

The effects of nanosilicon and vermicompost on contents of photosynthetic pigments, compatible osmolytes and the contribution of dry matter remobilization in grain yield of rye (*Secale cereal* L.) under water limitation conditions

Zahra Mohammadzadeh¹, Raouf Seyed Sharifi^{*1}

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

*-E-mail: raouf_ssharifi@yahoo.com

Introduction

Water deficit is one of the most common limiting factors the yield of crop plants in arid and semi arid regions. Water limitation causes significant changes in some physiological traits of crop plants. It decreases chlorophyll content, current photosynthesis and contribution of current photosynthesis in grain yield, but at the majority of cases, water deficit increases compatible osmolytes and the contribution of dry matter remobilization in grain yield. Several strategies have been proposed to increase the resistance of crops against water limitation. Among them, application of vermicompost and silicon improve the performance of crop plants under water deficit conditions. Therefore, the aim of this research was to study the influence of silicon and vermicompost on contents of photosynthetic pigments, compatible osmolytes and dry matter remobilization in grain yield of rye (*Secale cereal* L.) under water deficit conditions

Materials and methods

A factorial experiment was conducted in 2023 using a RCBD with three replications under the greenhouse conditions. The treatments were irrigation levels (full irrigation during growth period as control, irrigation withholding at 50% of booting stage (BBCH 43) until the end of growing season as severe water deficit and irrigation withholding at 50% of heading stage (BBCH 55) until the end of growing season as moderate water deficit) and application of nano silicon and vermicompost at four levels (no application as control, application of nano silicon, vermicompost, vermicompost with nanosilicon). The rye cultivar 'ardabil local' was used in pots with 13 kg of soil and a diameter of 40 cm. Application of Si was done in growth stages of BBCH 21 and 30. In all treatments, two weeks after irrigation withholding at heading stage or 135 days after planting, physiological and biochemical traits such as content of chlorophyll a, b, total chlorophyll, content of soluble sugars and proline, dry matter remobilization from shoots, contribution of remobilization in grain yield, contribution of stem reserves in grain yield, current photosynthesis, contribution of current photosynthesis to grain yield, soluble sugar, anthocyanin and proline content were determined. Dry matter remobilization from shoots

and stem and contribution of current photosynthesis to grain yield were measured by method of Inoue *et al* (2004).

Results and discussion

The results showed that under severe water deficit, there were an increase about 23 and 20.5% in content of proline and anthocyanin respectively in comparison to no application of nano silicon and vermicompost under the same level of irrigation levels. Also, there was an increase of 109.9% in current photosynthesis under full irrigation and both application of vermicompost and nanosilicon in compared to no application of vermicompost and nanosilicon under severe water limitation. There was an increase of 63.7, 56.9 and 61.8 in chlorophyll a, b content, total chlorophyll, under full irrigation and both application of vermicompost and nanosilicon in compared to no application of vermicompost and nanosilicon under severe water limitation. Content of soluble sugars increased about 21.3 under irrigation withholding at booting stage in compared to full irrigation. Similar results were obtained in this trait in application of nanosilicon and vermicompost in comparison to no application of them. Maximum of dry matter remobilization from shoots (0.935 g per plant), contribution of remobilization in grain yield (45.6%) and contribution of stem reserves in grain yield (37.43%) were obtained in no application of vermicompost and nanosilicon under irrigation withholding at booting stage, which there was an increase 7.5, 15.4 and 19.8% respectively in comparison with both applications of vermicompost and nanosilicon under the same level of irrigation.

Conclusion

Generally, it can be suggested that irrigation withholding at booting decreased about 29.9% from grain yield in comparison with full irrigation but both application of vermicompost and nanosilicon compensated about 6.6% of yield reduction under irrigation withholding at booting stage. Therefore, with considering of the results of this study, it can be stated that both application of vermicompost and nanosilicon due to the improvement of current photosynthesis and the enhancement in compatible osmolytes, prevents from the reduction of grain yield of rye under water limitation conditions.

Keywords: Proline, Drought stress, Rye, Soluble sugars, Silicon Nanoparticles

اثر مصرف نانوسیلیکون و ورمی کمپوست بر محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، اسمولیت های سازگار و سهم انتقال ماده خشک در عملکرد دانه چاودار در شرایط محدودیت آبی

زهرا محمدزاده^۱، رئوف سیدشریفی^{*}

۱. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

raouf_ssharifi@yahoo.com

چکیده

تنش خشکی یکی از متداول‌ترین عوامل محدود کننده رشد و عملکرد گیاهان زراعی است ولی مصرف تعدیل کننده‌های تنش همانند سیلیکون و ورمی کمپوست می‌تواند بخشی از اثرات تنش خشکی را کاهش دهد. در این رابطه آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۲ اجرا شد. تیمارهای مورد بررسی شامل آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل در طول دوره رشدی به عنوان شاهد، قطع آبیاری پس از رسیدن ۵۰ درصد گیاهان به مرحله آبستنی (BBCH ۴۳) تا پایان فصل رشد به عنوان تنش شدید آبی و قطع آبیاری پس از رسیدن ۵۰ درصد گیاهان به مرحله سنبله‌دهی (BBCH ۵۵) تا پایان فصل رشد به عنوان تنش ملایم آبی) و مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در چهار سطح (عدم مصرف به عنوان شاهد، مصرف نانوسیلیکون به مقدار ۴۰ میلی گرم در لیتر، مصرف ورمی کمپوست به مقدار هفت تن در هکتار، مصرف توام ورمی کمپوست و نانوسیلیکون به مقدار نصف مقادیر ذکر شده) بودند. نتایج نشان داد در شرایط محدودیت شدید آبی و کاربرد ورمی کمپوست و نانوسیلیکون، محتوای پروتئین و آنتوسیانین در مقایسه با عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در همین سطح از سطوح آبیاری، به ترتیب ۲۳ و ۲۰/۵ درصد افزایش یافتند. همچنین حداکثر فتوسنتز جاری در آبیاری کامل و مصرف توام ورمی کمپوست و نانوسیلیکون و کمترین آن در عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی بدست آمد. محتوای کلروفیل a، b، کلروفیل کل به ترتیب از یک افزایش ۶۳/۷، ۵۶/۹، ۶۱/۸ درصدی در آبیاری کامل و مصرف توام ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در مقایسه با عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون تحت قطع آبیاری در مرحله آبستنی برخوردار بود. محتوای قندهای محلول ۲۱/۳ درصد در قطع آبیاری در مرحله آبستنی نسبت به آبیاری کامل افزایش یافت. نتایج مشابهی نیز در این صفت در مصرف نانوسیلیکون و ورمی کمپوست در مقایسه با عدم مصرف آن‌ها بدست آمد. بیشترین انتقال ماده خشک از اندام هوایی (۹۳۵/۰ گرم در بوته)، سهم انتقال مجدد در عملکرد دانه (۴۵/۶ درصد) و میزان مشارکت ذخایر ساقه در عملکرد دانه (۳۷/۴۳ درصد) در عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی بدست آمد که از افزایش به ترتیب ۷/۵، ۱۵/۴ و ۱۹/۸ درصدی در مقایسه با مصرف توام ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در همین سطح از آبیاری، برخوردار بود. کمترین عملکرد دانه (۲/۰۴ گرم در بوته) در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی و عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون و بیشترین مقدار آن (۳/۰۴ گرم در بوته) در شرایط آبیاری کامل و کاربرد توام ورمی کمپوست و نانوسیلیکون بدست آمد. قطع آبیاری در مرحله آبستنی عملکرد دانه را ۲۰/۹ درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش داد، ولی مصرف توام ورمی کمپوست و نانوسیلیکون حدود ۶/۶ درصد از کاهش عملکرد تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی را جبران کردند. با در نظر گرفتن نتایج این آزمایش، می‌توان اظهار داشت که مصرف

توام نانوسیلیکون و ورمی کمپوست به دلیل بهبود فتوسنتزی جاری و افزایش محتوای اسمولیت‌های سازگار، باعث جلوگیری از کاهش عملکرد دانه چاودار در شرایط محدودیت آبی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: پرولین، تنش خشکی، چاودار، قندهای محلول و نانوذرات سیلیکون

مقدمه

چاودار (*Secale cereal L.*) به دلیل امکان استفاده دومانظوره (علوفه‌ای و دانه‌ای) از اهمیت زیادی در بین غلات برخوردار است. این گیاه از مقاومت به سرمای بالاتری نسبت به گندم و جو برخوردار است ولی مقاومت به شوری و خشکی کمتری نسبت به جو دارد (Khodabandeh, 2012). سطح زیر کشت چاودار در جهان چهار میلیون هکتار است و سه کشور روسیه، لهستان و آلمان بیشترین سطح زیر کشت و بالاترین میزان تولید این گیاه را به خود اختصاص داده‌اند (FAO, 2021). چاودار در خاک‌های ماسه‌ای غیر حاصلخیز با زهکشی پایین، پتانسیل عملکرد بالاتری نسبت به گندم دارد. این در حالی است که در خاک‌هایی با حاصلخیزی متوسط و بالا، عملکرد گندم بالاتر است (Schlegel, 2014).

