Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Crop Production

Print ISSN: 2008- 739x
Online ISSN: 2008- 7403

Iranian Society of Agronomy and Plant Breeding Sciences

The effects of vermicompost and nano silicon on yield and the trend of changes some physiological traits of rye (*Secale cereal* L.) in different irrigation regimes

Zahra Mohammadzadeh[1], Raouf Seyed Sharifi[2*]

1 Ph.D student, Crop Physiology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Ariculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: zahra.mhz9821@gmail.com

2 Corresponding Author, Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: raouf_ssharifi@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2024-6-5
Accepted: 2024-7-20

Keywords:
SPAD
relative water
stress
stomatal conductance

ABSTRACT

Background and objectives: Drought is one of the most important factors limiting crop production. Several methods have been proposed to increase the resistance of crops against water limitation. In this regard, the use of vermicompost and silicon can increase the performance of crop plants under stress conditions. Considering the above fact, the present study was undertaken to evaluate the effects of nano silicon and vermicompost application on grain yield and the trend of changes some physiological traits (i.e, SPAD, nitrogen index, relative water content, leaf electrical conductivity and stomatal conductivity) of rye in different irrigation regimes.

Materials and methods: A factorial layout based on a randomized complete block design with three replications was conducted under the research greenhouse conditions in 2023. Treatments were various irrigation regimes (full irrigation as control, irrigation withholding at 50% of booting and heading stages as severe and moderate water limitation, respectively), application of nanosilicon and vermicompost at four levels (no application as control, application of nanosilicon, vermicompost, both application vermicompost and nanosilicon). Vermicompost was prepared from Gilda Corporation and silicon from Pishgaman Nanomaterials Company. Nano silicon was with the average of particle size of less than 30 nm. Foliar application of Si was done in stages of tillering and stem elongation (BBCH 21 and 30, respectively). Two weeks after irrigation with holding in booting stage, some biochemical and physiological traits were measured on the flag leaf. The trend of changes some traits such as SPAD, nitrogen index, relative water content, leaf electrical conductivity and stomatal conductivity were measured at time intervals every four days from 135 to 151 days after planting. Analysis of variance was done by software package SAS $v_{9.12}$. The main effects and interactions were compared by LSD test at the 0.05 the probability level, using the SAS version 9.1.

Results: study of the trend of changes some physiological traits showed that in 151 days after planting under irrigation withholding at of booting conditions, application of vermicompost and nano silicon increased SPAD (47.9%), nitrogen index (47.6%), relative content of

flag leaf (30.2%), stomatal conductance (12.8%), root weight and volume (22.3 and 28.3%, respectively), plant height (32.5%), spike length (32.2%), the number of grains per spike (40.2%) and grain weight of per plant (7.3%) as compared to no application of nano silicon and vermicompost at the same level from irrigation levels. Also, under irrigation withholding at of booting stage conditions, no application of nano silicon and vermicompost increased electrical conductivity (13.8%), hydrogen peroxide content (26.7%) and malondialdehyde (9.8%) as compared to application of nano silicon and vermicompost at the same level from irrigation levels.

Conclusion: Therefore, with considering of the results of this study, it can be stated that, applying nano silicon and vermicompost were able to compensate part of the grain weight of per plant reduction caused by water limitation by improving some physiological traits of rye.

Cite this article: Mohammadzadeh, Z., Seyed Sharifi, R. 2024. The effects of vermicompost and nano silicon on yield and the trend of changes some physiological traits of rye (*Secale cereal* L.) in different irrigation regimes. *Crop Production Journal*, 17 (2), 121-140.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/ejcp.2024.22515.2630
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تولید گیاهان زراعی
شاپا چاپی: ۷۳۹x-۲۰۰۸
شاپا الکترونیکی: ۷٤۰۳-۲۰۰۸
دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
انجمن علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران

تاثیر ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون بر عملکرد و روند تغییرات برخی صفات فیزیولوژیک چاودار در رژیم‌های مختلف آبیاری

زهرا محمدزاده[۱]، رئوف سیدشریفی[۲*]

[۱] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، رایانامه: zahra.mhz9812@gmail.com
[۲] استاد، گروه مهندسی تولیدو ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، رایانامه: raouf_ssharifi@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۳/۳/۱٦
تاریخ پذیرش: ۱٤۰۳/٤/۳۰

واژه‌های کلیدی:
تنش
شاخص کلروفیل
محتوای نسبی آب
هدایت روزنه‌ای

چکیده

سابقه و هدف: خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده تولید گیاهان زراعی است. راه کارهای متعددی برای افزایش مقاومت گیاهان زراعی در برابر محدودیت آبی پیشنهاد شده است. در این رابطه کاربرد ورمی‌کمپوست و سیلیکون می‌تواند عملکرد گیاهان زراعی تحت شرایط تنش را افزایش دهد. هدف از این پژوهش ارزیابی اثرات نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست بر عملکرد دانه و روند تغییرات برخی صفات فیزیولوژیک چاودار در رژیم‌های مختلف آبیاری بود.

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 ۱٤۰۲ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل رژیم‌های مختلف آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد، قطع آبیاری در ۵۰ درصد مراحل آبستنی و سنبله‌دهی به‌ترتیب به‌عنوان محدودیت شدید و ملایم آبی)، کاربرد نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست در چهار سطح (عدم کاربرد به‌عنوان شاهد، کاربرد نانوسیلیکون، ورمی‌کمپوست، کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون) بود. ورمی‌کمپوست از شرکت گیلدا و نانوسیلیکون از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه شد. نانوسیلیکون با متوسط اندازه ذرات کمتر از ۳۰ نانومتر بود. محلول‌پاشی با نانوسیلیکون در دو مرحله پنجه‌زنی و ساقه‌دهی (به‌ترتیب معادل کد ۲۱ و ۳۰ مقیاس BBCH) انجام شد. دو هفته بعد از قطع آبیاری در مرحله خوشه‌دهی، برخی صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی بر روی برگ پرچم اندازه‌گیری شد. روند تغییرات برخی صفات همانند شاخص نیتروژن، قرائت کلروفیل‌متر، محتوای نسبی آب، هدایت الکتریکی و هدایت روزنه ایی برگ، در فاصله زمانی هر چهار روز یک بار از ۱۳۵ تا ۱۵۱ روز بعد از کاشت اندازه گیری شدند.

یافته‌ها: بررسی روند تغییرات فیزیولوژیک نشان داد که در ۱۵۱ روز بعد از کاشت در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، کاربرد توام نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست قرائت کلروفیل‌متر (٤۷/۹ درصد)، شاخص نیتروژن (٤۷/٦ درصد)، محتوای نسبی آب برگ پرچم (۳۰/۲ درصد)، هدایت روزنه‌ای (۱۲/۸ درصد)، وزن و حجم ریشه (به‌ترتیب ۲۲/۳ و ۲۸/۳ درصد)، ارتفاع

بوته (۳۲/۵ درصد)، طول سنبله (۳۲/۲ درصد)، تعداد دانه در سنبله (٤٠/٢ درصد) و وزن دانه در هر بوته (۷/۳ درصد) را نسبت به شرایط عدم کاربرد نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست در همین سطح از سطوح آبیاری افزایش داد. همچنین قطع آبیاری در مرحله آبستنی در شرایط عدم کاربرد نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست هدایت الکتریکی (۱۳/۸ درصد)، پراکسید هیدروژن (٢٦/٧ درصد) و مالون‌دی‌آلدهید (۹/۸ درصد) را نسبت به کاربرد توام نانوسیلیکون و ورمی-کمپوست در همین سطح از سطوح آبیاری افزایش داد.

نتیجه‌گیری: به نظر می‌رسد کاربرد تاثیر نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست با بهبود برخی صفات فیزیولوژیک چاودار قادر بودند بخشی از کاهش وزن دانه در هر بوته ناشی از محدودیت آبی را، جبران نمایند.

استناد: محمدزاده، زهرا؛ سیدشریفی، رئوف. (١٤٠٣).تاثیر ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون بر عملکرد و روند تغییرات برخی صفات فیزیولوژیک چاودار در رژیم‌های مختلف آبیاری. *مجله تولید گیاهان زراعی*، ۱۷(۲)، ١٤٠-١٢١.

DOI: 10.22069/ejcp.2024.22515.2630

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

چاودار (*Secale cereal* L.) به‌دلیل دامنه تحمل بالا به سرما، خشکی و شوری و امکان استفاده دو منظوره از آن، از اهمیت بالایی در مقایسه با جو و گندم برخوردار است (۱). خشکی گرچه یکی از مهمترین تنش‌های غیرزیستی موثر در کاهش عملکرد گیاهان زراعی است ولی گیاهان قادرند با ایجاد مکانیسم‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در جهت حفظ رشد و جلوگیری از کاهش بیش‌تر عملکرد، به نحو موثری عمل کنند (۲).

سیلیکون دومین عنصر در پوسته زمین و از عناصر ضروری برای رشد و نمو گیاه محسوب نمی‌شود، ولی به‌دلیل نقش محوری فیزیکی-مکانیکی آن، برای رشد بیش‌تر گیاهان مفید است و فرآیندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی زیادی را فعال می‌کند (۳). این عنصر با رسوب در زیر لایه کوتیکولی (با ضخامت ۰/۱ میکرومتر) برگ و تشکیل لایه دوگانه کوتیکول -سیلیس و در نتیجه افزایش ضخامت لایه کوتیکولی و موم آن، موجب کاهش تعرق از سطح برگ و افزایش محتوای نسبی آب و توسعه برگی گیاه شده، و تولید ماده خشک را افزایش می‌دهد (٤). سیلیکون تحت شرایط تنش با حفاظت از استوانه آوندی به‌عنوان یک حامل مکانیکی، ضمن سخت شدن دیواره سلولی استوانه آوندی و بافت آندودرمی، رشد طولی ریشه را افزایش می‌دهد (۵).

