های خاکی و میکروارگانیسم‌های خاک تولید می‌شود (Joshi *et al.*, 2015). ورمی‌کمپوست از قدرت بالای جذب و نگهداری آب و عناصر غذایی، تخلخل زیاد، تهویه و زهکشی مناسب برخوردار بوده و استفاده از آن در کشاورزی پایدار، علاوه بر افزایش جمعیت و فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید خاک در جهت فراهمی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم محلول عمل نموده و موجب بهبود رشد و عملکرد گیاهان زراعی می‌شود (Azeez *et al.*, 2010). همچنین، با داشتن مقادیر زیاد هیومیک اسید، به‌عنوان یک کود زیستی محرک رشد گیاه محسوب شده و موجب فعال‌شدن عملکرد آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کنترل رادیکال‌های آزاد می‌شود. در بررسی Mamnabi *et al.* (2020) کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط تنش خشکی موجب بهبود محتوای فسفر و نیتروژن برگ و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای اسمولیت‌های سازگار (محتوای پرولین و قندهای

محلول) شد، که با کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید موجب بهبود محتوای کلروفیل برگ، پایداری غشا و در نهایت افزایش عملکرد دانه کلزا شد. Mousavi Dehmordy *et al.* (2018) اظهار داشتند که در شرایط خشکی، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن مانند پراکسید هیدروژن، منجر به پراکسیداسیون چربی‌ها و آسیب به غشا می‌شود در این راستا کاربرد ورمی‌کمپوست از طریق بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای پرولین، موجب کاهش خسارت‌های ناشی از تنش می‌شود.

سیلیکون پس از اکسیژن، دومین عنصر فراوان در خاک است که محدودیت‌های زیست‌محیطی نظیر تنش فلزات سنگین، شوری، خشکی، سرما و یخ‌زدگی را کاهش می‌دهد (Zare *et al.*, 2015) و با دو فرایند عمده به مقاومت در برابر تنش کمک می‌کند؛ اول، حفاظت فیزیکی و مکانیکی که با رسوبات سیلیکون ایجاد می‌شود و دوم، پاسخ‌های بیوشیمیایی که موجب تغییرات متابولیکی می‌شوند. کاربرد سیلیکون با افزایش سنتز آنتی‌اکسیدان‌های درونی، تنش اکسیداتیو را در گیاه کاهش داده و می‌تواند آثار تنش آبی را تعدیل و رشد گیاه را افزایش دهد (Imtiaz *et al.*, 2016). هم‌چنین با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از جمله سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و گلوتاتیون ردوکتاز و افزایش ساخت و تجمع برخی از آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی، موجب تعادل سیستم دفاعی گیاه تحت شرایط خشکی می‌شود (Imtiaz *et al.*, 2016; Hattori *et al.*, 2007). Zare *et al.* (2015) اظهار داشتند که کاربرد سیلیکون تحت شرایط تنش با بهبود محتوای اسمولیت‌های سازگار (پرولین و قندهای محلول)، محتوای آنتوسیانین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، موجب کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ ذرت شد. Abbasi *et al.* (2018) اظهار داشتند کاربرد نانوسیلیکون در شرایط تنش خشکی با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای پرولین موجب کاهش محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید در گندم شد. Ahmadi *et al.* (2021) گزارش کردند که محلول پاشی نانوسیلیکون در مرحله ساقه‌دهی تحت شرایط محدودیت آبی با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز) و اسمولیت‌های سازگار (پرولین و قندهای محلول)، موجب کاهش محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید و در نهایت بهبود عملکرد دانه گندم شد.

اهمیت تربیتکاله به‌عنوان یکی از غلات دو منظوره و مصادف‌شدن مراحل حساس رشد زایشی این گیاه در بیش‌تر مناطق خشک و نیمه‌خشک با شرایط آب‌وهوایی گرم و خشک و هم‌چنین نقش ورمی‌کمپوست، میکوریزا و نانوسیلیکون در بهبود عملکرد و تعدیل اثر ناشی از محدودیت آبی و بررسی‌های محدود انجام‌شده در این زمینه، موجب شد تا اثر میکوریزا، ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون بر عملکرد، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و برخی صفات بیوشیمیایی تربیتکاله در شرایط محدودیت آبی مورد بررسی قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۳۹۸ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد، قطع آبیاری در ۵۰ درصد مراحل آبستنی و سنبله‌دهی به‌ترتیب به‌عنوان محدودیت شدید و ملایم آبی معادل با کد ۳۰ و ۴۳ براساس مقیاس BBCH^۱)، کاربرد کودهای زیستی در چهار

1. Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry; BBCH

سطح (عدم کاربرد کودهای زیستی به‌عنوان شاهد، کاربرد ورمی‌کمپوست، میکوریزا و کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست و میکوریزا) و محلول‌پاشی نانوسیلیکون در دو سطح (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد و محلول‌پاشی دو گرم در لیتر نانوسیلیکون) بود.

محلول‌پاشی نانوسیلیکون در مراحل پنجه‌زنی و ساقه‌دهی (به‌ترتیب معادل با کد ۲۱ و ۳۰ از مقیاس BBCH) اعمال شد. اولین آبیاری بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی بسته به شرایط گلخانه، نیاز گیاه زراعی و سطوح ذکرشده انجام شد. کاشت در گلدان‌هایی با قطر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری انجام شد. جهت اعمال تیمار میکوریزا از قارچ میکوریزا موسه^۱ استفاده شد که مخلوطی از اسپور، هیف و قطعات جداشده از ریشه‌های آلوده بود که از شرکت زیست فناوریان توران تهیه و به مقدار ۲۰ گرم در هر مترمربع خاک براساس توصیه شرکت مذکور استفاده شد. در هر گلدان ۵۰ بذر از تربیتکاله رقم سناباد برای رسیدن به تراکم ۴۰۰ بذر در مترمربع که مطلوب و توصیه‌شده برای این رقم است کشت شد. در طول دوره رشد علف‌های هرز به طریقه دستی کنترل شدند. گلدان‌ها در شرایط گلخانه‌ای در دمای ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد با طول دوره روشنایی ۱۵-۱۶ ساعت (با استفاده از ترکیبی از لامپ‌های معمولی و مهتابی) نگهداری شدند. مقدار ورمی‌کمپوست مصرفی در این آزمایش ۱۰ تن در هکتار بود که از شرکت گلیدا خریداری و مشخصات فیزیکوشیمیایی آن در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. نتایج تجزیه کود ورمی‌کمپوست

pH	EC (dSm ⁻¹)	(mg/kg)						مشخصه
		Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd	
۷/۶۴	۱/۱۲	۵۰۰۰	۲۷۵	۲۰	۱۱۰	۱۹	۱	مقادیر
	C/N	OC	N	P	K	Ca	Mg	مشخصه
				(%)				
	۲۱/۲۵	۳۲/۹	۱/۵۵	۰/۴	۰/۴	۲/۷۳	۰/۹۵	مقادیر

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنول‌اکسیداز) از روش *Sudhakar et al.* (2001)، محتوای قندهای محلول به‌روش *Dubios et al.* (1956)، اندازه‌گیری محتوای آنتوسیانین با روش *Wagner* (1979)، محتوای مالون‌دی‌آلدهید از روش *Stewart & Bewley* (1980)، محتوای پراکسید هیدروژن با روش *Alexieva et al.* (2001)، محتوای پرولین از روش *Bates et al.* (1973) استفاده شد. در زمان رسیدگی تعداد هشت بوته به ظاهر مشابه که به‌طور تصادفی در هر گلدان مشخص شده بود برداشت شد، سپس میانگین داده‌های حاصل، به‌عنوان ارزش صفت عملکرد تک‌بوته در تجزیه و تحلیل داده‌ها به‌کار گرفته شد. برای تجزیه داده‌ها از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) استفاده شد. میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز، پلی‌فنل‌اکسیداز)

تأثیر کودهای زیستی، نانوسیلیکون، سطوح آبیاری و برهم‌کنش هم‌زمان این سه عامل بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پلی‌فنل‌اکسیداز در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). هم‌چنین تأثیر کودهای زیستی، نانوسیلیکون، سطوح آبیاری و برهم‌کنش هم‌زمان کاربرد کودهای زیستی و محدودیت آبی بر فعالیت آنزیم

1. *Glomus moseae*

پراکسیداز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). بیش‌ترین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پلی‌فنل‌اکسیداز (به‌ترتیب ۵۴/۱۸ و ۹۳/۸۲ تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) در کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی نانوسیلیکون تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی بود (جدول ۳)، که از افزایش به‌ترتیب ۴۹/۱۷ و ۵۰/۶۴ درصدی نسبت به عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل برخوردار بود (جدول ۳). هم‌چنین کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست و میکوریزا تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی موجب افزایش ۴۷/۷۵ درصدی فعالیت آنزیم پراکسیداز نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و آبیاری کامل شد (جدول ۴). هم‌چنین مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد که بیش‌ترین فعالیت آنزیم پراکسیداز در کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست با میکوریزا (۱۰۹/۳) تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه، محلول‌پاشی نانوسیلیکون (۱۰۱/۷۹) تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه، در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی (۱۱۰/۷۱) تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) و کم‌ترین آن‌ها در عدم کاربرد کودهای زیستی و عدم محلول‌پاشی در آبیاری کامل به‌دست آمد (جدول ۵). خشکی با آسیب‌رساندن به رنگدانه‌های کلروفیل و سیستم انتقال الکترون فتوسنتز، منجر به تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود. گیاهان برای مقابله با اثرات نامطلوب گونه‌های فعال اکسیژن، سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی را توسعه می‌دهند (Wu *et al.*, 2012)، که در برخی گیاهان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مثل آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز در شرایط محدودیت آبی افزایش می‌یابد (Abdel Latef, 2010).

