

Effects of vermicompost and nano silicon on yield and some physiological and biochemical traits of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under irrigation withholding condition

R. Seyed Sharifi ^{1*}, R. Seyed Sharifi ², R. Khalil Zadeh³

1. Professor, Department Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2. Professor, Department of Animal Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3. Department of Plant Production and Genetic Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Received 17 November 2021; Accepted 13 February 2022

Extended abstract

Introduction

Drought stress is the most influential factors affecting crop yield particularly in irrigated agriculture in arid and semiarid regions. This stress induces various biochemical and physiological responses in plants as a survival mechanism (Tas and Tas, 2007). Drought stress have a direct impact on the photosynthetic apparatus, essentially by disrupting all major components of photosynthesis including the thylakoid electron transport, the carbon reduction cycle and the stomatal control of the CO₂ supply, together with an increased accumulation of carbohydrates, peroxidative destruction of lipids and disturbance of water balance (Allen and Ort, 2001). It breaks down the balance between the productions of reactive oxygen species (ROS) and the antioxidant defense system causing the accumulation of ROS which induces oxidative stress to protein, membrane lipids and disruption of DNA strands (El Tayeb, 2006). Several strategies have been developed in order to decrease the toxic effects caused by severe water limitation on plant growth. Among them the use of vermicompost and nano silicon play a key role in yield improvement. The aim of this study was to investigate the effects of vermicompost and nano silicon application on yield and some physiological and biochemical traits of safflower under irrigation withholding conditon.

Materials and methods

In order to study the effect of vermicompost and nano silicon on yield and some physiological and biochemical traits of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under irrigation withholding conditon, an experiment was conducted as factorial based on randomized complete block design with three replications in research farm of University of Mohaghegh Ardabili during 2019-2020. Factors experiment were included irrigation levels (full irrigation as control, irrigation withholding in 50% of heading bud and flowering stages as severe and moderate water limitation respectively) according with 55 and 65 BBCH code, foliar application nano silicon (foliar application with water as control, application of 25 and 50 mg.l⁻¹ nano silicon) and application of vermicompost (no application of vermicompost as control, application of 4 and 8 t.ha⁻¹). Vermicompost was purchased from the Gilda corporation. The safflower cultivar "Padideh" was used in the experiment with plant density of 40 seeds

*Corresponding author: Raouf Seyed Sharifi; E-Mail: raouf_ssharifi@yahoo.com



m⁻². Chlorophyll and carotenoids were obtained based on method of Arnon (1967). The quantum yield was measured by the uppermost fool expanded leaf using a fluorometer (chlorophyll fluorometer; Optic Science-OS-30 USA). For this purpose, the plants adapted to darkness for 20 minutes by using one special clamp then the fluorescence amounts were measured in 1000 (μM photon m²s), and calculation was performed using following formula (Arnon, 1967):

$$\text{ØPSII} = (\text{Fm}-\text{Fo})/\text{Fm}$$

ØPSII; quantum yield amount of photosystem II, Fm or maximum fluorescence after a saturated light pulse on plants adapted to darkness and Fo, the minimal fluorescence in the light adapted, which was determined by illumination with far-red light. To measure the enzyme activity, 0.2 g of fresh tissue was crushed by using liquid nitrogen and then one ml of buffer Tris-HCl (0.05 M, pH=7.5) was added. Obtained mixture centrifuged for 20 min (13000 rpm and 4 °C), then supernatant was used for enzyme activity measurements. Catalase, Peroxidase and Polyphenol Oxidase activity was assayed according to Karo and Mishra (1976). Also, the evaluation of protein carried out by Bradford (1976) method, 0.2 g of plant tissue was squashed with 0.6 ml extraction buffer and was centrifuged at 11500 rpm for 20 minutes at 4 °C. The supernatant was transferred to the new tubes and centrifuged for 20 minutes at 4000 rpm. To measure the protein amount, 10 μl of obtained extract was added to 5 μl Bradford solution and 290 μl extraction buffer and the absorbance rate was read at 595 nm.

Statistical analysis: Analysis of variance and mean comparisons were performed using SAS ver 9.1 computer software packages. The main effects and interactions were tested using the least significant difference (LSD) test at the 0.05 probability level.

Results and discussion

The results showed that application of the highest nano silicon level under full irrigation increased chlorophyll a and chlorophyll b (74 and 145% respectively) in comparison with no application of nano silicon under irrigation withholding in heading bud stage. Means comparison showed that irrigation withholding in booting bud at the highest vermicompost level increased proline and soluble sugars content (149 and 99% respectively) and antioxidant enzymes activity such as catalase, peroxidase and polyphenol Oxidase (103, 82 and 94% respectively) in comparison with no application of vermicompost under full irrigation. Also, the highest vermicompost level under full irrigation increased chlorophyll a, quantum yield and grain yield (61, 62 and 119% respectively) in comparison with no application of vermicompost under irrigation withholding in heading bud stage.

Conclusion

It seems that the application of vermicompost and nano silicon can increase grain yield of safflower under water limitation conditions due to improving physiological and biochemical traits.

Keywords: Antioxidant enzymes, Chlorophyll Content, Proline, Soluble sugars, Water limitation

اثر ورمی کمپوست و نانوسیلیکون بر عملکرد و برخی صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک گلرنگ (*Carthamus tinctories* L.) در شرایط قطع آبیاری

رئوف سید شریفی^{۱*}، رضا سید شریفی^۲، راضیه خلیل زاده^۳

۱. استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۲. استاد گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۳. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان پرویلین قندهای محلول محتوای کلروفیل محدودیت آبی	به منظور بررسی اثر ورمی کمپوست و نانوسیلیکون بر عملکرد و برخی صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک گلرنگ در شرایط قطع آبیاری، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۹۹-۱۳۹۸ اجرا شد. فاکتورهای آزمایشی سطوح آبیاری (آبیاری کامل به عنوان شاهد، قطع آبیاری در ۵۰ درصد مرحله تکمه‌دهی به عنوان محدودیت شدید آبی، قطع آبیاری در ۵۰ درصد مرحله گلدهی به عنوان ملایم آبی بر اساس کد ۵۵ و ۶۵ مقیاس BBCH)، محلول پاشی نانوآکسید سیلیکون (محلول-پاشی با آب به عنوان شاهد، کاربرد ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) و کاربرد ورمی کمپوست (عدم مصرف به عنوان شاهد، کاربرد چهار و هشت تن در هکتار) را شامل می‌شدند. نتایج نشان داد بالاترین سطح از کاربرد نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل، به ترتیب ۷۴ و ۱۴۵ درصد محتوای کلروفیل a و b را نسبت به عدم کاربرد نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری در مرحله تکمه‌دهی، افزایش داد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد قطع آبیاری در مرحله تکمه‌دهی در بالاترین سطح از کاربرد ورمی کمپوست، محتوای پرویلین و قندهای محلول را به ترتیب ۱۴۹ و ۹۹ درصد و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز را به ترتیب ۱۰۳، ۸۲ و ۹۴ درصد نسبت به عدم کاربرد ورمی کمپوست در شرایط آبیاری کامل افزایش داد. همچنین بالاترین سطح از کاربرد ورمی کمپوست در شرایط آبیاری کامل محتوای کلروفیل a، عملکرد کوانتومی و عملکرد دانه و درصد روغن را به ترتیب ۶۱، ۶۲، ۱۱۹ و ۲۶/۲ درصد نسبت به عدم کاربرد ورمی کمپوست در شرایط قطع آبیاری در مرحله تکمه‌دهی افزایش داد. به نظر می‌رسد کاربرد ورمی کمپوست و نانوسیلیکون می‌تواند به دلیل بهبود محتوای کلروفیل، عملکرد کوانتومی، محتوای اسمولیت‌های سازگار (همچون پرویلین و قندهای محلول) و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، عملکرد گلرنگ را تحت شرایط محدودیت آبی افزایش دهد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۴	
تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۳	
۱-۱۶: ۱۷(۱)	

مقدمه

فیزیولوژیک مرتبط با رشد و نمو را تحت تأثیر قرار داده و با تولید گونه‌های فعال اکسیژن موجب آسیب به غشای سلولی، کاهش عملکرد کوانتومی و جریان الکترون در فتوسیستم دو شده (Kheirizadeh Arough et al., 2016) و در بیشتر موارد با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز در جهت تعدیل خسارات اکسیداتیو (Ashraf et al., 2013)، منجر به تخریب