شریفی(۲۰۱۷) اظهار داشت محلول‌پاشی نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل همانند محدودیت آبی، با بهبود خصوصیات زراعی و فیزیولوژیک، موجب افزایش عملکرد دانه کلزا شد (٦). اپستین و بلوم (۲۰۰۵) اظهار نمودند کاربرد سیلیکون تحت شرایط خشکی با انتقال مواد فتوسنتزی بیش‌تر به اندام زایشی، موجب افزایش تعداد دانه در سنبله و عملکرد دانه گندم شد (۷). زروشان و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که نانوسیلیکون با کمک به افزایش جذب آب، موجب بهبود محتوای نسبی آب برگ و افزایش هدایت روزنه‌ای گیاه می‌شود (۸).

ورمی‌کمپوست به‌عنوان منبع غنی از عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف، ویتامین و هورمون‌های محرک رشد گیاه، یکی از کودهای زیستی مناسب در نظام‌های کشاورزی ارگانیک می‌باشد (۹). حیدرپور و همکاران (۲۰۲۰) اظهار داشتند که کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط محدودیت آبی، با افزایش محتوای نسبی آب، محتوای کلروفیل و کاهش نشت یونی برگ، می‌تواند در کاهش هدایت الکتریکی برگ و افزایش عملکرد موثر باشد (۱۰). گلدانی و کمالی (۲۰۱٦) بیان کردند کاربرد ورمی‌کمپوست به‌دلیل بهبود شرایط فیزیکوشیمیایی و افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک، منجر به افزایش پایداری غشا و محتوای نسبی آب شد (۱۱). محمدی کله‌سرلو و همکاران (۲۰۲۳) بیان کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست با کاهش هدایت الکتریکی و بهبود محتوای نسبی آب، موجب افزایش عملکرد دانه تریتیکاله شد (۱۲). بنیفاری و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط محدودیت آبی از طریق کاهش گونه‌های فعال اکسیژن و هدایت الکتریکی برگ، موجب افزایش محتوای کلروفیل، عملکرد کوانتومی و هدایت روزنه‌ای گیاه شدند (۱۳). شهبازی و همکاران (۱۳۹٤) بیان کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست از طریق بهبود رشد و توسعه ریشه، دسترسی به آب و عناصر غذایی را افزایش می‌دهد که با افزایش حجم اندام‌های فتوسنتز کننده، منجر به افزایش مقدار و ظرفیت تولید مواد پرورده و افزایش عملکرد دانه گندم می‌شود (۱٤).

تاثیر ناشی از محدودیت آبی در دوران رشد زایشی در کاهش عملکرد چاودار و نقشی که ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در تعدیل بخشی از

اثرات ناشی از محدودیت آبی دارد، موجب شد تا مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تاثیر برخی عوامل تعدیل کننده تنش (ورمی‌کمپوست و سیلیکون) بر وزن دانه در هر بوته و برخی صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک چاودار در شرایط محدودیت آبی اجرا شود.

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 ۱۴۰۲ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل رژیم‌های مختلف آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل در طول دوره رشد به‌عنوان شاهد، قطع آبیاری در ۵۰ درصد مراحل آبستنی و سنبله‌دهی به‌ترتیب به‌عنوان محدودیت شدید و ملایم آبی معادل با کد ۴۳ و ۵۵ مقیاس BBCH[1])، کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در چهار سطح (عدم کاربرد به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی ۴۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون، کاربرد هفت تن در هکتار ورمی‌کمپوست، کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون) بود. نانوسیلیکون ($Nano\ SiO^{-2}$) با اندازه ذرات ۲۰ تا ۳۰ نانومتر محصول شرکت Nanomaterial US Resarch بود که از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان در مشهد تهیه شد. محلول‌پاشی با نانوسیلیکون در مراحل پنجه‌دهی و ساقه‌دهی (به‌ترتیب معادل با کد ۲۱ و ۳۰ از مقیاس BBCH) انجام شد و مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است.

برای کاشت از گلدان‌هایی با قطر ۴۲ و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری استفاده شد. به هر گلدان ۱۳ کیلوگرم خاک اضافه شد. از چاودار پاییزه رقم محلی اردبیل با تراکم ۴۰۰ بذر در مترمربع (معادل ۵۵ عدد بذر در هر گلدان) که تراکم مطلوب و توصیه شده برای این رقم است استفاده شد. گلدان‌ها در شرایط گلخانه‌ای در دمای ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد با طول دوره روشنایی ۱۵-۱۴ ساعت (با استفاده از ترکیبی از لامپ های معمولی و مهتابی) نگهداری شدند. اولین آبیاری بعد از کاشت، آبیاری‌های بعدی بسته به شرایط محیطی و نیاز گیاه زراعی و سطوح تعریف شده، انجام شد. محلول‌پاشی با نانوسیلیکون در مراحل پنجه‌دهی و ساقه‌دهی (به‌ترتیب معادل با کد ۲۱ و ۳۰ از مقیاس BBCH) انجام شد. نتایج ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۲ و مشخصات ورمی‌کمپوست مصرفی در جدول ۳ آورده شده است.

دو هفته بعد از قطع آبیاری در مرحله سنبله‌دهی، نسبت به اندازه‌گیری برخی صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی بر روی برگ پرچم اقدام شد. روند تغییرات برخی صفات نظیر قرائت کلروفیل‌متر، شاخص نیتروژن، محتوای نسبی آب، هدایت الکتریکی و هدایت روزنه‌ایی برگ، در فواصل زمانی هر چهار روز یک‌بار اندازه‌گیری شد. در این راستا قرائت کلروفیل‌متر با استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر (SPAD-۵۰۲ مینولتای ژاپن)، و میزان نیتروژن برگ از همان برگ‌هایی که قرائت کلروفیل‌متر اندازه‌گیری شده بود، بر اساس رابطه زیر محاسبه شد (۱۵).

رابطه ۱:

$$N=SPAD\times(0.017332+0.0016322)$$

1-Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry (BBCH)

جدول ۱- مشخصات نانوسیلیکون

Table 1. Nano Silicon properties

رنگ Color	سطح ویژه ذرات surface of particles specific	میانگین اندازه ذرات Average particle size (nm)	خلوص Purity (%)	وزن Weight (g)	نوع نانوذرات Nanoparticles
پودری سفید White powder	>30 $m^2.g^{-1}$	20-30	99	0.05	نانوسیلیکون Nano silicon

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک

Table 2. Soil physico- chemical characteristics

ویژگی Characteristic	پتاسیم K	فسفر P	روی Zn	نیتروژن N	کربن آلی O. C	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	عصاره اشباع Saturated extract	بافت Texture	pH
مقادیر	mg.kg^{-1}					%				لومی سیلتی Loamy Silty	
Amount	255	17.3	1.02	0.04	0.7	38.5	42	19.5	47		7.8

جدول۳- نتایج تجزیه ورمی‌کمپوست

Table 3. Result of vermicompost analysis

مشخصه Characteristic	هدایت‌الکتریکی EC dS.m^{-1}	آهن Fe	منگنز Mn	مس Cu	روی Zn	سرب Pb	کادمیوم Cd	pH
		میلی گرم بر کیلوگرم (mg/kg)						
مقادیر Amount	1.12	5000	275	20	110	19	1	
مشخصه Characteristic	OM	OC	نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K	کلسیم Ca	منیزیم Mg	7.64
		درصد (٪)						
مقادیر Amount	56.8	32.9	1.55	0.4	0.4	2.73	0.95	

برای تعیین محتوای نسبی آب، از هر گلدان دو برگ پرچم به‌طور تصادفی انتخاب و بعد از قرار دادن در فویل‌های آلومینیومی، خیلی سریع به آزمایشگاه منتقل و با استفاده از رابطه پیشنهادی کوستوپولو و همکاران (۲۰۱۰) مقدار آن محاسبه شد (۱۶). به‌منظور اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در همان شرایط مربوط به اندازه‌گیری درصد محتوای نسبی آب، نمونه‌های برگ پرچم تا حد ممکن برخوردار از ابعاد یکسان، در بشرهای محتوای ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر (دارای EC مشخص) به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار داده و سپس توسط دستگاه EC متر (Mi 180 Bench Meter) اندازه‌گیری شد. هدایت روزنه‌ای برگ توسط دستگاه پرومتر (Porometer AP4, Delta-T Devices ltd., Cambridge, UK) به‌طور تصادفی بر روی چهار برگ پرچم اندازه‌گیری شد. برای سنجش پراکسید هیدروژن یک گرم نمونه برگ پرچم خرد کرده، درون فالکن‌های ۱۵ میلی‌لیتری ریخته و به آن پنج میلی‌لیتر محلول اسیدتری‌کلرواستیک یک درصد اضافه شد. نمونه هموژنیزه شده با سرعت ۹۰۰۰ دور بر دقیقه به‌مدت ۳۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول رویی به میکروتیوپ‌های دو میلی‌لیتری منتقل شده و به آن‌ها ۰/۵ میلی‌لیتر محلول بافر فسفات پتاسیم ۱۰ میلی‌مولار (pH=۷) و یک میلی‌لیتر محلول یک‌مولار یدید پتاسیم اضافه شد. میزان جذب با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۳۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (۱۷). محتوای مالون‌دی‌آلدهید

با روش استیوارت و بیولی (۱۹۸۰) اندازه‌گیری شد (۱۸). به‌منظور تعیین ارتفاع بوته، طول سنبله، تعداد دانه در سنبله و وزن دانه در هر بوته، پنج بوته به ظاهر مشابه و یکنواخت در زمان رسیدگی از بوته‌های هر گلدان برداشت و میانگین داده‌های حاصل، به‌عنوان ارزش این صفات در جدول تجزیه واریانس استفاده شد. وزن و حجم ریشه با خارج سازی ریشه‌ها از گلدان انجام شد. ریشه‌ها در آون با دمای ۷۵ درجه به مدت ۷۲ ساعت قرار داده شد و سپس وزن خشک ریشه با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین شد. حجم ریشه‌ها با استفاده از حجم مشخصی از آب در استوانه مدرج اندازه‌گیری شد. برای تجزیه داده‌ها از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/٤) استفاده شد. میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند.

