

Effects of foliar application of nanoparticle of iron, zinc and silicon on yield and some agrophysiological traits of rye (*Secale cereale* L.) under salinity stress

Fatemeh Aghaei^{1*}, Raouf Seyed Sharifi²

¹ Corresponding author, Ph.D Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: f.aghaei1994@gmail.com

² 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

ABSTRACT

Background and objectives: Among the abiotic stresses, salinity is one of the most destructive stresses that limit crop production worldwide, especially in arid and semi-arid regions. Due to its detrimental effects on numerous physiological and biochemical processes, this stress restricts the growth and development of plants. One of the suitable methods to improve plants' resistance to environmental stresses is the application of nanoparticles (Fe, Zn and Si). Applying nanoparticles (NPs) by protecting the membranes and photosynthetic system can increase the performance of crop plants under stress conditions. Therefore, the aim of this research was to evaluate the effects of foliar application of nanoparticles of iron, zinc and silicon on yield and some agrophysiological traits of rye under salinity stress.

Article history:

Received: 2024-11-15

Accepted: 2025-04-04

Materials and methods: An experimental as factorial was conducted based on randomized complete block design with three replications at the research greenhouse of Faculty of Agriculture and Natural resources, University of Mohaghegh Ardabili in 2023. Factors experimental were included salinity at three levels (non saline as control, salinity 70 and 140 mM by NaCl), and foliar application of nanoparticle (Zn, Fe and Si) at eight levels (foliar application with water as control, foliar application of 40 mg.L⁻¹ nano silicon, foliar application of 0.8 g.L⁻¹ nano zinc oxide, foliar application of 0.8 g.L⁻¹ nano iron oxide, foliar application of nano Si-Zn oxide, nano silicon-iron oxide, nano Zn-Fe oxide, foliar application of nano Fe-Zn oxide and nano silicon).

Keywords:

Leaf area index
Quantum yield
Root dry weigh
Stomatal conductance
Total chlorophyll content

Results: The results showed that salinity increased the contribution of dry matter remobilization from stem and air parts to grain yield, while it decreased total chlorophyll content, stomatal conductance, quantum yield, leaf area index, root weigh and volume, ongoing photosynthesis, contribution of ongoing photosynthesis in grain yield and grain yield compared with no salinity. However, both application of nanoparticles foliar application under salinity 140 mM decreased contribution of dry matter remobilization to grain yield (56%) and contribution of stem remobilization to grain yield (57.8%) in compared to no application of nanoparticles under the same salinity level. Also, the application of

nanoparticles (Zn, Fe and Si) under salinity 140 mM increased the total chlorophyll content (32.6%), stomatal conductance (32.4%), quantum yield (13.2%), leaf area index (31.4%), root weigh and volume (13.8 and 17.2%, respectively), ongoing photosynthesis (62.2%), contribution of ongoing photosynthesis in grain yield (19%) and grain yield (33.9%) in compared to no application of nanoparticles under salinity 140 mM.

Conclusion: Based on the results of this experiment, foliar application of nanoparticles can be suggested as an effective factor for increasing the yield of rye under salinity conditions.

Cite this article: Aghaei, F., Seyed Sharifi, R. 2025. Effects of foliar application of nanoparticle of iron, zinc and silicon on yield and some agrophysiological traits of rye (*Secale cereale* L.) under salinity stress. *Crop Production Journal*, 18 (1), 45-66.



© The Author(s).

DOI: [10.22069/ejcp.2025.22986.2651](https://doi.org/10.22069/ejcp.2025.22986.2651)

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



تأثیر محلول پاشی نانوذرات آهن، روی و سیلیکون بر عملکرد و برخی صفات اگروفیزیولوژیک چاودار (*Secale cereale* L.) تحت تنش شوری

فاطمه آقائی^{۱*}، رئوف سیدشریفی^۲

^۱نویسنده مسئول، دکتری، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، یارنامه: f.aghaei1994@gmail.com

^۲استاد گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، یارنامه: raouf_ssharifi@yahoo.com

چکیده	اطلاعات مقاله
سابقه و هدف: در میان تنش‌های غیرزیستی، شوری یکی از مخرب‌ترین تنش‌هایی است که تولید گیاهان زراعی را در سراسر جهان به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک محدود می‌کند. این تنش به دلیل اثرات مخربی که بر فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی متعدد دارد، رشد و نمو گیاهان را محدود می‌کند. یکی از روش‌های مناسب برای بهبود مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی، استفاده از نانوذرات (Si, Zn, Fe) است. استفاده از نانوذرات با محافظت از غشاها و سیستم فتوسنتزی می‌تواند عملکرد گیاهان زراعی تحت شرایط تنش را، افزایش دهد. بنابراین، هدف از این پژوهش ارزیابی اثرات محلول پاشی نانوذرات آهن، روی و نانوسیلیکون بر عملکرد و برخی صفات اگروفیزیولوژیک چاودار تحت تنش شوری بود.	نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی
مواد و روش‌ها: آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۲ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل شوری در سه سطح (عدم اعمال شوری به‌عنوان شاهد و اعمال شوری ۷۰ و ۱۴۰ میلی‌مولار با کلرید سدیم)، و محلول پاشی نانوذرات (روی، سیلیکون و آهن) در هشت سطح (محلول پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول پاشی ۴۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکون، محلول پاشی ۰/۸ گرم در لیتر نانوآکسیدروی، محلول پاشی ۰/۸ گرم در لیتر نانوآکسید آهن، محلول پاشی نانوسیلیکون و روی، محلول پاشی نانوسیلیکون و آهن، محلول پاشی نانوآکسیدروی و آهن، محلول پاشی توأم نانوسیلیکون، روی و نانوآکسید آهن) بود.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱/۱۶
یافته‌ها: نتایج نشان داد که شوری مشارکت ذخایر ساقه و سهم فرآیند انتقال مجدد در عملکرد دانه را افزایش ولی محتوای کلروفیل کل، هدایت روزنه‌ای، عملکرد کوانتومی، شاخص سطح برگ، حجم و وزن ریشه، فتوسنتز جاری، سهم فتوسنتز جاری در عملکرد دانه و عملکرد دانه را نسبت به عدم اعمال شوری کاهش داد. درحالی که محلول پاشی توأم نانوذرات تحت شوری ۱۴۰ میلی‌مولار، سهم فرآیند انتقال مجدد در عملکرد دانه (۵۶٪) و سهم ذخایر ساقه در عملکرد دانه (۵۷/۸٪) را نسبت به شرایط عدم محلول پاشی در همین سطح از سطوح شوری کاهش داد. همچنین کاربرد توأم نانوذرات (روی، سیلیکون و آهن) در شرایط شوری ۱۴۰	واژه‌های کلیدی: شاخص سطح برگ عملکرد کوانتومی محتوای کلروفیل کل وزن خشک ریشه هدایت روزنه‌ای

میلی مولار، محتوای کلروفیل کل (۳۲/۶٪)، هدایت روزنه‌ای (۳۲/۴٪)، عملکرد کوانتومی (۱۳/۲٪)، شاخص سطح برگ (۳۱/۴٪)، حجم و وزن ریشه (به‌ترتیب ۱۳/۸ و ۱۷/۲٪)، فتوسنتز جاری (۶۲/۲٪)، سهم فتوسنتز جاری در عملکرد دانه (۱۹٪) و عملکرد دانه (۳۳/۹٪) را نسبت به عدم کاربرد نانوذرات تحت شرایط شوری ۱۴۰ میلی مولار افزایش داد.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج این آزمایش محلول‌پاشی نانوذرات می‌تواند به‌عنوان یک عامل مؤثر برای افزایش عملکرد چاودار در شرایط شوری پیشنهاد شود.

استناد: آقائی، فاطمه؛ سیدشریفی، رئوف. (۱۴۰۴). تأثیر محلول‌پاشی نانوذرات آهن، روی و سیلیکون بر عملکرد و برخی صفات اگروفیزیولوژیک چاودار (*Secale cereale* L.) تحت تنش شوری. مجله تولید گیاهان زراعی، ۱۸ (۱)، ۶۶-۴۵.



© نویسندگان.

DOI: [10.22069/ejcp.2025.22986.2651](https://doi.org/10.22069/ejcp.2025.22986.2651)

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

چاودار (*Secale cereale* L.) یکی از گونه‌های مقاوم غلات نسبت به تنش‌های غیرزیستی مختلف مانند سرما، گرما و شوری است (۱). سطح زیر کشت چاودار در جهان چهارمیلیون هکتار است و سه کشور روسیه، لهستان و آلمان بیشترین سطح زیر کشت و بالاترین میزان تولید این گیاه را به خود اختصاص داده‌اند (۲). در طی سال‌های اخیر کشت چاودار در کشور به شدت کاهش یافته و از ۳۵۰۰ هکتار در سال ۱۳۷۰ به ۵۵۶ هکتار در سال ۱۳۹۸ تقلیل یافته است (۳). دلایل متعددی نظیر ارزش غذایی کمتر، رنگ نان تیره‌تر چاودار در مقایسه با نان گندم (۴)، کمی عملکرد این گیاه در مقایسه با گندم و جو، و تمایل بیشتر محققان به زراعی و به‌نژادی در انجام تحقیقات علمی بر روی گندم و جو در مقایسه با چاودار، از علل اصلی کاهش سطح زیر کشت چاودار در مقایسه با گندم بیان شده است. در ضمن سیاست‌های دولت بر خودکفایی گندم و حمایت از آن در کاهش سطح زیر کشت این محصول بی‌تأثیر نبوده است.