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی موثر در کاهش عملکرد است ولی گیاهان قادرند با تغییر در برخی صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی مانند افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی (Ghanbari et al, 2021)، مقاومت به تنش خشکی را افزایش داده (Sattar et al, 2020) و تاحدودی از کاهش بیش‌تر عملکرد جلوگیری کنند (Batoool et al, 2019).

مصرف برخی تعدیل کننده‌های تنش مانند ورمی کمپوست و سیلیکون نیز در افزایش مقاومت به تنش خشکی موثر است. به عنوان نمونه گزارش شده است که مصرف ورمی کمپوست در شرایط تنش خشکی، از طریق بهبود محتوای فسفر و نیتروژن برگ و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و محتوای اسمولیت‌های سازگار، منجر به افزایش عملکرد دانه کلزا شد (Mamnabi et al, 2020). وانگ و همکاران (Wang et al, 2011) اظهار داشتند که مصرف ورمی کمپوست در شرایط تنش خشکی، با افزایش اسید آمینه‌های ضروری (به‌ویژه گلوتامات و آرژنین که از پیش‌سازهای تولید پرولین می‌باشد) موجب افزایش تجمع پرولین و مقاومت در برابر تنش خشکی گیاه کیوی می‌شود. شهبازی و همکاران (Shahbazi et al, 2015) اظهار داشتند مصرف ورمی کمپوست، با بهبود دسترسی گیاه به آب و عناصر غذایی، موجب افزایش فتوسنتز و عملکرد گندم شد.

سیلیکون (Silicon) یکی از عناصر مهم در تعدیل اثرات ناشی از محدودیت آبی و کمک به بهبود جذب عناصری مانند پتاسیم، فسفر و کلسیم در گیاهان است (Eneji et al, 2008). این عنصر با تنظیم پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی (Ahiret et al, 2021)، ضمن بهبود استحکام مکانیکی گیاه، در افزایش کلروفیل در واحد سطح برگ و توانایی گیاه برای استفاده موثرتر از نور (Roychoudhury, 2020) و همچنین افزایش عملکرد کمی و کیفی گیاهان تحت شرایط تنش خشکی و شوری (Yan et al, 2018)

موثر است. خواجه و همکاران (Khajeh et al, 2014) بیان داشتند که محلول پاشی نانوسیلیکون در شرایط تنش خشکی، موجب افزایش محتوای پرولین برگ و عملکرد گندم شد. رضاییگی و همکاران (Rezabeighi et al, 2020) اظهار داشتند مصرف نانوسیلیکون به دلیل بهبود مکانیسم جذب، تجمع و انتقال بهتر هیدرات کربن به دانه، موجب افزایش میزان انتقال ماده خشک در گندم شد. برخی محققان اظهار داشتند که به هنگام وقوع تنش خشکی، عدم توانایی منابع در برآورد نیاز مخازن (دانه‌ها) و کاهش سهم فتوسنتز جاری، موجب می‌شود مواد فتوسنتزی بیشتری به دانه‌ها انتقال یافته و همین امر منجر به افزایش سهم انتقال ماده خشک می‌شود (Liu et al, 2020). سیلیکون گیاهان را از اثر مخرب کم آبی محافظت کرده و بهره‌وری گیاه تحت شرایط تنش را، بهبود می‌بخشد (Tripathi et al., 2016). از آنجایی که افزایش قندهای محلول در شرایط تنش خشکی، می‌تواند به عنوان یک محافظ معمولی عمل کرده و فشار آماس را تحت شرایط تنش خشکی حفظ کنند، از این رو با افزایش محدودیت آبی، میزان نشاسته کاهش و در مقابل، محتوای کربوهیدرات‌های محلول افزایش می‌یابد (Selim et al, 2019). موسی‌پور یحیی آبادی و اصغری‌پور (Mosapour Yahyaabadi & Asgharipour, 2016) نیز افزایش عملکرد دانه در اثر مصرف سیلیکون تحت شرایط تنش خشکی را، به بهبود محتوای آنتوسیانین، پرولین و قندهای محلول نسبت دادند. سیلیکون از طریق کاهش تخریب رنگدانه‌ها (Bybordi, 2016) و بهبود محتوای کلروفیل، به بهبود عملکرد دانه کمک می‌کند.

احمدی نورالدین‌وند و همکاران (Ahmadi Nouraldinvand et al, 2021) اظهار داشتند که عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط محدودیت شدید آبی، کمترین سهم فتوسنتز جاری و بیشترین سهم انتقال مجدد ماده خشک از کل بوته گندم را به خود اختصاص داد ولی با کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل، سهم فتوسنتز جاری افزایش ولی میزان انتقال ماده خشک و سهم این فرآیند در عملکرد دانه، کاهش یافت. برخی محققان در بررسی اثر محدودیت آبیاری و کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون بر عملکرد و برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی گندم، بیشترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و قندهای محلول در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی را، با کاربرد توأم کودهای زیستی و محلول پاشی ۳۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکون، گزارش کردند. نظری و همکاران (Nazari et al., 2021) اظهار داشتند که کاربرد ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل، عملکرد دانه تریتیاله را ۵۹/۵ درصد نسبت به قطع آبیاری در مرحله آبستنی و عدم کاربرد کودهای زیستی و آلی و نانوسیلیکون افزایش داد. نظری و همکاران (Nazari et al, 2023) افزایش محتوای کلروفیل برگ به واسطه کاربرد ورمی کمپوست به افزایش فراهمی عناصر غذایی از جمله آهن، روی و نیتروژن در تعدیل اثرات منفی ناشی از محدودیت آبی، نسبت دادند.

مواجه شدن دوره رشد زایشی چاودار در بیشتر مناطق خشک و نیمه خشک کشور با محدودیت آبی و اهمیت ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در تعدیل بخشی از آثار ناشی از تنش خشکی و بررسی‌های محدود انجام شده در مورد برهمکنش این عوامل، موجب شد تا اثر این عوامل بر عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی چاودار در شرایط محدودیت آبی مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۲ اجرا شد. عامل‌های مورد بررسی شامل آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل در طول دوره رشدی به عنوان شاهد، قطع آبیاری پس از رسیدن ۵۰ درصد گیاهان به مرحله آبستنی (کد ۴۳ مقیاس BBCH¹) تا پایان فصل رشد به عنوان تنش شدید آبی و قطع آبیاری پس از رسیدن ۵۰ درصد گیاهان به مرحله سنبله‌دهی (کد ۵۵ مقیاس BBCH) تا پایان فصل رشد به عنوان تنش ملایم آبی)، مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در چهار سطح (عدم مصرف به عنوان شاهد، مصرف نانوسیلیکون، مصرف ورمی کمپوست، مصرف توام ورمی کمپوست و نانوسیلیکون) بودند. از آنجایی که یکی از شیوه‌های مرسوم در اعمال محدودیت آبی، قطع آبیاری بر اساس مراحل فنولوژی گیاه است، از این رو در این تحقیق آبیاری کامل در طول دوره رشدی به استناد نیاز گیاه زراعی و شرایط محیطی به عنوان شاهد و قطع آبیاری در اواسط مرحله آبستنی (۵۰ درصد آبستنی) به دلیل حساسیت بالای این مرحله به کمبود آب به عنوان تنش شدید، و قطع آبیاری در اواسط مرحله سنبله‌دهی (۵۰ درصد سنبله‌دهی) به عنوان تنش ملایم آبی در نظر گرفته شدند. اعمال چنین شرایطی در محدودیت آبیاری در خیلی از آزمایشات متداول است (Kheirizadeh ; Arough Khalilzadeh et al, 2016). محلول پاشی نانوسیلیکون به میزان ۴۰ میلی گرم در لیتر و در دو مرتبه در مراحل پنجه‌دهی و ساقه‌دهی (به ترتیب معادل با کد ۲۱ و ۳۰ از مقیاس BBCH) انجام شد. نانوسیلیکون مورد استفاده در این پژوهش با اندازه ذرات ۲۰ تا ۳۰ نانومتر محصول شرکت Nanomaterial US Research بود که از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان در مشهد تهیه شد و مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. میزان ورمی کمپوست هفت تن در هکتار بود که با کل خاک در هر گلدان مخلوط شد.

جدول ۱- مشخصات نانوسیلیکون Table 1. Nano Silicon properties

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

برای کاشت از گلدان‌هایی با قطر ۴۲ و ارتفاع ۴۰ سانتی متری استفاده شد. هر گلدان به عنوان یک واحد آزمایشی در نظر گرفته شد. در هر گلدان ۱۳ کیلوگرم خاک ریخته شد. از چاودار (پاییزه) رقم محلی اردبیل با در نظر گرفتن وزن هزار دانه حدود ۳۰ گرم، ۵۵ بذر در هر گلدان معادل ۱/۶ گرم، استفاده شد. قبل از کاشت، بذور برای ورنالیزاسیون به مدت ۱۲ روز در دمای ۲ درجه سانتی گراد در دستگاه کُلد انکوباتور (مدل IKH.RI90، شرکت ایران خودساز) قرار داده شدند. گلدان‌ها در شرایط گلخانه‌ای در دمای ۲۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس

¹ . Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical Industry; BBCH

با طول دوره روشنایی ۱۵-۱۴ ساعت (با استفاده از ترکیبی از لامپ‌های معمولی و مهتابی) نگهداری شدند. اولین آبیاری بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی بسته به شرایط محیطی و نیاز رطوبتی گیاه زراعی و سطوح تیمار کم آبیاری، انجام شد. نتایج ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۲ و مشخصات ورمی‌کمپوست مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است.