نتایج و بحث

قرائت کلروفیل‌متر: تاثیر تعدیل کننده‌های تنش (نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست)، رژیم‌های مختلف آبیاری و برهمکنش توام این عوامل بر قرائت کلروفیل‌متر برگ پرچم در تمامی مراحل نمونه‌برداری در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ٤). بررسی روند تغییرات قرائت کلروفیل‌متر در سطوح مختلف آبیاری نشان داد که مقدار این عدد در مراحل اولیه نمونه‌برداری بالا بوده و سپس تا انتهای فصل رشد به‌دلیل نزدیک شدن به مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی و پیر شدن برگ‌ها، روند نزولی داشت. ولی با کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون، روند تغییرات این عدد، نوسان کمتری نشان داد (جدول ۵). طوری‌که در ۱۵۱ روز پس از کاشت (اوایل مرحله‌ی شیری شدن معادل BBCH ۷۳)، بیش‌ترین عدد قرائت کلروفیل‌متر در کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل بدست آمد که از افزایش ۵۵/۷ درصدی نسبت به قطع آبیاری در مرحله آبستنی و عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون برخوردار بود. همچنین کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، موجب افزایش ٤۷/۹ درصدی شاخص کلروفیل نسبت به عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در همین سطح از سطوح آبیاری شد (جدول ۵). به‌نظر می‌رسد علت کاهش قرائت کلروفیل‌متر (SPAD) در شرایط محدودیت آبی را می‌توان به افزایش غلظت آبسیزیک اسید و اتیلن نسبت داد که تحریک کننده آنزیم کلروفیلاز بوده و موجب تجزیه کلروفیل می‌شود (۱۹). بخش دیگری از کاهش قرائت کلروفیل‌متر در شرایط محدودیت آبی می‌تواند ناشی از افزایش تنش اکسیداتیو و تولید گونه‌های فعال اکسیژن نظیر پراکسید هیدروژن (جدول ۱۱) باشد که ضمن افزایش پراکسیداسیون لیپیدی یا محتوای مالون دی‌آلدئید (جدول ۱۱)، موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های بیوسنتزی رنگدانه‌های فتوسنتزی همانند آنزیم گلوتامات لیگاز، القای تجزیه یا مهار سنتز آنها در شرایط تنش، تخریب ساختمان کلروپلاست، فتواکسیداسیون کلروفیل‌ها و واکنش آنها با اکسیژن فعال می‌شود (۲۰). نتایج مشابهی نیز مبنی بر کاهش کلروفیل در شرایط محدودیت آبی با افزایش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن و پراکسیداسیون لیپیدی، توسط دیگر محققان گزارش شده است (۲۱). بخشی از بهبود قرائت کلروفیل‌متر (SPAD) با کاربرد ورمی‌کمپوست و سیلیکون می‌تواند ناشی از تاثیر این عوامل در افزایش وزن و حجم ریشه (جدول ۱۱) باشد که ضمن کمک به بهبود دسترسی به آب و افزایش محتوای نسبی آب (جدول ۷)، در کاهش اثرات ناشی از تنش اکسیداتیو و تعدیل اثرات ناشی از محدودیت آبی به نحو موثری عمل نموده و از کاهش

بیشتر کلروفیل جلوگیری می‌کند. از طرفی کاربرد ورمی‌کمپوست با افزایش فراهمی عناصر غذایی موثر در ساختار کلروفیل نظیر آهن، روی و منیزیوم (جدول ۳) و کمک به آزاد سازی تدریجی عناصری مانند نیتروژن، موجب افزایش فعالیت کربوکسیلازی روبیسکو و افزایش سنتز کلروفیل می‌شود (۲۲). برخی محققان اظهار داشتند که کاربرد ورمی‌کمپوست از طریق بهبود فعالیت‌های میکروبی خاک، تولید تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه و کمک به جذب بیشتر عناصر غذایی، موجب افزایش محتوای کلروفیل می‌شود (۲۳). بخشی از بهبود قرائت کلروفیل‌متر با کاربرد سیلیکون می‌تواند ناشی از قرارگیری سیلیکون در آپوپلاست دیواره‌های خارجی سلول‌های اپیدرمی برگ باشد که علاوه بر استحکام برگ، و تولید بافت ناهمواری در دو سطح برگ (۲٤)، موجب تاخیر در پیری برگ و در نتیجه افزایش محتوای کلروفیل می‌گردد. برخی محققان اظهار داشتند که کاربرد ورمی‌کمپوست با افزایش میزان نیتروژن برگ، موجب افزایش قرائت کلروفیل‌متر یا SPAD شد (۲۵) و در این راستا ارزیابی شاخص نیتروژن (جدول ۷) نیز بیانگر این مدعاست چرا که در همان ترکیب تیماری که قرائت کلروفیل‌متر حداکثر شده بود، شاخص نیتروژن نیز از مقادیر بالایی برخوردار بود.

شاخص نیتروژن: کاربرد نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست، سطوح آبیاری و برهمکنش توام این عوامل بر شاخص نیتروژن برگ پرچم در تمامی مراحل نمونه برداری در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ٤). روند تغییرات شاخص نیتروژن برگ پرچم مشابه تغییرات قرائت کلروفیل‌متر بود. طوری‌که در تمامی ترکیبات تیماری، در مراحل اولیه نمونه‌برداری بالا بوده و با گذشت زمان از روند نزولی نسبتا مشابهی برخوردار شده و در انتهای فصل رشد به‌دلیل نزدیک شدن به مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی و پیری برگ‌ها، کاهش یافت (جدول ۵). با کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در تمام سطوح آبیاری، روند تغییرات شاخص نیتروژن از دامنه تغییرات کمتری برخوردار بود (جدول ۵). نتایج نشان داد که در ۱۵۱ روز پس از کاشت (اوایل مرحله‌ی شیری شدن معادل BBCH ۷۳)، بیش‌ترین شاخص نیتروژن برگ پرچم در کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل بدست آمد که از افزایش ۵۵/۸ درصدی نسبت به قطع آبیاری در مرحله آبستنی و عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون برخوردار بود و همچنین کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، موجب افزایش ٤٧/٦ درصدی شاخص نیتروژن نسبت به عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در این سطح از سطوح آبیاری شد (جدول ۵). به بیانی دیگر در همان ترکیبات تیماری که مقدار نیتروژن کمتر بود قرائت کلروفیل‌متر نیز از عدد کمتری برخوردار بود (جدول ۵). به‌نظر می‌رسد وجود عناصر غذایی موثر در سنتز کلروفیل مانند نیتروژن، آهن و منیزیم در ورمی‌کمپوست مورد استفاده (جدول ۳)، می‌تواند از دلایل افزایش شاخص نیتروژن باشد. رشتبری و علیخانی (۲۰۱۲) اظهار داشتند که کاربرد ورمی‌کمپوست با افزایش میزان نیتروژن برگ، موجب افزایش قرائت کلروفیل‌متر شد (۲۵). سیلیکون نیز در شرایطی که قابلیت دسترسی نیترات کم باشد، جذب آن را افزایش می‌دهد و اگر غلظت نیترات در گیاه کافی باشد، به‌منظور پیشگیری از بروز سمیت، تجمع نیترات را کاهش می‌دهد. از این‌رو، سیلیکون با افزایش سنتز نیتروژن از آمینواسیدها و دیگر ترکیبات دارای نیتروژن، موجب افزایش شاخص نیتروژن می‌شود (۲٦).

جدول ٤- تجزیه واریانس تاثیر نانوسیلیکون و ورمی کمپوست بر قرائت کلروفیل‌متر و نیتروژن برگ پرچم چاودار تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

Table 4. Variance analysis of the effects of nano silicon and vermicompost on SPAD and nitrogen index flag leaf of rye under various irrigation regimes

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	Mean Square مربعات میانگین									
		قرائت کلروفیل‌متر (SPAD)					شاخص نیتروژن Nitrogen index				
		sampling stages (day after planting) مراحل نمونه‌برداری (روز پس از کاشت)									
		135	139	143	147	151	135	139	143	147	151
تکرار Replication	2	45.9^{ns}	10.7^{ns}	65.5**	133**	36.9*	0.016^{ns}	0.0038^{ns}	0.013*	0.047*	0.02**
سطوح آبیار (A) Irrigation levels	2	156.1**	76.2*	249.4**	220.6**	224.9**	0.05**	0.27**	0.08**	0.079*	0.089*
تعدیل‌کننده‌های تنش (N) Stress modulator	3	280.2**	414.1**	195.7**	266.6**	199.8**	0.1**	0.14**	0.07**	0.095*	0.07**
A×N	6	70.3**	22.3*	34.5**	53.1*	34.1**	0.02*	0.008*	0.012*	0.019*	0.012*
خطاError	22	21.4	8.2	6.5	8.8	8.1	0.007	0.0029	0.0029	0.0031	0.002
ضریب تغییرات (%) CV		8.5	5.3	5.6	6.4	6.5	8.8	5.8	5.2	6.3	6.2

ns، * و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** are non-significant, significant at P≤0.05 and P≤0.01, respectively.