برخی پژوهش‌گران اظهار داشتند استفاده از میکوریزا به‌علت افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاه، ساخت برخی آنزیم‌ها از جمله آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش می‌دهد که موجب کاهش انباشت رادیکال‌های آزاد می‌شود (Ageeb, 2018) (Akladios & Mohamed, 2018). Zare *et al.* (2015) نیز بیان کردند که هم‌زیستی ریشه گیاه با قارچ میکوریزا با بهبود توانایی گیاه در جذب آب و مواد غذایی، موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود. از طرفی ورمی‌کمپوست با داشتن مواد هیومیک و برخی هورمون‌ها نظیر آبسزیک‌اسید، اکسین و سیتوکینین‌ها می‌تواند در افزایش فعالیت این آنزیم‌ها مؤثر باشد، به‌طوری‌که در پژوهشی گزارش شده است محلول‌پاشی با اکسین، آبسزیک‌اسید و بنزیل آدنین موجب افزایش میزان آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز شد (Pan *et al.*, 2013). فعالیت این آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نقش کلیدی در بقای گیاه در شرایط تنش بازی می‌کند. از آنجایی‌که ورمی‌کمپوست مورد استفاده (جدول ۱) دارای مقادیر بالایی از عناصر ریزمغذی به‌ویژه آهن و روی است که در ساختار آنزیم‌ها شرکت دارند، به‌نظر می‌رسد دلیل افزایش فعالیت این آنزیم‌ها، وجود این عناصر در ورمی‌کمپوست و جذب آن توسط گیاه باشد (Adamipour *et al.*, 2016). Shen *et al.* (2010) افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان تیمار شده با سیلیکون را به اثر این ماده در جلوگیری از تخریب سلول در برابر حمله گونه‌های فعال اکسیژن و کاهش محتوای پراکسید هیدروژن و رادیکال‌های آزاد نسبت دادند. به‌نظر می‌رسد که بخشی از افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ناشی از کاربرد سیلیکون باشد که با محافظت از غشای سلول در برابر پراکسیداسیون لیپیدی، موجب تحمل گیاه به شرایط تنش و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی همانند کاتالاز و پراکسیداز می‌شود. Shekari *et al.* (2017) گزارش کردند کاربرد عنصر سیلیکون می‌تواند سنتز آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را افزایش و اثرات منفی حاصل از تنش خشکی را به شدت کاهش دهد. Young *et al.* (2013) افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی را، به کاهش خسارت گونه‌های فعال اکسیژن و محافظت سلول‌ها در برابر تنش اکسیداتیو نسبت دادند که می‌تواند آسیب وارده به گیاه را کاهش و منجر به بهبود عملکرد شوند.

جدول ۲. تجزیه واریانس تأثیر کودهای زیستی، نانوسیلیکون و محدودیت آبی بر عملکرد دانه و برخی صفات بیوشیمیایی تربیتکاله

منابع تغییر	درجه آزادی	کاتالاز	پراکسیداز	پلی فنول اکسیداز	پروتئین	قندهای محلول	مالون دی‌آلدهید	پراکسید هیدروژن	آنتوسیانین	عملکرد دانه	میانگین مربعات (M.S)	
											تکرار	خطا
تکرار	۲	۳۰۶/۲۲**	۷۳۰۳/۱۵**	۱۹۰۰/۳**	۶/۰۰۹**	۱۲۱۹/۵**	۰/۰۰۴۱**	۰/۰۳۰۸**	۰/۰۰۰۰۰۴۲**	۱۰/۳**	۹/۹	۷/۲
سطوح آبیاری (S)	۲	۵۸۶/۲۵**	۲۷۲۲/۴۶**	۱۶۳۶/۱**	۱۱/۵۷۵**	۲۳۸۹/۰۲**	۰/۰۱۱۸**	۰/۰۳۱۷**	۰/۰۰۰۰۱۳۶**	۲/۵**	۹/۹	۷/۲
کودهای زیستی (B)	۳	۲۷۵/۶۶**	۱۵۵۹/۰۸**	۹۵۸/۷۵**	۵/۱۵۸**	۱۱۰۳/۲**	۰/۰۰۵۹**	۰/۰۲۸۰**	۰/۰۰۰۰۰۹۶**	۳/۰۸**	۹/۹	۷/۲
نانوسیلیکون (N)	۱	۸۵/۸۰**	۳۶۹/۷۳**	۲۰۳/۵۴**	۱/۴۴۷**	۳۴۰/۷۷**	۰/۰۰۰۰۹**	۰/۰۱۳۳**	۰/۰۰۰۰۰۳۳**	۱/۹**	۹/۹	۷/۲
S×B	۶	۸۰/۵۶**	۳۹/۱۳**	۳۳/۳۷**	۰/۱۸۲۵**	۳۰/۰۸۰**	۰/۰۰۰۰۲۲**	۰/۰۰۰۰۱۲ns	۰/۰۰۰۰۰۳۱**	۰/۰۳۹**	۹/۹	۷/۲
S×H	۲	۰/۵۱۰ns	۹/۹۵ns	۲۶/۱۲۳**	۰/۰۳۴۳**	۲۰/۶۱۷**	۰/۰۰۰۰۶ns	۰/۰۰۰۰۲۶ns	۰/۰۰۰۰۰۱۴ns	۰/۰۱۷ns	۹/۹	۷/۲
B×H	۳	۰/۵۳۰ns	۳/۶۲ns	۱۵/۲۹**	۰/۰۷۹۵*	۷/۹۱۳**	۰/۰۰۰۰۷*	۰/۰۰۰۰۲۳ns	۰/۰۰۰۰۰۱۸ns	۰/۰۵۲**	۹/۹	۷/۲
S×B×H	۶	۴/۱۸۳*	۱۲/۱۰ns	۷/۹۷*	۰/۱۲۹۱**	۹/۶۲۵**	۰/۰۰۰۰۱۶**	۰/۰۰۰۰۶۷**	۰/۰۰۰۰۰۱۵*	۰/۰۰۵۷**	۹/۹	۷/۲
خطا	۴۶	۱/۰۵۶۴	۵/۷۲۶	۳/۲۶۹	۰/۰۰۶۲	۱/۹۹۰	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۰۰۵	۳/۰۳	۹/۹	۷/۲
C.V. %	-	۷/۲	۹/۱۳	۹/۲	۷/۸	۶/۶	۹/۳	۸/۲	۷/۲	۹/۹	۹/۹	۷/۲

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

جدول ۳. مقایسه میانگین تأثیر کاربرد کودهای زیستی، نانوسیلیکون و محدودیت آبی بر عملکرد دانه و برخی صفات بیوشیمیایی تربیتکاله