Table2. Soil physico- chemical characteristics

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک

ویژگی Characteristic	پتاسیم K	فسفر P	روی Zn	نیتروژن N	کربن آلی O. C	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	اکسید سیلیکون (SiO ₂)	عصاره اشباع Saturated extract	بافت Texture
مقادیر Amount	mg.kg ⁻¹			%							لومی سیلتی Loamy Silty
	255	17.3	1.02	0.04	0.72	38.5	42	19.5	64.8	47	pH 7.8

Table 3- Result of vermicompost analysis

جدول ۳- نتایج تجزیه ورمی‌کمپوست

ویژگی Characteristic	هدایت الکتریکی EC dS.m ⁻¹	آهن Fe	منگنز Mn	مس Cu	روی Zn	سرب Pb	کادمیوم Cd	سیلیکون Si
مقادیر Amount	1.12	5000	275	20	110	19	1	43.8
مقادیر Amount	OM	OC	نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K	کلسیم Ca	منیزیم Mg	pH
مقادیر Amount	56.8	32.9	1.55	0.4	0.4	2.73	0.95	7.64

در تمامی تیمارها دو هفته بعد از آخرین قطع آبیاری یا ۱۳۵ روز بعد از زمان کاشت، نسبت به ارزیابی صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بر روی برگ پرچم اقدام شد. در این راستا برای سنجش میزان قندهای محلول به روش دابویس و همکاران (Dubios et al, 1956)، محتوای پرولین برگ پرچم با استفاده از روش بیتز و همکاران (Bates et al, 1973) و مقدار آنتوسیانین با روش واگنر (Wagner, 1979) تعیین شد. پروتئین کل از برگ با روش برادفورد (Bradford, 1976) استخراج شد. محتوای کلروفیل و کاروتنوئید برگ پرچم با استفاده از روش آرنون (Arnon, 1967) اندازه‌گیری و از طریق قرائت جذب نوری محلول‌رویی در طول موج‌های ۴۷۰، ۴۴۵ و ۶۶۳ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر (SP- UV 200, APerkinElmer Company) اندازه‌گیری و براساس رابطه‌های (۱) تا (۳) محاسبه شدند.

رابطه ۱: $a = (19/3 \times A_{663} - 8/6 \times A_{645})V/100W$ = کلروفیل

رابطه ۲: $b = (19/3 \times A_{645} - 3/6 \times A_{663})V/100W$ = کلروفیل

رابطه ۳: کلروفیل = a + b کلروفیل

در این روابط V حجم استون استفاده شده و W وزن نمونه گیاهی استفاده شده است.

به منظور اندازه‌گیری میزان انتقال ماده خشک، یک هفته قبل از پرشدن دانه تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک، هر چهار روز یک‌بار نمونه‌برداری انجام شد. بوته‌های برداشتی (دو بوته) در هر مرحله به ساقه، برگ و دانه تفکیک و پس از خشک کردن (قرار دادن در آونی

با دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت) توزین شدند. سپس میزان انتقال ماده خشک، سهم فرایند انتقال مجدد از بخش رویشی به دانه و میزان مشارکت ذخایر ساقه در عملکرد دانه از طریق روابط زیر محاسبه شد (Barnett & Pearce, 1983).

$$DMT = DMA - DMM \quad \text{رابطه ۴:}$$

که در آن DMT^2 میزان انتقال ماده خشک کل برحسب گرم در بوته، DMA^3 حداکثر وزن خشک اندام هوایی در برداشت اول و DMM^4 وزن خشک اندام هوایی (به جز دانه) در مرحله رسیدگی است.

$$CDMAG = \left(\frac{DMT}{GY} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۵:}$$

در این رابطه $CDMAG^5$ سهم فرایند انتقال مجدد از بخش‌های هوایی در دانه بر حسب درصد، DMT میزان انتقال ماده خشک بر حسب گرم در بوته و GY^6 عملکرد دانه بر حسب گرم در بوته می‌باشد.

$$SDMT = SDMM - SDMA \quad \text{رابطه ۶:}$$

در این رابطه $SDMT^7$ میزان انتقال ماده خشک از ساقه بر حسب گرم در بوته، $SDMA^8$ حداکثر وزن خشک ساقه در برداشت اول، $SDMM^9$ وزن خشک ساقه در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک می‌باشد.

$$CSAG = \left(\frac{SDMT}{GY} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۷:}$$

در این رابطه $CSAG^{10}$ سهم ذخایر ساقه در عملکرد دانه بر حسب درصد، $SDMT$ میزان انتقال ماده خشک از ساقه بر حسب گرم در بوته و GY عملکرد دانه بر حسب گرم در بوته می‌باشد.

$$CP = GY - DMT \quad \text{رابطه ۸:}$$

در این رابطه CP^{11} میزان فتوسنتز جاری برحسب گرم در بوته، GY عملکرد دانه بر حسب گرم در بوته و DMT میزان انتقال ماده خشک بر حسب گرم در بوته می‌باشد. در زمان رسیدگی، پنج بوته به‌ظاهر یکنواخت و مشابه در هر گلدان برداشت و میانگین داده‌های حاصل از آنها به‌عنوان عملکرد تک بوته در تجزیه داده‌ها استفاده شد. تجزیه داده‌ها با نرم افزار SAS (نسخه ۹/۴) انجام شد. میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند.

² Dry Matter Translocation

³ Dry Matter at Anthesis

⁴ Dry Matter at Maturity

⁵-Contribution of Dry Matter Assimilates to Grain

⁶-Grain Yield

⁷ Stem Dry Matter Translocation

⁸ Stem Dry Matter at Anthesis

⁹ Stem Dry Matter at Maturity

¹⁰-Contribution of Stem Assimilates to Grain

¹¹ Current photosynthesis

نتایج و بحث

محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی برگ پرچم: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهم‌کنش هر یک از عامل‌های آزمایشی بر محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین محتوای کلروفیل a، b و کلروفیل کل (به‌ترتیب ۲/۴۲، ۰/۸۱۳ و ۳/۲۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) در مصرف توام ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل بدست آمد. که از افزایش به‌ترتیب ۶۳/۷، ۵۶/۹ و ۶۱/۸ درصدی نسبت به قطع آبیاری در مرحله آبستنی و عدم مصرف ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون برخوردار بود (جدول ۵). بالا بودن غلظت آهن، روی و نیتروژن موجود در ورمی‌کمپوست مورد استفاده (جدول ۳) که از عناصر اساسی در سنتز کلروفیل محسوب می‌شوند، می‌تواند از دلایل افزایش کلروفیل تحت چنین شرایطی باشد. به نظر می‌رسد در شرایط محدودیت آبی، گیاه با بسته نگاه داشتن روزه‌ها سعی در حفظ محتوای نسبی آب دارد، ولی در چنین وضعیتی انتقال الکترون در فتوسینتیم II مختل شده و الکترون اضافی ناشی از فتولیز آب، موجب تولید گونه‌های فعال اکسیژن شده (Ghosh et al., 2004)، که با تخریب کلروپلاست طی بروز تنش اکسیداتیو (Miller et al., 2010)، و یا با سنتز آهسته کلروفیل، منجر به کاهش کلروفیل می‌شود. در چنین شرایطی به نظر می‌رسد کاربرد ورمی‌کمپوست به‌دلیل وجود عناصر ریزمغذی موجود در آن به‌خصوص از نظر فسفر، آهن، منگنز و روی (جدول ۳) که در سنتز کلروفیل نقش اساسی دارند (Theunissen et al., 2010) و همچنین با کاهش گونه‌های فعال اکسیژن، و همچنین سهولت دسترسی به عناصری مانند نیتروژن، موجب افزایش سنتز کلروفیل می‌شود (Hosseinzadeh et al., 2016). نظری و همکاران (Nazari et al, 2023) نیز افزایش محتوای کلروفیل برگ به-واسطه کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط محدودیت آبی را، به افزایش فراهمی عناصر غذایی از جمله آهن، روی و نیتروژن نسبت دادند. در این زمینه نوربخش و همکاران (Nourbakhsh et al., 2016) اظهار داشتند کاربرد ورمی‌کمپوست به‌دلیل فراهمی مقادیر زیادی عناصر غذایی به‌خصوص نیتروژن و امکان جذب بسیاری از ریزمغذی‌ها مانند روی و آهن که از عناصر ضروری در سنتز کلروفیل بوده و در ساختار آن نقش اساسی دارند، منجر به افزایش محتوای کلروفیل می‌شود. سایر محققین نیز بیان کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط محدودیت آبی با بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش گونه‌های فعال اکسیژن، موجب افزایش محتوای کلروفیل شد (Benaffari et al., 2022). سیلیکون نیز با قرار گرفتن در آپوپلاست دیواره‌های خارجی سلول‌های اپیدرمی، علاوه بر تولید بافت ناهمواری در دو سطح برگ، ضمن کمک به استحکام برگ و تأخیر در پیری آن، موجب افزایش محتوای کلروفیل می‌شود (Gong et al., 2005). جیاو و همکاران (Jiao et al, 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.