شوری یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که بر رشد و عملکرد گیاهان تأثیر منفی داشته و با ایجاد سمیت یونی، عدم تعادل هورمونی و کاهش تحرک مواد مغذی، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و اختلال در بیوسنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی (۵)، همچنین با اعمال محدودیت آبی و بسته شدن روزنه‌ها و ممانعت از تبادلات گازی، موجب کاهش فتوسنتز و عملکرد در گیاهان تحت تنش می‌شود (۶). نظری و همکاران (۲۰۲۲) اظهار داشتند که شوری موجب کاهش وزن و حجم ریشه، کاهش سطح برگ و میزان فتوسنتز جاری می‌شود (۷). نریماتی و سیدشریفی (۲۰۲۳) بیان کردند که شوری با کاهش محتوای کلروفیل، عملکرد کوانتومی و تسریع پیری در گندم، انتقال مجدد ماده خشک را افزایش می‌دهد (۸).

مولفه‌های فلورسانس کلروفیل شامل F_0 (حداقل فلورسانس از برگ سازگار شده با تاریکی)، F_m (حداکثر فلورسانس در برگ سازگار شده با تاریکی)، F_v (فلورسانس متغیر از برگ سازگار شده با تاریکی)، F_m/F_v (حداکثر کارایی یا عملکرد کوانتومی فتوسیستم II در شرایط سازگار شده با تاریکی) هستند (۹)، این شاخص‌ها در شرایط تنش در طول دوره رشدی گیاه با اختلال در سیستم فتوسنتزی گیاه، موجب کاهش عملکرد می‌شود (۱۰). به‌منظور کاهش اثرات زیانبار تنش‌های غیرزیستی مانند شوری، استفاده از روش‌هایی که موجب افزایش مقاومت گیاهان در برابر عوامل تنش‌زای مختلف می‌شود، ضروری است. یکی از راه کارهای مؤثر و جدید، استفاده از نانوذرات مصنوعی و کودهای میکرو است (۱۱). نانوذرات از غشاء و دستگاه فتوسنتزی در شرایط تنش محافظت می‌کنند و کارایی فتوسنتز را افزایش می‌دهند، ضمن آنکه با بهینه‌سازی سطح هورمون‌ها و فنول‌ها، فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی را افزایش می‌دهند و مقاومت گیاه در برابر تنش شوری را تقویت می‌کنند (۱۲). از این‌رو، اثرات مفید کاربرد نانوذرات بر فتوسنتز (۱۳) و عملکرد (۱۴) طی بررسی‌های مختلفی گزارش شده است. برخی پژوهشگران اظهار داشتند که به هنگام وقوع تنش شوری، عدم توانایی منابع در برآورد نیاز مقصدها (دانه‌ها) و کاهش فتوسنتز جاری، موجب می‌شود مواد فتوسنتزی کمتری به دانه‌ها انتقال یافته و همین پدیده منجر به افزایش سهم انتقال ماده خشک می‌شود. ولی کاربرد نانوذرات (آهن، روی و نانوسیلیکون) با افزایش فتوسنتز جاری، شاخص سطح برگ، هدایت روزنه‌ای، محتوای کلروفیل، عملکرد کوانتومی و افزایش حجم و وزن ریشه موجب می‌شود تعادل مبداء و مقصد تا حدود زیادی حفظ شود و مواد تولیدی مبداء بتواند در مقصد مورد استفاده قرار گیرد

و سهم فرآیند انتقال مجدد در عملکرد دانه کاهش یابد (۷، ۸).

عنصر روی (Zn) یکی از مهم‌ترین ریزمغذی‌های مورد نیاز برای رشد و تولید گیاهی است و نقش مهمی در فرآیند فتوسنتزی، تقسیم سلولی، بیوسنتز کلروفیل، متابولیسم اکسین و عملکرد دانه‌گرده دارد (۱۵)، ولی pH بالای خاک، مواد آلی و رطوبت کم خاک منجر به کمبود روی در گیاهان می‌شود (۱۶) و در این راستا محلول‌پاشی عناصر غذایی یک رویکرد مهم جهت استفاده بهینه از کودها و همچنین اثر بخشی آنها تحت شرایط نامساعد محیطی است (۱۷). نریمانی و سیدشریفی (۲۰۲۳) بیان کردند که کاربرد نانو اکسیدروی به دلیل افزایش هدایت روزنه‌ای، محتوای کلروفیل و شاخص سطح برگ، موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد (۸). عادل و همکاران (۲۰۲۲) نیز بیان کردند که محلول‌پاشی نانو اکسیدروی موجب افزایش محتوای کلروفیل گیاه گندم در شرایط شوری شد (۱۸).

آهن یکی دیگر از عناصر ضروری کم مصرف ولی مؤثر در فعالیت برخی آنزیم‌ها نظیر کاتالاز، پراکسیداز، ساخت کلروفیل و کربوهیدرات‌ها و تبدیل نیتروژن نیترا به اسیدهای آمینه است (۱۹) و نقش اساسی در سنتز کلروفیل، انتقال الکترون، بهبود عملکرد فتوسنتس‌ها و متابولیسم گیاهان دارد. کمبود آن ضمن آسیب به کلروفیل و تخریب ساختار کلروپلاست، موجب کاهش فتوسنتز می‌شود (۲۰). نظری و همکاران (۲۰۲۲) افزایش عملکرد دانه گندم به واسطه محلول‌پاشی نانو اکسید آهن را به بهبود حجم و وزن ریشه، شاخص سطح برگ و فتوسنتز جاری نسبت دادند (۷).

کاربرد سیلیکون (Si) نیز یکی دیگر از راهکارهایی است که می‌تواند اثر مخرب تنش در گیاهان را تا حد زیادی تعدیل کند و بهره‌وری گیاهان

تحت شرایط تنش را بهبود بخشد (۲۱). سیلیکون به بهبود تغذیه معدنی، کارایی فتوسنتزی و سیستم دفاعی گیاه کمک می‌کند (۲۲) و در کاهش اثرات منفی ناشی از تنش و بهبود رشد و عملکرد گیاه مفید است (۲۳). همچنین سیلیکون با مستحکم کردن دیواره‌های سلولی و بهبود ساختار برگ، افزایش سطح برگ و جذب نور توسط برگ‌ها، منجر به بهبود فتوسنتز می‌شود (۲۴). سیلیکون رسوب شده روی اپیدرم برگ، با کنترل هدایت روزنه‌ای برگ، موجب کاهش سرعت تعرق و بهبود فتوسنتز (۲۵)، و سیلیکون انباشته شده در ریشه‌ها موجب افزایش جذب یون‌ها از طریق تقویت حرکت هیدرولیکی ریشه می‌شود (۲۶). آقائی و همکاران (۲۰۲۴) اظهار داشتند که محلول‌پاشی نانو اکسید آهن و سیلیکون تحت شرایط شوری به دلیل بهبود شاخص سطح برگ، فتوسنتز جاری و سهم این فرآیند در عملکرد دانه، موجب افزایش عملکرد دانه تریتی کاله شد (۲۷).

گرچه استفاده از نانوذرات به عنوان یک رویکرد سازگار با محیط زیست برای افزایش مقاومت به تنش شوری در گیاهان مختلف در نظر گرفته می‌شود، ولی بررسی‌های محدودی در مورد برهمکنش توأم نانو ذرات روی، سیلیکون و آهن بر عملکرد چاودار در شرایط تنش شوری در دسترس است. از این رو، هدف از این بررسی ارزیابی اثرات نانوذرات (Si, Zn, Fe) بر عملکرد، رنگیزه‌های فتوسنتزی و برخی صفات آگروفیزیولوژیک چاودار تحت سطوح مختلف شوری بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۲ اجرا شد. فاکتورهای

درصد عصاره اشباع خاک)، مقدار نمک مورد نیاز برای هر کیلوگرم خاک گلدان در هریک از سطوح شوری محاسبه و به خاک اضافه شد. برای حفظ شوری در طول دوره رشد در زیر هر گلدان زیر گلدانی قرار داده شد تا بعد از هر سه تا چهار نوبت آبیاری، نمک‌های احتمالی وارد شده به زیر گلدانی دوباره در آب حل شده و به داخل هر گلدان برگشت داده شود. پس از تهیه خاک یکدست، ۱۵ کیلوگرم خاک به هر گلدان اضافه شد و تمامی گلدان‌ها با قطر ۴۲ سانتی‌متر، تا ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری از خاک پر شدند. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است.