گلرنگ (*Carthamus tinctories* L.) یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی است که به دلیل برخورداری از درصد بالای روغن و سازگاری به شرایط مختلف اقلیمی و خاکی، سالانه در سطح وسیعی از مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور کشت می‌شود. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های تولید در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کمبود آب است (Reddy et al., 2004). محدودیت آبی بسیاری از ویژگی‌های بیوشیمیایی و

کلروپلاست، کاهش محتوای کلروفیل، فتوسنتز و عملکرد می‌شود. کاربرد سیلیکون یکی از راه‌کارهایی است که می‌تواند با تجمع پرولین (Kalteh et al., 2014)، افزایش محتوای کلروفیل (Merwad et al., 2018) و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، ممانعت از پراکسیداسیون غشا پلاسمایی (Liang et al., 2006) و بهبود کارایی فتوسنتزی، اثر مخرب محدودیت آبی در گیاهان را تا حد زیادی تعدیل کرده و بهره‌وری گیاهان تحت شرایط تنش را بهبود بخشد (Tripathi et al., 2016). به همین دلیل است که موسسه بین‌المللی تغذیه گیاه^۱ سیلیکون را به فهرست عناصر غذایی مفید اضافه کرده است (Ouellette et al., 2017). در مطالعه‌ای محلول پاشی برگی نانوسیلیکون موجب بهبود معنی‌دار عملکرد دانه و برخی پارامترهای رشدی از جمله ارتفاع بوته و تعداد دانه در طبق آفتابگردان شد (Janmohammadi et al., 2016). شن و همکاران (Shen et al., 2010) اظهار داشتند سیلیکون در شرایط محدودیت آبی در سویا، خسارت وارده به گیاه را از طریق تعدیل فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز و اثرگذاری بر تقلیل سطح پراکسید هیدروژن، کاهش داد. ساجد گلجه و همکاران (Sajed Gollojeh et al., 2020) بیان کردند محلول پاشی نانوسیلیکون تحت شرایط محدودیت آبی با کاهش نشت الکتروولت برگ، بهبود شاخص سبزی‌نگی و عملکرد کوانتومی، موجب افزایش عملکرد دانه کلزا شد. شریفی (Sharifi, 2017) اظهار داشت محلول پاشی نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل نیز همانند محدودیت آبی با بهبود خصوصیات زراعی و فیزیولوژیک موجب افزایش عملکرد دانه کلزا شد.

ورمی‌کمپوست‌ها نیز یکی از کودهای آلی است که علاوه بر افزایش جمعیت و فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید خاک با فراهم کردن دسترسی گیاه به عناصر غذایی مورد نیاز مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم، موجب بهبود رشد و عملکرد گیاهان می‌شود (Arancon et al., 2004). تونیس و همکاران (Theunissen et al., 2010) گزارش کردند ورمی‌کمپوست غنی از مواد غذایی میکرو و مواد هیومیکی بوده و موجب بهبود فراهمی عناصری مانند آهن و روی می‌شود که در سنتز کلروفیل نقش اساسی دارند. جهانگیری و همکاران

اهمیت گلرنگ به‌عنوان یکی از دانه‌های روغنی مهم با کاربرد وسیع در صنایع مختلف رنگرزی، داروسازی، تغذیه دام و از طرفی نقش ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در بهبود عملکرد و تعدیل اثر ناشی از محدودیت آبی و بررسی‌های محدود انجام‌شده در این زمینه، موجب شد تا اثر این عوامل بر عملکرد و برخی صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک گلرنگ در شرایط محدودیت آبی مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال زراعی ۱۳۹۹ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل کاربرد ورمی‌کمپوست در سه سطح (عدم مصرف به‌عنوان شاهد، کاربرد چهار و هشت تن در هکتار) (Hajghani et al., 2017)، نانواکسید سیلیکون در سه سطح (محلول پاشی با آب به‌عنوان شاهد، کاربرد ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) (Amiri et al., 2014) و سه سطح آبیاری (آبیاری کامل بر اساس عرف متداول زارعین محلی به‌عنوان شاهد، آبیاری تا مراحل ۵۰ درصد تکمه‌دهی و گلدهی به ترتیب به‌عنوان محدودیت شدید و ملایم آبی معادل با کد ۵۵ و ۶۵ از مقیاس BBCH^۲) بود. هر واحد آزمایشی شامل پنج ردیف پنج‌متری با فاصله بین ردیفی ۵۰ سانتیمتر بود. به‌منظور جلوگیری از اثر نفوذ آب آبیاری و محلول پاشی به کرت‌های مجاور، سه ردیف نکاشت بین هر واحد آزمایشی قرار داده شد. بذر مورد استفاده رقم پدیده بود که از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شد. به‌محض مساعد شدن شرایط اقلیمی، کاشت با دست در

۱- International of Plant Nutrition Institute (IPNI)
۲- (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemical industry; BBCH)

نانوسیلیکون (Nano-SiO₂) با اندازه ذرات ۱۰ تا ۲۰ نانومتر و خلوص بالای ۹۹ درصد از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان (محصول شرکت US Research Nanomaterial) تهیه شد. ورمی کمپوست مصرفی از شرکت گلیدا خریداری و مشخصات فیزیوشیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است. قبل از کاشت تا عمق ۴۰ سانتی متری خاک نمونه برداری انجام و نتایج مربوطه در جدول ۲ و شرایط اقلیمی منطقه مورد کشت در طول دوره رشدی در جدول ۳ آورده شده است.

عمق چهار تا پنج سانتی متری و به صورت هیرم کاری انجام شد. در مرحله چهار تا پنج برگی، گیاهچه‌ها بر اساس فاصله حدود پنج سانتی متر (تراکم حدود ۴۰ بوته در مترمربع) تنک شدند (Pasban Eslam, 2014). محلول پاشی با نانوسیلیکون در دو مرحله از رشد ساقه (اولین میانگه ساقه توسعه یافته، نه یا بیشتر میانگه‌های قابل مشاهده‌اند) که به ترتیب معادل با کد ۳۱ و ۳۹ از مقیاس BBCH است انجام شد (Seyed Sharifi and Khalilzadeh, 2018).

Table 1. Result for vermicompost analysis

مشخصه Characteristic	کادمیم Cd	سرب Pb	روی Zn	مس Cu	منگنز Mn	آهن Fe	هدایت الکتریکی EC	pH
	mg.kg ⁻¹						dS.m ⁻¹	
مقادیر Amount	1	19	110	20	275	5000	1.12	7.64
مشخصه Characteristic	منیزیم Mg	کلسیم Ca	پتاسیم K	فسفر P	نیتروژن N	کربن آلی OC	ماده آلی OM	
	%							
مقادیر Amount	0.95	2.73	0.4	0.4	1.55	32.9	56.8	

جدول ۱. نتایج تجزیه کود ورمی کمپوست

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 2. Physical and Chemical Characteristics of experimental farm soil

مشخصه Characteristic	عصاره اشباع			رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	بافت Texture	کربن آلی O.C	نیتروژن Total N	فسفر P	پتاسیم K	روی Zn
	pH	SP	Lime									
	%						لومی	%		mg.kg ⁻¹		
مقادیر Amounts	7.8	49	14.4	23	42	35	loam	0.62	0.06	8.29	212	1.8

جدول ۳. پارامترهای جوی در طول دوره رشدی گلرنگ (مأخذ: اداره کل هواشناسی استان اردبیل)

Table 3. Atmospheric parameters during the period of safflower growth (Source; Ardabil Meteorology Department)

Parameters climatic	پارامترهای اقلیمی	Months				
		خرداد Jun	تیر Jul	مرداد Aug	شهریور Sep	مهر Oct
Rainfall	میزان بارندگی mm	6.6	3.7	4.7	12.9	30.3
Temperature man	میانگین دما °C	18.9	18.7	18.4	16.8	12.1
Sunny hours	جمع ساعات آفتابی h	314.3	298.5	248.2	267.9e	188.1
Relative humidity mean	متوسط رطوبت نسبی %	60.5	66.2	74	70.7	76.4