محتوای پرولین و قندهای محلول برگ پرچم: نتایج نشان داد که اثرات اصلی هر یک از عامل‌های آزمایش بر محتوای قندهای محلول، و برهم‌کنش آن‌ها بر محتوای پرولین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). در بین سطوح آبیاری، بیش‌ترین محتوای قندهای محلول در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی (۹۷/۵۳ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) بدست آمد که از افزایش ۲۱/۳ درصدی نسبت به آبیاری کامل برخوردار بود (جدول ۶).

جدول ۴- تجزیه واریانس تاثیر ورمی کمپوست و نانوسیلیکون بر محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و برخی صفات بیوشیمیایی چاودار تحت تنش خشکی

Table 4. Analysis of variance the effects of nano silicon and vermicompost on the content of photosynthetic pigments and on some biochemical traits of rye under drought stress

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات M.S					
		پرولین Proline	قندهای محلول Soluble sugars	آنتوسیانین Anthocyanine	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll
تکرار Replication	2	5.77**	351.9**	0.007**	0.99**	0.069**	0.57**
سطوح آبیاری (A) Irrigation levels	2	7.63**	876.7**	0.026**	0.80**	0.098**	1.44**
تعدیل‌کننده‌های تنش (N) Stress modulator	3	4.89**	184.9**	0.007**	0.08 ^{ns}	0.028**	0.15**
A×N	6	1.01**	38.87 ^{ns}	0.0029**	0.88*	0.007**	0.10**
خطا Error	22	0.282	30.7	0.00058	0.03	0.0014	0.03
ضریب تغییرات CV(%)		7.2	6.2	5.9	8	5.5	6.1

^{ns}, * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** are non-significant, significant at $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively

جدول ۵- مقایسه میانگین تاثیر نانوسیلیکون و ورمی کمپوست بر محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و برخی صفات بیوشیمیایی چاودار تحت تنش خشکی

Table 5. Means comparison of the effects of nano silicon and vermicompost on the content of photosynthetic pigments and some biochemical traits of rye under drought stress

ترکیب تیماری Treatments	محتوای پرولین Proline	محتوای آنتوسیانین Anthocyanin ($\mu\text{mol.gFW}^{-1}$)	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Chlorophyll total
	($\mu\text{g.g}^{-1}\text{FW}$)		(mg.g FW ⁻¹)		

A ₁ ×N ₁	5.34 ^f	0.317 ^f	2.25 ^{a-c}	0.707 ^{c-e}	2.96 ^{a-c}
A ₁ ×N ₂	5.64 ^f	0.322 ^f	2.29 ^{a-c}	0.762 ^{a-c}	3.06 ^{ab}
A ₁ ×N ₃	7.4 ^{c-e}	0.403 ^{c-e}	2.36 ^{ab}	0.794 ^{ab}	3.15 ^a
A ₁ ×N ₄	7.12 ^{de}	0.4 ^{c-e}	2.42 ^a	0.813 ^a	3.23 ^a
A ₂ ×N ₁	7.23 ^{c-e}	0.39 ^{de}	1.47 ^e	0.518 ^g	1.99 ^f
A ₂ ×N ₂	7.51 ^{c-e}	0.375 ^e	2.11 ^{bc}	0.601 ^f	2.71 ^{c-e}
A ₂ ×N ₃	7.26 ^{c-e}	0.408 ^{c-e}	2.03 ^d	0.553 ^{fg}	2.58 ^{de}
A ₂ ×N ₄	8.9 ^a	0.47 ^a	1.77 ^d	0.683 ^{de}	2.46 ^e
A ₃ ×N ₁	6.72 ^e	0.464 ^{ab}	2.27 ^{a-c}	0.671 ^e	2.94 ^{a-c}
A ₃ ×N ₂	8.08 ^{a-c}	0.425 ^{b-d}	2.20 ^{a-c}	0.583 ^f	2.79 ^{b-d}
A ₃ ×N ₃	7.78 ^{b-d}	0.454 ^{ab}	2.25 ^{a-c}	0.741 ^{b-d}	2.99 ^{a-c}
A ₃ ×N ₄	8.55 ^{ab}	0.436 ^{a-c}	2.27 ^{a-c}	0.777 ^{ab}	3.04 ^{ab}
LSD 0.05	0.89	0.04	0.29	0.064	0.29

A₁, A₂ و A₃ به ترتیب نشان دهنده ی آبیاری کامل و قطع آبیاری در مراحل آبستنی و سنبله دهی و N₁, N₂, N₃ و N₄ به ترتیب نشان دهنده ی عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون (شاهد)، مصرف نانوسیلیکون، مصرف ورمی کمپوست، مصرف توام نانوسیلیکون و ورمی کمپوست می باشند. میانگین های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی داری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد 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 at the 5% probability level

جدول ۶- مقایسه میانگین اثرات اصلی کاربرد نانوسیلیکون و ورمی کمپوست بر محتوای قندهای محلول و انتقال ماده خشک از ساقه چاودار در شرایط محدودیت آبی

Table 6. Means comparison of the main effects of nanosilicon and vermicompost application on soluble sugars content and dry matter remobilization from stem of rye under water limitation conditions

تیمارهای آزمایشی Treatments	انتقال ماده خشک از ساقه SDMT	محتوای قندهای محلول Soluble sugars
سطوح آبیاری Irrigation levels	(g.per plant)	(mg.g.FW ⁻¹)
A ₁	0.612b	80.58c
A ₂	0.724a	97.53a
A ₃	0.692a	87.12b
LSD	0.038	5.72
تعدیل کننده های تنش	انتقال ماده خشک از ساقه SDMT (g. per plant)	محتوای قندهای محلول Soluble sugars(mg.g. FW ⁻¹)
N ₁	–	84.51b
N ₂	–	87.36ab
N ₃	–	86.81ab
N ₄	–	94.95a
LSD	–	9.07

A₁, A₂ و A₃ به ترتیب نشان دهنده ی آبیاری کامل و قطع آبیاری در مراحل آبستنی و سنبله دهی و N₁, N₂, N₃ و N₄ به ترتیب نشان دهنده ی عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون (شاهد)، مصرف نانوسیلیکون، مصرف ورمی کمپوست، مصرف توام نانوسیلیکون و ورمی کمپوست می باشند. میانگین های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی داری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد 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.

SDMT= Stem Dry Matter Translocation

Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test at the 5% probability level

در بین تعدیل کننده‌های تنش نیز، مصرف توام ورمی کمپوست و نانوسیلیکون از بیشترین محتوای قندهای محلول (۹۴/۹۵ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) برخوردار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین محتوای پرولین (۸/۹ میکروگرم برگرم وزن تر برگ) در مصرف توام ورمی کمپوست با نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی بدست آمد که در مقایسه با عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در همین سطح از سطوح آبیاری، از افزایش ۲۳ درصدی و در مقایسه با آبیاری کامل از افزایش ۶۶/۶ درصدی برخوردار بود (جدول ۵). به نظر می‌رسد سیلیکون از طریق کمک به جذب بیش‌تر نیترات و بهبود آمینواسیدهای آزاد، منجر به افزایش محتوای پرولین شده (Hajiboland et al, 2017) و با افزایش میزان فتوسنتز جاری (جدول ۸)، منجر به افزایش تولید قندهای محلول و تجمع بیشتر آن در گیاه می‌شود (Silva et al, 2012). وانگ و همکاران (Wang et al, 2011) اظهار داشتند که کاربرد ورمی کمپوست در شرایط خشکی، با افزایش اسید آمینه‌های ضروری به‌ویژه گلوتامات و آرژنین که از پیش‌سازهای تولید پرولین می‌باشد موجب افزایش تجمع پرولین و در نهایت افزایش مقاومت گیاه در مواجهه با تنش‌هایی مثل شوری و خشکی می‌شود. به بیانی دیگر افزایش تجمع پرولین در شرایط محدودیت آبی، علاوه بر نقش فیزیولوژیک مهمی که از نظر تامین انرژی ایفا می‌کند، می‌تواند موجب کاهش پتانسیل اسمزی سلول شده و از طریق تنظیم اسمزی، ضمن بالاتر نگه‌داشتن میزان آب نسبی در گیاهان، منجر به افزایش مقاومت به محدودیت آبی شود. همچنین، ورمی کمپوست از طریق بهبود حاصلخیزی خاک و فراهمی بهتر عناصر ضروری گیاه، ضمن کمک به بهبود فتوسنتز جاری (جدول ۸)، موجب افزایش سنتز و تجمع متابولیت‌ها از جمله کربوهیدرات‌ها می‌شود (Salehi et al, 2011). نتایج مشابهی نیز مبنی بر افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول در شرایط محدودیت آبی با کاربرد نانوسیلیکون توسط دیگر محققان گزارش شده است (Sonobe et al, 2011). از آنجایی که افزایش قندهای محلول در شرایط تنش خشکی، می‌تواند به عنوان یک محافظ معمولی عمل کرده و فشار تورگر را تحت شرایط تنش خشکی حفظ کنند، از این‌رو با افزایش محدودیت آبی، میزان نشاسته کاهش و در مقابل، محتوای کربوهیدرات‌های محلول افزایش می‌یابد (Selim et al, 2019). کاربرد ورمی کمپوست نیز به دلیل برخورداری از عناصر ریزمغذی نظیر آهن، روی و نیتروژن می‌تواند ضمن افزایش فتوسنتز جاری (جدول ۸) و محتوای قندهای محلول و پرولین (جدول ۵ و ۶)، منجر به افزایش شیب پتانسیل آب و بهبود جذب آب توسط گیاه در شرایط تنش شود (Asghari et al, 2020). نتایج مشابهی نیز مبنی بر افزایش فتوسنتز جاری با کاربرد نانوسیلیکون توسط دیگر پژوهشگران گزارش شده است (Ahmadi et al, 2024).