جدول ٥- مقایسه میانگین تاثیر نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست بر قرائت کلروفیل‌متر و شاخص نیتروژن برگ پرچم چاودار تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

Table 5. Means comparison of the effects of nano silicon and vermicompost on SPAD and nitrogen index flag leaf of rye under various irrigation regimes

Treatments تیمارها	قرائت کلروفیل‌متر (SPAD)					شاخص نیتروژن برگ پرچم Nitrogen Index				
	Day after planting روز پس از کاشت									
	135	139	143	147	151	135	139	143	147	151
$A_1 \times N_1$	50.4^{c-f}	45.6^{g}	52.56^{bc}	48.5^{ab}	45.9^{ab}	0.95^{c-f}	0.86^{g}	0.99^{bc}	0.919^{ab}	0.87^{ab}
$A_1 \times N_2$	51.8^{c-e}	56.3^{b-e}	56.1^{ab}	49.4^{ab}	47^{ab}	0.982^{c-e}	1.06^{b-e}	1.063^{ab}	0.938^{ab}	0.891^{ab}
$A_1 \times N_3$	61.9^{ab}	57.7^{a-d}	56.4^{ab}	52.5^{a}	49.1^{a}	1.17^{ab}	1.09^{a-d}	1.07^{ab}	0.996^{a}	0.93^{a}
$A_1 \times N_4$	64.5^{a}	61.5^{a}	57.6^{a}	53.1^{a}	49.4^{a}	1.22^{a}	1.16^{a}	1.09^{a}	1.008^{a}	0.93^{a}
$A_2 \times N_1$	43.7^{f}	41.3^{g}	38.94^{d}	33.53^{c}	31.7^{c}	0.828^{f}	0.784^{g}	0.73^{d}	0.635^{c}	0.602^{c}
$A_2 \times N_2$	56.3^{b-d}	55.6^{c-e}	52.5^{bc}	47.06^{b}	33.6^{c}	1.067^{b-d}	1.054^{c-e}	0.99^{bc}	0.892^{b}	0.93^{c}
$A_2 \times N_3$	51.4^{c-f}	50.4^{f}	53.86^{a-c}	49.06^{ab}	42.8^{b}	0.976^{c-f}	0.957^{f}	1.02^{a-c}	0.93^{ab}	0.81^{b}
$A_2 \times N_4$	48.8^{d-f}	54.3^{ef}	52.73^{bc}	51.9^{ab}	46.9^{ab}	0.926^{d-f}	1.03^{d-f}	1^{bc}	0.984^{ab}	0.89^{ab}
$A_3 \times N_1$	44.5^{ef}	43.3^{g}	41.2^{d}	37^{c}	35.4^{c}	0.844^{ef}	0.821^{g}	0.78^{d}	0.70^{c}	0.67^{c}
$A_3 \times N_2$	53.6^{cd}	52.4^{ef}	43.5^{d}	35.4^{c}	44.9^{ab}	1.017^{cd}	0.993^{ef}	0.82^{d}	0.67^{c}	0.85^{ab}
$A_3 \times N_3$	57.4^{a-c}	59.5^{a-c}	53.5^{a-c}	48.2^{ab}	45.6^{ab}	1.089^{a-c}	1.128^{a-c}	1.01^{a-c}	0.91^{ab}	0.86^{ab}
$A_3 \times N_4$	63.3^{ab}	60.9^{ab}	51.06^{c}	49.2^{ab}	48.7^{a}	1.201^{ab}	1.155^{ab}	0.96^{c}	0.94^{ab}	0.92^{a}
LSD	7.8	4.8	4.8	5.04	4.8	0.14	0.09	0.09	0.09	0.091

A_1، A_2 و A_3 به‌ترتیب آبیاری کامل و قطع آبیاری در مراحل آبستنی و سنبله‌دهی. N_1، N_2، N_3 و N_4 به‌ترتیب شاهد، کاربرد نانوسیلیکون، ورمی‌کمپوست، کاربرد توام نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

A1, A2 and A3 are full irrigation, irrigation withholding at heading and booting stages, respectively.
N1, N2, N3 and N4 are control, application of nano-silicon, vermicompost, both application vermicompost and nano-silicon, respectively. Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test.

محتوای نسبی آب برگ پرچم: تاثیر تعدیل کننده‌های تنش (نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست)، سطوح آبیاری و برهمکنش توام این عوامل بر محتوای نسبی در تمامی مراحل نمونه‌برداری در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بوده (جدول ٦) و در طول فصل رشد از الگوی نسبتا یکسانی برای تمامی تیمارها

تبعیت کرد (جدول ۷). در شرایط محدودیت شدید آبی (قطع آبیاری در مرحله آبستنی) میزان این کاهش نسبت به قطع آبیاری در مرحله سنبله‌دهی و آبیاری کامل، بسیار بارزتر بود (جدول ۷). نتایج نشان داد در ۱۵۱ روز پس از کاشت، بیشترین محتوای نسبی آب در کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل بدست آمد که از افزایش ٤٥/٤ درصدی نسبت به قطع آبیاری در مرحله آبستنی و عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون برخوردار بود.

همچنین در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون موجب افزایش ۳۰/۲ درصدی محتوای نسبی آب نسبت به عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در این مرحله از مراحل آبیاری شد (جدول ۷). یکی از مهمترین عوامل حفظ بقای گیاه در شرایط تنش، توانایی گیاه در حفظ آب سلولی از طریق افزایش محتوای نسبی آب است. احتمالا محدودیت آبی، پایداری غشاء سلولی را از طریق افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن همچون پراکسید هیدروژن (جدول ۱۱) و افزایش پراکسیداسیون لیپیدی همچون محتوای مالون دی آلدئید (جدول ۱۱)، کاهش می‌دهد که در چنین شرایطی محتوای نسبی آب برگ، کاهش می‌یابد (۲۷). حسین و همکاران (۲۰۲۲) نیز کاهش محتوای نسبی آب در شرایط محدودیت آبی را، به افزایش نشت الکترولیت از سلول‌های برگ به‌دلیل تجمع گونه‌های فعال اکسیژن و افزایش پراکسیداسیون لیپیدی نسبت دادند (۲۸). بخشی از افزایش محتوای نسبی آب به‌واسطه کاربرد ورمی‌کمپوست را می‌توان به افزایش فراهمی عناصر غذایی (جدول ۳) موجود در آن، نسبت داد. در این راستا نظری و همکاران (۲۰۲۲) اظهار داشتند که کاربرد ورمی‌کمپوست با افزایش فراهمی و جذب عناصر غذایی، ضمن افزایش فرآیندهای فتوسنتزی همچون قرائت کلروفیل‌متر (جدول ۵) و کاهش آسیب به غشاء سلولی، موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ تریتیکاله در شرایط محدودیت آبی شد (۲۹). شادکام و مهاجری (۲۰۱۹) گزارش کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست تحت شرایط خشکی با بهبود ساختار خاک و کمک به حفظ رطوبت، موجب بهبود رشد و محتوای نسبی آب برگ به لیمو شد (۳۰). ما و یاماجی (۲۰۰٦) اظهار داشتند که سیلیکون با رسوب در زیر لایه کوتیکولی برگ و افزایش ضخامت لایه آن، موجب کاهش تعرق از سطح برگ و افزایش محتوای نسبی آب می‌شود (٤). بخشی از افزایش محتوای نسبی آب با کاربرد ورمی‌کمپوست و سیلیکون می‌تواند ناشی از تاثیر این عوامل در افزایش وزن و حجم ریشه (جدول ۱۱) باشد. نتایج مشابهی نیز توسط دیگر محققان گزارش شده است (۳۱).

هدایت روزنه‌ای برگ پرچم: برهمکنش توام نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست، سطوح آبیاری بر هدایت روزنه‌ای برگ پرچم در تمامی مراحل نمونه‌برداری در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ٦). بررسی روند تغییرات هدایت روزنه‌ای برگ پرچم نشان داد که در تمامی ترکیبات تیماری، با گذشت زمان به‌دلیل نزدیک شدن به مرحله رسیدگی و پیر شدن برگ‌ها مقدار این صفت از روند نزولی نسبتا مشابهی برخوردار بود، ولی در کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش، روند تغییرات این شاخص، نوسان کمتری نشان داد (جدول ۷). طوری‌که در ۱۵۱ روز پس از کاشت، بیش‌ترین هدایت روزنه‌ای برگ پرچم در کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل بدست آمد که از افزایش ۵۱/۱ درصدی نسبت به قطع آبیاری در مرحله آبستنی و عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون برخوردار بود. همچنین کاربرد توام

ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی موجب افزایش ۱۲/۸ درصدی هدایت روزنه‌ای نسبت به عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در همین سطح از سطوح آبیاری شد(جدول ۷). به نظر می‌رسد بخشی از افزایش هدایت روزنه‌ایی در کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون ناشی از تاثیر این عوامل بر افزایش وزن و حجم ریشه (جدول ۱۱) باشد که با کمک به جذب بهتر آب، منجر به افزایش محتوای نسبی آب گیاه (جدول ۷) و هدایت روزنه‌ایی گیاه می‌شود. به بیانی دیگر در هر ترکیب تیماری که محتوای نسبی آب بالاتر بوده است در همان ترکیب تیماری، هدایت روزنه‌ایی نیز بیشتر بود. در این راستا زروشان و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که نانوسیلیکون با کمک به افزایش جذب آب و بهبود محتوای نسبی آب برگ، و همچنین با رسوب در سلول‌های نگهبان روزنه و بهبود حرکات روزنه‌ای، موجب افزایش هدایت روزنه‌ای می‌شود (۸). حبیبی وحاجی‌بلند (۲۰۱۳) نیز اظهار داشتند که کاربرد سیلیکون با بهبود جذب آب از ریشه و افزایش محتوای نسبی آب، موجب افزایش هدایت روزنه‌ای شد (۳۲).