فتوسیستم دو (Fv/Fm) به وسیله دستگاه فلورومتر (fluorometerchlorophyll)، آپتی ساینسس آمریکا) اندازه گیری شد (Seyed Sharifi et al, 2016). اندازه گیری محتوای پروتئین به روش بیتز و همکاران (Bates et al., 1973)، قندهای محلول با روش دابویس و همکاران

دو هفته بعد از قطع آخرین آبیاری (قطع آبیاری در مرحله گلدهی) معادل با کد ۷۵ از مقیاس BBCH، بر روی جوان ترین و کامل ترین برگ در حداقل سه بوته از خطوط اصلی هر واحد آزمایشی با در نظر گرفتن اثر حاشیه‌ای، محتوای کلروفیل با روش آرنون (Arnon, 1967)، کارایی فتوشیمیایی

(2010) اظهار داشتند خشکی می‌تواند با افزایش آنزیم کلروفیل‌لاز و تشدید سرعت تجزیه آن، مانع از بیوسنتز کلروفیل شده و محتوای کلروفیل را به میزان چشمگیری کاهش دهد. در این پژوهش، کاربرد ورمی‌کمپوست منجر به افزایش محتوای کلروفیل کل شد (شکل ۱). بالاترین سطح از کاربرد ورمی‌کمپوست به افزایش ۵۷ درصدی محتوای کلروفیل کل نسبت به عدم کاربرد آن منجر گردید (شکل ۱). به نظر می‌رسد بخشی از افزایش محتوای کلروفیل در کاربرد ورمی‌کمپوست، با مقادیر بالای نیتروژن موجود در ورمی‌کمپوست (جدول ۱) مرتبط باشد، زیرا با کاهش نیتروژن، محتوای کلروفیل نیز کاهش می‌یابد (Hasegawa et al., 2008)، بخش دیگری از افزایش محتوای کلروفیل می‌تواند به عناصر ریزمغذی موجود در آن به خصوص از نظر آهن و روی (جدول ۱) مربوط باشد که در سنتز کلروفیل نقش دارند (Theunissen et al., 2010). در این زمینه نوریخس و همکاران (Nourbakhsh et al., 2016) اظهار داشتند کاربرد ورمی‌کمپوست علاوه بر فراهم نمودن مقدار زیادی عناصر غذایی به خصوص نیتروژن، با تعدیل pH خاک موجب می‌شود جذب بسیاری از ریزمغذی‌ها مانند روی و آهن افزایش یابد که در ساختار کلروفیل و چرخه فتوسنتزی نقش اساسی دارند.

محلول‌پاشی سیلیکون منجر به افزایش محتوای کلروفیل کل شد. طوری که محلول‌پاشی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در مقایسه با کاربرد ۲۵ میلی‌گرم آن، منجر به افزایش ۱۳ درصدی محتوای کلروفیل کل و در مقایسه با عدم محلول‌پاشی، به افزایش ۳۸/۶ درصدی کلروفیل کل منجر شد (شکل ۱). بهبود محتوی کلروفیل برگ در گیاهان زراعی مختلف با کاربرد سیلیکون تحت شرایط محدودیت آبی توسط محققان متعددی گزارش داده است (Merwad et al., 2018). سیلیکون با قرار گرفتن در آپوپلاست دیواره‌های خارجی سلول‌های اپیدرمی، علاوه بر استحکام و تأخیر در پیری برگ، منجر به افزایش محتوای کلروفیل می‌شود (Gong et al., 2005). ساجدگلجه و همکاران (Sajed et al., 2020) افزایش محتوای کلروفیل برگ‌های کلزا در تیمار با سیلیکون را، به اثر این ماده در افزایش کارایی فتوسیستم دو تحت شرایط تنش نسبت دادند.

(Dubois et al., 1956) و برای ارزیابی فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز از روش سودهاکار و همکاران (Sudhakar et al., 2001) استفاده شد. اندازه‌گیری روغن با روش سوکسله و با کمک حلال آلی متانول-کلروفرم انجام شد (Joshi et al., 1998). عملکرد دانه با برداشت از سطحی معادل یک مترمربع از خطوط اصلی هر کرت بعد از حذف اثر حاشیه‌ای برآورد شد. برای تجزیه داده‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزارهای SAS ver 9.4 و Excel و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون کمترین اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

محتوای کلروفیل

نتایج تجزیه واریانس نشان داد برهمکنش توأم آبیاری در ورمی‌کمپوست بر محتوای کلروفیل a در سطح احتمال یک درصد و برهمکنش آبیاری در نانوسیلیکون بر محتوای کلروفیل a و b به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد آبیاری کامل در بالاترین سطح از کاربرد ورمی‌کمپوست، از افزایش ۶۱ درصدی محتوای کلروفیل a نسبت به عدم کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط قطع آبیاری در مرحله تکمه‌دهی برخوردار بود (جدول ۵). همچنین مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری در نانوسیلیکون بر محتوای کلروفیل a و b نشان داد بالاترین سطح از کاربرد نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل از افزایش به ترتیب ۷۴ و ۱۴۵ درصدی محتوای کلروفیل a و b نسبت به عدم کاربرد نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری در مرحله تکمه‌دهی برخوردار بود (جدول ۶).

به نظر می‌رسد در شرایط محدودیت آبی، انتقال الکترون در فتوسیستم دو مختل شده و الکترون اضافی ناشی از فتولیز آب، موجب تولید گونه‌های فعال اکسیژن و متعاقب آن پراکسیداسیون لیپیدها، پروتئین‌ها و کاهش محتوای کلروفیل می‌شود (Jiao et al., 2010). برخی محققان کاهش محتوای کلروفیل در شرایط محدودیت آبی را به کاهش کارایی استفاده از کربن و افزایش تولید اتانول و لاکتات (Oliviera-Neto et al., 2009) و برخی دیگر به سنتز آهسته کلروفیل یا تخریب کلروپلاست‌ها طی بروز تنش اکسیداتیو نسبت داده‌اند (Miller et al., 2010). جیاو و همکاران (Jiao et al., 2010)

جدول ۴. تجزیه واریانس تأثیر نانوسیلیکون و ورمی کمپوست بر محتوای کلروفیل، پرولین و قندهای محلول، فعالیت آنزیمها، عملکرد کوانتومی، عملکرد دانه و درصد روغن گلرنگ تحت شرایط قطع آبیاری

Table 4. variance analysis the effects of nano silicon and vermicompost on chlorophyll content, enzymes activity, Fv/Fm, proline, soluble carbohydrate, grain yield and oil percentage of safflower under irrigation withholding condition

S.O.V	منابع تغییرات	درجه آزادی df	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	پرولین Proline	قندهای محلول soluble sugars
Replication	تکرار	2	15.14**	3.518**	33.20**	51.62**	5770.33**
Irrigation (I)	آبیاری	2	5.75**	1.704**	13.63**	45.61**	7344.87**
Vermicompost (V)	ورمی کمپوست	2	5.79**	6.33**	24.21**	53.68**	2498.32**
Nanosilicon (N)	نانوسیلیکون	2	2.57**	4.311**	13.56**	8.36**	330.6**
I*V	آبیاری × ورمی کمپوست	4	0.063**	0.0148 ^{ns}	0.138 ^{ns}	0.834**	49.21**
I*N	آبیاری × نانوسیلیکون	4	0.087*	0.054**	0.072 ^{ns}	0.201	6.50 ^{ns}
V*N	ورمی کمپوست × نانوسیلیکون	4	0.0209 ^{ns}	0.0152 ^{ns}	0.057 ^{ns}	1.695**	1.71 ^{ns}
I*V*N	آبیاری × ورمی کمپوست × نانوسیلیکون	8	0.0021 ^{ns}	0.0048 ^{ns}	0.0059 ^{ns}	0.042 ^{ns}	0.033 ^{ns}
Error	اشتباه آزمایشی	52	0.0259	0.021	0.090	0.166	12.24
C.V %	ضریب تغییرات		7.1	5.7	7.3	4.7	12.4