وزن صددانه: نتایج تجزیه واریانس بیانگر معنی‌داری اثر عامل‌های آزمایش بر وزن صددانه در سطح احتمال پنج درصد بود (جدول ۷). در شرایط آبیاری کامل بیش‌ترین وزن صد دانه در مصرف توام ورمی کمپوست و نانوسیلیکون (۳/۶ گرم) بدست آمد که در مقایسه با عدم مصرف آنها از افزایش ۳۲ درصدی برخوردار بود. همچنین قطع آبیاری در مرحله آبستنی در شرایط مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون، وزن صددانه را ۲۸/۱ درصد نسبت به عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در همین سطح از سطوح آبیاری افزایش

داد (جدول ۸). بخشی از افزایش وزن صددانه در کاربرد ورمی کمپوست می‌تواند ناشی از وجود مقادیر بالایی از عناصر موجود در این کود باشد (جدول ۳) که ضمن افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی (جدول ۵) و افزایش فتوسنتز جاری (جدول ۸) منجر به افزایش وزن دانه و به تبع از آن افزایش وزن صد دانه شده است (جدول ۸). دیگر محققان نیز دلیل افزایش وزن هزار دانه با کاربرد سیلیکون تحت شرایط تنش خشکی را، به نقش سیلیکون در بهبود سیستم فتوسنتزی و انتقال مواد فتوسنتزی به اندام زایشی، نسبت دادند (Gong et al., 2003).

محتوای آنتوسیانین برگ پرچم: کاربرد ورمی کمپوست، نانوسیلیکون و سطوح آبیاری بر محتوای آنتوسیانین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). بیش‌ترین محتوای آنتوسیانین در مصرف توام ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبیستی (۰/۴۷ میکرومول برگرم وزن تر برگ) بدست آمد که در مقایسه با عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در همین سطح از آبیاری، از افزایش ۲۰/۵ درصدی و در مقایسه با آبیاری کامل از افزایش ۴۸/۲ درصدی برخوردار بود (جدول ۵). آنتوسیانین از مهمترین ترکیبات آنتی‌اکسیدانی هستند که نه‌تنها رادیکال‌های آزاد را از بین می‌برند، بلکه از تولید بیشتر آنها در گیاه جلوگیری کرده (Saadatmand & Enteshari, 2013) و با محافظت سیستم فتوسنتزی در برابر اکسیداسیون نوری، از گیاهان در معرض تنش محافظت می‌کند (He et al, 2010). احمد و همکاران (Ahmad et al, 2011) علت افزایش محتوای آنتوسیانین در کاربرد ورمی-کمپوست را، به مواد هیومیکی (مشتقات ترکیبات فنی) موجود در این کود به‌عنوان پیش ماده سنتز آنتوسیانین نسبت دادند. سیلیکون نیز با جلوگیری از کاهش معنی‌دار آنتوسیانین در گیاهان در معرض تنش خشکی، اثرات ناشی از محدودیت آبی بر سیستم فتوسنتزی را کاهش و مقاومت به تنش خشکی را، افزایش می‌دهد (Shen et al, 2010). حاجی بلند و همکاران (Hajiboland et al, 2017) اظهار داشتند که کاربرد نانوسیلیکون از طریق جذب نیترات بیشتر و بهبود آمینواسیدهای آزاد، موجب افزایش محتوای پرولین، قندهای محلول و آنتوسیانین برگ گندم شد. از این‌رو به نظر می‌رسد بخشی از افزایش محتوای آنتوسیانین در شرایط کاربرد ورمی کمپوست و نانوسیلیکون می‌تواند ناشی از اثر این ماده در افزایش اسمولیت‌های سازگار باشد (جدول ۵). نتایج مشابهی نیز مبنی بر افزایش محتوای آنتوسیانین با کاربرد سیلیکون، توسط دیگر محققان گزارش شده است (Mosapour Yahyaabadi & Asgharipour, 2016).

انتقال ماده خشک از اندام هوایی و ساقه و سهم این فرایندها در عملکرد دانه: اثرات اصلی سطوح آبیاری بر میزان انتقال ماده خشک از ساقه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد ولی اثر ترکیب تیماری این دو عامل بر میزان انتقال ماده خشک از اندام هوایی، سهم فرایند انتقال ماده خشک از بخش‌های هوایی و ساقه در عملکرد دانه در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۷). بیش‌ترین انتقال ماده خشک از اندام هوایی (۰/۹۳۵ گرم در بوته)، سهم این فرایند در عملکرد دانه (۴۵/۶ درصد) و همچنین میزان مشارکت ذخایر ساقه در عملکرد دانه (۳۷/۴ درصد) در عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری در مرحله

آبستنی بدست آمد که در مقایسه با مصرف توام ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در همین سطح از آبیاری، از افزایش به ترتیب ۷/۵، ۱۵/۴ و ۱۹/۸ درصدی و در مقایسه با آبیاری کامل از افزایش ۳۲/۶، ۹۷/۱ و ۹۳/۸ درصدی برخوردار بود (جدول ۸). به بیانی دیگر در سطح ثابت از شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، گرچه بیشترین انتقال ماده خشک از اندام هوایی و سهم این فرایند در عملکرد دانه در عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون بدست آمد ولی با مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون به تنهایی در این سطح از سطوح آبیاری، از نظر آماری معنی داری نبود (جدول ۸). همچنین سهم انتقال ماده خشک از ساقه در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی از افزایش ۱۸/۳ درصدی نسبت به آبیاری کامل برخوردار بود (جدول ۶). ولی در سطح ثابت از شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، سهم انتقال ماده خشک از ساقه بین عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون با مصرف نانوسیلیکون معنی دار نبود (جدول ۸). به نظر می رسد بخشی از افزایش انتقال ماده خشک در شرایط محدودیت آبی، به دلیل افزایش تقاضای دانه های تشکیل شده به مواد فتوسنتزی و کاهش سهم فتوسنتز جاری (جدول ۸) در برآورد نیاز مخازن (دانه ها) باشد. نتایج مشابهی نیز مبنی بر اینکه در شرایط تنش رطوبتی به دلیل محدودیت در فتوسنتز، میزان انتقال ماده خشک نسبت به آبیاری کامل افزایش می یابد توسط دیگر محققان گزارش شده است (Rezabeighi et al, 2020 ; Liu et al, 2020). ولی کاربرد نانوسیلیکون و ورمی کمپوست با افزایش سهم فتوسنتز جاری (جدول ۸)، موجب می شود تعادل منبع و مخزن تا حدود زیادی حفظ شده و مواد تولیدی منبع بتواند در مخزن مورد استفاده قرار گرفته و سهم فرایند انتقال مجدد در عملکرد دانه کاهش یابد (Seyed Sharifi, 2018). نتایج مشابهی نیز مبنی بر کاهش انتقال ماده خشک و افزایش سهم فتوسنتز جاری با کاربرد نانوسیلیکون توسط دیگر پژوهشگران گزارش شده است (Nazari et al, 2021). در این راستا حبیبی و مجیدیان (Habibi & Majidian, 2014) اظهار داشتند استفاده از ورمی کمپوست در ذرت به دلیل فراهم نمودن عناصر غذایی و بهبود خواص بیولوژیکی و فیزیکی خاک، موجب شد تا اثر تنش تا حدودی تعدیل شده و گیاه بتواند با افزایش فتوسنتز و تولید ماده خشک بیشتر، عملکرد را افزایش دهد. محققان اظهار داشتند سیلیکون با افزایش عمودی شدن برگ ها و نفوذ بیشتر نور به جامعه گیاهی و افزایش سهم فتوسنتز جاری، منجر به کاهش انتقال مجدد ماده خشک می شود (Parsapour et al, 2019). از آنجایی که در شرایط کاربرد ورمی کمپوست و نانوسیلیکون، سهم فتوسنتز جاری افزایش می یابد (جدول ۸) از این رو طبیعی است که در چنین شرایطی سهم انتقال مجدد از ساقه و اندام های هوایی در دانه کاهش یابد (Yaghoubi Khanghahi et al, 2019). در واقع کاربرد کودهای زیستی با تعدیل اثر ناشی از تنش خشکی و بهبود فتوسنتز جاری (جدول ۸) موجب می شود بخش عمده ای از عملکرد دانه توسط فتوسنتز جاری تأمین شده و بخش کمتری به انتقال ماده خشک تخصیص یابد.