مورد بررسی شامل شوری در سه سطح (عدم اعمال شوری به عنوان شاهد، اعمال شوری ۷۰ و ۱۴۰ میلی‌مولار با کلرید سدیم)، و محلول پاشی نانوذرات (روی، سیلیکون و آهن) در هشت سطح (محلول پاشی با آب به عنوان شاهد، محلول پاشی ۴۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکون، محلول پاشی ۰/۸ گرم در لیتر نانو اکسیدروی، محلول پاشی ۰/۸ گرم در لیتر نانو اکسید آهن، محلول پاشی نانوسیلیکون و روی، محلول پاشی نانوسیلیکون و آهن، محلول پاشی نانو اکسیدروی و آهن، محلول پاشی توأم سیلیکون و نانو اکسیدروی و آهن) بود (۷ و ۲۸). با استفاده از نرم افزار Salt Calc (به استناد هدایت الکتریکی و

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک

Table 1. Soil physico- chemical characteristics

ویژگی	Characterist	مقادیر	Amounts
ک	K	۲۵۵	
پ	P	۱۷.۳	
روی	Zn	۱.۰۲	
ن	N	۰.۰۴	
سی	C	۰.۷	
مقدار	Sand	۳۸.۵	
سیلت	Silt	۴۲	
گل	Clay	۱۹.۵	
عصاره اشباع	Saturated extract	۴۷	
بافت	Texture	Loamy Silty	
پH	pH	۷.۸	
شوری	EC	۱.۳۸	

دو مرحله رشدی مراحل پنجه‌دهی و ساقه‌دهی (به- ترتیب معادل با کد ۲۱ و ۳۰ از مقیاس^۱ BBCH) انجام شد. اولین آبیاری بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی بسته به شرایط محیطی و نیاز گیاه زراعی انجام شد. مشخصات نانوذرات در جدول ۲ آورده شده است.

در مرحله ظهور کامل برگ پرچم (BBCH ۳۹) نسبت به اندازه‌گیری عملکرد کوانتومی، هدایت روزنه‌ای، شاخص سطح برگ و رنگی‌های فتوسنتزی اقدام شد.

در این آزمایش از بذر چاودار (پاییزه) رقم محلی اردبیل با تراکم ۴۰۰ بذر در متر مربع (۵۲ بذر در هر گلدان) که تراکم مطلوب و توصیه شده برای این رقم است، استفاده شد. تاریخ کاشت ۱۴۰۲/۰۹/۱۶ بود. بذور قبل از کاشت به مدت ۱۲ روز در دمای دو درجه سانتی‌گراد در دستگاه کُلد انکوباتور (مدل IKH.R190، شرکت ایران خودساز، ایران) ورنالیزه و سپس کشت شد. کاشت گلدان‌ها در شرایط گلخانه‌ای در دمای ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد با طول دوره روشنایی ۱۶-۱۵ ساعت (با استفاده از ترکیبی از لامپ‌های معمولی و مهتابی) و رطوبت نسبی ۶۵±۷ درصد نگهداری شدند. محلول پاشی با نانوذرات در

¹ Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry

جدول ۲- مشخصات نانوذرات

Table 2. Nanoparticles properties

رنگ Color	سطح ویژه ذرات surface Specific area of particles	میانگین اندازه ذرات Average particle size (nm)	خلوص Purity (%)	نوع نانوذرات Type of nanoparticles
پودری قرمز Red powder	$>30 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$	<30	99	نانواکسید آهن Nano iron oxide
پودری سفید white powder	$>30 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$	20-30	99	نانوسیلیکون Nano silicon
پودری سفید white powder	$>30 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$	<30	99	نانواکسید روی Nano zinc oxide

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

به منظور برآورد میزان انتقال مجدد مواد از اندام های رویشی به دانه، نمونه برداری از زمان پرشدن دانه تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک انجام شد (۳۰). بدین ترتیب که در این مرحله هر چهار روز یکبار، برداشت نمونه انجام گرفت. بوته های برداشت شده به ساقه، برگ و سنبله تفکیک و پس از خشک کردن (قراردادن در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت) وزن شدند و میزان انتقال ماده خشک، سهم فرآیند انتقال مجدد از بخش رویشی به دانه و میزان مشارکت ذخایر ساقه در عملکرد دانه با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند (۳۱).

$$DMT = DMA - DMM \quad (6)$$

که در آن DMT^1 میزان انتقال ماده خشک کل برحسب گرم در بوته، DMA^2 حداکثر میزان ماده خشک اندام هوایی در برداشت اول و DMM^3 میزان ماده خشک اندام هوایی (به جز دانه) در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک است.

$$CDMAG = \left(\frac{DMT}{GY} \right) \times 100 \quad (7)$$

عملکرد کوانتومی (F_v/F_m) توسط دستگاه فلورسانس کلروفیل (مدل OS-30p، شرکت OPTI SCIENCES، آمریکا) و هدایت روزنه ای با استفاده از دستگاه پرومتر (Porometer AP4, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK) اندازه گیری شد. شاخص سطح برگ (LAI) (در مرحله ظهور کامل برگ پرچم یا BBCH ۳۹)، با استفاده از رابطه تقسیم سطح برگ به سطح زمین اشغالی برآورد شد.

اندازه گیری محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها برگ نیز با استفاده از روش آرنون (۱۹۶۷) انجام شد (۲۹). برای این کار، ۰/۲ گرم از بافت برگ پرچم را با استون ۸۰ درصد به تدریج له شد تا کلروفیل وارد محلول استونی شود و در نهایت حجم محلول با استون ۸۰ درصد به حجم ۲۰ میلی لیتر رسانده شد. محلول حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در ۴۰۰۰ دور سانتریفوژ شد و سپس جذب نوری محلول رویی در طول موج های ۶۴۵، ۶۷۰ و ۶۶۳ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر قرائت شد. محتوای کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها بر اساس روابط ۲ تا ۵ برآورد شدند.

$$Chl_a = [19.3 (A_{663}) - 0.86 (A_{645})] V / (100 \times W) \quad (2)$$

$$Chl_b = [19.3 (A_{645}) - 3.6 (A_{663})] V / (100 \times W) \quad (3)$$

$$Total\ chl = (Chl_a + Chl_b) \quad (4)$$

$$Carotenoides = [100 (A_{470}) - 3.27 (Chl_a) - 104 (Chl_b)] / 227 \quad (5)$$

¹ Dry Matter Translocation

² Dry Matter at Anthesis

³ Dry Matter at Maturity

سپس وزن خشک ریشه با تراوزی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین شد. حجم ریشه‌ها نیز با استفاده از حجم مشخصی از آب در استوانه مدرج اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عملکرد دانه تک بوته، در زمان رسیدگی تعداد شش بوته به ظاهر مشابه که به‌طور تصادفی در هر گلدان مشخص شده بود برداشت شد و میانگین داده‌های حاصل به‌عنوان ارزش این صفت در تجزیه و تحلیل داده‌ها به‌کار گرفته شد. تجزیه داده‌ها با نرم‌افزار SAS 9.1 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شدند.

نتایج و بحث

محتوای کلروفیل (a, b, کل و کاروتنوئیدها): نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی سطوح شوری و نانوذرات (Fe و Zn, Si) بر محتوای کلروفیل a, b و کاروتنوئیدها در سطح احتمال یک درصد و اثر ترکیب تیماری این عوامل بر محتوای کلروفیل کل در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). شوری موجب کاهش محتوای کلروفیل a, b و کاروتنوئیدها در مقایسه با گیاهان شاهد شد. طوری‌که محتوای کلروفیل a, b و کاروتنوئیدها در شوری ۱۴۰ میلی‌مولار از کاهش به‌ترتیب ۲۸/۸، ۲۰/۶ و ۲۸/۴ درصدی نسبت به عدم اعمال شوری برخوردار بود (جدول ۴). ولی کاربرد توأم نانوذرات (Fe و Zn, Si) موجب افزایش به‌ترتیب ۳۸/۱، ۲۹/۱ و ۳۲/۷ درصدی محتوای کلروفیل a, b و کاروتنوئیدها نسبت به عدم کاربرد نانوذرات شد (جدول ۴). بالاترین محتوای کلروفیل کل در شرایط عدم اعمال شوری و کاربرد توأم نانوذرات بدست آمد؛ هرچند که اختلاف آماری معنی‌داری با ترکیب تیماری عدم اعمال شوری و کاربرد نانوسیلیکون نداشت (جدول ۵). همچنین، محلول‌پاشی توأم نانوذرات (Zn, Si) و (Fe) در شرایط شوری ۱۴۰ میلی‌مولار موجب افزایش

در این رابطه CDMAG^۱ سهم فرآیند انتقال مجدد ماده خشک کل در تشکیل دانه بر حسب درصد، DMT میزان انتقال ماده خشک بر حسب گرم در بوته و GY^۲ عملکرد دانه بر حسب گرم در بوته است.

$$SDMT = SDMM - SDMA \quad (۸)$$

در این رابطه SDMT^۳ میزان انتقال ماده خشک از ساقه بر حسب گرم در بوته، SDMA^۴ حداکثر وزن خشک ساقه در برداشت اول، SDMM^۵ وزن خشک ساقه در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک می‌باشد.

$$CSAG = \left(\frac{SDMT}{GY} \right) \times 100 \quad (۹)$$

در این رابطه CSAG^۶ 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.

$$CP = GY - DMT \quad (۱۰)$$

در این رابطه CP^۷ میزان فتوسنتز جاری بر حسب گرم در بوته، GY عملکرد دانه بر حسب گرم در بوته و DMT میزان انتقال ماده خشک بر حسب گرم در بوته می‌باشد.

$$SSPG = \left(\frac{CP}{GY} \right) \times 100 \quad (۱۱)$$

در این رابطه CCPG^۸ سهم نسبی فتوسنتز جاری در دانه بر حسب درصد، CP میزان فتوسنتز جاری بر حسب گرم در بوته و GY عملکرد دانه بر حسب گرم در بوته می‌باشد.