تربیتکاله	تربیت تیماری	کاتالاز	پلی فنول پراکسیداز	پروتئین	قندهای محلول	پراکسید هیدروژن	مالون دی‌آلدهید	آنتوسیانین	عملکرد دانه
		(OD µg protein/min)	(µg g ⁻¹ FW)	(µg g ⁻¹ FW)	(mg. g ⁻¹ FW)	(µmol.gFW ⁻¹)	(µmol.gFW ⁻¹)	(g per plant)	(g per plant)
۲/۹jk	I ₁ ×B ₁ ×N ₁	۳۶/۳۲r	۶۲/۲۸q	۵/۵۲q	۶۸/۶۵r	۰/۴۲۹cd	۰/۲۰۱fg	۰/۰۱۶q	۲/۹jk
۳/۱۶hi	I ₁ ×B ₂ ×N ₁	۳۷/۸۸pqr	۶۴/۲۹op	۵/۶۵pq	۷۳/۱۴op	۰/۳۷۸fg	۰/۱۶۲lm	۰/۰۱۷opq	۳/۱۶hi
۳/۶de	I ₁ ×B ₃ ×N ₁	۳۹/۱۹no	۶۷/۹۳lmn	۶/۱۰m	۷۹/۹۳kl	۰/۳۵۳ijk	۰/۱۶۳lm	۰/۰۱۸mno	۳/۶de
۴/۰۲a	I ₁ ×B ₄ ×N ₁	۴۴/۱۵jk	۷۴/۶۶i	۶/۴۸jk	۸۳/۳۵ij	۰/۳۳۰lm	۰/۱۵۴no	۰/۰۲۱hij	۴/۰۲a
۳/۴۷ef	I ₁ ×B ₁ ×N ₂	۳۷/۳۴mn	۶۶/۵۲pq	۵/۶۲q	۷۰/۳۵qr	۰/۳۸۷fg	۰/۱۹۱hi	۰/۰۱۷pq	۳/۴۷ef
۳/۷۹bc	I ₁ ×B ₂ ×N ₂	۳۹/۷۲no	۷۰/۱۸mn	۶/۱۷m	۷۵/۱۶no	۰/۳۳۶kml	۰/۱۶۹l	۰/۰۱۹lmn	۳/۷۹bc
۴/۰۱a	I ₁ ×B ₃ ×N ₂	۴۱/۹۳lm	۷۲/۲۴klm	۵/۸۴no	۸۱/۶۳jk	۰/۳۳۰lm	۰/۱۵۴no	۰/۰۱۹klm	۴/۰۱a
۴/۰۲a	I ₁ ×B ₄ ×N ₂	۴۷/۸۸fg	۸۳/۲۰gh	۶/۹۵deg	۸۸/۰۳g	۰/۳۱۸lm	۰/۱۵۱o	۰/۰۲۲efg	۴/۰۲a
۲/۶mn	I ₂ ×B ₁ ×N ₁	۳۸/۳۷opq	۶۴/۵۹op	۵/۷۶op	۷۲/۲۲pq	۰/۴۶۸b	۰/۲۲۲bc	۰/۰۱۷pq	۲/۶mn
۲/۷۵lm	I ₂ ×B ₂ ×N ₁	۴۰/۳۰mn	۷۶/۰۳jk	۶/۴۲kl	۷۸/۳۳lm	۰/۴۰۱ef	۰/۱۹۶gh	۰/۰۲۰ijk	۲/۷۵lm
۳/۲۸gh	I ₂ ×B ₃ ×N ₁	۴۵/۶۱hij	۸۱/۷۵ij	۶/۶۰ij	۸۷/۴۱gh	۰/۴۰۰ef	۰/۱۷۸k	۰/۰۲۱ghi	۳/۲۸gh
۳/۷cd	I ₂ ×B ₄ ×N ₁	۴۹/۰۴ef	۸۵/۹۳ef	۷/۱۵e	۹۶/۵۴d	۰/۳۶۷ghi	۰/۱۶۸l	۰/۰۲۳cd	۳/۷cd
۳/۰۳ij	I ₂ ×B ₁ ×N ₂	۴۰/۵۶mn	۶۹/۷۸no	۵/۹۷n	۷۶/۶۷mn	۰/۴۴۲c	۰/۲۱۲de	۰/۰۱۸nop	۳/۰۳ij
۳/۰۴ij	I ₂ ×B ₂ ×N ₂	۴۵/۳۴ij	۷۷/۴۴gh	۷/۰۷ef	۸۹/۹۵fg	۰/۴۰۰ef	۰/۱۷۷k	۰/۰۲۰jkl	۳/۰۴ij
۳/۵۱ef	I ₂ ×B ₃ ×N ₂	۴۶/۶۵ghi	۸۰/۲۸fg	۶/۷۲hi	۹۳/۷۵ce	۰/۳۷۴gh	۰/۱۸۷ij	۰/۰۲۳de	۳/۵۱ef
۳/۹ab	I ₂ ×B ₄ ×N ₂	۵۰/۲۷de	۸۸/۲۷ef	۷/۴۶c	۹۹/۵۸b	۰/۳۴۲ijk	۰/۱۵۸mn	۰/۰۲۴bc	۳/۹ab
۲/۵۲n	I ₃ ×B ₁ ×N ₁	۴۳/۳۳kl	۷۲/۶۹jk	۶/۳۲l	۸۵/۴۹hi	۰/۴۹۴a	۰/۲۳۲a	۰/۰۱۹lmn	۲/۵۲n
۲/۵۵n	I ₃ ×B ₂ ×N ₁	۴۹/۲۸ef	۸۴/۶۳ce	۷/۵۸c	۹۴/۲۴cd	۰/۴۶۳b	۰/۲۱۶cd	۰/۰۲۲ef	۲/۵۵n
۲/۸۴kl	I ₃ ×B ₃ ×N ₁	۵۲/۰۹bc	۹۱/۰۳bc	۷/۳۱d	۹۹/۲۳b	۰/۴۱۶de	۰/۲۱۷bc	۰/۰۲۴cd	۲/۸۴kl
۳/۳۸fg	I ₃ ×B ₄ ×N ₁	۵۳/۱۰ab	۹۳/۳۸ab	۷/۸۴b	۱۰۲/۳a	۰/۴۱۴de	۰/۲۰۵ef	۰/۰۲۵ab	۳/۳۸fg
۲/۶۶mn	I ₃ ×B ₁ ×N ₂	۴۷/۰۹gh	۷۸/۸۹hi	۶/۸۴gh	۹۱/۵۷ef	۰/۴۷۳ab	۰/۲۲۴b	۰/۰۲۲fgh	۲/۶۶mn
۲/۸۴kl	I ₃ ×B ₂ ×N ₂	۵۱/۱۰cd	۸۸/۳۹c	۷/۷۱b	۹۹/۹۷b	۰/۴۱۶de	۰/۲۱۶bcd	۰/۰۲۵ab	۲/۸۴kl
۳/۳۷fg	I ₃ ×B ₃ ×N ₂	۵۲/۸۳ab	۹۰/۶۲ab	۷/۷۹b	۱۰۲/۳a	۰/۴۱۵de	۰/۲۰۷ef	۰/۰۲۵ab	۳/۳۷fg
۳/۶۹cd	I ₃ ×B ₄ ×N ₂	۵۴/۱۸a	۹۳/۸۲a	۸/۰۰a	۱۰۴/۵a	۰/۳۶۲hij	۰/۱۸۳jk	۰/۰۲۶a	۳/۶۹cd
۰/۱۶۳۷	(0.05%) LSD	۱/۶۸	۳/۹۳	۰/۱۳	۲/۳۲	۲/۰۲	۰/۰۰۷	۰/۰۰۱۲	۰/۱۶۳۷

I₁، I₂ و I₃: به ترتیب آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله سنبله‌دهی و آبستنی.
B₁، B₂ و B₃: به ترتیب عدم کاربرد کودهای زیستی، کاربرد ورمی کمپوست، میکوریزا و کاربرد هم‌زمان ورمی کمپوست و میکوریزا.
N₁ و N₂: به ترتیب عدم محلول‌پاشی و محلول‌پاشی دو گرم در لیتر نانوسیلیکون.

(OD µg protein min⁻¹) تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه؛ (µg g⁻¹FW) میکروگرم بر گرم وزن تر برگ
(µmol g⁻¹FW) میکرومول بر گرم وزن تر برگ؛ (g per plant) گرم در بوته

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD هم ندارند.

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر کودهای زیستی و محدودیت آبی، نانوسیلیکون در کودهای زیستی بر فعالیت آنزیم پراکسیداز

پراکسیداز (OD $\mu\text{g protein min}^{-1}$)			تیماز
سطوح آبیاری			
I ₁	I ₂	I ₃	
۷۹/۸۴h	۸۴/۷۸g	۹۶/۹۱e	B1
۸۶/۳۷g	۹۸/۳۹de	۱۱۱/۹۴bc	B2
۹۲/۸۲f	۱۰۱/۱۹d	۱۱۵/۹۹ab	B3
۱۰۰/۹۵de	۱۰۹/۲۳c	۱۱۷/۹۷a	B4
۴/۱۱۸			LSD(0.05%)

I₁، I₂ و I₃: به ترتیب آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله سنبله‌دهی و آبستنی.
 B₁، B₂، B₃ و B₄: به ترتیب عدم کاربرد کودهای زیستی، کاربرد ورمی کمپوست، میکوریزا و کاربرد هم‌زمان ورمی کمپوست و میکوریزا.
 N₁ و N₂: به ترتیب عدم محلول‌پاشی و محلول‌پاشی دو گرم در لیتر نانوسیلیکون.
 (OD $\mu\text{g protein min}^{-1}$) تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه
 میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری براساس آزمون LSD هم ندارند.