جدول ۷- تجزیه واریانس تاثیر نانو سیلیکون و ورمی کمپوست بر انتقال ماده خشک و فتوسنتز جاری چاودار تحت تنش خشکی

Table 7. Analysis of variance the effects of nano silicon and vermicompost on current photosynthesis and dry matter remobilization of rye under drought stress

منابع تغییر S.O.V	df	میانگین مربعات M.S					
		انتقال ماده	سهم انتقال ماده	انتقال ماده	سهم انتقال ماده	عملکرد دانه	فتوسنتز جاری
		خشک از اندام	خشک از اندام	خشک از ساقه	خشک از ساقه	GY	CP
		هوایی DMT	هوایی در عملکرد دانه CDMAG	SDMT	در عملکرد دانه CSAG		
Replication تکرار	2	0.1413**	84.67**	0.1366**	112.7**	0.675**	0.395**
Irrigation (A) سطوح آبیاری	2	0.0261**	444.92**	0.040**	380.62**	1.321**	1.646**
levels							
تعدیل کننده‌های تنش (N)	3	0.0085*	135.44**	0.0037 ^{ns}	92.49**	0.566**	0.605**
Stress modulators							
A×N	6	0.0077**	32.09**	0.0018 ^{ns}	20.24*	0.116**	0.121**
Error خطا	22	0.0022	7.024	0.0019	7.23	0.020	0.026
CV(%) ضریب تغییرات	-	5.4	7.8	6.5	10.3	5.3	9

^{ns}, * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

^{ns}, * and ** are non-significant, significant at $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively

DMT= Dry Matter Translocation; SDMT= Stem Dry Matter Translocation; CSAG= Contribution of Stem Assimilates to Grain;

GY= Grain Yield; CP= Current photosynthesis; 100 GW= 100 Grain Weight.

جدول ۸- مقایسه میانگین تاثیر نانوسیلیکون و ورمی کمپوست بر انتقال ماده خشک و فتوسنتز جاری چاودار تحت تنش خشکی

Table 8. Means comparison of effects of nanosilicon and vermicompost on current photosynthesis and dry mater remobilization of rye under drought stress

تیمارها Treatments	انتقال ماده خشک از اندام هوایی DMT (g.per plant)	سهم انتقال ماده خشک از اندام هوایی در عملکرد SDMT دانه (%)	سهم انتقال ماده خشک از ساقه در عملکرد دانه CSAG (%)	عملکرد دانه GY (g.per plant)	فتوسنتز جاری (گرم در بوته) CP (g.per plant)	وزن صددانه 100 GW (g)
A ₁ ×N ₁	0.858 ^a	32.68 ^c	22.29 ^{c-e}	2.65 ^b	1.79 ^c	2.75 ^e
A ₁ ×N ₂	0.864 ^a	28.84 ^c	21.33 ^{c-e}	3 ^a	2.14 ^{ab}	3.19 ^{bc}
A ₁ ×N ₃	0.873 ^a	28.81 ^c	20.76 ^{de}	3.03 ^a	2.16 ^{ab}	3.35 ^b
A ₁ ×N ₄	0.705 ^b	23.13 ^d	19.31 ^e	3.04 ^a	2.33 ^a	3.63 ^a
A ₂ ×N ₁	0.935 ^a	45.6 ^a	37.43 ^a	2.04 ^d	1.11 ^e	2.38 ^g
A ₂ ×N ₂	0.929 ^a	44.11 ^a	34.21 ^{ab}	2.1 ^d	1.17 ^{de}	2.47 ^g
A ₂ ×N ₃	0.918 ^a	32.29 ^c	25.51 ^c	2.19 ^{cd}	1.93 ^{bc}	2.49 ^{fg}
A ₂ ×N ₄	0.869 ^a	39.51 ^b	31.23 ^b	2.85 ^{ab}	1.32 ^{de}	3.05 ^{cd}
A ₃ ×N ₁	0.903 ^a	38.47 ^b	31.31 ^b	2.35 ^c	1.44 ^d	2.7 ^{ef}
A ₃ ×N ₂	0.86 ^a	31.01 ^c	24.47 ^{cd}	2.8 ^{ab}	1.94 ^{bc}	2.84 ^{de}
A ₃ ×N ₃	0.899 ^a	30.37 ^c	22.92 ^{c-e}	2.96 ^a	2.06 ^{ab}	3.06 ^c
A ₃ ×N ₄	0.925 ^a	30.68 ^c	22.33 ^{c-e}	3.01 ^a	2.08 ^{ab}	3.25 ^{bc}
LSD	0.0811	4.488	4.55	0.244	0.274	0.212
0.05						

A₁, A₂ و A₃ به ترتیب نشان دهنده‌ی آبیاری کامل و قطع آبیاری در مراحل آبستنی و سنبله‌دهی و N₁, N₂, N₃ و N₄ به ترتیب نشان دهنده عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون (شاهد)، مصرف نانوسیلیکون، مصرف ورمی کمپوست، مصرف توام نانوسیلیکون و ورمی کمپوست می‌باشند. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد 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.

DMT= Dry Matter Translocation; SDMT= Stem Dry Matter Translocation; CSAG= Contribution of Stem Assimilates to Grain;

GY= Grain Yield; CP= Current photosynthesis; 100 GW= 100 Grain Weight.

Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test at the 5% probability level

فتوستنز جاری برگ پرچم: نتایج تجزیه واریانس نشان داد مصرف ورمی کمپوست، نانوسیلیکون و سطوح آبیاری بر فتوستنز جاری برگ پرچم در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۷). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تحت شرایط آبیاری کامل، بیش‌ترین میزان فتوستنز جاری در مصرف توام ورمی کمپوست و نانوسیلیکون بدست آمد که در مقایسه با عدم مصرف توام آنها، از افزایش ۳۰ درصدی برخوردار بود. هر چند در سطح ثابت از شرایط آبیاری کامل، در سهم فتوستنز جاری بین مصرف ورمی کمپوست، نانوسیلیکون به تنهایی و در مصرف توام آنها تفاوت آماری، معنی‌داری نبود (جدول ۸). همچنین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون منجر به افزایش ۱۸/۹ درصدی فتوستنز جاری نسبت به عدم مصرف آنها در همین سطح از سطوح آبیاری شد (جدول ۸). این نتایج با یافته‌های دیگر پژوهشگران مبنی بر اینکه مصرف ورمی کمپوست با افزایش دسترسی به آب و عناصر غذایی، موجب بهبود فتوستنز و افزایش سهم فتوستنز در عملکرد دانه گندم شد مطابقت دارد. به نظر می‌رسد شرایط مطلوب آبیاری به دلیل تأخیر در پیری برگ‌ها (Tatar *et al*, 2016) و سیلیکون با عمودی شدن برگ‌ها و نفوذ بیشتر نور به جامعه گیاهی، منجر به افزایش سهم فتوستنز جاری شده است (Parsapour *et al*, 2019).

عملکرد دانه: نتایج تجزیه واریانس بیانگر معنی‌داری اثر عامل‌های آزمایش بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد بود (جدول ۷). تحت شرایط آبیاری کامل، بیش‌ترین عملکرد دانه در مصرف توام ورمی کمپوست و نانوسیلیکون (۳/۰۴ گرم در بوته) بدست آمد که در مقایسه با عدم مصرف آنها از افزایش ۱۴/۷ درصدی برخوردار بود. همچنین قطع آبیاری در مرحله آبستنی در شرایط مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون، عملکرد دانه را ۳۹ درصد نسبت به عدم مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون در همین سطح از سطوح آبیاری افزایش داد (جدول ۸). البته در سطح ثابت از شرایط آبیاری کامل، بین مصرف ورمی کمپوست، نانوسیلیکون به تنهایی و کاربرد توام آنها تفاوت آماری معنی‌داری در عملکرد دانه نبود (جدول ۸). بخشی از بهبود عملکرد دانه می‌تواند ناشی از مصرف ورمی کمپوست به دلیل برخورداری از مقادیر بالای نیتروژن و فسفر موجود در آن (جدول ۳) باشد که ضمن بهبود فتوستنز جاری (جدول ۸)، موجب افزایش عملکرد دانه شد. از طرفی مصرف ورمی کمپوست و نانوسیلیکون با بهبود محتوای رنگیزه‌های فتوستنزی (جدول ۵) توانست بخشی از اثرات مخرب ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن را کاهش داده و در کاهش اثرات ناشی از تنش اکسیداتیو به نحو موثری عمل نماید. همچنین کاربرد تعدیل کننده‌های تنش با افزایش اسمولیت‌های سازگاری همانند پرولین و قندهای محلول (جدول ۵)، در افزایش فتوستنز جاری (جدول ۸) موثر بوده و همه این عوامل می‌تواند توجیه کننده بخشی از افزایش عملکرد دانه باشد (جدول ۸). مام نبی و همکاران (Mamnabi *et al*, 2020) اظهار داشتند کاربرد ورمی کمپوست در شرایط تنش خشکی از طریق بهبود محتوای فسفر و نیتروژن برگ و همچنین افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای پرولین و قندهای محلول، منجر به افزایش عملکرد دانه کزرا شد. شهبازی و همکاران (Shahbazi *et al*, 2015) اظهار داشتند کاربرد ورمی کمپوست با افزایش دسترسی به آب و عناصر غذایی