به‌منظور اندازه‌گیری وزن و حجم ریشه، ریشه‌ها از گلدان‌ها خارج و برای خشک شدن در آون با دمای 70 ± 5 سیلیسیوس به مدت ۷۲ ساعت قرار داده شد.

¹ Contribution of Dry Matter Assimilates to Grain

² Grain Yield

³ Stem Dry Matter Translocation

⁴ Stem Dry Matter at Anthesis

⁵ Stem Dry Matter at Maturity

⁶ Contribution of Stem Assimilates to Grain

⁷ Current photosynthesis

⁸ Contribution Current photosynthesis in grain

۳۲/۶ درصدی محتوای کلروفیل کل نسبت به عدم محلول‌پاشی نانوذرات در همین سطح از شوری شد (جدول ۵).

به نظر می‌رسد در شرایط شوری، تجمع بیشتر گونه‌های فعال اکسیژن و افزایش غلظت اتیلن با جلوگیری از بیوسنتز کلروفیل و افزایش فعالیت آنزیم کلروفیل‌لاز، موجب کاهش و تجزیه محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی در گیاهان می‌شود (۳۲). بخشی از بهبود محتوای کلروفیل در کاربرد نانوذرات آهن، روی و نانو سیلیکون می‌تواند با بهبود عملکرد کوانتومی (جدول ۵) مرتبط باشد. بخش دیگری از افزایش محتوای کلروفیل می‌تواند ناشی از تاثیر سیلیکون بر دیواره‌های خارجی سلول‌های اپیدرمی برگ باشد که ضمن ایجاد بافت ناهموار در هر دو سطح برگ، به افزایش استحکام و تاخیر در پیری برگ کمک می‌کند (۳۳). همچنین کاربرد نانو اکسید آهن به دلیل نقش آهن در سنتز پروتوکلروفیلید از کمپلکس پروتوپورفیرین منیزیم به بهبود رنگیزه‌های فتوسنتزی کمک می‌کند (۲۰). شوری از طریق اختلال در بیوسنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی، اختلال در مرکز واکنش زنجیره انتقال الکترون و همچنین فتوسیستم II (PSII) سرعت فتوسنتز را کاهش می‌دهد، درحالی‌که کاربرد نانو اکسید آهن ممکن است به محافظت از این رنگدانه‌ها و افزایش فعالیت فتوسنتزی کمک کند (۳۴). بنابراین به نظر می‌رسد، نانو اکسید آهن با بهبود عملکرد کوانتومی (جدول ۵)، موجب افزایش محتوای کلروفیل شد.

عملکرد کوانتومی (Fv/Fm): نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات سطوح شوری، محلول‌پاشی نانوذرات (Fe و Zn، Si) و برهمکنش این عوامل بر عملکرد کوانتومی در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین عملکرد کوانتومی (۰/۸۱۷) در ترکیب

تیماری محلول‌پاشی توأم نانوذرات (Fe و Zn، Si) در شرایط عدم اعمال شوری و کم‌ترین آن (۰/۶۵۹) در عدم محلول‌پاشی نانوذرات در سطح شوری ۱۴۰ میلی‌مولار به‌دست آمد (جدول ۵). به‌گونه‌ای که محلول‌پاشی توأم نانوذرات (Fe و Zn، Si) در شرایط عدم اعمال شوری، موجب افزایش ۲۳/۹ درصدی عملکرد کوانتومی نسبت به شرایط عدم محلول‌پاشی نانوذرات تحت شرایط شوری ۱۴۰ میلی‌مولار شد (جدول ۵). تنش شوری با کاهش توانایی فتوسنتزی گیاه بر عملکرد کوانتومی گیاهان تأثیر منفی می‌گذارد. در واقع شوری به دلیل کاهش پتانسیل آبی سیستم ریشه‌ای موجب کندی یا محدودیت در دسترسی گیاه به آب می‌شود. علاوه بر این، غلظت بالای نمک موجب افزایش سطح پروتون می‌شود که مانع از جریان الکترون‌ها از آب به ترکیبات آلی می‌شود و در نتیجه مخزن پلاستوکینون و توانایی آن برای تولید ATP را کاهش می‌دهد. این فرآیندی است که به‌عنوان مهار فتوسنتز ناشی از شوری شناخته می‌شود (۳۵). علاوه بر این، برخی پژوهشگران اظهار داشتند که در شرایط تنش، اختلال در جذب برخی عناصر ضروری مؤثر در سنتز کلروفیل نظیر آهن و منیزیم، با کاهش مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی، تخریب ساختار کلروپلاست و دستگاه فتوسنتزی، فتواکسیداسیون کلروفیل‌ها، تخریب پیش ماده‌های سنتز کلروفیل و جلوگیری از بیوسنتز کلروفیل‌های جدید و فعال شدن آنزیم‌های تجزیه‌کننده کلروفیل از جمله کلروفیل‌لاز، منجر به کاهش کارایی عملکرد کوانتومی می‌شود (۳۶). بنابراین به نظر می‌رسد بهبود عملکرد کوانتومی گیاهان چاودار در محلول‌پاشی نانوذرات (Zn، Si) و Fe را می‌توان به نقش آن‌ها در تولید افزایش محتوای کلروفیل (جدول ۵) و بهبود اثرات منفی ناشی از تنش شوری نسبت داد. در این راستا نریمانی و سیدشریفی (۲۰۲۳) نیز افزایش عملکرد کوانتومی برگ گندم در

کاربرد روی در شرایط تنش شوری را، به افزایش محتوای کلروفیل و هدایت روزنه‌ای نسبت دادند (۸). علاوه بر این، تثبیت رنگدانه‌های فتوسنتزی در پاسخ به کاربرد نانواکسیدروی، نرخ خالص فتوسنتزی را با به حداقل رساندن آسیب اکسیداسیون ناشی از تنش غیرزیستی مانند شوری در گندم، بهبود بخشید (۳۷).

هدایت روزنه‌ای: براساس نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح شوری و محلول پاشی نانوذرات (Zn, Si و Fe) و برهمکنش این عوامل بر هدایت روزنه‌ای برگ پرچم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج نشان داد که حداکثر هدایت روزنه‌ای در شرایط عدم اعمال شوری و کاربرد نانوسیلیکون و نانواکسیدروی بدست آمد هرچند که اختلاف آماری معنی‌داری با ترکیب تیماری عدم اعمال شوری و کاربرد توأم نانوذرات و کاربرد نانواکسید روی و آهن نداشت (جدول ۵). هدایت روزنه‌ای با افزایش سطح شوری کاهش یافت؛ ولی استفاده از نانوذرات (Zn, Si, Fe) موجب افزایش هدایت روزنه‌ای در شرایط شوری شد (جدول ۵). به گونه‌ای که در شوری ۱۴۰ میلی‌مولار، کاربرد توأم نانوذرات موجب افزایش ۳۲/۴ درصدی هدایت روزنه‌ایی نسبت به عدم کاربرد نانوذرات در همین سطح از سطوح شوری شد (جدول ۵). جمیل و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که کاهش فتوسنتز با افزایش تنش شوری می‌تواند به دلیل هدایت روزنه‌ای پایین‌تر، کاهش فرآیندهای متابولیکی به‌ویژه در جذب کربن، بازدارندگی ظرفیت فتوسنتزی و یا ترکیبی از این موارد باشند و بازدارندگی ضریب خاموشی فتوشیمیایی توسط شوری ممکن است در اثر بسته شدن روزنه‌ها از طریق القاء تنش شوری و کاهش پتانسیل اسمزی، ایجاد شده باشد (۳۸). کاربرد نانوذرات آهن، روی و نانوسیلیکون موجب افزایش هدایت روزنه‌ای شد (جدول ۵). در شرایط تنش،

افزودن سیلیکون به دلیل کمک به افزایش جذب آب به گیاهان اجازه می‌دهد هدایت روزنه‌ای و انتشار CO₂ بین سلولی را در محل کربوکسیلاسیون حفظ کنند و در نتیجه سرعت فتوسنتز را افزایش دهند (۳۹). هادی و همکاران (۲۰۱۶) نیز اظهار داشتند که در شرایط تنش، انتقال سیلیکون به اپیدرم برگ‌ها، موجب کاهش قطر روزنه‌ها و تنگ‌تر شدن آنها می‌شود و این حالت کارایی روزنه‌ها را افزایش می‌دهد و موجب اتلاف کمتر آب و بهبود هدایت روزنه‌ای گیاه می‌شود (۴۰). روی نیز، نقش مهمی در تنظیم میزان باز بودن روزنه‌ها به دلیل نگهداری عنصر پتاسیم در سلول‌های محافظ روزنه دارد و کاهش فعالیت آنزیم کربنیک آنهیدراز ناشی از کمبود روی نیز می‌تواند به بسته شدن روزنه‌ها و کاهش میزان فتوسنتز خالص منجر شود (۴۱).