Table 4. Continued

جدول ۴. ادامه

S.O.V	منابع تغییرات	درجه آزادی df	کاتالاز CAT	پراکسیداز POD	پلی فنل اکسیداز PPO	عملکرد کوانتومی Fv/Fm	عملکرد دانه grain yield	درصد روغن Oil percentage
Replication	تکرار	2	33369.5**	11584.71**	7446.04**	0.59**	2567682.7**	876.65**
Irrigation (I)	آبیاری	2	6392.14**	6985.96**	4321.64**	0.093**	3965509.8**	154.52**
Vermicompost (V)	ورمی کمپوست	2	2645.27**	3143.93**	3417.11**	0.272**	302081.2**	19.77**
Nanosilicon (N)	نانوسیلیکون	2	493.76**	539.88**	774.21**	0.033**	63783.5**	1.72**
I*V	آبیاری × ورمی کمپوست	4	44.32**	32.31**	35.12*	0.006**	19240.8**	1.26**
I*N	آبیاری × نانوسیلیکون	4	8.38 ^{ns}	5.55 ^{ns}	7.95 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	1763.4 ^{ns}	0.066 ^{ns}
V*N	ورمی کمپوست × نانوسیلیکون	4	19.07 ^{ns}	61.94**	22.62 ^{ns}	0.0008 ^{ns}	21.1 ^{ns}	0.104 ^{ns}
I*V*N	آبیاری × ورمی کمپوست × نانوسیلیکون	8	0.263 ^{ns}	0.63 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.00012 ^{ns}	449.1 ^{ns}	0.028 ^{ns}
Error	اشتباه آزمایشی	52	18.49	14.25	11.77	0.00059	5955.3	0.208
C.V %	ضریب تغییرات		6.06	5.15	7.06	7.13	10.33	5.69

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

ns, * and ** show no significant and significant differences at 0.05, 0.01 probability level, respectively

CAT: Catalase; POD: Peroxidase; PPO: Polyphenol Oxidase

محلول در مقایسه با عدم کاربرد ورمی کمپوست در شرایط

آبیاری کامل منجر شد (جدول ۵).

معنی دار شدن اثر ترکیب تیماری نانوسیلیکون در سطوح

آبیاری بر محتوای پرولین در سطح احتمال یک درصد (جدول

۴) و مقایسه میانگینها نشان داد بالاترین سطح از کاربرد

محتوای پرولین و قندهای محلول

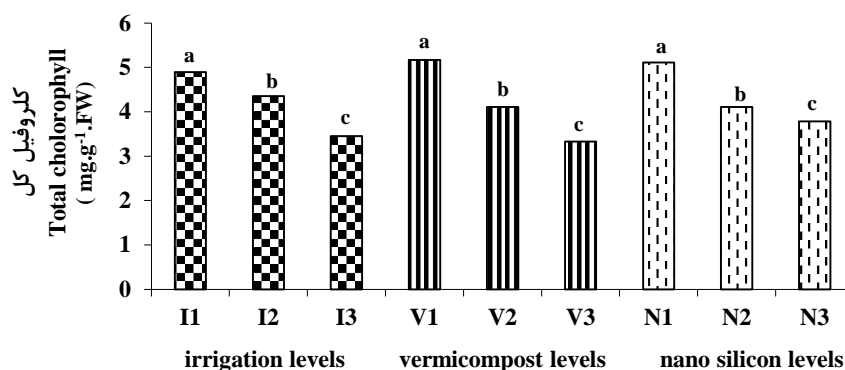
معنی دار شدن اثر برهم کنش توأم آبیاری در ورمی-

کمپوست بر هر دو صفت در سطح احتمال یک درصد (جدول

۴) و مقایسه میانگینها نشان داد بالاترین سطح از کاربرد

ورمی کمپوست در شرایط قطع آبیاری در مرحله تکمه دهی به

افزایش ۱۴۹ درصدی محتوای پرولین و ۹۹ درصد قندهای



شکل ۱. مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح آبیاری ورمی کمپوست و نانوسیلیکون بر محتوای کلروفیل کل گلرنگ

Fig. 1. Means comparison the main effects of irrigation levels, vermin compost and nano silicon on total chlorophyll content of safflower

جدول ۵. مقایسه میانگین تأثیر آبیاری و ورمی کمپوست بر محتوای کلروفیل a، پرولین و قندهای محلول، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، عملکرد کوانتومی، عملکرد دانه و درصد روغن گلرنگ تحت شرایط قطع آبیاری

Table 5. Means comparison the effects of irrigation and vermicompost on chlorophyll a, proline and soluble carbohydrate content, activity of CAT, POD and PPO enzymes, Fv/Fm, grain yield and oil percentage of safflower under irrigation withholding condition

تیمار Treatments	پرولین Proline μg g ⁻¹ FW	کلروفیل a Chlorophyll a -----mg g ⁻¹ FW-----	قندهای محلول soluble sugars	کاتالاز CAT ----- OD μg protein min ⁻¹ -----	پراکسیداز POD
I ₁ ×V ₁	1.26±5.94	3.81±0.935	62.23 ± 11.58	64.6± 30.21	85.96 ± 17.31
I ₁ ×V ₂	1.20±4.62	0.974±3.27	54.94 ± 10.54	55.73 ± 26.5	74.83 ±14.71
I ₁ ×V ₃	3.62 ± 0.765	2.73 ± 0.711	46.74 ± 9.11	49.01 ± 25.66	68.19 ±14.13
I ₂ ×V ₁	6.74 ± 1.43	0.813±3.32	71.25 ± 13.57	79.21 ±33.53	101.46± 20.43
I ₂ ×V ₂	5.26 ± 1.37	2.84 ± 0.689	12.07±62.9	29.45±68.32	88.3 ± 17.36
I ₂ ×V ₃	4.11± 0.871	0.617±2.37	53.52 ± 10.43	59.98 ± 28.75	16.68±80.46
I ₃ ×V ₁	9.03 ± 1.93	2.72 ± 0.683	98.32 ± 18.72	37.25±99.8	122.1 ± 24.59
I ₃ ×V ₂	7.13 ± 1.89	2.34 ± 0.59	86.81 ± 16.65	86.03 ± 32.74	162.6 ± 20.89
I ₃ ×V ₃	5.53± 1.17	1.97 ± 0.515	73.85 ± 14.39	32.35±75.4	20.07±96.83
LSD	0.385	0.152	3.31	4.067	3.57

Table 5. Continued

جدول ۵. ادامه

تیمار Treatments	پلی فنل اکسیداز PPO OD μg protein min ⁻¹	عملکرد کوانتومی Fv/Fm	عملکرد دانه grain yield kg.ha ⁻¹	درصد روغن Oil percentage %
I ₁ ×V ₁	69.58 ± 14.76	0.17±0.837	1825.51 ± 368.8	29.62 ± 5.48
I ₁ ×V ₂	59.69 ± 12.22	0.14±0.697	1703.74 ± 344.32	5.37±29.096
I ₁ ×V ₃	10.92±50.84	0.585 ± 0.122	305.41±1511.36	5.28±28.62
I ₂ ×V ₁	82.11 ± 17.42	0.754 ± 0.152	297.2±1478.93	28.077 ± 5.18
I ₂ ×V ₂	70.43 ± 14.43	0.635 ± 0.127	1418.42 ±286.59	26.66 ±4.94
I ₂ ×V ₃	59.99 ± 12.88	0.515 ± 0.115	272.61±1335.77	25.61 ± 4.73
I ₃ ×V ₁	98.81 ± 20.97	0.663 ± 0.133	1004.03 ±202.84	4.63±25.13
I ₃ ×V ₂	84.76±17.36	0.588 ± 0.119	937.06±189.37	24.39 ± 4.51
I ₃ ×V ₃	72.2±15.5	0.515 ± 0.106	831.25 ±167.97	4.33±23.46
LSD	3.245	0.022	72.99	0.431

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

I₁, I₂ و I₃: به ترتیب آبیاری کامل، قطع آبیاری در مرحله گلدهی و قطع آبیاری در مرحله تکمه دهی؛ V₁, V₂ و V₃: به ترتیب کاربرد ۸ تن در هکتار، ۴ تن در هکتار و عدم کاربرد ورمی کمپوست.