و افزایش فتوستتیز، موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد. عباسی و همکاران (Abbasi et al, 2018) افزایش عملکرد دانه گندم در شرایط تنش خشکی با کاربرد نانوسیلیکون را، به بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای پرولین نسبت دادند. موسی‌پور یحیی آبادی و اصغری‌پور (Mosapour Yahyaabadi & Asgharipour, 2016) نیز افزایش عملکرد دانه به‌واسطه کاربرد سیلیکون تحت شرایط تنش خشکی را، به بهبود محتوای آنتوسیانین، پرولین و قندهای محلول نسبت دادند. به نظر می‌رسد سیلیکون از طریق کاهش تخریب رنگدانه‌ها (Bybordi, 2016) و بهبود محتوای کلروفیل به بهبود عملکرد دانه کمک می‌کند.

نتیجه‌گیری کلی

محدودیت آبی یکی از مهمترین تنش‌هایی است که می‌تواند با ایجاد تنش اکسیداتیو و تولید گونه‌های فعال اکسیژن، آثار مخربی بر واکنش‌های مختلف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه و به تبع از آن بر کاهش عملکرد از خود برجای گذارد. در چنین شرایطی کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش نظیر ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در گیاهان از جمله راه‌کارهایی است که می‌تواند به‌دلیل افزایش محتوای اسمولیت‌های سازگاری همچون پرولین و قندهای محلول، تا حد زیادی با کاهش اثرات مخرب ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن و افزایش مقاومت گیاه در برابر محدودیت آبی، از کاهش بیشتر عملکرد در شرایط تنش جلوگیری نماید. در این راستا ارزیابی نتایج کاربرد ورمی‌کمپوست، نانوسیلیکون به تنهایی و مخصوصاً در کاربرد توأم در بیشتر صفات مورد بررسی، نشان داد که کاربرد توأم به‌دلیل افزایش محتوای اسمولیت‌های قادر بودند بخشی از اثرات ناشی از تنش اکسیداتیو را کاهش و با بهبود فتوستتیزی جاری و افزایش سهم مشارکت این فرایند در عملکرد دانه، به بهبود عملکرد دانه چاودار کمک نمایند. در این رابطه کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون تحت شرایط محدودیت شدید آبی، به‌دلیل بهبود برخی صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی توانست عملکرد دانه را ۸/۳ درصد در مقایسه با عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون در همین سطح از سطوح آبیاری افزایش دهد. از این‌رو بر اساس نتایج این بررسی می‌توان به منظور بهبود عملکرد دانه چاودار تحت شرایط محدودیت آبی، کاربرد توأم ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون را توصیه نمود.

سپاسگزاری

از اساتید محترم و کارکنان گلخانه و آزمایشگاه زراعت دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

- Abbasi, A.R., Lotfi, M., Mohammadi, J., 2018. Response of antioxidant defense mechanism and wheat yield changes to drought stress with application of different concentrations of nano-silicone and nano-titanium. *Rainfed Agriculture of Iran*. 7(1), 79-101. (in Persian). <http://doi.org/10.22092/IDAJ.2018.120366.196>
- 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'). *Joural of Soil and Plant Interaction*. 7 (1), 35-47. (in Persian). <https://civilica.com/doc/260318>
- Ahire, M.L., Mundada, P.S., Nikam, T.D., Bapat, V.A., Penna, S., 2021. Multifaceted roles of silicon in

mitigating environmental stresses in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*. 169, 291-310. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.010>.

Ahmad, Y.M., Shahlaby E.A., Shnan, N.T., 2011. The use of organic and inorganic cultures in improving vegetative growth, yield characters and antioxidant activity of roselle plants (*Hibiscus sabdariffa* L.). *African Journal of Biotechnology*. 10(11), 1988-1996.

Ahmadi Nouraldinvand, F., Seyed Sharifi, R., Siadat, S.A., Khalilzadeh, R., 2024. Effects of bio-fertilizers and foliar application of nano-silicon on the contribution of dry matter remobilization and current photosynthesis in grain yield of wheat under irrigation withholding conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 16(4),1005-1028. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22077/escs.2023.5254.2128>

Ahmadi Nouraldinvand, F., Seyed Sharifi, R., Siadat, S.A., Khalilzadeh, R., 2021. Effect of water limitation and application of bio-fertilizer and nano-silicon on yield and some biochemical traits of wheat. *Cereal Research*. 10(4): 285-298. (in persian). doi: [10.22124/CR.2021.18682.1645](https://doi.org/10.22124/CR.2021.18682.1645)

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>

Asghari, B., Khademian, R., Sedaghati, B., 2020. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) confer drought resistance and stimulate biosynthesis of secondary metabolites in pennyroyal (*Mentha pulegium* L.) under water shortage condition. *Scientia Horticulturae*. 263, 109132. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109132>

Barnett, K.H., Pearce, P.B., 1983. Source-Sink ratio alteration and its effect on physiological parameters in maize. *Crop Science*. 23, 101-109.

Bates, L.S., Walderen R.D., Taere, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil*. 39, 205- 207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>

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.

Benaffari, W., Boutasknit, M., Anli, M., Ait-El-Mokhtar, Y., Ait-Rahou, R., Ben-Laouane, H., Ben Ahmed, T., Mitsui, M., Baslam, M., 2022. The native Arbuscular Mycorrhizal fungi and vermicompost-based organic amendments enhance soil fertility, growth performance, and the drought stress tolerance of quinoa. *Journal Plants*. 11(3): 393-396. <https://doi.org/10.3390/plants11030393>

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>

Dubios, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Roberts, P.A., Smith, F., 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Annals of Chemistry*. 28, 350-356. <https://doi.org/10.1038/168167a0>

Eneji, A.E., Inanaga, S., Muranaka, S., Li, J., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., 2008. Growth and nutrient use in four grasses under drought stress as mediated by silicon fertilizers. *Journal of Plant Nutrition*. 31(2), 355-365. <https://doi.org/10.1080/01904160801894913>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2021. FAOSTAT Statistical Database. [Rome].

Ghanbari, M., Mokhtassi-Bidgoli, A., Mansour Ghanaei-Pashaki, K., Talebi-Siah Saran, P., 2021. The study of yield and physiological characteristics of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) in response to bio-fertilizers and different irrigation regimes. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. 31 (1), 23-37. (In Persian with English Summary). <https://sid.ir/paper/398795/fa>

Ghosh, P.K., Ajay, K.K., Bandyopadhyay, M.C., Manna, K.G., Mandal, A.K., Hati, K.M., 2004. Comparative effectiveness of cattle manure, poultry manure, phosphocompost and fertilizer-NPK on three cropping system in vertisols of semi-arid tropics. II. Dry matter yield, nodulation, chlorophyll content and enzyme activity. *Bioresource Technology*. 95, 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.012>

Gong, H., Chen, K., Chen, G., Wang, S., Zhang, C.H., 2003. Effects of silicon on growth of wheat under drought. *Journal Plant Nutrition*. 26, 1055-1063.