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر اصلی کاربرد کودهای زیستی، نانوسیلیکون و محدودیت آبی بر فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ پرچم تریتیکاله

پراکسیداز (OD $\mu\text{g protein min}^{-1}$)	تیماز
	سطوح آبیاری
۸۶/۴۹c	I ₁
۹۸/۳۷b	I ₂
۱۱۰/۷۱a	I ₃
۱/۳۹	LSD (0.05%)
کودهای زیستی	
۸۷/۱۸d	B ₁
۹۸/۸۷c	B ₂
۱۰۲/۶۷b	B ₃
۱۰۹/۳۸a	B ₄
۱/۶۰۵	LSD (0.05%)
محلول‌پاشی نانوسیلیکون	
۹۷/۲۶b	N ₁
۱۰۱/۷۹a	N ₂
۱/۱۳۵	LSD (0.05%)

I₁، I₂ و I₃: به ترتیب آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله سنبله‌دهی و آبستنی.
 B₁، B₂، B₃ و B₄: به ترتیب عدم کاربرد کودهای زیستی، کاربرد ورمی کمپوست، میکوریزا و کاربرد هم‌زمان ورمی کمپوست و میکوریزا.
 N₁ و N₂: به ترتیب عدم محلول‌پاشی و محلول‌پاشی دو گرم در لیتر نانوسیلیکون.
 (OD $\mu\text{g protein min}^{-1}$) تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه
 میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری براساس آزمون LSD هم ندارند.

۳.۲. محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید

برهم‌کنش هم‌زمان کودهای زیستی، نانوسیلیکون و محدودیت آبی بر محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی موجب افزایش به ترتیب ۵۵/۳۴ و ۵۳/۶۴ درصدی محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید نسبت به کاربرد هم‌زمان ورمی کمپوست، میکوریزا و نانوسیلیکون تحت شرایط آبیاری کامل شد (جدول ۳). تنش‌های محیطی با ایجاد تنش اکسیداتیو، محتوای پراکسید هیدروژن در سلول را افزایش می‌دهند که با

پراکسید کردن غشاهای سلولی، موجب تخریب غشاها می‌شود. یکی از معیارهای سنجش میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی، اندازه‌گیری محتوای مالون‌دی‌آلدهید می‌باشد (Zarooshan *et al.*, 2020). افزایش تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط تنش خشکی، موجب القای پاسخ‌های حفاظتی و آسیب سلولی می‌شود. پراکسیدهدیروژن منجر به پراکسیداسیون چربی‌ها و در نتیجه آسیب به غشا می‌شود (Mousavi Dehmordy *et al.*, 2018).

به نظر می‌رسد کاربرد قارچ میکوریزا تحت شرایط تنش با بهبود محتوای اسمولیت‌های سازگار (جدول ۳) و افزایش محتوای آنتوسیانین برگ (جدول ۳) و همچنین فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدانی (جدول‌های ۳، ۴ و ۵) موجب افزایش ظرفیت مهار رادیکال‌های آزاد شده و با کاهش میزان گونه‌های فعال اکسیژن، آسیب به غشای سلولی برگ گندم را کاهش می‌دهد (Tofighi *et al.*, 2019). Aghaei (2019) اظهار داشت که کاربرد قارچ میکوریزا با بهبود محتوای اسمولیت‌های سازگار (پرویلین و قندهای محلول)، محتوای آنتوسیانین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز) موجب کاهش محتوای پراکسیدهدیروژن و در نتیجه با افزایش پایداری غشا موجب کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید گندم تحت شرایط تنش شد.

Shirani Bidabadi *et al.* (2017) نیز بیان کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست با بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و افزایش محتوای پرویلین، موجب کاهش محتوای پراکسیدهدیروژن و مالون‌دی‌آلدهید شد. Shalalvand *et al.* (2018) گزارش کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست از طریق تأمین عناصر غذایی گیاه، موجب بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و در نهایت کاهش میزان مالون‌دی‌آلدهید برگ شد. در بررسی Mammabi *et al.* (2020)، کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط تنش خشکی موجب بهبود محتوای فسفر و نیتروژن برگ و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای اسمولیت‌های سازگار (محتوای پرویلین و قندهای محلول) شد، که با کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید موجب بهبود محتوای کلروفیل برگ، پایداری غشاء و در نهایت افزایش عملکرد دانه کلزا شد.

Mosapour Yahyaabadi & Asgharipour (2016) اظهار داشتند که محلول‌پاشی سیلیکون تحت شرایط تنش با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز و پراکسیداز) و بهبود محتوای اسمولیت‌های سازگار (محتوای پرویلین و قندهای محلول) و آنتوسیانین، با کاهش محتوای پراکسیدهدیروژن، موجب کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید رازیانه شد. Zarooshan *et al.* (2020) اظهار داشتند محلول‌پاشی نانوسیلیکون به دلیل بهبود میزان فتوسنتز و افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز، موجب کاهش تولید پراکسیدهدیروژن و مالون‌دی‌آلدهید برگ ذرت شد. بخشی از کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید با محلول‌پاشی سیلیکون را می‌توان به اثر این ماده در افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نسبت داد. در این زمینه Liang *et al.* (2007) اظهار داشتند که سیلیکون با از بین بردن گونه‌های فعال اکسیژن به طور مستقیم و کاهش نفوذپذیری غشای سلولی، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز) به طور غیرمستقیم، موجب کاهش پراکسیداسیون لیپیدهای غشای سلولی و کاهش مقدار مالون‌دی‌آلدهید می‌شود. سیلیکون با محافظت از غشاهای سلولی از دسترسی پروتئازها به پروتئین‌های داخلی غشا و تخریب و بهم‌ریختگی غشای سلولی ممانعت می‌کند (Gong *et al.*, 2005). بخشی از کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید در کاربرد سیلیکون را می‌توان به اثر این ماده در افزایش محتوای آنتوسیانین (جدول ۳)، پرویلین و قندهای محلول (جدول ۳) نسبت داد. نتایج مشابهی نیز توسط Saadatmand & Enteshari (2013) گزارش شده است. به طور کلی، به نظر می‌رسد کاربرد ورمی‌کمپوست، میکوریزا و نانوسیلیکون تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی با بهبود محتوای اسمولیت‌های سازگار (پرویلین و قندهای محلول)، محتوای آنتوسیانین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز) موجب کاهش محتوای پراکسیدهدیروژن و مالون‌دی‌آلدهید برگ پرچم شد (جدول‌های ۳ و ۴).

۳.۳. محتوای پرولین و قندهای محلول

تأثیر کاربرد کودهای زیستی، نانوسیلیکون، محدودیت آبی و برهم‌کنش هم‌زمان این سه عامل بر محتوای پرولین و قندهای محلول در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین نشان داد کاربرد ورمی‌کمپوست، میکوریزا و نانوسیلیکون تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبتنی، موجب افزایش ۴۴/۹۲ درصدی محتوای پرولین و افزایش ۵۲/۲۲ درصدی محتوای قندهای محلول برگ پرچم نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون تحت شرایط آبیاری کامل شد (جدول ۳).