I₁, I₂, and I₃ indicate full irrigation, irrigation withholding at flowering and irrigation withholding at heading bud stage, respectively; V₁, V₂ and V₃ indicate application of 8 ton/ha, 4 ton/ha and no application of vermicompost, respectively. Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test

قندهای محلول و تجمع بیشتر آن‌ها در گیاه می‌شود (Silva et al., 2012). ورما و دویم (Verma and Dubeym, 2001) اظهار داشتند کاربرد سیلیکون با تأثیر بر متابولیسم قندها موجب افزایش قندهای محلول می‌شود. برخی محققان گزارش کرده‌اند کاربرد سیلیکون تحمل گیاه در برابر محدودیت آبی را از طریق اصلاح اسمولیت‌ها در گونه‌های مختلف گیاهی بهبود می‌بخشد (Hamayun et al., 2010; Hasanuzzaman et al., 2018)، طوری که محتوی پرولین در بوته‌های کلزا رشد یافته در شرایط محدودیت ملایم و شدید آبی با کاربرد سیلیکون افزایش نشان داد (Hasanuzzaman et al., 2018).

جدول ۶. مقایسه میانگین تأثیر آبیاری در نانوسیلیکون بر محتوای کلروفیل a و b

Table 6. Means comparison the effects of irrigation and nano silicon on Chlorophyll a and Chlorophyll b content

تیمارها Treatments	Chlorophyll a a کلروفیل	Chlorophyll b b کلروفیل
	----- mg.g. FW ⁻¹ -----	
I ₁ ×N ₁	3.64 ± 0.95	2.08 ± 0.655
I ₁ ×N ₂	3.22 ± 0.900	0.607 ± 1.48
I ₁ ×N ₃	0.825 ± 2.95	1.29 ± 0.485
I ₂ ×N ₁	0.832 ± 3.16	1.87 ± 0.587
I ₂ ×N ₂	0.781 ± 2.8	1.46 ± 0.564
I ₂ ×N ₃	0.718 ± 2.57	0.512 ± 1.047
I ₃ ×N ₁	0.693 ± 2.65	0.508 ± 1.56
I ₃ ×N ₂	2.31 ± 0.647	0.468 ± 0.974
N ₃ ×N ₃	0.562 ± 2.09	0.848 ± 0.425
LSD	0.152	0.137

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

I₁, I₂ و I₃: به ترتیب آبیاری کامل، قطع آبیاری در مرحله گلدهی و قطع آبیاری در مرحله تکمه دهی؛ N₁, N₂ و N₃: به ترتیب کاربرد ۸ تن در هکتار، ۴ تن در هکتار و عدم کاربرد ورمی کمپوست.

I₁, I₂ and I₃ indicate full irrigation, irrigation withholding at flowering and irrigation withholding at heading bud stages, respectively; N₁, N₂ and N₃ indicate application of 25 mg.l⁻¹, 50 mg.l⁻¹ and no application of nano silicon, respectively. Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test.

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان

تجزیه واریانس نشان داد برهم‌کنش آبیاری در ورمی کمپوست بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. همچنین برهم‌کنش ورمی کمپوست در نانوسیلیکون بر فعالیت پراکسیداز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین

نانوسیلیکون و ورمی کمپوست در مقایسه با عدم کاربرد آن‌ها، از افزایش ۸۱ درصدی محتوای پرولین برخوردار بود (جدول ۷). به نظر می‌رسد افزایش محتوای پرولین در شرایط محدودیت آبی، ناشی از بیوسنتز پرولین از گلوتامیک اسید در سیتوزول و کلروپلاست سلول‌های گیاهی (Lehmann et al., 2010) و تخریب پروتئین‌ها و انباشت آمینواسیدهای آزاد جهت تنظیم اسمزی سلول (Alikhani et al., 2019) باشد، در چنین شرایطی افزایش محتوای پرولین می‌تواند موجب محافظت از غشای سلولی، پروتئین‌ها، مهار گونه‌های فعال اکسیژن و حذف رادیکال‌های آزاد در شرایط محدودیت آبی شود (Liang et al., 2013). همچنین بخشی از افزایش محتوای پرولین می‌تواند با تولید قندهای محلول در ارتباط باشد؛ زیرا یکی از مسیرهای تولید پرولین، گلوتامات است و با افزایش تولید قندهای محلول، میزان گلوتامات افزایش یافته و سنتز پرولین تشدید می‌شود (Alikhani et al., 2019). افزایش محتوای قندهای محلول در شرایط محدودیت آبی می‌تواند ناشی از افزایش فعالیت آنزیم آمیلاز و هیدرولیز نشاسته به قندهای ساده و همچنین کند شدن انتقال قندها از برگ به سایر مراکز رشد باشد، از این رو در شرایط خشکی میزان نشاسته کاهش اما قندهای محلول افزایش می‌یابد (Zhang et al., 2010). برخی محققان (Kheirizadeh Arough et al., 2016) افزایش محتوای قندهای محلول در شرایط تنش را به کاهش نیاز به مواد فتوسنتزی به دلیل کاهش رشد، ساخت این ترکیبات از مسیرهای غیرفتوسنتزی و همچنین تخریب قندهای نامحلول نسبت دادند. بخشی از افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول می‌تواند ناشی از افزایش عناصر غذایی موجود در ورمی کمپوست باشد (جدول ۸). در این راستا قاسم‌زاده و جعفر (Ghasemzadeh and Jafar, 2011) اظهار داشتند زیادی عناصر غذایی قابل دسترس در خاک تیمار شده با ورمی کمپوست، با افزایش فعالیت آنزیم روبیسکو 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. به نظر می‌رسد افزایش محتوای پرولین در تیمار گیاه با سیلیکون به‌طور مستقیم و غیرمستقیم با القای ژن‌ها و افزایش فعالیت آنزیم‌های دخیل در مسیر بیوسنتز پرولین (Liang et al., 2006) و یا با افزایش محتوای کلروفیل کل مرتبط باشد که موجب افزایش میزان تثبیت دی‌اکسید کربن و در نهایت افزایش تولید

اکسیدانی در شرایط آزمایش می‌تواند وجود مقادیر بالایی از عناصر ریزمغذی به خصوص آهن و روی در ورمی کمپوست مورد استفاده باشد (جدول ۱) که در ساختار آنزیم‌ها شرکت دارند. نتایج مشابهی نیز در افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی با کاربرد ورمی کمپوست توسط دیگر محققان گزارش شده است (Adamipour et al., 2016). شن و همکاران (Shen et al., 2010) افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی 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. زو و گونگ (Zhu and Gong, 2014) اظهار داشتند کاربرد خارجی سیلیکون از طریق افزایش سیستم دفاعی گیاه از جمله فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی موجب می‌شود تنش اکسیداتیو القا شده توسط محدودیت آبی، کاهش یابد.

عملکرد کوانتومی

معنی دار شدن اثر سطوح آبیاری در ورمی کمپوست در سطح احتمال یک درصد (جدول ۴) و مقایسه میانگین‌ها نشان داد بالاترین سطح از کاربرد ورمی کمپوست در شرایط آبیاری کامل، از افزایش ۶۲ درصدی عملکرد کوانتومی نسبت به عدم کاربرد ورمی کمپوست در شرایط قطع آبیاری در مرحله تکمه-دهی برخوردار بود (جدول ۵). کاهش عملکرد کوانتومی در شرایط تنش، نشان‌دهنده کاهش میزان حفاظت نوری و در نتیجه بازدارندگی اثر تنش بر کارایی فتوسنتز است. نتایج مشابهی نیز توسط شیائو و همکاران (Xiao et al., 2019) مبنی بر کاهش عملکرد کوانتومی در برنج با افزایش محدودیت آبی گزارش شده است. آنان اظهار داشتند در تیمارهایی که عملکرد کوانتومی کمتر است، دستگاه فتوسنتزی در آن‌ها به خشکی حساس‌تر است و محدودیت آبی با اختلال در انتقال الکترون در واکنش مربوط به تجزیه آب (واکنش هیل) به بروز این پدیده کمک کرده و موجب می‌شود کارایی کوانتومی فتوسنتز کاهش یابد. از این رو به نظر می‌رسد افزایش این شاخص در کاربرد ورمی کمپوست در سطوح مختلف آبیاری (جدول ۵) نشان‌دهنده نقش مثبت این عوامل در بهبود سیستم حفاظتی گیاه است. طوری که در سطح ثابت از شرایط قطع آبیاری در مرحله تکمه‌دهی، عملکرد کوانتومی در بالاترین سطح از کاربرد ورمی کمپوست نسبت به عدم کاربرد ورمی کمپوست در این سطح از آبیاری،

برهمکنش توأم آبیاری با ورمی کمپوست نشان داد قطع آبیاری در مرحله تکمه‌دهی در بالاترین سطح از کاربرد ورمی کمپوست، از افزایش به ترتیب ۱۰۳، ۸۲ و ۹۴ درصدی فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز نسبت به عدم کاربرد ورمی کمپوست در شرایط آبیاری کامل برخوردار بود (جدول ۵). همچنین مقایسه میانگین ورمی کمپوست در نانوسیلیکون نشان داد بالاترین سطح از کاربرد نانوسیلیکون و ورمی کمپوست از افزایش ۴۵ درصدی فعالیت آنزیم پراکسیداز نسبت به عدم کاربرد ورمی کمپوست و نانوسیلیکون برخوردار بود (جدول ۷).