Gong, H.Z., Chen, K., Wang, S., Zang, C., 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in post under drought. *Plant Science*. 169, 313-321. <https://doi.org/0.1016/j.plantsci.2005.02.023>

Habibi, S., Majidian, M., 2014. Effect of different levels of nitrogen fertilizer and vermi-Compost on yield and quality of sweet corn (*Zea mays* Hybrid Chase). *Journal of Crop Production and Processing*. 4, 15-26. (In Persian). <http://jcnp.iut.ac.ir/article-1-2043-en.html>

Hajiboland, R., Cherghvareh, L., Dashtebani, F., 2017. Effects of silicon supplementation on wheat plants under salt stress. *Journal of Plant Process and Function*. 5(18), 1-11. (in Persian with English abstract). <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-484-fa.html>

He, F., Mu, L., Yan, G.L., Liang, N., Pan, Q., Wang, J., Reeves, M., Duan, C., 2010 Biosynthesis of anthocyanins and their regulation in colored grapes. *Molecules*. 15, 9057-9091. <https://doi.org/10.3390/molecules15129057>

Heidarpour, O., Esmailpour, B., Soltani, A.A., Khorramdel, S. 2019. Effect of vermicompost on essential oil composition of (*Satureja hortensis* L.) under water stress condition. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*. 22 (2), 484–492. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2019.1618204>

Hosseinzadeh, S.R., Amiri, H., Ismaili, A., 2016. Effect of vermicompost fertilizer on photosynthetic characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Photosynthetica*. 54(1), 87-92. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.010>
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.001>

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/10.1001.1.83372008.1397.20.3.11.8>

Khajeh, M., Mousavi Nik, S.M., Siros Mehr, A., Yadali De Cheshme, P., Amiri, A., 2014. The effect of drought stress and silicon foliar application on yield and photosynthetic pigments of wheat in Sistan region. *Crop Physiology*. 7(26), 5-19. (In Persian). <https://sid.ir/paper/482740/fa>

Khalilzadeh, R., Seyed Sharifi, R., Jalilian, J., 2016. Antioxidant status and physiological responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) to cycocel application and bio fertilizers under water limitation condition. *Journal of Plant Interactions*. 11(1): 130-137. <https://doi.org/10.1080/17429145.2016.1221150>

Kheirizadeh Arough, Y., Seyed Sharifi, R., 2017. Physiological responses of Triticale to zinc application and bio fertilizers under water limitation condition. *The Philippine Agricultural Scientist*. 100(2): 1211-1217.

Khodabandeh, N., 2012. Cereal. University of Tehran Press, Tehran, p. 538. (In Persian). <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-763-fa.html>

Kostopoulou, P., Barbayiannis, N., Basile, N., 2010. Water relations of yellow sweet clover under the synergy of drought and selenium addition. *Plant Soil*. 330, 1-2. 65-71. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0176-x>

Liu, Y., Zhang, P., Li, M., Chang, L., Cheng, H., Chai, S., Yang, D., 2020. Dynamic responses of accumulation and remobilization of water soluble carbohydrates in wheat stem to drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*. 155, 262-270. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.024>

Ma, J.F., Yamaji, N., 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends Plant Science*. 11(8): 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>

Mamnabi, S., Nasrollahzadeh, K., Golezani, G., Raei, Y., 2020. Improving yield-related physiological characteristics of spring rapeseed by integrated fertilizer management under water deficit conditions. *Saudi Journal of Biology Science*. 27(3), 797-804. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.01.008>

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>

Molik, K., Pawłowska, E., Kantarek, Z., Milczarski, P., 2014. QTL analysis of chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameter in mapping population of rye. *Folia Pomeranae Universitatis Technologiae Stenensis Agricultura Alimentaria Piscaria et Zootechnica*. 312, 105- 116.

Mosapour Yahyaabadi, H., Asgharipour, M.R., 2016. Effects of drought stress and its interaction with silicon on stimulates the antioxidant system and lipid peroxidation in Fennel (*Foeniculum vulgare*). *Plant Process and Function*. 5(16), 71-84. (In Persian). <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-349-en.html>

Nazari, Zh., R. Seyed Sharifi, M. Sedghei and H. Narimani. 2023. Evaluation of yield and grain filling components of triticale (*X Triticosecale* Witt.) affected by application of mycorrhizal fungi, vermicompost and nano-silicon under water deficit conditions. *Environmental Stresses Sciences* 16(1): 53-69. (In Farsi).

Nazari, Zh., Seyed Sharifi, R., Narimani, H., 2021. Effect of bio fertilizers, nano silicon and water limitation on current photosynthesis and dry matter transfer of triticale. *Journal of Crop Physiology*. 13(51), 5-24. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jci.2022.333768.2639>

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). <https://doi.org/10.22067/JHORTS4.V30I2.34190>

Pan, S., Rasul, F., Li, W., Tian, H., Mo, Z., Duan M., Tang, X., 2013. Roles of plant growth regulators on yield, grain qualities and antioxidant enzyme activities in super hybrid rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Rice*. 6, 9-14.

Parsapour, O., Bakhshandeh, A., Gharineh, M.H., Feisi, H., Moradi Telavat, M.R., 2019. The effect of foliar application of nano and bulk silicon dioxide particles on grain yield and redistribution of dry matter in wheat under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 12, 377-388. (In Persian). <https://doi.org/10.22077/escs.2019.1191.1244>

Rahimi, A., Gitari, H., Lyons, G., Heydarzadeh, S., Tuncturk, M., Tuncturk, R., 2023. Effects of vermicompost, compost and animal manure on vegetative growth, physiological and antioxidant activity characteristics of *Thymus vulgaris* L. under water stress. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*. 33(1): 40-53. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.1124458>

Rezabeighi, S., Bijanzadeh, E., Behpouri, A., 2020. Effect of silicone spraying on assimilate remobilization and yield of two bread and durum wheat under late season water stress. *Journal of Plant Production* (Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources). 27(3), 55-71. sid. (In Persian). <https://sid.ir/paper/959406/en>

Roychoudhury, A., 2020. Silicon-nanoparticles in crop improvement and agriculture. *International Journal on Recent Advancement in Biotechnology & Nanotechnology*. 3, 54-65.

Saadatmand, M., Enteshari, S., 2013. The effects of pretreatment duration with silicon on salt stress in Iranian borage (*Echium amoenum* Fisch & C.A. Mey). *Journal of Soil and Plant Interactions Isfahan University of Technology*. 3(4), 45-57. (In Persian).

Salehi, A., Ghalavand, A., Sefidkon, F., Asgharzade, A., 2011. The effect of zeolite, PGPR and vermicompost application on N, P, K concentration, essential oil content and yield in organic cultivation of German Chamomile (*Matricaria chamomilla* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*. 27, 188-201. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2011.6394>

Sattar, A., Sher, A., Ijaz, M., Ul-Allah, S., Rizwan, M.S. and Hussain M., 2020. Terminal drought and heat stress alter physiological and biochemical attributes in flag leaf of bread wheat. *Plos One*. 15 (5), 1-14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232974>

Schlegel, R.H.J., 2014. Rye: Genetics, Breeding, and Cultivation. *CRC Press, Boca Raton*. 359 pp.

Selim, D.H., Nassar, R.A., Boghdady, M.S., Bonfill, M., 2019. Physiological and anatomical studies of two wheat cultivars irrigated with magnetic water under drought stress conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*. 135, 480-488. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.11.012>

Seyed Sharifi, R., 2018. Effects of uniconazole and bio fertilizers on grain filling period and contribution of remobilization in grain yield of wheat under different moisture regimes in greenhouse condition. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 11, 515-531. (In Persian). <https://doi.org/10.22077/escs.2018.764.1148>

Shahbazi, Sh., Fateh, E., Ayeneband, 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*. 38(2), 99-110. (In Persian). <https://sid.ir/paper/165202/en>

Shekari, F., Abbasi, A., Mustafavi, S.H., 2017. Effect of silicon and selenium on enzymatic changes and productivity of dill in saline condition. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 16 (4), 367-374. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.11.006>

Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A.E., Li, J., 2010. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean antioxidant systems in two cottons. *General and Applied Plant Physiology*. 33, 221-234. <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 in

modulated by the leaf water potential in two waterdeficient tomato cultivars. *Plant Soil and Environment*. 58, 481-486. <https://doi.org/10.17221/213/2012-PSE>

Sonobe, K., Hattori, T., Tsuji, W., Eneji, A.E., Kobayashi, S., Kawamura, Y., Tanaka, K. Inanaga, S., 2011. Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. *Journal of Plant Nutrition*. 34 (1), 71-82. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.531360>

Tatar, Ö. Brück, H., Asch, F.O., 2016. Photosynthesis and remobilization of dry matter in wheat as affected by progressive drought stress at stem elongation stage. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 202, 292-299. <https://doi.org/10.1111/jac.12160>

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*, 46(4), 1-14. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00046>

Wagner, G.J., 1979. Content and vacuole/extra vacuole distribution of neutral sugars free amino acids, and anthocyanins in protoplast. *Plant Physiology*, 64, 88-93. <https://doi.org/10.1104/pp.64.1.88>

Wang, Y., Ma, F., Li, M., Liang, D., & Zou, J., 2011. Physiological responses of kiwifruit plants to exogenous ABA under drought conditions. *Plant Growth Regulation*. 64, 63-74. <https://doi.org/10.1007/s10725-010-9537-y>

Yaghoubi Khanghahi, M., Pirdashti, H., Rahimian, H., Nematzadeh, G., Ghajar Sepanlou, M., 2019. The role of potassium solubilizing bacteria (KSB) inoculations on grain yield, dry matter remobilization and translocation in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Nutrition*. 42, 1165-1179. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1609511>

Yan, G., Nikolic, M., Ye, M., Xiao, Z., Liang, Y., 2018. Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*. 17(10), 2138-2150. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62037-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62037-4)

Young, L.S., Hameed, A., Peng, S.Y., Shan, Y.H., Wu, S.P., 2013. Endophytic establishment of the soil isolate Burkholderia sp. CC-A174 enhances growth and P-utilization rate in maize (*Zea mays* L.). *Applied Soil Ecology*. 66, 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.02.001>