در شرایط کمبود آب، بیوسنتز پرولین از گلوتامیک‌اسید در سیتوزول و کلروپلاست سلول‌های گیاهی انجام می‌گیرد، بنابراین تجمع پرولین در سیتوسل صورت گرفته تا توزیع آب به داخل سلول انجام شده (Lehmann *et al.*, 2010) و موجب محافظت از غشای سلولی، آنزیم‌های سیتوپلاسمی، پروتئین‌ها، مهار گونه‌های فعال اکسیژن و حذف رادیکال‌های آزاد در شرایط تنش خشکی شود (Liang *et al.*, 2013). Alikhani *et al.* (2019) بیان کردند که محدودیت آبی از طریق تولید گونه‌های فعال اکسیژن موجب اکسیداسیون اسیدهای آمینه به گروه‌های کربونیل می‌شود و به ساختار پروتئین و عملکرد آن آسیب وارد می‌کند. از این‌رو، در شرایط تنش به‌دلیل تخریب پروتئین‌ها و انباشت آمینواسیدهای آزاد جهت تنظیم اسمزی سلول، محتوای پرولین افزایش می‌یابد (Alikhani *et al.*, 2019). Ehdai *et al.* (2006) افزایش محتوای قندهای محلول در شرایط تنش را به کاهش نیاز به مواد فتوسنتزی به‌دلیل کاهش رشد، ساخت این ترکیبات از مسیرهای غیرفتوسنتزی و همچنین تخریب قندهای نامحلول که موجب افزایش قندهای محلول می‌شود، نسبت دادند. افزایش در غلظت قندهای محلول می‌تواند یک پاسخ نسبت به تغییرات میزان نسبی آب و پتانسیل آب برگ‌ها ارزیابی شود، زیرا افزایش غلظت ساکارز و قندهای محلول تحت شرایط تنش خشکی، در بهبود تحمل به خشکی نقشی مهم ایفا می‌کند (Ehdai *et al.*, 2006).

Zhang *et al.* (2010) نیز اظهار داشتند که محدودیت آبی از طریق افزایش فعالیت آنزیم آمیلاز و هیدرولیز نشاسته به قندهای ساده و همچنین کُند شدن انتقال قندها از برگ به سایر مراکز رشد، موجب افزایش محتوای قندهای محلول می‌شود، بنابراین در اثر تنش خشکی میزان نشاسته کاهش اما قندهای محلول افزایش می‌یابد. Ehsani *et al.* (2009) اظهار داشتند کاربرد میکوریزا در شرایط تنش، با کاهش سنتز پروتئین، افزایش هیدرولیز آن و افزایش میزان آب‌سیزیک‌اسید موجب افزایش انباشتگی آمینواسیدهایی مانند پرولین می‌شود. همچنین قارچ میکوریزا با بهبود تولید هورمون‌های گیاهی، افزایش جذب عناصر غذایی از جمله کربن و نیتروژن موجب افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول می‌شود (Alikhani *et al.*, 2019). Alikhani *et al.* (2019) اظهار داشتند که تولید پرولین با تولید قندهای محلول ارتباط دارد؛ زیرا یکی از مسیرهای تولید پرولین، گلوتامات است و با افزایش تولید قندهای محلول، میزان گلوتامات افزایش می‌یابد و سنتز پرولین تشدید می‌شود. Zafari *et al.* (2018) نیز افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول تحت شرایط تنش کم‌آبی به‌واسطه کاربرد قارچ میکوریزا را به افزایش جذب عناصر غذایی از جمله کم‌مصرف و عنصر ضروری نیتروژن نسبت دادند. Mammabi *et al.* (2020) در بررسی خود نشان دادند که کاربرد ورمی‌کمپوست تحت شرایط محدودیت آبی با بهبود جذب نیتروژن و فسفر موجب افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول شد. به‌نظر می‌رسد قارچ میکوریزا با افزایش مقاومت گیاه به تنش خشکی و بالاتر بردن سرعت فتوسنتز برگ‌ها، موجب افزایش تجمع کربوهیدرات‌های غیرساختمانی جهت کاهش پتانسیل اسمزی گیاه می‌شود (Rapparini & Panuelas, 2014). در این رابطه Kapoor *et al.* (2013) اظهار داشتند که قارچ‌های میکوریزا با هیدرولیز نشاسته موجب افزایش قندهای محلول گیاهان می‌شوند، دلیل دیگر برای تأثیر این قارچ‌ها در افزایش محتوای قندهای محلول، افزایش مقدار

هورمون‌های سیتوکینین و جبرلین در گیاهان میکوریزایی است. افزایش میزان این هورمون‌ها به‌ویژه سیتوکینین می‌تواند با انتقال یون‌های مؤثر در بازشدن روزنه‌ها و تنظیم سطح کلروفیل موجب افزایش یافتن سرعت فتوسنتز و در نهایت، افزایش محتوای قندهای محلول در گیاهان شود (Nemat-Alla *et al.*, 2008).

Wang *et al.* (2011) اظهار داشتند که کاربرد کودهای آلی از جمله ورمی‌کمپوست در شرایط تنش خشکی، با افزایش اسید آمینه‌های ضروری به‌ویژه گلوتامات و آرژینین که از پیش‌سازهای تولید پرولین می‌باشد موجب افزایش تجمع پرولین و در نهایت افزایش تحمل گیاه در مواجهه با تنش‌های محیطی مثل شوری و خشکی می‌شود. Valinezhad *et al.* (2019) گزارش کردند که کاربرد هم‌زمان میکوریزا و ورمی‌کمپوست از طریق گسترش هیف، توسعه سیستم ریشه‌ای و مواد آلی خاک، جذب آب و مواد غذایی را افزایش و با بهبود فتوسنتز موجب افزایش محتوای قندهای محلول و آنتوسیانین شد. همچنین، ورمی‌کمپوست از طریق بهبود حاصلخیزی خاک، موجب جذب بهتر آب، فراهم‌نمودن عناصر ضروری گیاه، تقویت فتوسنتز، افزایش زیست‌توده گیاهی می‌شود و از طرف دیگر ویژگی‌های فیزیکی خاک را بهبود بخشیده و باعث رشد بهتر ریشه، افزایش رشد، تسریع واکنش‌های متابولسمی، افزایش سنتز و تجمع متابولیت‌ها از جمله کربوهیدرات‌ها می‌شود (Salehi *et al.*, 2011). Ghasemzadeh & Jaafar (2011) اظهار داشتند که افزایش عناصر غذایی در خاک تیمار شده با ورمی‌کمپوست، با افزایش فعالیت آنزیم رویسکو منجر به افزایش میزان فتوسنتز خالص در گیاه شده و همچنین با فعال کردن آنزیم‌های درگیر در بیوسنتز نشاسته و پروتئین در سنتز کربوهیدرات‌های محلول مورد استفاده قرار می‌گیرد. ورمی‌کمپوست با افزایش عناصر غذایی در خاک، باعث افزایش فعالیت آنزیم رویسکو و بهبود فتوسنتز و کربوهیدرات‌ها در گیاه می‌شوند (Lattanzio *et al.*, 2013). همچنین به‌نظر می‌رسد که تیمار گیاه با سیلیکون به‌طور مستقیم و غیرمستقیم با القای ژن‌ها و افزایش فعالیت آنزیم‌های دخیل در مسیر بیوسنتز پرولین، موجب افزایش محتوای پرولین می‌شود (Liang *et al.*, 2006). Hajiboland *et al.* (2017) اظهار داشتند که کاربرد سیلیکون از طریق جذب نیتрат بیشتر و بهبود آمینواسیدهای آزاد موجب افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول برگ گندم شد که در نهایت پتانسل اسمزی گیاه را بهبود بخشید. محلول پاشی سیلیکون در شرایط تنش خشکی می‌تواند با افزایش ذخیره کربوهیدراتی (قندهای محلول) در گیاهان، فعالیت‌های متابولیک، متابولیسم پایه و تعادل آبی گیاه و همچنین افزایش پایداری ساختار سلول را بهبود بخشد (Mosapour Yahyaabadi & Asgharipour, 2016). Hajiboland *et al.* (2017) اظهار داشتند که کاربرد سیلیکون از طریق جذب نیترات بیشتر و بهبود آمینواسیدهای آزاد موجب افزایش محتوای پرولین، قندهای محلول و آنتوسیانین برگ گندم شد که در نهایت پتانسیل اسمزی گیاه را بهبود بخشید. سیلیکون از طریق بالابردن محتوای کلروفیل و کاهش نکروزه‌شدن برگ‌ها تحت شرایط تنش خشکی، موجب افزایش میزان تثبیت دی‌اکسیدکربن و در نهایت افزایش تولید قندهای محلول و تجمع بیش‌تر در گیاه می‌شود (Silva *et al.*, 2012). Verma & Dubey (2001) گزارش کردند که کاربرد سیلیکون با تأثیر بر متابولیسم قندها و پخش مواد فتوسنتزی موجب افزایش قندهای محلول می‌شود و همین امر به انجام فرایندهای متابولیک و حفظ متابولیسم پایه در حد مطلوب کمک می‌کند. Asghari *et al.* (2020) گزارش کردند کاربرد کودهای زیستی می‌تواند با افزایش محتوای قندهای محلول و پرولین، باعث افزایش ظرفیت اسمزی شود که این امر منجر به افزایش شیب پتانسیل آب و در نتیجه بهبود جذب آب و رشد گیاه در شرایط تنش شود. Nemat-Alla *et al.* (2008) دلیل تأثیر قارچ‌های میکوریزایی در افزایش محتوای قندهای محلول، به افزایش مقدار هورمون‌های سیتوکینین و جبرلین در گیاهان میکوریزایی نسبت دادند. افزایش در میزان این هورمون‌ها به‌ویژه سیتوکینین می‌تواند با انتقال یون‌های مؤثر در بازشدن روزنه‌ها و تنظیم سطح کلروفیل، موجب بالارفتن سرعت فتوسنتز و در نهایت افزایش محتوای

کربوهیدرات‌ها در گیاهان شود. از آنجا که پرولین نقش مؤثری را در جلوگیری از تخریب آنزیم‌ها و تجزیه ماکرومولکول‌ها و حفظ استحکام دیواره سلولی در هنگام وقوع تنش‌های محیطی از جمله تنش خشکی دارد. از این رو، به‌نظر می‌رسد کاربرد سیلیکون و کودهای زیستی (قارچ‌های میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد) با افزایش محتوای پرولین به افزایش تحمل گیاه در برابر تنش خشکی کمک می‌کند. نتایج مشابهی توسط Bukhari *et al.* (2020) مبنی بر افزایش محتوای پرولین در محلول‌پاشی ۴ میلی‌مولار سیلیکون گزارش شده است.