شاخص سطح برگ: نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات سطوح شوری، نانوذرات (Zn, Si, Fe) و برهمکنش این عوامل بر شاخص سطح برگ در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). شاخص سطح برگ تحت تنش شوری کاهش یافت (جدول ۵). افزایش غلظت شوری با جلوگیری از تقسیمات سلولی برگ و در نتیجه کاهش سطح برگ، منجر به کاهش شاخص سطح برگ می‌شود. در این راستا پژوهشگران معتقدند زیادی تجمع نمک در محیط، منجر به کاهش دسترسی به آب برای گیاه، جلوگیری از تقسیمات سلولی، کاهش اندازه سلول و در نهایت کاهش اندازه برگ‌ها می‌شود (۴۲). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در شرایط عدم اعمال شوری، کاربرد توأم نانوذرات (Zn, Si, Fe)، از بیشترین شاخص سطح برگ (۲/۱۳) و از افزایش ۴۸/۹ درصدی نسبت به عدم کاربرد نانوذرات تحت شوری ۱۴۰ میلی‌مولار، برخوردار بود (جدول ۵).

جدول ۳- تجزیه واریانس تاثیر محلولپاشی نانوذرات بر رنگزیادهای فتوسنتزی برگ پرچم چاودار در سطوح مختلف شوری

Source of variation	df	Mean squares						
		a	b	کلروفیل کل	Total کلروفیل	کاروتنوئیدها	عملکرد کوانتومی Fv/Fm	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance
تکرار Replication	2	1.352**	1.462**	5.288**	5.288**	0.067**	0.035**	116.13**
شوری Salinity (S)	2	2.825**	0.544**	5.85**	5.85**	0.025**	0.014**	290.03**
نانوذرات Nanoparticles (N)	7	0.509**	0.116**	1.111**	1.111**	0.003**	0.006**	46.09**
S×N	14	0.063 ^{ns}	0.012 ^{ns}	0.131*	0.131*	0.0005 ^{ns}	0.002*	8.14**
خطا Error	46	0.034	0.006	0.068	0.068	0.0006	0.001	3.11
ضریب تغییرات CV (%)		6.9	5.6	6.3	6.3	9.9	4.7	5.7
								5.9

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

* و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر سطوح شوری و محلول پاشی نانوذرات بر انتقال ماده خشک و رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ پرچم چاودار

Table 4. Mean comparison of the effects of salinity levels and nanoparticles foliar application on dry matter remobilization and photosynthetic pigments of flag leaf of rye

میزان انتقال مجدد از ساقه SDMT (g/plant)	انتقال ماده خشک کل DMT (g/plant)	کاروتنوئیدها Carotenoids	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل a Chlorophyll a	تیمار Treatments
(mg.g FW ⁻¹)					
0.425 ^a	0.562 ^a	0.217 ^c	1.37 ^e	2.23 ^e	N ₁
0.397 ^{b-d}	0.522 ^{b-d}	0.252 ^b	1.57 ^{b-d}	22.63 ^{b-d}	N ₂
0.381 ^{cd}	0.511 ^{b-d}	0.246 ^b	1.55 ^d	2.61 ^d	N ₃
0.402 ^{a-c}	0.527 ^{bc}	0.251 ^b	1.56 ^{cd}	2.62 ^{cd}	N ₄
0.376 ^{de}	0.492 ^{de}	0.255 ^b	1.57 ^{cd}	2.65 ^{b-d}	N ₅
0.407 ^{ab}	0.531 ^{ab}	0.261 ^b	1.65 ^b	2.81 ^b	N ₆
0.379 ^{c-e}	0.498 ^{cd}	0.262 ^b	1.63 ^{bc}	2.79 ^{bc}	N ₇
0.356 ^e	0.465 ^e	0.288 ^a	1.77 ^a	3.08 ^a	N ₈
0.024	0.031	0.021	0.077	0.176	LSD
0.366 ^c	0.477 ^c	0.289 ^a	1.75 ^a	3.04 ^a	S ₁
0.395 ^b	0.52 ^b	0.249 ^b	1.56 ^b	2.62 ^b	S ₂
0.41 ^a	0.543 ^a	0.225 ^c	1.45 ^c	2.36 ^c	S ₃
0.014	0.019	0.014	0.04	0.108	LSD

S₁, S₂ و S₃ به ترتیب عدم شوری یا شاهد، شوری ۷۰، ۱۴۰ میلی مولار.

N₁, N₂, N₃, N₄, N₅, N₆, N₇ و N₈ به ترتیب عدم محلول پاشی، محلول پاشی نانوسیلیکون، نانواکسید روی، نانواکسید آهن، محلول پاشی نانوسیلیکون و نانواکسید روی، نانوسیلیکون و نانواکسید آهن، نانواکسید روی و نانواکسید آهن، محلول پاشی توام نانوسیلیکون و نانواکسید روی و نانواکسید آهن.

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD اختلاف آماری معنی داری نسبت به هم ندارند.

S₀, S₁, and S₂: indicate without salinity or control, 70 mM, and 140 mM salinity, respectively.

N₁, N₂, N₃, N₄, N₅, N₆, N₇ and N₈ denote no foliar application, nano silicon foliar application, nano zinc oxide, nano iron oxide, nano Si-Zn oxide foliar application, nano silicon-iron oxide foliar application, nano Zn - Fe oxide foliar application, both foliar application nano Fe-Zn oxide and nano silicon.

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

شاخص سطح برگ شد (۷) که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. به نظر می‌رسد که محلول پاشی روی با بهبود عملکرد کوانتومی (جدول ۵) و هدایت روزنه‌ای (جدول ۵) منجر به افزایش شاخص سطح برگ شده است (جدول ۵) که با نتایج بررسی‌های نریمانی و سیدشریفی (۲۰۲۳) مبنی بر اینکه محلول پاشی نانواکسید روی، با تعدیل اثرات ناشی از تنش و افزایش عرضه مواد مغذی و مواد فتوسنتزی منجر به افزایش عملکرد کوانتومی و هدایت روزنه‌ای می‌شود همخوانی دارد (۸).

همچنین در شوری ۷۰ میلی مولار، کاربرد توأم نانوذرات موجب افزایش ۳۷/۵ درصدی شاخص سطح برگ نسبت به عدم کاربرد نانوذرات در همین سطح از سطوح شوری شد (جدول ۵). بخشی از افزایش شاخص سطح برگ به واسطه محلول پاشی نانوذرات را می‌توان به افزایش وزن و حجم ریشه (جدول ۷) و بهبود فتوسنتز (جدول ۷) نسبت داد. نظری و همکاران (۲۰۲۲) اظهار داشتند کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون تحت شرایط تنش از طریق بهبود میزان فتوسنتز (جدول ۵) موجب افزایش

جدول ۵- مقایسه میانگین تاثیر محلول پاشی نانوذرات بر برخی صفات فیزیولوژیک چاودار در سطوح شوری

Table 5. Mean comparison of the effects of foliar application nanoparticles on some physiological traits of rye under salinity levels

شاخص سطح برگ LAI	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance (mmol H ₂ O/m ² . s)	عملکرد کوانتومی Fv/Fm	کلروفیل کل Total Chlorophyll (mg.g FW ⁻¹)	ترکیب تیماری Treatments
1.72 ^{e-h}	33.67 ^{f-i}	0.733 ^{d-g}	4.08 ^{f-i}	S ₁ ×N ₁
1.93 ^{b-d}	38.33 ^{a-c}	0.723 ^{f-h}	5.06 ^a	S ₁ ×N ₂
1.94 ^{b-d}	38.36 ^{a-c}	0.734 ^{d-g}	4.43 ^{d-f}	S ₁ ×N ₃
2.04 ^{ab}	35.02 ^{d-g}	0.726 ^{e-g}	4.95 ^{ab}	S ₁ ×N ₄
1.89 ^{b-c}	40.53 ^a	0.802 ^{a-c}	4.82 ^{a-d}	S ₁ ×N ₅
2.04 ^{ab}	37.48 ^{b-d}	0.781 ^{a-e}	4.97 ^{ab}	S ₁ ×N ₆
1.94 ^{b-d}	38.49 ^{a-c}	0.808 ^{ab}	4.91 ^{a-c}	S ₁ ×N ₇
2.13 ^a	40.2 ^{ab}	0.817 ^a	5.14 ^a	S ₁ ×N ₈
1.44 ^k	29.8 ^{j-l}	0.68 ^{g-i}	3.34 ^k	S ₂ ×N ₁
1.54 ^{i-k}	31.33 ^{i-k}	0.769 ^{a-f}	3.93 ^{g-i}	S ₂ ×N ₂
1.81 ^{f-i}	33.52 ^{f-i}	0.752 ^{b-f}	4.26 ^{e-g}	S ₂ ×N ₃
1.78 ^{d-g}	32.65 ^{g-j}	0.712 ^{f-i}	3.94 ^{g-i}	S ₂ ×N ₄
1.82 ^{c-g}	34.54 ^{e-h}	0.727 ^{e-g}	4.12 ^{e-h}	S ₂ ×N ₅
1.66 ^{g-j}	37.26 ^{c-c}	0.73 ^{e-g}	4.46 ^{d-f}	S ₂ ×N ₆
1.83 ^{c-g}	31.7 ^{h-k}	0.732 ^{d-g}	4.54 ^{b-c}	S ₂ ×N ₇
1.98 ^{a-c}	38.3 ^{a-c}	0.787 ^{a-d}	4.9 ^{a-c}	S ₂ ×N ₈
1.43 ^k	27.05 ^l	0.659 ⁱ	3.4 ^{jk}	S ₃ ×N ₁
1.52 ^{jk}	31.48 ^{-k}	0.715 ^{f-i}	3.65 ^{i-k}	S ₃ ×N ₂
1.59 ^{h-k}	28.8 ^{kl}	0.738 ^{d-f}	3.79 ^{h-j}	S ₃ ×N ₃
1.54 ^{jk}	30.6 ^{jk}	0.729 ^{e-g}	3.69 ^{h-k}	S ₃ ×N ₄
1.68 ^{g-j}	30.05 ^{jk}	0.668 ^{hi}	3.71 ^{h-k}	S ₃ ×N ₅
1.75 ^{e-h}	30.91 ^{i-k}	0.731 ^{d-g}	3.97 ^{g-i}	S ₃ ×N ₆
1.48 ^k	32.08 ^{h-j}	0.748 ^{c-f}	3.82 ^{h-j}	S ₃ ×N ₇
1.88 ^{b-f}	35.82 ^{c-f}	0.746 ^{c-f}	4.51 ^{c-e}	S ₃ ×N ₈
0.17	2.9	0.05	0.43	LSD