جدول ٦- تجزیه واریانس تاثیر نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست بر محتوای نسبی آب و هدایت روزنه‌ای برگ پرچم چاودار تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

Table 6. Variance analysis of the effects of nano silicon and vermicompost on relative water content and stomatal conductivity of flag leaf of rye under various irrigation regimes

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	Mean Square مربعات میانگین									
		Relative water content محتوای نسبی آب					Stomatal conductivity هدایت روزنه‌ای				
		sampling stages (day after planting) مراحل نمونه‌برداری (روز پس از کاشت)									
		135	139	143	147	151	135	139	143	147	151
تکرار Replication	2	187.1**	14.4ns	38.2ns	44.5*	15.06ns	22.1**	22.2**	33.9**	111.6**	41.3**
سطوح آبیاری Irrigation (A) levels	2	344.6**	784.5**	307.9**	737.5**	714.2**	65.4**	97.7**	131.6**	130.7**	176.2**
تعدیل‌کننده‌های تنش (N) Stress modulator	3	127.9**	78.6*	512.6**	212.9**	55.6**	35.7**	44.1**	80.2**	91.6**	92.2**
A×N	6	84.1**	89.4*	55.7*	35.1*	40.7*	5.4**	6.2**	34.8**	18.1*	13.9*
خطا Error	22	17.5	22.5	21.7	13.2	13.2	1.1	1.4	3.4	5.5	5. 2
ضریب تغییرات CV (%)		5.4	7	6.8	5.3	5.3	4.9	4.6	5.4	6	5.5

ns، * و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** are non-significant, significant at P≤0.05 and P≤0.01, respectively.

هدایت الکتریکی برگ پرچم: برهمکنش تعدیل کننده‌های تنش و سطوح آبیاری بر هدایت الکتریکی برگ پرچم در تمامی مراحل نمونه برداری در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۸). در تمامی سطوح آبیاری، هدایت الکتریکی برگ پرچم در کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در مقایسه با عدم کاربرد این عوامل، کاهش یافت (جدول ۹) و شدت این کاهش با گذشت زمان و در مراحل نهایی نمونه برداری، بیشتر از مراحل اولیه نمونه برداری بود (جدول ۹). به‌طوری‌که در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی در ۱۵۱روز پس از کاشت، هدایت الکتریکی برگ پرچم در حالت عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون از افزایش ٤٩/٤٦ درصدی نسبت به کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل برخوردار بود. همچنین عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون

تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی از افزایش ۱۳/۸ درصدی هدایت الکتریکی برگ پرچم نسبت به کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در این سطح از سطوح آبیاری برخوردار بود (جدول ۹). افزایش هدایت الکتریکی در شرایط تنش، می‌تواند با تولید گونه‌های فعال اکسیژن همچون پراکسید هیدروژن (جدول ۱۱) و آسیب وارده بر غشای سلولی و همچنین پراکسیداسیون غشایی (جدول ۱۱)، مرتبط باشد. به بیانی دیگر گونه‌های فعال اکسیژن با افزایش پراکسیداسیون لیپیدی و محتوای مالون دی‌آلدئید موجب تغییر در نفوذپذیری غشا و افزایش نشت یونی به بیرون از سلول می‌شوند (۳۳). حیدرپور و همکاران (۲۰۲۰) اظهار داشتند که کاربرد ورمی‌کمپوست تحت شرایط خشکی با افزایش پایداری غشا، منجر به کاهش هدایت الکتریکی و نشت یونی برگ مرزه شد (۱۰). برخی محققان معتقدند سیلیکون پس از ورود و رسوب در داخل سلول، به صورت ژل پلیمری شده در آمده و ضمن استحکام و پایداری گیاه، میزان نشت الکترولیت در گیاه را نیز کاهش می‌دهد (۳٤).

جدول ۷- مقایسه میانگین تاثیر نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست بر محتوای نسبی آب و هدایت روزنه‌ای برگ پرچم چاودار تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

Table 7. Means comparison of the effects of nanosilicon and vermicompost on relative water content and stomatal conductivity of flag leaf of rye under various irrigation regimes

Treatments تیمارها	محتوای نسبی آب Relative water content (%)					هدایت روزنه‌ای Stomatal conductivity (mmol H_2O m^2·sec)				
	135	139	143	147	151	135	139	143	147	151
$A_1 \times N_1$	72.43^{cd}	74.56^{cd}	71.5^{bc}	68.93^{cd}	68.63^{ab}	42.36^{b-d}	38.36^{bc}	28.26^{f}	27.53^{c-e}	21.9^{d}
$A_1 \times N_2$	83.13^{a}	80.06^{ab}	75.86^{ab}	62.83^{de}	75.23^{ab}	43.06^{a-d}	42.76^{a}	37.06^{b-d}	30.26^{ab}	24.56^{a-c}
$A_1 \times N_3$	83.76^{a}	81.13^{ab}	78.46^{a}	77.86^{ab}	74.96^{ab}	45.73^{ab}	43.03^{a}	39.06^{ab}	29.16^{a-c}	25.06^{ab}
$A_1 \times N_4$	4.66^{a}	81.66^{a}	79.96^{a}	78.36^{a}	76.53^{a}	65.5^{a}	43.6^{a}	40.23^{a}	30.63^{a}	25.93^{a}
$A_2 \times N_1$	63.06^{e}	60.93^{e}	54.86^{g}	53.73^{f}	52.6^{c}	32.63^{e}	29.7^{e}	26.13^{f}	20.2^{i}	17.16^{f}
$A_2 \times N_2$	69.76^{de}	61.66^{e}	58.03^{fg}	55.06^{ef}	56.86^{c}	33.6^{e}	39.83^{ab}	27.33^{f}	22.13^{hi}	18.46^{ef}
$A_2 \times N_3$	69.23^{de}	73.33^{d}	70.6^{b-d}	71.06^{a-c}	54.23^{c}	40.06^{d}	39.9^{ab}	35^{c-e}	26.83^{de}	23.8^{bc}
$A_2 \times N_4$	80.86^{ab}	62.83^{e}	67.26^{c-e}	70.06^{b-d}	68.53^{ab}	40.73^{d}	32.06^{de}	32.76^{e}	25.93^{ef}	19.36^{e}
$A_3 \times N_1$	81.13^{ab}	76.33^{a-d}	56.7^{fg}	58.53^{ef}	70.36^{ab}	41.56^{cd}	34.83^{cd}	36.53^{b-d}	22.83^{gh}	19.13^{e}
$A_3 \times N_2$	80.93^{ab}	77.7^{a-d}	65.03^{de}	71.6^{a-c}	69.56^{ab}	34.8^{e}	39.9^{ab}	35.36^{c-e}	24.2^{fg}	22.96^{cd}
$A_3 \times N_3$	74.1^{b-d}	75.53^{b-d}	61.96^{ef}	75.8^{a-c}	68.46^{b}	42.23^{b-d}	40.9^{ab}	34.06^{de}	28.4^{b-d}	23.46^{b-d}
$A_3 \times N_4$	77.96^{a-c}	75.13^{cd}	68.53^{cd}	75.06^{a-c}	67.6^{b}	44.76^{a-c}	41.33^{ab}	37.73^{a-c}	27.56^{c-e}	23.26^{b-d}
LSD	7.09	5.75	6.15	7.89	8.03	3.79	3.98	3.14	2.04	1.83

A_1، A_2 و A_3 به‌ترتیب آبیاری کامل و قطع آبیاری در مراحل آبستنی و سنبله‌دهی. N_1، N_2، N_3 و N_4 به‌ترتیب شاهد، کاربرد نانوسیلیکون، ورمی‌کمپوست، کاربرد توام نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

A1, A2 and A3 are full irrigation, irrigation withholding at heading and booting stages, respectively.
N1, N2, N3 and N4 are control, application of nano-silicon, vermicompost, both application vermicompost and nano-silicon, respectively. Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test.

محتوای پراکسیدهیدروژن و مالون دی‌الدهید: برهمکنش توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون و سطوح آبیاری بر محتوای پراکسیدهیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۱۰). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین محتوای پراکسیدهیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید (به‌ترتیب ۰/۳۸ و ۰/۲۷ میکرومول برگرم وزن تر برگ) در عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی بدست آمد که از افزایش به‌ترتیب ۵۵/۷۳ و٦٦/٦٦ درصدی محتوای پراکسیدهیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید نسبت به کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل برخوردار بود. همچنین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون از افزایش به‌ترتیب ٢٦/٧٦ و ۹/۸۲ درصدی محتوای پراکسیدهیدروژن و

مـــالون‌دی‌آلدهیـــد نســـبت بـــه کـــاربرد تـــوام ورمـی‌کمپوســـت و نانوســـیلیکون در ایـن سـطح از سطوح آبیاری برخوردار بود (جدول ۱۱).