۴.۳. محتوای آنتوسیانین

برهم‌کنش کاربرد هم‌زمان کودهای زیستی، نانوسیلیکون و محدودیت آبی بر محتوای آنتوسیانین برگ پرچم در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی نانوسیلیکون تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، دارای بیش‌ترین محتوای آنتوسیانین (۰/۰۲۶ میکرومول بر گرم تر برگ) بود (جدول ۳)، که این ترکیب تیماری از افزایش ۶۲/۵ درصدی نسبت به عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون تحت شرایط آبیاری کامل برخوردار بود (جدول ۳). آنتوسیانین از مهم‌ترین ترکیبات آنتی‌اکسیدانی هستند، این ترکیبات نه‌تنها رادیکال‌های آزاد را از بین می‌برند، بلکه از تولید بیش‌تر آن‌ها در گیاه جلوگیری می‌کنند (Saadatmand & Enteshari, 2013). عوامل محیطی تنش‌زا از قبیل تنش خشکی موجب افزایش تجمع رنگدانه آنتوسیانین در برگ‌ها می‌شوند. از نقش‌های اصلی آنتوسیانین‌ها می‌توان به نقش آنتی‌اکسیدانی و محافظت سیستم فتوسنتزی در برابر اکسیداسیون نوری اشاره نمود که در گیاهان در معرض تنش، نقش محافظتی ایفا می‌کنند (He *et al.*, 2010).

Vitrac *et al.* (2000) علت افزایش آنتوسیانین در کاربرد کودهای زیستی را به جذب بهتر منیزیم و کلسیم در حضور این کودها نسبت دادند. این پژوهش‌گران اظهار داشتند که کودهای زیستی با کمک به جذب منیزیم و کلسیم در گیاه، می‌توانند ساخت آنتوسیانین را افزایش دهند. عناصر کانی مانند کلسیم، موجب بالارفتن میزان هیدرات‌های کربن شده و موجب توسعه رنگدانه‌های یاخته‌ای و ساخت آنتوسیانین می‌شوند (Vitrac *et al.*, 2000). هم‌چنین، ریشه تلقیح‌شده با قارچ میکوریزا و ورمی‌کمپوست توانایی ساخت و ترشح مواد زیستی فعال مانند ویتامین‌های گروه B، نیکوتینیک‌اسید، پنتوتینیک‌اسید، بیوتین، اکسین، جیبرلین‌ها و غیره را دارند که این مواد موجب افزایش محتوای ماده آلی و هیدرات‌های کربن گیاه و در نتیجه افزایش محتوای آنتوسیانین می‌شود (Valinezhad *et al.*, 2019). Ahmad *et al.* (2011) نیز افزایش محتوای آنتوسیانین را به مواد هیومیکی (مشتقات ترکیبات فنلی) موجود در ورمی‌کمپوست که به‌عنوان پیش‌ماده سنتز آنتوسیانین مطرح می‌باشند، نسبت دادند.

کاربرد سیلیکون با پیشگیری از افت معنی‌دار آنتوسیانین در گیاه تحت تنش خشکی موجب کاهش اثر مضر خشکی بر سیستم فتوسنتزی می‌شود و می‌تواند مقاومت گیاه را نسبت به تنش خشکی افزایش دهد (Shen *et al.*, 2010). Saadatmand *et al.* (2013) اظهار داشتند که کاربرد سیلیکون با تقویت مکانیسم‌های مقاومتی از جمله ترشح اسیدهای آلی و هم‌چنین با تأثیر بر فعالیت آنزیم‌ها موجب افزایش محتوای آنتوسیانین می‌شود. Hajiboland *et al.* (2017) اظهار داشتند که کاربرد سیلیکون از طریق جذب نیترات بیش‌تر و بهبود آمینواسیدهای آزاد و هم‌چنین افزایش محتوای پرولین، قندهای محلول، محتوای آنتوسیانین برگ گندم را افزایش داد. هم‌چنین Mosapour Yahyaabadi & Asgharipour (2016)، افزایش محتوای آنتوسیانین در شرایط محلول‌پاشی با سیلیکون را به بهبود محتوای اسمولیت‌های سازگار (محتوای پرولین و قندهای محلول) و حفظ تعادل آبی سلول به‌منظور افزایش مقدار آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی تحت شرایط تنش، نسبت دادند.

۳.۵. عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر کودهای زیستی، نانوسیلیکون، محدودیت آبی و برهم‌کنش هم‌زمان این سه عامل بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند (جدول ۲). نتایج نشان داد که بیش‌ترین عملکرد دانه (۴/۰۲ گرم در بوته) در کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی نانوسیلیکون تحت شرایط آبیاری کامل بود (جدول ۳)، که این ترکیب تیماری موجب افزایش ۵۹/۵۲ درصدی عملکرد دانه نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی شد (جدول ۳). تنش خشکی با ایجاد اختلال در سیستم فتوسنتزی موجب افزایش محتوای پراکسید هیدروژن و افزایش پراکسیدسیون لیپیدی می‌شود که تحت چنین شرایط کاربرد کودهای زیستی از جمله قارچ میکوریزا با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و بهبود محتوای اسمولیت‌های سازگار موجب افزایش مقاومت گیاه نسبت به تنش خشکی شده و عملکرد دانه را افزایش دهد (Ebadi, 2018). در این رابطه Aghaei (2019) بیان کردند که کاربرد قارچ میکوریزا تحت شرایط تنش با افزایش محتوای پرولین، قندهای محلول و آنتوسیانین و هم‌چنین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز) موجب کاهش محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید و در نهایت کاهش عملکرد دانه گندم شد. Mamnabi *et al.* (2020) نیز اظهار داشتند کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط تنش خشکی از طریق بهبود محتوای فسفر و نیتروژن برگ و هم‌چنین افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای اسمولیت‌های سازگار (محتوای پرولین و قندهای محلول) موجب کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید در نهایت افزایش عملکرد دانه کلزا شد. در بررسی Abbasi *et al.* (2018) نیز کاربرد نانو سیلیکون با بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای پرولین با کاهش محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید موجب افزایش عملکرد دانه گندم در شرایط تنش خشکی شد. Mosapour Yahyaabadi & Asgharipour (2016) نیز افزایش عملکرد دانه به‌واسطه کاربرد سیلیکون تحت شرایط تنش خشکی را به بهبود محتوای آنتوسیانین، پرولین و قندهای محلول نسبت دادند. از این‌رو، به‌نظر می‌رسد کاربرد ورمی‌کمپوست، میکوریزا و نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز) (جدول‌های ۳ و ۴)، محتوای اسمولیت‌های سازگار (پرولین و قندهای محلول) (جدول ۳) و محتوای آنتوسیانین (جدول ۳) موجب کاهش محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید (جدول ۳) و در نهایت افزایش عملکرد دانه تربیتیکاله (جدول ۳) شد.