S₁، S₂ و S₃ به ترتیب عدم شوری یا شاهد، شوری ۷۰، ۱۴۰ میلی مولار.

N₁، N₂، N₃، N₄، N₅، N₆، N₇ و N₈ به ترتیب عدم محلول پاشی، محلول پاشی نانوسیلیکون، نانواکسید روی، نانواکسید آهن، محلول پاشی نانوسیلیکون و نانواکسید آهن، نانوسیلیکون و نانواکسید روی، نانوسیلیکون و نانواکسید آهن، نانواکسید روی و نانواکسید آهن، محلول پاشی توام نانوسیلیکون و نانواکسید روی و نانواکسید آهن.

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD اختلاف آماری معنی داری نسبت به هم ندارند.

S₀، S₁، and S₂: indicate without salinity or control, 70 mM, and 140 mM salinity, respectively.

N₁، N₂، N₃، N₄، N₅، N₆، N₇ and N₈ denote no foliar application, nano silicon foliar application, nano znic oxide, nano iron oxide, nano Si-Zn oxide foliar application, nano silicon-iron oxide foliar application, nano Zn - Fe oxide foliar application, both foliar application nano Fe-Zn oxide and nano silicon.

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

ساقه و سهم فرآیند انتقال مجدد در عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۶). مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد که شوری موجب افزایش انتقال مجدد ماده خشک از ساقه و اندام هوایی (به ترتیب ۱۲ و ۱۳/۸ درصد) در مقایسه با عدم اعمال شوری شد (جدول ۴). همچنین مقایسه

انتقال ماده خشک کل و سهم این فرایندها در عملکرد دانه: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی سطوح شوری و محلول پاشی نانوذرات (Fe و Zn، Si) بر میزان انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد و اثر ترکیب تیماری این عوامل بر میزان مشارکت ذخایر

به دانه می‌شود، توسط دیگر محققان گزارش شده است (۸، ۲۷).

فتوستتز جاری و سهم این فرایندها در عملکرد دانه: برهم‌کنش توام محلول پاشی نانوذرات (Zn, Si) و (Fe) و تنش شوری بر فتوستتز جاری و سهم این فرآیند در عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیش‌ترین فتوستتز جاری (۱/۸۴ گرم از بوته) از محلول پاشی توأم نانوذرات (Zn, Si) و (Fe) در شرایط عدم اعمال شوری بدست آمد که از افزایش ۸۳/۶ درصدی فتوستتز جاری نسبت به عدم محلول پاشی نانوذرات (روی، آهن و سیلیکون) در شرایط شوری ۱۴۰ میلی‌مولار برخوردار بود (جدول ۷). همچنین در شرایط عدم اعمال شوری، بالاترین سهم فتوستتز جاری در عملکرد دانه (۷۹/۴ درصد) در محلول پاشی نانوذرات سیلیکون و آهن بدست آمد که اختلاف آماری معنی‌داری با محلول پاشی نانوذرات آهن و روی، نانوذرات آهن و روی و سیلیکون در همین سطح از سطوح شوری نداشت (جدول ۷). آقائی و همکاران (۲۰۲۴) بیان داشتند در شرایط بهینه، فتوستتز جاری بیش‌ترین سهم را در وزن دانه‌ی تریتیکاله داشت، ولی در شرایط تنش شاید به دلیل تعدیل اثر منفی ناشی از تنش بر میزان فتوستتزی جاری، سهم فرایند انتقال مجدد به دانه‌ها افزایش یافت تا از کاهش بیشتر عملکرد دانه بواسطه افزایش سهم فرایند انتقال مجدد، جلوگیری شود (۲۷). بخشی از بالا بودن فتوستتز جاری را می‌توان به تأثیر مثبت نانوذرات بر افزایش عملکرد کوانتومی (جدول ۵)، شاخص سطح برگ (جدول ۵) و بهبود حجم و وزن ریشه (جدول ۷) نسبت داد. در این راستا آقائی و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که کاربرد نانوسیلیکون و نانواکسیدروی در شرایط تنش شوری

میانگین اثر ترکیب تیماری شوری در نانوذرات نشان داد که شوری ۱۴۰ میلی‌مولار در شرایط عدم کاربرد نانوذرات، سهم فرآیند انتقال مجدد از اندام هوایی و ساقه در عملکرد دانه را به ترتیب ۳۲/۷ و ۳۰/۳ درصد، نسبت به کاربرد توأم نانوذرات در همین سطح از سطوح شوری افزایش داد (جدول ۷). به نظر می‌رسد بخشی از افزایش انتقال ماده خشک در شرایط شوری می‌تواند ناشی از اثر شوری در کاهش محتوای کلروفیل (جدول ۵) و به تبع از آن در کاهش فتوستتز جاری (جدول ۷) باشد. در چنین شرایطی به دلیل عدم توانایی مبداء در تأمین نیاز مقصدها، موجب می‌شود که میزان انتقال ماده خشک افزایش یابد تا لاقل بتواند بخشی از نیاز مقصدها را برآورده نماید. چرا که میزان انتقال مجدد ماده خشک و سهم آن در عملکرد دانه بیشتر تحت تأثیر روابط مبداء و مقصد و شرایط محیطی است (۴۳). در حالی که کاربرد توأم نانوذرات (Zn, Si) و (Fe) به دلیل کمک به افزایش محتوای کلروفیل و بهبود فتوستتز جاری (جدول ۷) از کم‌ترین میزان انتقال ماده از اندام هوایی و ساقه (۰/۴۶۵ و ۰/۳۵۶ گرم در بوته) برخوردار بوده و از کاهش ۸۶/۳ و ۹۳/۵ درصدی سهم این فرایندها در عملکرد دانه نسبت به شرایط عدم محلول پاشی نانوذرات تحت شرایط شوری ۱۴۰ میلی‌مولار برخوردار بود (جدول ۷). به بیانی دیگر در شرایط مطلوب و دسترسی به منابع کافی (به عنوان مثال، روی، آهن و سیلیکون) به دلیل بهبود محتوای کلروفیل (جدول ۶) موجب می‌شود که فتوستتز جاری افزایش یافته و سهم فرآیند انتقال مجدد در عملکرد دانه (جدول ۷) تا حدودی نسبت به شرایط تنش کاهش یابد. نتایج مشابهی توسط پژوهشگران دیگر مبنی بر اینکه استفاده از نانواکسیدروی، آهن و نانوسیلیکون موجب کاهش انتقال مجدد ماده خشک

با افزایش شاخص سطح برگ و عملکرد کوانتومی، موجب بهبود فتوسنتز جاری می‌شود (۲۸). نظری و همکاران (۲۰۲۲) نیز افزایش فتوسنتز جاری و سهم این فرآیند در عملکرد دانه با کاربرد نانو اکسید آهن و سیلیکون را، به افزایش وزن و حجم ریشه و شاخص سطح برگ، نسبت دادند (۷).