جدول ۸- تجزیه واریانس تاثیر نانوسیلیکون و ورمی کمپوست بر هدایت الکتریکی برگ پرچم چاودار تحت تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

Table 8. Variance analysis of the effects of nano silicon and vermicompost on electrical conductivity of flag leaf of rye under various irrigation regimes

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square				
		مراحل نمونه برداری (روز پس از کاشت) (Day after planting)				
		135	139	143	147	151
تکرار Replication	2	2438**	4095.2**	835.4**	1788.22**	2464.81**
سطوح آبیاری (A) Irrigation levels	2	1868.56**	1863.09**	3494.65**	6192.57**	6381.58**
تعدیل‌کننده‌های تنش (N) Stress modulator	3	290.21**	979.87**	1653.1**	535.75**	654.88**
A×N	6	122.04**	130.69*	303.49**	406.78**	295.98*
خطا Error	22	32.82	47.93	85.36	92.46	93.89
ضریب تغییرات (%) CV		5.3	5.9	6.1	5.5	5

ns، * و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** are non-significant, significant at P≤0.05 and P≤0.01, respectively.

جدول ۹- مقایسه میانگین تاثیر نانوسیلیکون و ورمی کمپوست بر هدایت الکتریکی برگ پرچم چاودار تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

Table 9. Means comparison of the effects of nanosilicon and vermicompost on electrical conductivity of flag leaf of rye under various irrigation regimes

تیمار	هدایت الکتریکی (روز پس از کاشت) (میکروزیمنس بر متر) Electrical conductivity (Day after planting) (µS. m^{-1})				
	135	139	143	147	151
$A_1 \times N_1$	92.26^{e}	119.53^{cd}	154.9^{c-e}	138.33^{d}	166.03^{fg}
$A_1 \times N_2$	109.03^{cd}	120.4^{b-c}	145.73^{e}	175.53^{c}	181.2^{ef}
$A_1 \times N_3$	87.7^{e}	96.56^{f}	120.4^{f}	144.53^{d}	162.13^{g}
$A_1 \times N_4$	84.36^{e}	93.5^{f}	116.46^{f}	129.63^{d}	152.7^{g}
$A_2 \times N_1$	123.43^{a}	138.86^{a}	175.36^{a}	195.8^{a}	223.7^{a}
$A_2 \times N_2$	120.56^{ab}	134.96^{a}	172.63^{ab}	193.33^{ab}	211.26^{a-c}
$A_2 \times N_3$	113.93^{a-d}	131.53^{ab}	159.23^{b-e}	190.43^{a-c}	203.9^{b-d}
$A_2 \times N_4$	112.43^{b-d}	119.33^{cd}	166.7^{a-d}	183.8^{a-c}	196.46^{c-e}
$A_3 \times N_1$	117.8^{a-c}	127.83^{a-c}	170.06^{a-c}	186.6^{a-c}	217.56^{ab}
$A_3 \times N_2$	109.16^{cd}	108.76^{de}	152.73^{de}	176.96^{c}	189.56^{de}
$A_3 \times N_3$	104.46^{d}	113.56^{d}	153.53^{de}	177.13^{bc}	198.03^{cd}
$A_3 \times N_4$	110.86^{b-d}	100.23^{ef}	125.13^{f}	176.4^{c}	198.4^{cd}
LSD	9.7	11.7	15.6	16.2	16.4

A_1، A_2 و A_3 به‌ترتیب آبیاری کامل و قطع آبیاری در مراحل آبستنی و سنبله‌دهی. N_1، N_2، N_3 و N_4 به‌ترتیب شاهد، کاربرد نانوسیلیکون، ورمی‌کمپوست، کاربرد توام نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

A1, A2 and A3 are full irrigation, irrigation withholding at heading and booting stages, respectively.
N1, N2, N3 and N4 are control, application of nano-silicon, vermicompost, both application vermicompost and nano-silicon, respectively. Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test.

افزایش محتوای مالون دی‌آلدئید در گیاه نشان دهنـده این است که تحت شرایط تنش، ساختار غشاء آسیب دیده و لیپیدهای آن آزاد شده و به‌دلیل وجود ترکیبات ROS که تحت شرایط تنش افـزایش مـی‌یابنـد، ایـن لیپیدها پراکسیده شده و مالون‌دی‌آلدهید تولید می‌شود. در این راستا محققـان اظهـار داشـتند کـه اسـتفاده از سیلیکون سبب کاهش محتوای پراکسـید هیـدروژن و مالون‌دی‌آلدئید در گیاهانی می‌شود که بـا محـدودیت

آبی مواجه هستند (۳۵). بخشی از کاهش محتوای پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید در کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون، می‌تواند ناشی از اثر این عوامل بر افزایش وزن و حجم ریشه (جدول ۱۱) باشد که ضمن کمک به جذب بهتر آب در گیاه و افزایش محتوای نسبی آب (جدول ۷)، در بهبود مقاومت به خشکی نیز موثر خواهد بود.

وزن و حجم ریشه: تاثیر تعدیل کننده‌های تنش (نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست)، سطوح آبیاری و برهمکنش توام این عوامل بر وزن و حجم ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱۰). کاربرد توام نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست در شرایط آبیاری کامل دارای بیشترین وزن و حجم ریشه (به‌ترتیب ۰/۸۵٤ گرم در بوته و ۲/۷۸ سانتی مترمکعب در بوته) بود که این ترکیب تیماری به‌ترتیب از افزایش ٥٦/٦٩ و ٦٦/٤٦ درصدی وزن و حجم ریشه نسبت به شرایط عدم کاربرد تعدیل کننده‌های تنش (نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست) تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی برخوردار بود. همچنین در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون موجب افزایش ۲۲/۳ و ۲۸/۳ درصدی به ترتیب وزن و حجم ریشه نسبت به عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در این سطح از سطوح آبیاری شد (جدول ۱۱). سیلیکون تحت شرایط تنش با حفاظت از استوانه آوندی به‌عنوان یک حامل مکانیکی، موجب سخت شدن دیواره سلولی استوانه آوندی و بافت آندودرمی شده و رشد طولی ریشه را افزایش می‌دهد (۵)، در این زمینه برخی محققان اظهار داشتند که تغذیه بهینه سیلیکون، موجب افزایش سطح کل جذب کننده عناصر و در نهایت رشد و توسعه حجمی و وزنی ریشه‌ها می‌شود (۳٦). شهبازی و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست از طریق بهبود رشد و توسعه ریشه، دسترسی به آب و عناصر غذایی را افزایش می‌دهد و با افزایش حجم اندام‌های فتوسنتز کننده، منجر به افزایش مقدار و ظرفیت تولید مواد پرورده شده و افزایش عملکرد دانه گندم می‌گردد (١٤).

ارتفاع بوته، طول سنبله و تعداد دانه در سنبله: برهمکنش توام نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست در سطوح مختلف آبیاری بر ارتفاع بوته، طول سنبله و تعداد دانه در سنبله در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۱۰). کاربرد توام نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست در شرایط آبیاری کامل دارای بیشترین ارتفاع بوته، طول سنبله و تعداد دانه در سنبله (به‌ترتیب ۱۵۱/۱۳ و ۲٤/۲۳ سانتی‌متر، ۷۰/۳٤) بود که به‌ترتیب از افزایش ٦٤/۷٥، ٥٥/۳۲ و ٦۲ درصدی ارتفاع بوته، طول سنبله و تعداد دانه در سنبله نسبت به شرایط عدم کاربرد تعدیل کننده‌های تنش نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی برخوردار بود. همچنین در سطح ثابت از قطع آبیاری در مرحله آبستنی، کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون موجب افزایش ۳۲/٥۹، ۳۲/۲٤ و٤۰/۲٦ درصدی به ترتیب ارتفاع بوته، طول سنبله و تعداد دانه در سنبله نسبت به عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون شد (جدول ۱۱). به‌نظر می‌رسد بروز تنش با کاهش طول دوره رشدی گیاه و کمبود تولید و عرضه مواد فتوسنتزی و همچنین افزایش رقابت درون بوته‌ای، موجب ریزش گل‌ها و کاهش تعداد دانه در سنبله شده است. بخشی از بهبود تعداد دانه در سنبله در کاربرد ورمی‌کمپوست می‌تواند ناشی از عناصر موجود در این کود (جدول ۳) باشد که ضمن افزایش قرائت کلروفیل‌متر (جدول ٥) و رشد و توسعه ریشه (جدول ۱۱)، در نهایت موجب افزایش وزن دانه در هر بوته چاودار شد. از طرفی محدودیت آبی با اختلال در فرآیندهای

فتوسنتزی و کاهش تولید مواد پرورده به بخش‌های در حال رشد، مانع از دستیابی به پتانسیل ژنتیکی کامل گیاه می‌گردد. از طرفی محدودیت آبی سبب افزایش رقابت برای جذب آب بین بخش هوایی و زیرزمینی شده و در این رقابت، گیاه سهم بیشتری از مواد فتوسنتزی را به ریشه و سهم کمتری را به بخش هوایی از جمله ساقه اختصاص می‌دهد و همین امر موجب کاهش ارتفاع بوته می‌شود (۳۷). ازآنجایی که در مرحله طویل شدن ساقه و سنبله، اجزاء گلچه‌ها نیز کامل می‌شوند و با ظهور برگ پرچم، تقسیمات میوزی دانه‌های گرده شروع می‌شود، بنابراین احتمال می‌رود که تنش ناشی از محدودیت آبی در این مرحله از مراحل رشدی، با صدمه به دانه‌های گرده و عدم امکان تلقیح مادگی، ضمن پوکی دانه‌ها، موجب می‌شود تعداد دانه‌های تشکیل شده در سنبله نیز کاهش یابد (۳۸). اپستین و بلوم (۲۰۰۵) اظهار نمودند کاربرد سیلیکون تحت شرایط خشکی با انتقال مواد فتوسنتزی بیشتر به اندام زایشی، موجب افزایش تعداد دانه در سنبله و در نهایت عملکرد دانه گندم می‌شود (۷). فلاح و همکاران (۲۰۰٤) اظهار داشتند که سیلیکون از طریق کاهش اثر خشکی، تعداد سنبلچه در سنبله و تعداد دانه در سنبله را افزایش داد (۳۹).