جدول ۷. مقایسه میانگین تأثیر ورمی کمپوست در نانوسیلیکون بر محتوای پرولین و فعالیت آنزیم پراکسیداز

Table 7. Means comparison the effects of vermicompost × nano silicon on proline content and activity of peroxidase enzyme

تیمارها Treatments	پرولین Proline μg.g ⁻¹ FW	پراکسیداز POD OD μg protein min ⁻¹
V ₁ ×N ₁	7.63 ± 2.18	108.93 ± 27.18
V ₁ ×N ₂	2.09 ± 7.29	102.69 ± 25.62
V ₁ ×N ₃	1.905 ± 6.79	97.2 ± 24.43
V ₂ ×N ₁	6.77 ± 1.98	91.67 ± 22.87
V ₂ ×N ₂	5.53 ± 1.588	89.59 ± 22.35
V ₂ ×N ₃	4.7 ± 1.35	88.12 ± 21.98
V ₃ ×N ₁	4.64 ± 1.33	86.9 ± 21.68
V ₃ ×N ₂	4.43 ± 1.268	83.84 ± 20.92
V ₃ ×N ₃	4.207 ± 1.207	74.73 ± 18.64
LSD	0.385	3.57

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

N₁، N₂ و N₃: به ترتیب کاربرد ۵۰ میلی گرم در لیتر، ۲۵ میلی گرم در لیتر و عدم کاربرد نانوسیلیکون؛ V₁، V₂ و V₃: به ترتیب کاربرد ۸ تن در هکتار، ۴ تن در هکتار و عدم کاربرد ورمی کمپوست.

N₁، N₂ and N₃ indicate application of 25 mg.l⁻¹, 50 mg.l⁻¹ and no application of nano silicon, respectively. V₁, V₂ and V₃ indicate application of 8 t.ha⁻¹, 4 t.ha⁻¹ and no application of vermicompost, respectively.

Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test

محدودیت آبی با آسیب به محتوای کلروفیل و سیستم انتقال الکترون فتوسنتز، منجر به تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود. در چنین شرایطی گیاه برای مقابله با اثرات نامطلوب گونه‌های فعال اکسیژن، با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی مثل کاتالاز، پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز (Abdel Latef, 2010)، موجب کاهش انباشت رادیکال‌های آزاد می‌شود. از دیگر دلایل افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی

۵). روند مشابهی نیز در افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی به دست آمد (جدول ۵). صالحی و همکاران (Salehi et al., 2011) اظهار داشتند ورمی کمپوست با بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و کمک به رشد بهتر ریشه، افزایش سنتز و تجمع متابولیت‌ها از جمله کربوهیدرات‌های محلول، منجر به افزایش عملکرد دانه می‌شود. به نظر می‌رسد سیلیکون از طریق کاهش تخریب رنگ‌دانه‌ها (Bybordi, 2016) و بهبود محتوای کلروفیل و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، به بهبود عملکرد دانه کمک می‌کند. کالته و همکاران (Kalteh et al., 2014) بیان داشتند محلول‌پاشی نانوسیلیکون با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و افزایش عملکرد کوانتومی، رشد و عملکرد گیاهان را بهبود می‌بخشد. در این بررسی نیز به نظر می‌رسد کاربرد ورمی-کمپوست و نانوسیلیکون تحت شرایط محدودیت آبی با افزایش محتوای کلروفیل کل (شکل ۱) و بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (جدول ۵) و اسمولیت‌های سازگاری همانند پرولین و قندهای محلول (جدول ۵)، موجب افزایش عملکرد دانه گلرنگ شده است.

درصد روغن

معنی‌دار شدن برهمکنش آبیاری در ورمی کمپوست بر درصد روغن در سطح احتمال یک درصد (جدول ۴) و مقایسه میانگین‌ها نشان داد بالاترین سطح از کاربرد ورمی کمپوست در شرایط آبیاری کامل از افزایش ۲۶/۲ درصدی محتوای روغن در مقایسه با قطع آبیاری در مرحله تکمه‌دهی و عدم کاربرد ورمی کمپوست برخوردار بود (جدول ۵). گزارش شده است که درصد روغن تحت تأثیر رژیم‌های آبیاری قرار می‌گیرد و با افزایش مقدار آبیاری، درصد روغن نیز افزایش می‌یابد (Patel and Patel., 1996). به نظر می‌رسد کاهش درصد روغن در اثر محدودیت آبی می‌تواند به علت اختلال در فرآیندهای متابولیکی بذر و آسیب به انتقال آسمیلات‌ها به دانه باشد، زیرا محدودیت آبی در مراحل نهایی رشد گیاه به دلیل تسریع در رسیدگی، درصد روغن را کاهش ولی محتوای پروتئین را افزایش می‌دهد. در چنین شرایطی فرصت کافی برای سنتز روغن از پروتئین‌های ذخیره‌شده در دانه وجود نداشته و از این رو درصد روغن کاهش می‌یابد (Seyed Ashrafi and Razmjoo, 2016). برخی معتقدند تنش خشکی باعث کاهش محتوای روغن دانه می‌شود (Ashrafi and Razmjoo, 2016).

از افزایش ۲۸ درصدی برخوردار بود (جدول ۵) که نشان دهنده نقش مثبت این کود زیستی در بهبود سیستم حفاظتی گیاه است. بخش دیگری از کاهش عملکرد کوانتومی در شرایط محدودیت ملایم و شدید آبی (قطع آبیاری در شرایط گلدهی و تکمه‌دهی) علاوه بر وقوع آشفستگی در کلروپلاست، می‌تواند ناشی از کاهش محتوای کلروفیل کل (شکل ۱) در این شرایط باشد؛ زیرا فلورسانس کلروفیل به‌طور مستقیم با فعالیت کلروفیل در مراکز واکنش فتوسیستم‌ها ارتباط داشته و می‌توان از آن به‌عنوان معیاری برای اندازه‌گیری کارایی فتوسنتز استفاده نمود (Maxwell and Johnson, 2000).

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد برهمکنش ورمی کمپوست در سطوح آبیاری بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد آبیاری کامل در بالاترین سطح از کاربرد ورمی کمپوست، از افزایش ۱۱۹ درصدی عملکرد دانه نسبت به عدم کاربرد ورمی-کمپوست در شرایط قطع آبیاری در مرحله تکمه‌دهی برخوردار بود (جدول ۵). بخشی از بالا بودن عملکرد دانه در شرایط آبیاری کامل و کاربرد ورمی کمپوست می‌تواند ناشی از افزایش ۶۱ درصدی محتوای کلروفیل a و افزایش ۶۲/۵ درصدی عملکرد کوانتومی در چنین ترکیبات تیماری در مقایسه با قطع آبیاری در مرحله تکمه‌دهی و عدم کاربرد ورمی کمپوست باشد (جدول ۵). به بیانی دیگر تنش آبی برخلاف آبیاری کامل با ایجاد تنش اکسیداتیو و اختلال در ساختار کلروپلاست و کاهش محتوای کلروفیل، منجر به کاهش فعالیت فتوسنتزی و عملکرد دانه می‌شود (Amini et al., 2013). بخشی از بهبود عملکرد دانه در کاربرد ورمی-کمپوست در تمامی سطوح آبیاری به‌خصوص در شرایط محدودیت شدید آبی، می‌تواند ناشی از بهبود حاصلخیزی خاک و فراهم نمودن عناصر ضروری گیاه (جدول ۱)، در کاربرد این کود زیستی در افزایش اسمولیت‌های سازگار (همچون پرولین و قندهای محلول) و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان (نظیر کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز) باشد. طوری که در سطح ثابت از آبیاری کامل و در بالاترین سطح از کاربرد ورمی کمپوست، محتوای پرولین و قندهای محلول از افزایش به ترتیب ۶۴ و ۳۳ درصدی نسبت به همین سطح از آبیاری و عدم کاربرد ورمی کمپوست برخوردار بودند (جدول

آنزیم‌ها نظیر کاتالاز و پراکسیداز، جلوگیری از اکسیداسیون برخی اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه و قابلیت تبدیل هیدرات کربن به روغن در شرایط تنش نقش اساسی دارد (Ruiz et al., 2000).