حجم و وزن خشک ریشه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح شوری، نانوذرات (Fe و Zn, Si) و برهمکنش این عوامل بر حجم و وزن ریشه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۶). کاربرد توأم نانوذرات در شرایط شوری ۱۴۰ میلی‌مولار موجب افزایش به ترتیب ۱۷/۲ و ۱۳/۸ درصدی حجم و وزن ریشه نسبت به شرایط عدم کاربرد نانوذرات در همین سطح از شوری شد (جدول ۷). بخشی از افزایش وزن و حجم ریشه به واسطه نانوذرات را می‌توان به اثر این مواد در توسعه شاخص سطح برگ (جدول ۵)، بهبود فتوسنتز (جدول ۷) و هدایت روزنه‌ای (جدول ۵) نسبت داد که افزایش معنی‌دار این صفات بواسطه کاربرد نانوذرات موجب شده است که بخشی از مواد فتوسنتزی تولید شده به ریشه منتقل شده و منجر به افزایش وزن و حجم ریشه شود. از آنجایی که شوری موجب ایجاد تنش آبی شده و توانایی گیاه را برای جذب آب و مواد معدنی از طریق ریشه مختل می‌کند (۴۴) از این رو بر وزن و حجم ریشه تأثیر منفی می‌گذارد. به بیانی دیگر شوری با ایجاد پلاسمولیز و تأثیر بر متابولیسم سلولی منجر به کندی یا توقف رشد گیاه می‌شود (۴۴). نظری و همکاران (۲۰۲۲) اظهار داشتند که محلول‌پاشی نانو اکسید آهن و سیلیکون با بهبود فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی به ریشه، ضمن بهبود رشد گیاه، موجب افزایش وزن و حجم ریشه گیاه گندم شد (۷). لو و همکاران (۲۰۱۳) نیز بیان کردند که عنصر روی

به دلیل نقش مهمی که در باز و بسته شدن روزنه‌ها، بهبود وضعیت آبی و بهبود فرآیند فتوسنتز دارد، موجب بهبود رشد و افزایش وزن ریشه می‌شود (۴۵). **عملکرد دانه:** نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح شوری، نانوذرات (Fe و Zn, Si) و برهمکنش این عوامل بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۶). مقایسه میانگین‌ها نشان داد حداکثر عملکرد دانه از کاربرد توأم نانوذرات (Fe و Zn, Si) در شرایط عدم اعمال شوری به دست آمد. از طرفی عدم کاربرد نانوذرات در شرایط شوری ۱۴۰ میلی‌مولار، موجب کاهش ۳۳/۹ درصدی عملکرد دانه نسبت به کاربرد توأم نانوذرات در این سطح از شوری شد (جدول ۷). همچنین کاربرد نانوذرات در شرایط شوری ۷۰ میلی‌مولار، موجب کاهش ۳۵/۳ درصدی عملکرد دانه نسبت به کاربرد توأم نانوذرات در این سطح از شوری شد (جدول ۷). برخی پژوهشگران دلیل اصلی کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش را به کاهش سرعت فتوسنتز و پیری سریع برگ‌ها (کاهش قدرت مبداء) و کاهش قدرت مقصد نسبت دادند (۴۶). به نظر می‌رسد بخشی از کاهش عملکرد دانه در شرایط شوری می‌تواند به اثر شوری بر کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی (جدول ۵) و شاخص سطح برگ (جدول ۵)، کاهش عملکرد کوانتومی و هدایت روزنه‌ایی (جدول ۵) نسبت داده شود. در حالی که کاربرد نانوذرات در تمامی سطوح شوری، منجر به افزایش عملکرد دانه شد. به بیانی دیگر محلول‌پاشی نانوذرات سیلیکون، آهن و روی منجر به بهبود محتوای کلروفیل (جدول ۵)، هدایت روزنه‌ای، عملکرد کوانتومی (جدول ۵)، فتوسنتز جاری (جدول ۷) و افزایش شاخص سطح برگ (جدول ۵) و افزایش وزن و حجم ریشه (جدول ۷) شد.

جدول ۶- تجزیه واریانس تأثیر محلول پاشی نانوذرات بر انتقال ماده خشک چاودار در سطح مختلف شوری

Table 6. Analysis of variance of the effects nanoparticles on dry matter remobilization of rye under different levels of salinity

میانگین مربعات Mean squares										
منابع تغییرات Source of variation	درجه df	انتقال ماده خشک DMT	سهم فرآیند انتقال مجدد درعملکرد دانه CDMAG	میزان انتقال مجدد از ساقه SDMT	سهم ذخایر ساقه در عملکرد دانه CSAG	میزان فتوستر جاری CP	سهم فتوستر جاری در عملکرد دانه SSPG	وزن خشک ریشه Root dry weigh	حجم ریشه Root volume	عملکرد دانه Grain yield
تکرار Replication	2	0.028**	27.76**	0.007**	40.12**	0.109**	27.71**	0.013**	0.281**	0.203**
شوری Salinity (S)	2	0.026**	389.06**	0.011**	201.79**	0.953**	388.73**	0.01**	0.117**	0.664**
نانوذرات Nanoparticles(N)	7	0.007**	123.9**	0.004**	71.13**	0.285**	113.14**	0.004**	0.039**	0.214**
S×N	14	0.001 ^{ns}	20.82**	0.0004 ^{ns}	9.9**	0.058**	25.54**	0.002**	0.034**	0.042**
خطا Error	46	0.001	2.64	0.0006	1.63	0.012	2.58	0.001	0.01	0.014
ضریب تغییرات CV (%)		6.6	5.9	6.7	5.6	7.6	2.2	6.7	6.6	6.1

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

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

جدول ۷- مقایسه میانگین تاثیر محلول پاشی نانوذرات بر انتقال ماده خشک و عملکرد دانه چاودار در سطوح مختلف تنش شوری
Table 7. Mean comparison of the effects of nanoparticles foliar application on dry matter remobilization and grain yield of rye under different levels of salinity stress

عملکرد دانه	حجم ریشه	وزن خشک	سهم نسبی	میزان	سهم ذخایر	سهم فرآیند انتقال	تیمار
Grain yield (g/plant)	Root volume (cm ³ /plant)	ریشه Root dry weigh (g/plant)	فتوستتز جاری در عملکرد دانه SSPG (%)	فتوستتز جاری CP (g/plant)	ساقه در عملکرد دانه CSAG (%)	مجدد در عملکرد دانه CDMAG (%)	Treatment
S ₁ ×N ₁	1.57 ^{b-g}	0.49 ^{b-f}	71.72 ^{fg}	1.33 ^{fg}	21.48 ^{fg}	28.27 ^{de}	
S ₁ ×N ₂	1.61 ^{b-f}	0.499 ^{b-f}	79.46 ^a	1.75 ^{ab}	15.96 ^{lm}	20.54 ^{ik}	
S ₁ ×N ₃	1.45 ^{f-h}	0.451 ^{f-h}	76.64 ^{bc}	1.6 ^{b-d}	17.68 ^{i-l}	23.35 ^{hi}	
S ₁ ×N ₄	1.71 ^{a-c}	0.532 ^{ab}	76.88 ^{a-c}	1.57 ^{cd}	18.1 ^{i-k}	23.11 ^{h-j}	
S ₁ ×N ₅	1.73 ^{ab}	0.536 ^{ab}	76.63 ^{bc}	1.55 ^{c-e}	17.97 ^{jk}	23.36 ^{hi}	
S ₁ ×N ₆	1.71 ^{a-c}	0.532 ^{ab}	79.42 ^a	1.77 ^{ab}	17.75 ^{i-l}	22.45 ^{h-j}	
S ₁ ×N ₇	1.61 ^{b-f}	0.498 ^{b-f}	78.65 ^{ab}	1.7 ^{a-c}	16.71 ^{kl}	21.35 ^{i-k}	
S ₁ ×N ₈	1.81 ^a	0.563 ^a	78.32 ^{ab}	1.84 ^a	14.73 ^m	19.77 ^k	
S ₂ ×N ₁	1.43 ^{gh}	0.45 ^{f-h}	64.33 ^j	1.05 ^{hi}	26.34 ^{bc}	35.66 ^a	
S ₂ ×N ₂	1.54 ^{d-h}	0.476 ^{c-g}	70.41 ^{gh}	1.28 ^{fg}	22.45 ^{ef}	29.58 ^{cd}	
S ₂ ×N ₃	1.5 ^{e-h}	0.467 ^{d-h}	75.14 ^{c-e}	1.52 ^{c-e}	18.8 ^{h-j}	24.85 ^{f-h}	
S ₂ ×N ₄	1.51 ^{e-h}	0.475 ^{c-g}	67.68 ⁱ	1.16 ^{gh}	24.41 ^d	32.31 ^b	
S ₂ ×N ₅	1.47 ^{f-h}	0.476 ^{c-g}	77.98 ^{ab}	1.67 ^{a-c}	16.93 ^{i-l}	22.01 ^{i-k}	
S ₂ ×N ₆	1.47 ^{f-h}	0.457 ^{e-h}	67.72 ⁱ	1.15 ^{g-i}	24.43 ^{cd}	32.27 ^b	
S ₂ ×N ₇	1.58 ^{b-g}	0.499 ^{b-f}	73.75 ^{d-f}	1.43 ^{d-f}	19.98 ^{g-i}	26.24 ^{e-g}	
S ₂ ×N ₈	1.66 ^{a-c}	0.517 ^{a-d}	79.36 ^a	1.76 ^{ab}	15.94 ^{lm}	20.63 ^{jk}	
S ₃ ×N ₁	1.37 ^h	0.417 ^h	64.14 ^j	0.98 ⁱ	28.51 ^a	36.85 ^a	
S ₃ ×N ₂	1.62 ^{b-f}	0.509 ^{a-c}	64.49 ^j	1.04 ^{hi}	26.87 ^{ab}	35.5 ^a	
S ₃ ×N ₃	1.73 ^{a-c}	0.516 ^{a-d}	67.67 ⁱ	1.15 ^{g-i}	23.63 ^{de}	32.33 ^b	
S ₃ ×N ₄	1.39 ^h	0.434 ^{gh}	68.31 ^{hi}	1.18 ^{gh}	23.98 ^{de}	31.68 ^{bc}	
S ₃ ×N ₅	1.7 ^{a-d}	0.525 ^{a-c}	72.81 ^{e-g}	1.42 ^{d-f}	20.68 ^{f-h}	27.18 ^{d-f}	
S ₃ ×N ₆	1.46 ^{f-h}	0.457 ^{e-h}	68.91 ^{hi}	1.18 ^{gh}	24.04 ^{de}	31.08 ^{bc}	
S ₃ ×N ₇	1.51 ^{e-h}	0.473 ^{v-g}	72.58 ^{e-g}	1.38 ^{ef}	20.49 ^{gh}	27.41 ^{d-f}	
S ₃ ×N ₈	1.56 ^{c-g}	0.489 ^{b-f}	76.37 ^{b-d}	1.59 ^{b-d}	18.06 ^{ik}	23.62 ^{g-i}	
LSD	0.17	0.05	2.64	0.181	1.91	2.67	

S₁ و S₂ به ترتیب عدم شوری یا شاهد، شوری ۷۰، ۱۴۰ میلی مولار.