جدول ۱۰- تجزیه واریانس تاثیر نانوسیلیکون و ورمی کمپوست بر وزن دانه در هر بوته و برخی صفات بیوشیمیایی چاودار تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

Table 10. Variance analysis of the effect of nano silicon and vermicompost on grain weight of per plant and some biochemical traits of rye under various irrigation regimes

منابع تغییر s.o.v	درجه آزادی df	میانگین مربعات							
		محتوای پراکسید هیدروژن H_2O_2	محتوای مالون آلدهید MHD	طول سنبله Spike length	ارتفاع بوته Plant height	تعداد دانه در سنبله Number of grains per spike	وزن دانه در هر بوته Grain weight of per plant	وزن ریشه Root weight	حجم ریشه Root volume
تکرار Replication	2	0.016**	0.0083**	21.41**	451.09**	147.13**	0.675**	0.03**	0.26**
سطوح آبیاری Irrigation (A) levels	2	0.027**	0.01**	74.31**	3294.76**	1055.74**	1.321**	0.076**	1.36**
تعدیل‌کننده‌های تنش (N) Stress modulator	3	0.0044**	0.0047**	50.41**	2129**	176.07**	0.566**	0.046**	0.68**
A×N	6	0.0013*	0.00073*	8.35*	443.13**	39.38*	0.116**	0.07**	0.11**
خطاError	22	0.00042	0.00025	1.21	78.12	11.93	0.020	0.0017	0.014
ضریب تغییرات(%) CV		6.2	7	5.6	6.9	5.7	5.3	6	5.6

ns، * و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** are non-significant, significant at P≤0.05 and P≤0.01, respectively.

جدول ۱۱- مقایسه میانگین تاثیر نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست بر وزن دانه در هر بوته و برخی صفات بیوشیمیایی چاودار تحت تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

Table11. Means comparison of the effects of nanosilicon and vermicompost on grain weight of per plant and some biochemical traits of rye under various irrigation regimes

تیمار Treatments	وزن ریشه Root weight	حجم ریشه Root volume	طول سنبله Spike length (cm)	ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد دانه در سنبله Number of grains per spike	وزن دانه در هربوته Grain weight of per plant	محتوای‌پراکسید هیدروژن H_2O_2 mol/g) (µFW	محتوای مالون دی آلدهید Malondialdehyde (µmol/g FW)
$A_1 \times N_1$	0.675^{de}	1.91^{f}	18.16^{de}	131^{cd}	61.73^{cd}	2.65^{b}	0.343^{b}	0.239^{b-e}
$A_1 \times N_2$	0.711^{cd}	2.28^{de}	22.36^{ab}	134.76^{bc}	65.66^{a-d}	3^{a}	0.255^{c}	0.172^{g}
$A_1 \times N_3$	0.841^{ab}	2.70^{ab}	23.33^{a}	145.26^{a-c}	69.04^{ab}	3.03^{a}	0.266^{c}	$0.189f^{g}$
$A_1 \times N_4$	0.85^{4a}	2.78^{a}	24.23^{a}	151.13^{a}	70.34^{a}	3.04^{a}	0.244^{c}	0.162^{g}
$A_2 \times N_1$	0.545^{f}	1.67^{g}	15.6^{f}	91.73^{e}	43.41^{e}	2.04^{d}	0.38^{a}	0.27^{a}
$A_2 \times N_2$	0.662^{de}	1.79^{fg}	15.83^{f}	116.1^{d}	48.32^{e}	2.1^{d}	0.369^{ab}	0.256^{a-c}
$A_2 \times N_3$	0.583^{f}	1.72^{fg}	16.13^{f}	94.3^{e}	44.63^{e}	2.85^{ab}	0.358^{ab}	0.233^{c-e}
$A_2 \times N_4$	0.667^{de}	1.86^{fg}	20.63^{bc}	131.63^{c}	60.89^{d}	2.19^{cd}	0.346^{ab}	0.213^{ef}
$A_3 \times N_1$	0.604^{ef}	1.75^{fg}	16.6^{ef}	96.66^{e}	61.18^{cd}	2.35^{c}	0.373^{ab}	0.264^{ab}
$A_3 \times N_2$	0.693^{d}	2.14^{e}	19.16^{cd}	138.33^{a-c}	63.22^{b-d}	2.8^{ab}	0.349^{ab}	0.242^{b-c}
$A_3 \times N_3$	0.779^{bc}	2.46^{cd}	20.13^{c}	143.03^{a-c}	65.09^{a-d}	2.96^{a}	0.342^{b}	0.225^{de}
$A_3 \times N_4$	0.807^{ab}	2.55^{bc}	22.73^{a}	148.46^{ab}	66.98^{a-c}	3.01^{a}	0.362^{ab}	0.239^{b-e}
LSD	0.071	0.20	1.8	14.4	5.8	0.24	0.034	0.027

A_1، A_2 و A_3 به‌ترتیب آبیاری کامل و قطع آبیاری در مراحل آبستنی و سنبله‌دهی. N_1، N_2، N_3 و N_4 به‌ترتیب شاهد، کاربرد نانوسیلیکون، ورمی‌کمپوست، کاربرد توام نانوسیلیکون و ورمی‌کمپوست. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

A1, A2 and A3 are full irrigation, irrigation withholding at heading and booting stages, respectively.
N1, N2, N3 and N4 are control, application of nano-silicon, vermicompost, both application vermicompost and nano-silicon, respectively. Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test.

وزن دانه در هر بوته: نتایج تجزیه واریانس بیانگر معنی‌داری عامل‌های آزمایشی بر وزن دانه در هر بوته در سطح احتمال یک درصد است (جدول ۱۰). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین وزن دانه در هر بوته در کاربرد توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون تحت شرایط آبیاری کامل (۳/۰٤ گرم در بوته) بدست آمد که در مقایسه با عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون از افزایش ۱٤/۷ درصدی برخوردار بود. همچنین قطع آبیاری در مرحله آبستنی در شرایط کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون، وزن دانه در هر بوته را ۷/۳ درصد نسبت به عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در همین سطح از سطوح آبیاری افزایش داد (جدول ۱۱). به نظر می‌رسد دلیل اصلی کاهش وزن دانه در هر بوته در شرایط خشکی، کاهش قرائت کلروفیل‌متر (جدول ۵) و کاهش محتوای نسبی آب (جدول ۷) و هدایت روزنه‌ایی (جدول ۷) باشد که منجر به کاهش فتوسنتز، پیری سریع برگ‌ها و کاهش عملکرد می‌شود (٤۰). ولی با کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون، وزن دانه در هر بوته افزایش یافت. بخشی از بهبود وزن دانه در هر بوته در کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در تمامی سطوح آبیاری به خصوص در شرایط محدودیت شدید آبی (قطع آبیاری در مرحله آبستنی) می‌تواند ناشی از اثر این مواد در کاهش گونه‌های فعال اکسیژن همچون پراکسیدهیدروژن (جدول ۱۱) و همچنین کاهش محتوای مالون دی‌الدئید (جدول ۱۱)، کاهش هدایت الکتریکی (جدول ۹) و افزایش وزن و حجم ریشه باشد (جدول ۱۱). از طرفی ورمی‌کمپوست به‌دلیل برخورداری از مقادیر بالای نیتروژن و فسفر موجود در آن (جدول ۳)، موجب بهبود فتوسنتز و عملکرد گیاه می‌شود. شهبازی و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند که کاربرد

ورمی‌کمپوست از طریق بهبود رشد و توسعه ریشه، دسترسی به آب و عناصر غذایی را افزایش می‌دهد که با افزایش حجم اندام‌های فتوسنتز کننده، منجر به افزایش مقدار و ظرفیت تولید مواد پرورده شده و در نتیجه موجب افزایش وزن دانه در هر بوته می‌گردد (۱٤). بخش دیگری از افزایش وزن دانه در هر بوته در کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، می‌تواند ناشی از تاثیر این عوامل بر افزایش طول سنبله و تعداد دانه در سنبله (جدول ۱۱) ناشی می‌شود.