نتیجه‌گیری نهایی

به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش محدودیت آبی عملکرد کمی و کیفی، عملکرد کوانتومی و محتوای کلروفیل کاهش ولی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (همچون کاتالاز، پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز) و محتوای اسمولیت‌های سازگار (پرولین و قندهای محلول) افزایش یافت. کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در تمامی سطوح آبیاری (آبیاری کامل و محدودیت ملایم و شدید آبی) در مقایسه با عدم کاربرد آن‌ها، به بهبود عملکرد کوانتومی، محتوای کلروفیل، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوای پرولین و قندهای محلول منجر گردید. از این رو به نظر می‌رسد کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون می‌تواند به دلیل بهبود صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی، عملکرد گلرنگ را حتی در شرایط محدودیت آبی بهبود بخشد. ولی برای دستیابی به بالاترین عملکرد کمی و کیفی، کاربرد هشت تن در هکتار ورمی‌کمپوست در شرایط آبیاری کامل و حتی محدودیت ملایم و شدید آبی، مناسب‌ترین ترکیب تیماری قابل توصیه است.

2010). بخشی از بهبود محتوای روغن در کاربرد ورمی-کمپوست می‌تواند به دلیل فراهمی عناصر ریزمغذی موجود در آن از نظر آهن و روی باشد (جدول ۱). در این راستا، برخی محققان بهبود درصد روغن با کاربرد ریزمغذی‌ها را به نقش فعال این عناصر در بسیاری از سیستم‌های آنزیمی، تولید پروتئین و به‌عنوان کاتالیزور واکنش‌های شیمیایی اکسایشی و احیا نسبت داده‌اند (Bybordi, 2016). اثر افزاینده عنصر روی بر میزان پروتئین و روغن، به نقش آن در متابولیسم نیتروژن مربوط می‌شود. چون عنصر روی نقش مهمی در سنتز پروتئین‌ها و متابولیسم کربوهیدرات‌ها دارند (Sawan et al., 2001) که در نهایت به تجمع روغن کمک می‌کند. در اثر کمبود عنصر روی فعالیت آنزیم RNA پلیمرز کم می‌شود و با کاهش انتقال اسیدهای آمینه، تجزیه و تخریب RNA، سنتز پروتئین کاهش و به تبع از آن، درصد روغن کاهش می‌یابد زیرا سنتز روغن از پروتئین‌های ذخیره‌شده در دانه اتفاق می‌افتد. روی همچنین می‌تواند با افزایش متابولیسم چربی‌ها و میزان چربی ذخیره‌شده در بافت‌های ذخیره‌ای مانند دانه، در نهایت درصد روغن دانه را افزایش دهد (Hanif et al., 2017). سینگ (Singh, 2000) یکی از دلایل بهبود درصد روغن کلزا در حضور عنصر آهن در شرایط تنش خشکی را، به بهبود تداوم سطح برگ و افزایش فتوسنتز و تولیدات پروتئینی گیاه نسبت داد. به نظر می‌رسد بخشی از بالا بودن محتوای روغن در تیمارهای حاوی ورمی‌کمپوست ناشی از وجود مقادیر بالایی از آهن موجود در آن باشد (جدول ۱) که در تبدیل نیتروژن نیتراژ به اسیدهای آمینه، فعالیت برخی

منابع

- Abdel Latef, A.A., 2010. Changes of antioxidative enzymes in salinity tolerance among different wheat cultivars. *Cereal Research Communications*, 38, 43-55. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.1556/CRC.38.2010.1.5>
- 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, 35-47. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.18869/acadpub.ejgcst.7.1.35>
- 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, 155-166. [In Persian with English Summary]. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23832592.1398.32.1.7.0>
- Allen, D. J., Ort, D.R. 2001. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants. *Trends Plant Science*. 6, 36-42. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(00\)01808-2](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01808-2)
- Amini, H., Arzani, A., Bahrami, F., 2013. Seed

- yield and some physiological traits of safflower as affected by water deficit stress. *International Journal of Plant Production*. 17, 598-614. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22069/IJPP.2013.1120>
- Amiri, A., Bagheri, A., Khajeh, M., Najafabadi Pour, F., Yadollahi, P. 2014. Effect of silicone foliar application on yield and antioxidant enzymes activity of safflower under limited irrigation conditions. *Journal of Crop Production Research*. 5, 361- 372. [In Persian with English Summary].
- Arancon, N.Q., Edwards, C.A., Atiyeh, R., Metzger, J.D., 2004. Effects of vermicomposts produced from food waste on the growth and yields of greenhouse peppers. *Bioresource Technology*. 93, 139-144. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.015>
- Arnon, A.N., 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*. 23, 112-121. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/730/1/012066>
- Ashraf, M., Harris, P.J.C. 2013. Photosynthesis under stressful environments: an overview. *Photosynthetica*. 51, 163-190.
- Ashrafi, E., Razmjoo, Kh., 2010. Effect of irrigation regimes on oil content and composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 87, 499-506. <https://doi.org/10.1007/s11746-009-1527-8>
- Bates, L, Waldren, S.R.P., Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*. 39, 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Bradford, M.M., 1976. A rapid and sensitive for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*. 72, 248-254. <https://doi.org/10.1006/abio.1976.9999>
- Bybordi, A., 2016. Influence of zeolite, selenium and silicon upon some agronomic and physiologic characteristics of canola grown under salinity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 47, 832-850. <https://doi.org/10.1080/0010.3624.2016.1146898>
- Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, I.K., Rebers, P.A., Smith, F., 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*. 28, 350-356.
- El-Tayeb, M.A. 2005. Response of barley grains to the interactive effect of salinity and salicylic acid. *Plant Growth Regulation*. 45, 215-224. <https://doi.org/10.1007/s10725-005-4928-1>
- Ghasemzadeh, A., Jafar, 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 <https://doi.org/10.3390/ijms12021101>
- Gholdani, M., Kamali, M., 2016. Evaluation of culture Media including vermicompost, compost and manure under drought stress in Iranian Petunia (*Petunia hybrida*). *Plant Production*. 39, 91-100. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22055/ppd.2016.12335>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.02.023>
- Hajghani, M., Ghalavand, A., Modarres Sanavy, S.A.M., 2017. Evaluation the yield, yield components and growth indices of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in conventional and organic farming systems. *Journal of Agroecology*. 9, 15-30. [In Persian with English Summary] <https://doi.org/10.22067/JAG.V9I1.31520>
- Hamayun, M., Sohn, E.Y., Khan, S.A., Shinwari, Z.K., Khan, A.L., I.J. Lee., 2010. Silicon alleviates the adverse effects of salinity and drought stress on growth and endogenous plant growth hormones of soybean (*Glycine max* L.). *Pakistan Journal of Botany*. 42, 1713-1722.
- Hanif, M.A., Nawaz, M., Ayub, A., Tabassum, N., Kanwal, N., Rashid, N., Saleem, M., Ahmad, M., 2017. Evaluation of the effects of zinc on the chemical composition and biological activity of basil essential oil by using Raman spectroscopy. *Industrial Crops Production*, 96, 91-101. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2016.10.058>
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Anee, T.I., Khan, M.I.R., Fujita, M., 2018. Silicon-mediated regulation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress tolerance in Brassica napus L. *South African Journal of Botany*, 115, 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.12.006>
- Hassegawa, R.H., Fonseca, H., Fancelli, A.L., Da Silva, V.N., Schammas, E.A., Reis, T.A.,