۴. نتیجه‌گیری

کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی نانوسیلیکون تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی موجب افزایش محتوای آنتوسیانین، محتوای اسمولیت‌های سازگار (پرولین و قندهای محلول) و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز) نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل شد. محلول‌پاشی نانوسیلیکون و کاربرد هم‌زمان کودهای زیستی (ورمی‌کمپوست و میکوریزا) در شرایط قطع آبیاری در مراحل آبستنی و سنبله‌دهی موجب افزایش به‌ترتیب ۴۱/۲ و ۴۶ درصدی عملکرد دانه نسبت به شرایط عدم کاربرد نانوسیلیکون و کودهای زیستی تحت چنین شرایطی شد. هم‌چنین کاربرد هم‌زمان ورمی‌کمپوست، میکوریزا و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل دارای کم‌ترین محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید و بیش‌ترین مقدار عملکرد دانه بود. به‌نظر می‌رسد کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون با بهبود محتوای اسمولیت‌های سازگار و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌تواند عملکرد دانه تربیتیکاله را تحت شرایط محدودیت آبی افزایش دهد.

۵. تشکر و قدردانی

از مساعدت‌های صمیمانه و خالصانه یکایک همکاران ارجمند در بخش‌های مختلف گلخانه‌ای و آزمایشگاهی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در اجرای این پایان‌نامه، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع مورد استفاده

- Abbasi, A. R., Lotfi, M., & Mohammadi, J. (2018). Response of antioxidant defense mechanism and wheat yield changes to drought stress with application of different concentrations of nano-silicon and nano-titanium. *Rainfed agriculture of Iran*, 7(1), 79-101. (In Persian)
- Abdel Latef, A. A. (2010). Changes of antioxidative enzymes in salinity tolerance among different wheat cultivars. *Cereal Research Communications*, 38, 43-55. (In Persian)
- Adamipour, N., Heiderianpour M. B., & Zarei, M. (2016). Application of vermicompost for reducing the destructive effects of salinity stress on tall fescue turfgrass (*Festuca arundinacea* Schreb. 'Queen'). *Journal of soil and plant Interaction*, 7 (1), 35-47. (In Persian)
- Ageeb Akladios, S., & Mohamed, H. I. (2018). Ameliorative effects of calcium nitrate and humic acid on the growth, yield component and biochemical attribute of Pepper (*Capsicum annuum*) plants grown under salt stress. *Scientia Horticulturae*, 236, 244- 250.
- Aghaei, F. (2019). Effect of uniconazole and biofertilizers on grain filling components and some biochemical and physiological traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) under soil salinity condition. M.Sc. Thesis. Faculty of Agriculture and Natural Resources. *University of Mohaghegh Ardabili*. (In Persian)
- Ahmad, Y. M., Shahlaby E. A., & Shnan, N. T. (2011). The use of organic and inorganic cultures in improving vegetative growth, yield characters and antioxidant activity of roselle plants (*Hibiscus sabdariffa* L.). *African Journal of Biotechnology*, 10(11), 1988-1996.
- Ahmadi Nouradinvand, F., Seyed Sharifi, R., Ataollah Siadat, S., & Khalilzadeh, R. (2021). Effect of water limitation and application of bio-fertilizer and nano-silicon on yield and some biochemical traits of wheat. *Cereal Research*, 10(4), 285-298. (In Persian)
- Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S., & Karanov, E. (2001). The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant Cell and Environment*, 24, 1337-1344.
- Alikhani, S., & Mahmoudi Zarandi, M. (2019). Effect of coinoculation with endomycorrhiza, *Pseudomonas aeruginosa* and *Rhizobium meliloti* on *Medicago sativa* under water stress. *Journal of Plant Research*, 32(1), 155-166. (In Persian)
- Asghari, B., Khademian, R., & Sedaghati, B. (2020). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) confer drought resistance and stimulate biosynthesis of secondary metabolites in pennyroyal (*Mentha pulegium* L.) under water shortage condition. *Scientia Horticulturae*, 263, 109132.
- Azeez, J. O., Van Averbek A. B., & Okorogbona, A. O. M. (2010). Differential responses in yield of pumpkin (*Cucurbita maxima* L.) and nightshade (*Solanum retroflexum* Dun.) to the application of three animal manures. *Bioresource Technology*, 101, 2499-2505.
- Bates, L. S., Waldereen R. D., & Taere, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil*, 39, 205- 207.
- Bezabih, A., Girmay, G., & Lakewu, A. (2019). Performance of triticale varieties for the marginal highlands of Wag-Lasta, Ethiopia. *Cogent Food and Agriculture*, 5, 1-11.

- Bukhari, M. A., Ahmad, Z., Ashraf, M. Y., Afzal, M., Nawaz, F., Nafees, M., Jatoi, W. N., Malghani, N. A., Shah, A. N., & Manan, A. (2020). Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through improving photosynthetic pigments, *biochemical and yield characters*. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00797-4>.
- Dubios, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Roberts P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Annals of Chemistry*, 28, 350-356.
- Ebadi, N. (2018). Evaluation of yield and some agrophysiological traits of rainfed barley (*Hordeum vulgari*.) as affected by biofertilizers and supplementary irrigation. M. Sc. Thesis. Faculty of Agriculture and Natural Resources. University of Mohaghegh Ardabili. (In Persian)
- Ehdai, B., Alloush, G. A., Madore, M. A., & Waines, J. G. (2006). Genotype variation for stem reserves and mobilization in wheat: II. Postanthesis changes in internode water soluble carbohydrates. *Crop Science*, 46, 2093-2103.
- Ehsani, M., Norinia, A. A., & Bakhshi Khaniki, Gh. R. (2009). Effect of salinity and Mycorrhiza on amount of proline in sorghum. *Journal of Plant Protection and Food*, 3, 11-18.
- Ghasemzadeh, A., & Jaafar, H. Z. E. (2011). Effect of CO₂ enrichment on synthesis of some primary and secondary metabolites in ginger (*Zingiber officinale* Roscoe). *International Journal of Molecular Sciences*, 12, 1101-1114
- Gong, H. Z., Chen, K., Wans, S., & Zhang, C. (2005). Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science*, 169, 313-321.
- Hajiboland, R., Cherghvareh, L., Dashtebani, F. (2017). Effects of silicon supplementation on wheat plants under salt stress. *Journal of Plant Process and Function*, 5(18), 1-11.
- Hattori, T., Sonobe, K., Inanaga, S., An, P., Tsuji, W., Araki, H., & Morita, S. (2007). Short term stomatal responses to light intensity changes and osmotic stress in sorghum seedlings raised with and without silicon. *Environmental and experimental botany*, 60(2), 177-182.
- He, F., Mu, L., Yan, G. L., Liang, N., Pan, Q., Wang, J., Reeves, M., & Duan, C. (2010). Biosynthesis of anthocyanins and their regulation in colored grapes. *Molecules*, 15, 9057-9091.
- Heshmati, S., Amini Dehaghi, M., & Amirkhiz, F. K. (2016). Effect of chemical and biological phosphorus on antioxidant enzymes activity and some biochemical traits of spring Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under water deficit stress conditions. *Journal of Crop Production and Processing*, 6(19), 203-214. DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.6.19.203.
- Hu, Y.Y., Zhang, Y. L., Yi, X. P., Zhan, D. X., Luo, H. H., Chow, W. S., & Zhang, W. F. (2014). The relative contribution of non-foliar organs of cotton to yield and related physiological characteristics under water deficit. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(5), 975-989. DOI: 10.1016/S2095-3119(13)60568-7.
- Imtiaz, M., Rizwan, M. S., Mushtaq, M. A., Ashraf, M., Shahzad, S. M., & Yousaf, B. (2016). Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: A review. *Journal of Environmental Management*, 183, 521-529.
- Joshi, R., Singh, J., & Vig, A. P. (2015). Vermicompost as an effective organic fertilizer and biocontrol agent: effect on growth, yield and quality of plants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 14(1), 137-159.
- Kapoor, R., Evelin, H., Mathur, P., & Giri, B. (2013). Arbuscular mycorrhiza: Approaches for abiotic stress tolerance in crop plants for sustainable agriculture. In: Plant acclimation to environmental stress (Eds. Tuteja, N. and Gill, S. S.), 359-401.
- Khalafallah, A. A., & Abo-Ghalia, H. H. (2008). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the metabolic products and activity of antioxidant system in wheat plants subjected to short-term water stress, followed by recovery at different growth stages. *Journal of Applied Sciences Research*, 4, 559-569.
- Lattanzio, V., Cardinali, A., Ruta, C., Fortunato, I. M., Lattanzio, V. M. T., & Linsalata, V. (2013). Relationship of secondary metabolism to growth in oregano (*Origanum vulgare* L.) shoot cultures under nutritional stress. *Environmental and Experimental, Botany*, 65, 54-62.