نتیجه‌گیری

در شرایط محدودیت آبی کاربرد توام ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی نانوسیلیکون با افزایش محتوای نسبی آب و بهبود قرائت کلروفیل‌متر، کاهش هدایت الکتریکی و محتوای پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید، بهبود وزن و حجم ریشه، در نهایت منجر به افزایش وزن دانه در هر بوته چاودار شد. از این‌رو به نظر می‌رسد استفاده از ورمی‌کمپوست و نانو سیلیکون در شرایط خشکی، قادر است بخشی از کاهش وزن دانه در هر بوته ناشی از محدودیت آبی را جبران و از افت بیشتر آن جلوگیری نمایند.

References

1. Seyed Sharifi, R., & Khalilzadeh, R. (2019). Cereal Crops Production. University of Mohaghegh Ardabili press. 400 pp.
2. Batool, A., Akram, N.A., Cheng, Z.G., Lv, G.C., Ashraf, M., Afzal, M., Xiong, J.L., Wang, J.Y. & Xiong, Y.C. (2019). Physiological and biochemical responses of two spring wheat genotypes to nonhydraulic root-to-shoot signalling of partial and full root-zone drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, *139*, 11-20.
3. Luyckx, M., Hausman, J.F., Lutts, S. & Guerriero, G. (2017). Silicon and plants: Current knowledge and technological perspectives. *Frontiers in Plant Sciences*, *8*, 411.
4. Ma, J.F. & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, *11*(8), 1-6.
5. Datnoff, L.E., Synder, G. H. & Korndorfer, G. H. (2001). Silicon in Agriculture. Elsevier. Amesterdam. PP: 285.
6. 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.
7. Epstein, E. & Bloom, A. (2005). Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives. 2nd ed. Sinecure Associates, Sunderland, Mass: Sinauer Associates, Inc.
8. Zarooshan, M., Abdilzadeh, 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. *Journal of Plant Environmental Physiology, 15*, 23-38.
9. Prabha, M.L., Jayraaj, I.A., Jayraaj, R. & Rao, D.S. (2007). Effect of vermicompost ongrowth parameters of selected vegetable andmedicinal plants. *Asian Journal of Microbiology*, *Biotechnology and Environmental Sciences*, *9*, 321-326.
10. Heidarpour, O., Esmaielpour, B., Soltani Toolarood, A. & Khorramdel, S. (2020). Effect of vermicompost on morphophysiological, biochemical and yield characteristics of summer savory (*Satureja hortensis* L.) under different irrigation regimes. *Journal of Agroecology*, *12*(3), 507-522. (In Persian)
11. Ghldani, M. &Kamali, M. (2016). Evaluation of culture media including vermicompost, compost and manure under drought stress in Iranian petunia

(*Petunia hybrida*). *Plant Production*, *39*(3), 91-100. (In Persian)
12. Mohammadi Kale Sarlou, S., Seyed Sharifi, R. & Narimani, H. (2023). Effects of vermicompost, humic acid and Flabacterium on yield, chlorophyll fluorescence indices and some physiological traits of triticale under soil salinity conditions. *Environmental Stresses Sciences*, *15*(4): 953-974. (In Persian)
13. Benaffari, W., Boutasknit, A., Anli, M., Ait-El-Mokhtar, M., Ait-Rahou, Y., Ben-Laouane, R., Ben Ahmed, H., Mitsui, T., Baslam, M. & Meddich, A. (2022). The native Arbuscular Mycorrhiza fungi and vermicompost-based organic amendments enhance soil fertility, growth performance, and the drought stress tolerance of quinoa. *Plants*, *11*(3), 393.
14. Shahbazi, Sh. Fateh, A. & Ainehband, A. (2015). Evaluation of the effect of humic acid and vermicompost on yield and yield components of three wheat cultivars in tropical regions. *The plant production (Scientific Journal of Agriculture)*, *38*(2): 99-110. (In Persian)
15. Scharf, P. C., Brouder, S. M. & Hoeft, R. G. (2006). Chlorophyll meter reading can predict nitrogen need and yield response of corn in the north-central USA. *Agronomy Journal*, *98*(3), 655-665.
16. Kostopoulou, P., Barbayiannis, N. & Basile, N. (2010). Water relations of yellow sweet clover under the synergy of drought and selenium addition. *Plant Soil*, *330*(1), 65-71.
17. 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.
18. Stewart, R.C. & Beweley, J.D. (1980). Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiology*, *65*(2): 245-8.
19. Orabi, S. A., Salman, S.R. and Shalaby, A.F. (2010). Increasing resistance to oxidative damage in cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants by exogenous application of salicylic acid and paclobutrazol. *World Journal of Agricultural Sciences*, *6*, 252-259.
20. Naghavi, M.R., Toorchi, M., Moghaddam, M. & Shakiba, M.R. (2015). Evaluation of diversity and traits correlation in spring wheat cultivars under drought stress. *Notulae Scientia Biologicae*, *7*(73), 359-354349.
21. Ullah, A., Tian Z., Xu, L., Abid, M., Lei, K., Khanzada, A., Zeeshan, M., Sun, C., Yu, J. & Dai, T. (2022). Improving the effects of drought priming against post-anthesis drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) using nitrogen. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 965996.
22. Hosseinzadeh, S.R., Amiri, H. & Ismaili, A. (2016). Effect of vermicompost fertilizer on photosynthetic characteristics of hickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Photosynthetica*, *54*(1), 87-92.
23. Oftadeh Fadafen, A., Aminifard, M. H., Behdani, M. A., Moradinezhad, F. (2018). Evaluation of nitroxin and vermicompost on quantitative characteristics and photosynthetic pigments of saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of Saffron Research*, *5*(2), 163-179. (In Persian with English Summary).
24. Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S. & Zhang, C. (2005). Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in post under drought. *Plant Science*, *169*, 313-321.
25. Rashtbari, M. & Alikhani, H. A. (2012). Effect and efficiency of municipal solid waste compost and vermicompost on morpho-physiological properties and yield of canola under drought stress conditions. *Journal of Agricultural Science and Sustainble Production*, *22*(2): 113-127. (In Persian)
26. Baker, N. R. & Rosenqvist, E. (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental of Botany*, *55*(403), 1607-1621.
27. Hannachi, S., Signore, A., Adnan, M. & Mechi, L. (2022). Single and associated effects of drought and heat stresses on

physiological, biochemical and antioxidant machinery of four eggplant cultivars. *Plants*, *11*(18), 2404.

28. Hossen, M.S., Karim, M.F., Fujita, M., Bhuyan, M.H.M., Nahar, K., Masud, A. A.C., Mahmud, J.A. & Hasanuzzaman, M. (2022). Comparative physiology of indica and japonica rice under salinity and drought stress: An intrinsic study on osmotic adjustment, oxidative stress, antioxidant defense and methylglyoxal detoxification. *Stresses*, *2*(2), 156-178.
29. Nazari, Zh., Seyed Sharifi, R. & Narimani, H. (2022). Effect of Mycorrhiza, vermicompost and Nano silicon on agronomic and physiological traits of triticale under different intensities of drought stress. *Crop Production Journal*, *14*(4), 21-46. (In Persian)
30. Shadkam, Z. & Mohajeri, F. (2019). The interaction between irrigation interval with manure and vermicompost on vegetative characteristics and yield of Lemon Verbena (*Lippia citriodora* L.). Quart. *Journal of Plant Production*, *9*(1), 67-82. (In Persian)
31. Thapa, S., Reddy, S. K., Fuentealba, M. P., Xue, Q., Rudd, J. C., Jessup, K. E., Devkota, R. N., Liu, S. (2018). Physiological responses to water stress and yield of winter wheat cultivars differing in drought tolerance. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *204*, 347–358.
32. Habibi, G. and Hajiboland, R. (2013). Alleviation of drought stress by silicon supplementation in pistachio (*Pistacia vera* L.) plants. *Folia Horticulturae*, *25*, 21-29.
33. Mohammadkhani, N. & Heidari, R. (2007). Effect of drought stress on protective enzyme activities and lipid peroxidation in two maize cultivars.*Pakistan Journal of Biological Sciences*, *10*(21), 3835-3840
34. Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y. and Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants- a review. *Environmental Pollution*, *147*(2), 422-428.
35. Maghsoudi, K., Emam, Y., Ashraf, M. and Arvin, M. J. (2019). Alleviation of field water stress in wheat cultivars by using silicon and salicylic acid applied separately or in combination. *Crop and Pasture Science, 70*, 36-43.
36. Sun, C. W., Liang, Y. C. & Romheld, V. (2005). Effects of foliar-and root applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildow in Cucumis sativus. *Journal of Plant Pathology*, *54*, 678-685.
37. Arafa, S.A., Attia, K.A., Niedbała, G., Piekutowska, M., Alamery, S., Abdelaal, K., Alateeq, T.K., Ali, M., Elkelish, A. & Attallah, S.Y. (2021). Seed priming boost adaptation in Pea plants under drought stress. *Plants*, *10*, 2201.
38. Dehghan, M., Balouchi, H.R., Yadavi, A.R. & Safikhani, F. (2017). Effect of foliar application of brassinolide on grain yield and yield components of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. Sirvan under terminal drought stress conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, *19*, 40-56. (In Persian).
39. Fallah, A., Visperas, R. M., Alejar, A. A. (2004). The interactive effect of silicon and spikelet filling in rice (*Oryza sativa* L.). *The Philippine Agricultural Scientist*, *87*, 174-176.
40. Pequeno, D.N., Hernandez-Ochoa, I. M., Reynolds, M., Sonder, K., MoleroMilan, A., Robertson, R.D., Lopes, M.S., Xiong, W., Kropff, M. & Asseng, S. (2021). Climate impact and adaptation to heat and drought stress of regional and global wheat production. *Environmental Research Letters*, *16*, 054070.