- Correa, B., 2008. Influence of macro and micro nutrient fertilization on fungal contamination and fumonisin production in corn grains. *Food Control*. 19, 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2007.01.006>
- Jahangiri, N., Syyadat, A. Koochakzadeh, A., Sayyahfar, M., Moradi Telavat, M.R., 2017. The effect of vermicompost and Mycorrhizal inoculation on grain yield and some physiological characteristics of soybean (*Glycine max* L.) under water stress condition. *Journal of Agroecology*. 8, 583-597. [In Persian with English Summary] <https://doi.org/10.22067/JAG.V8I4.51116>
- Janmohammadi, M., Amanzadeh, T., Sabaghnia, N., Ion, V., 2016. Effect of nano-silicon foliar application on safflower growth under organic and inorganic fertilizer regimes. *Botanica Lithuanica*. 22, 53-64. <https://doi.org/10.1515/botlit-2016-0005>
- Jiao, J., Chen, K., Yi, C., 2010. Effects of soil moisture content on growth, physiological and biochemical characteristics of *Jatropha curcas* L. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 4460-4466. <https://doi.org/10.1007/s11337-010-1118-8>
- Joshi, N.L., Mali, P.C., Sexena, A., 1998. Effect of nitrogen and sulphur application on yield and fatty acid composition of mustard (*Brassica juncea* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 180, 59-63. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1998.tb00370.x>
- Kalteh, M., Alipour, Z.T., Ashraf, S., Aliabadi, M. M., Nosratabadi, A.F., 2014. Effect of silica nanoparticles on basil (*Ocimum basilicum*) under salinity stress. *Journal Chemistry Health Risks*. 4, 49-55. <https://doi.org/10.22034/jchr.2023.1967340.1619>
- Kheirizadeh Arough, Y., Seyed Sharifi, R., Seyed Sharifi, R., 2016. Bio fertilizers and zinc effects on some physiological parameters of Triticale under water limitation condition. *Journal of Plant Interactions*. 11, 167-177. <https://doi.org/10.1080/17429145.2016.1262914>
- Karo, M., Mishra, D. 1976. Catalase, peroxidase and polyphenol oxidase activity during rice leaf senescence. *Plant Physiology*. 57, 315-319.
- 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, 998-1011. <https://doi.org/10.1089/ars.2012.5074>
- Liang, Y., Zhu, Y., Christie, P., 2006. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A Review. *Environmental Pollution*. 147, 422-428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>
- Maxwell, K., Johnson, G.N., 2000. Chlorophyll fluorescence a practical guide. *Journal of Experimental Botany*. 51, 656-668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
- Merwad, A.R.M.A., Desoky, E.S.M., Rady, M.M., 2018. Response of water deficit-stressed *Vigna unguiculata* performances to silicon, proline or methionine foliar application. *Scientia Horticulturae*, 228, 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.10.08>
- Miller, G., Suzuki, N., Ciftci-Yilmaz, S., Mittler, R., 2010. Reactive oxygen species homeostasis and signaling during drought and salinity stresses. *Plant Cell and Environment*, 33, 453-467. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02041.x>
- Nourbakhsh, F., Chalavi, V., Akbarpour, V., 2016. Effect of vermicompost and nitroxin on vegetative growth and some biochemical properties of rosemary herb (*Rosmarinus officinalis* L.). *Journal of Horticultural Science*, 30, 178-184. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22067/JHORTS4.V30I2.34190>
- Oliviera-Neto, C.F., Silva-Lobato, A.K., Goncalves-Vidigal, M.C., Costa, R.C.L., Santos Filho, B.G., Alves, G.A.R., Silva-Maia, W.J.M., Cruz, F.J.R., Neres, H.K.B. Santos - Lopes, M.J., 2009. Carbon compounds and chlorophyll contents in sorghum submitted to water deficit during three growth stages. *Science and Technology*. 7, 588-593.
- 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 *Frontiers in Plant Science*. 8, 949-954. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00949>
- Pasban Eslam, B., 2014. Effects of row spacing and seeding rate on seed yield and its components in safflower Cv. Padideh in Tabriz region. *Seed and Plant Production Journal*. 30,

223-236.

- Patel, P.G., Patel, Z.Q., 1996. Effects of irrigation methods and levels on seed yield and quality of safflower. *Journal of Oilseed Research*. 13, 53-55.
- Reddy, A.R., Chaitanya, K.V., Vivekanandan, M., 2004. Drought induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology*. 161, 1189-1202.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.01.013>
- Ruiz, J.M., Baghour, M., Romero, L. 2000. Efficiency of the different genotypes of tomato in relation to foliar content of Fe and the response of some bioindicators. *Journal of Plant Nutrition*. 23, 1777 -1786.
<https://doi.org/10.1080/01904160009382141>
- Sajed Gollojeh, K., Khomari, S., Shekhzadeh, P., Sabaghnia, N., Mohebodini, M., 2020. The effect of foliar spray of nano silicone and salicylic acid on physiological traits and seed yield of spring rapeseed at water limitation conditions. *Electronic Journal of Crop Production*, 12, 137-156. [In Persian with English Summary].
<https://doi.org/10.22069/EJCP.2020.16396.2221>
- 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 Medical and Aromatic Plants*, 27, 188-201. [In Persian with English Summary]
<https://doi.org/10.22092/ijmapr.2011.6394>
- Sawan, Z.M., Hafez, S.A., Basyony, A.E., 2001. Effect of nitrogen fertilization and foliar application of plant growth retardant and zinc on cotton seed, protein and oil yields and oil properties of cotton. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 186, 183-191.
<https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2001.00473.x>
- Seyed Sharifi, R. 2016. *Oil Seeds*. Jahad Daneshgahi Ardabil press. 282 pp.
- Seyed Sharifi, R., Khalilzadeh, R., Jalilian, J., 2016. Effects of biofertilizers and cycocel on some physiological and biochemical traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Archive of Agronomy and Soil Science*, 63, 308-317.
<https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1207242>
- Seyed Sharifi, R., Khalilzadeh, R., 2018. *Morphology and Growth and Development Stages of Crops*. University of Mohaghegh Ardabili press. 505 p.
- Sharifi, P., 2017. Effect of silicon nutrition on yield and physiological characteristics of canola (*Brassica napus*) under water stress conditions. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR)*. 8, 144-153.
- Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Li, J., 2010. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. *Journal of Plant Physiology*. 167, 1248-1252.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.04.011>
- 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.
- Singh, S. 2000. Effect of Fe, Zn on growth of canola. *Journal of Environmental Sciences*, 34, 57-63.
- 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.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(01\)00450-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00450-2)
- Tas, S., Tas, B. 2007. Some physiological responses of drought stress in wheat genotypes with different ploidity in Turkey. *World Journal of Agricultural Science*. 3, 178-183.
- Theunissen, J., Ndakidemi, P., Laubscher, C., 2010. Potential of vermicompost produced from plant waste on the growth and nutrient status in vegetable production. *International Journal of the Physical Sciences*, 5, 1964-1973.
- Tripathi, D.K., Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D.K., Dubey, N.K., 2016. Silicon nanoparticles more efficiently alleviate arsenate toxicity than silicon in maize cultivar and hybrid differing in arsenate tolerance. *Frontiers in Environmental Science*, 4, 46.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00046>
- Verma, S., Dubey, R.S., 2001. Effect of cadmium on soluble sugars and enzymes of

- their etabolism in rice. *Biologia Plantarum*, 1, 117-123. <https://doi.org/10.1023/A:1017938809311>
- Xiao, X., Xu, X., Yang, F., 2008. Adaptive responses to progressive drought stress in two *Populus cothayana* populations, *Silva Fennica*. 42, 705-719. <https://doi.org/10.14214/sf.224>
- Zhang, K.M., Yu, H.J., Shi, K., Zhou, Y.H., Yu, J.Q., Xia, X., 2010. Photoprotective roles of anthocyanins in *Begonia semperflorens*. *Plant Science*. 179, 202-208. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.05.006>
- Zhu, Y., Gong, H., 2014. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*. 34, 455-472. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0194-1>