- Lehmann, S., Funck, D., Szabados, L., & Rentsch, D. (2010). Proline metabolism and transport in plant development. *Amino Acids*, 39, 949-962.
- Liang, X., Zhang, L., Natarajan S. K., & Becker, D. F. (2013). Proline mechanisms of stress survival. *Antioxid Redox Signal*, 19 (9), 998-1011.
- Liang, Y. C., Zhang, W. H., Chen, Q., Liu Y. L., & Ding, R. X. (2006). Effect of exogenous silicon (Si) on H⁺-ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt stressed barley.
- Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y., & Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants- a review, *Environmental Pollution*, 147, 422-428.
- Mamnabi, S. S., Nasrollahzadeh, K., Golezani, G., & Raei, Y. (2020). Improving yield-related physiological characteristics of spring rapeseed by integrated fertilizer management under water deficit conditions. *Saudi Journal of Biology Science*, 27(3), 797-804.
- Mosapour Yahyaabadi, H., & Asgharipour, M. R. (2016). Effects of drought stress and its interaction with silicon on stimulates the antioxidant system and lipid peroxidation in Fennel (*Foeniculum vulgare*). *Plant process and function*. 5(16), 71-84. (In Persian)
- Mousavi Dehmordy, Z., Gholami, M., & Baninasab, B. (2018). Effect of Vermicompost Fertilizer on Growth and Drought Tolerance of Olive (*Olea europaea* L. cv. Zard). *j. plant proc. func.*, 7(23), 1-18. (In Persian)
- Muscolo, A., Panuccio, M. R., Giofrè A. M., & Jacobsen, S. E. (2016). Drought and salinity differently affect growth and secondary metabolites of “Chenopodium quinoa Willd” seedlings. *Halophytes for Food Security in Dry Lands*, 259-275. DOI: 10.1016/B978-0-12-801854-5.00016-9.
- Nemat-Alla, M. M., Badawi, A. M., Hassan, N. M., El-Bastawisy, Z. M., & Badran, E. G. (2008). Effect of metribuzin, butachlor and chlorimuron-ethyl on amino acid and protein formation in wheat and maize seedlings. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 90, 8-18.
- Nemat-Alla, M. M., Badawi, A. M., Hassan, N. M., El-Bastawisy Z. M., & Badran, E. G. (2008). Effect of metribuzin, butachlor and chlorimuron-ethyl on amino acid and protein formation in wheat and maize seedlings. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 90, 8-18.
- Ouellette, S. M. H., Goyette, C., Labbé, J., Laur, L., Gaudreau, A., Gosselin, M., Dorais, R. K., Deshmukh, R., & Bélanger, R. (2017). Silicon transporters and effects of silicon amendments in strawberry under high tunnel and field conditions *Front. Plant Science*, 8, 949-956.
- Pan, S., Rasul, F., Li, W., Tian, H., Mo, Z., Duan M., & Tang, X. (2013). Roles of plant growth regulators on yield, grain qualities and antioxidant enzyme activities in super hybrid rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Rice*, 6, 9-14.
- Rapparini, F., & Penuelas, J. (2014). Mycorrhizal fungi to alleviate drought stress on plant growth. Miransari M (Eds.), *In use of microbes for the alleviation of soil stress*, 1, 21-42.
- Saadatmand, M., & Enteshari, S. (2013). The effects of pretreatment duration with silicon on salt stress in Iranian borage (*Echium amoenum* Fisch & C.A. mey). *JSPI*, 3(4), 45-57. (In Persian)
- Salehi, A., Ghalavand, A., Sefidkon, F., & Asgharzade, A. (2011). The effect of zeolite, PGPR and vermicompost application on N, P, K concentration, essential oil content and yield in organic cultivation of German Chamomile (*Matricaria chamomilla* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 27, 188-201.
- Seyed Sharifi, R., & Namvar, A. (2016). *Biofertilizers in Agronomy*. University of Mohaghegh Ardabili press, 282. (in Persian)
- Shalalvand, M., Pazoki, A., Monem, R., & Abdol, M. (2018). The effect of application of vermicompost and salicylic acid on activity of antioxidant enzymes and yield of milk thistle (*Silybum Marianum* L.) in different irrigation conditions, *Agriculture and plant breeding, Iran*, 14(2), 49-67. (In Persian)
- Shekari, F., Abbasi, A., & Mustafavi, S. H. (2017). Effect of silicon and selenium on enzymatic changes and productivity of dill in saline condition. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16 (4), 367-374.

- Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A. E., & Li, J. (2010). Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean antioxidative systems in two cottons. *General and Applied Plant Physiology*, 33, 221-234.
- Shirani Bidabadi, S., Dehghanipoodeh, S., & Wright, G. C. (2017). Vermicompost leachate reduces some negative effects of salt stress in pomegranate. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6, 255-263.
- Silva, O. N., Lobato, A. K., Avila, F. W., Costa, L., Oliveira, F., Santos, B. G., Martins, A. P., Lemos, R., Pinho, J., Medeiros, M. B., Cardoso, M., & Andrade, I. P. (2012). silicon-induced increase in chlorophyll is modulated by the leaf water potential in two water-deficient tomato cultivars. *Plant Soil and Environment*, 58, 481-486.
- Stewart, R. C., & Beweley, J. D. (1980). Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiology*, 65, 245-248.
- Sudhakar, C., Lakshmi, A., & Giridara Kumar, S. (2001). Changes in the antioxidant enzyme efficacy in two high yielding genotypes of Mulberry (*Morus alba* L.) under NaCl salinity. *Plant Science*, 167, 613-619.
- Tofighi, K., Khavari Nejad, R., Najafi, F., Razavi, Kh., & Rejali, F. (2016). XML Interaction effect investigation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth regulator brassinolide on enhancing to wheat tolerance to salinity tension, *Crop physiology*, 8 (30), 5-19. (In Persian)
- Valinezhad, Z., Gholizadeh, A., Naemi, M., Gholamalalipour Alamdari, E., & Zarei, M. (2019). Effects of vermicompost and mycorrhizal fungus on quantitative and qualitative traits of medicinal plant *Stevia rebaudiana Bertoni*. 484-500. (In Persian)
- Verma, S., & Dubey, R. S. (2001). Effect of cadmium on soluble sugars and enzymes of their metabolism in rice. *Biologia Plantarum*, 1, 117-123.
- Vitrac, X., Larronde, F., Krisa, S., Decendit, A., Deffieux, G., & Mérillon, J. M. (2000). Sugar sensing and Ca²⁺ calmodulin requirement in *Vitis vinifera* cells producing anthocyanins. *Phytochemistry*, 53, 659-665.
- Wagner, G. J. (1979). Content and vacuole/extra vacuole distribution of neutral sugars free amino acids, and anthocyanins in protoplast. *Plant Physiology*, 64, 88-93.
- Wang, Y., Ma, F., Li, M., Liang, D., & Zou, J. (2011). Physiological responses of kiwifruit plants to exogenous ABA under drought conditions. *Plant Growth Regulation*, 64, 63-74.
- Wu, H., Wu, X., Li, Z., Duan, L., & Zhang, M. (2012). Physiological evaluation of drought stress tolerance and recovery in Cauliflower (*Brassica oleraceavar Botrytis*.) seedlings treated with methyl jasmonate and coronatine. *Journal of Plant Growth Regulation*, 31, 113-123.
- Yang, S., Wang, Y., Liu, R., Li, Q., & Yang, Z. (2018). Effects of straw application on nitrate leaching in fields in the Yellow River irrigation zone of Ningxia, China. *Scientific Reports*, 8(1), 954.
- Young, L. S., Hameed, A., Peng, S. Y., Shan Y. H., & Wu, S. P. (2013). Endophytic establishment of the soil isolate Burkholderia sp. CC-A174 enhances growth and P-utilization rate in maize (*Zea mays* L.). *Applied Soil Ecology*, 66, 40-47.
- Zafari, M., & Jahanbakhsh, S. (2018). The impact of bio-fertilizers to increase compatibility osmolytes in the alfalfa under water stress conditions, *Plant Research (Iranian Biology)*, 31(1), 156-165. (In Persian)
- Zare, H. R., Ghanbarzadeh, Z., Behdad, A., & Mohsenzadeh, S. (2015). Effect of silicon and nanosilicon on reduction of damage caused by salt stress in maize (*Zea mays*) seedlings. *Iranian Journal of Plant Biology*, 26(7), 59-74.
- Zarooshan, M., Abdilzade, A., Sadeghipour, H. R., & Mehrabanjoubani, P. (2020). Comparison of the effect of silicon and nano-silicon on some biochemical and photosynthetic traits of *Zea mays* L. under salinity stress, 23-38. (In Persian)
- Zhang, K. M., Yu, H. J., Shi, K., Zhou, Y. H., Yu J. Q., & Xia, X. J. (2010). Photoprotective roles of anthocyanins in *Begonia semperflorens*. *Plant Science*, 179(3), 202-208.