N₁, N₂, N₃, N₄, N₅, N₆, N₇ و N₈ به ترتیب عدم محلول پاشی، محلول پاشی نانوسیلیکون، نانواکسید روی، نانواکسید آهن، محلول پاشی نانوسیلیکون و نانواکسید روی و نانواکسید آهن. توام نانوسیلیکون و نانواکسید

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

S₀, S₁, and S₂: indicate without salinity or control, 70 mM, and 140 mM salinity, respectively.
N₁, N₂, N₃, N₄, N₅, N₆, N₇ and N₈ denote no foliar application, nano silicon foliar application, nano znic oxide, nano iron oxide, nano Si-Zn oxide foliar application, nano silicon-iron oxide foliar application, nano Zn - Fe oxide foliar application, both foliar application nano Fe-Zn oxide and nano silicon.
Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test.

به‌واسطه محلول پاشی نانوذرات آهن و سیلیکون را به بهبود وزن و حجم ریشه، شاخص سطح برگ و فتوستتز جاری نسبت دادند (۷). بررسی‌های چاتا و همکاران (۲۰۲۲) گزارش دادند که کاربرد روی در شرایط شوری، به دلیل افزایش محتوای کلروفیل و

در این راستا عادل و همکاران (۲۰۲۲) بیان کردند که محلول پاشی نانواکسید روی تحت شرایط شوری با افزایش محتوای کلروفیل و بهبود حجم و وزن ریشه، موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد (۱۸). برخی پژوهشگران نیز افزایش عملکرد دانه گندم

سرعت فتوستتز موجب شد تا عملکرد دانه گندم افزایش یابد (۴۷). همچنین، آقائی و همکاران (۲۰۲۴) بیان کردند که محلول پاشی نانوسیلیکون، نانوآکسید آهن و روی از طریق بهبود فتوستتز جاری و شاخص سطح برگ و بهبود حجم و وزن ریشه، و افزایش عملکرد دانه تریتیکاله شد (۲۷). نریمانی و سیدشریفی (۲۰۲۳) نیز گزارش کردند که کاربرد روی با افزایش هدایت روزنه‌ای، محتوای کلروفیل و شاخص سطح برگ، موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد (۸).

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که در شرایط شوری، کاربرد نانوذرات (اکسید آهن، روی و سیلیکون) به صورت توأم و منفرد نقش چشمگیری در بهبود محتوای کلروفیل، عملکرد کوانتومی، هدایت روزنه‌ای، شاخص سطح برگ، وزن و حجم ریشه، عملکرد دانه و فتوستتز جاری داشت. ولی برخلاف این صفات ذکر شده که در شرایط شوری، مقادیر آنها کاهش و با کاربرد نانوذرات افزایش یافت. در صفاتی مانند انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی و میزان مشارکت ذخایر ساقه و کل اندام هوایی در عملکرد دانه عکس این حالت مشاهده گردید و بیش‌ترین مقادیر این صفات، در شرایط عدم کاربرد نانوذرات (اکسید آهن، روی و سیلیکون) و در سطوح بالاتر

شوری، بدست آمد. از آنجایی که تشکیل دانه حاصل دو انتقال ماده خشک و فتوستتز جاری است. به نظر می‌رسد در شرایط عدم اعمال شوری و کاربرد نانوذرات به صورت منفرد یا توأم چون تعادل منبع (برگ‌ها) و مقصد (دانه‌ها) به نحو مناسبی برقرار می‌شود و مواد تولیدی منبع به دلیل بهبود فتوستتز قادر است نیاز مخازن (دانه‌ها) را تامین نماید در نتیجه در چنین شرایطی میزان انتقال ماده خشک و سهم این فرایند در عملکرد دانه کمتر می‌شود در حالی که در شرایط تنش شوری و عدم کاربرد نانوذرات، کاهش محتوای کلروفیل، عملکرد کوانتومی، هدایت روزنه‌ای، شاخص سطح برگ، وزن و حجم ریشه از جمله صفاتی هستند که تحت چنین شرایطی منجر به کاهش فتوستتز جاری و عدم توانایی منبع در تامین نیاز مقاصد (دانه‌ها) می‌شود و در چنین شرایطی است که به نظر می‌رسد گیاه به دلیل تامین بخشی از نیاز دانه‌ها، میزان انتقال ماده خشک و سهم این فرایند در عملکرد دانه را افزایش می‌دهد تا اینکه بتواند از افت بیشتر عملکرد دانه در چنین شرایطی جلوگیری نماید. به طور کلی بر اساس نتایج بررسی حاضر می‌توان اظهار داشت که کاربرد نانوذرات در شرایط شوری با تعدیل و یا کاهش بخشی از اثرات منفی ناشی تنش شوری می‌تواند در بهبود عملکرد دانه چاودار مفید باشد.

References

1. Zhiling, L., Wenhua, D. & Fangyuan, Z. (2024). Genome-wide identification and phylogenetic and expression pattern analyses of EPF/EPFL family genes in the rye (*Secale cereale* L.). *BMC Genomics*, 25, 532, 1-12.
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). FAOSTAT Statistical Database. [Rome].
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). FAOSTAT Statistical Database. [Rome].
4. Imam, Y. (2003). Cereal crops. Shiraz University Press, Shiraz, Iran 190 pp. (In Farsi)
5. Singh, A. (2022). Soil salinity: A global threat to sustainable development. *Soil Use and Management*, 38, 39-67.

6. Abideen, Z., Koyro, H.W., Huchzermeyer, B., Ahmed, M.Z., Zulfiqar, F., Egan, T. & Khan, M.A. (2020). Phragmites karka plants adopt different strategies to regulate photosynthesis and ion flux in saline and water deficit conditions. *Plant Biosyst*, 155, 524-534.
7. Nazari, G., Sedgi, M. & Narimani, H. (2022). Effect of salinity and application of humic acid, iron and silicon nanoxide on the contribution of remobilization process and current photosynthesis in wheat grain yield. *Crop Physiology Journal*, 14(54), 5-25. [In Persian]
8. Narimani, H. & Seyed Sharifi, R. (2023). Effect of foliar and soil application of zinc on grain filling, yield and some physiological traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 70,133, 1-15.
9. Maxwell, K. & Johnson, G.N. (2000). Chlorophyll fluorescence a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51, 345. 656-668.
10. Kheirizadeh Arough, Y., Seyed Sharifi, R. & Seyed Sharifi, R. (2016). Bio fertilizers and zinc effects on some physiological parameters of triticale under water-limitation condition. *Journal of Plant Interactions*, 11(1), 167-177.
11. Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S.A., Rehman, Hu., Ashraf, I. & Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: current status, challenges and future opportunities. *Science of The Total Environment*, 721, 137778.
12. Rehman, A., Khan, S., Sun, F., Peng, Z., Feng, K., Wang, N., Jia, Y., Pan, Z., He, S., Wang, L., Qayyum, A., Du, X. & Li, H. (2024). Exploring the nano-wonders: unveiling the role of Nanoparticles in enhancing salinity and drought tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, 14,1324176.
13. Feng, Y., Kreslavski, V.D., Shmarev, A.N., Ivanov, A.A., Zharmukhamedov, S.K., Kosobryukhov, A., Yu, M., Allakhverdiev, S.I. & Shabala, S. (2022). Effects of iron oxide nanoparticles (Fe₃O₄) on growth, photosynthesis, antioxidant activity and distribution of mineral elements in wheat (*Triticum aestivum*). *Plants*, 11, 1894.
14. Singh, P., Arif, Y., Siddiqui, H., Sami, F., Zaidi, R., Azam, A., Prave, A. & Hayat, S. (2021). Nanoparticles enhances the salinity toxicity tolerance in *Linum usitatissimum* L. by modulating the antioxidative enzymes, photosynthetic efficiency, redox status and cellular damage. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 213,112020.
15. Saa, S., Negron, C. & Brown, P. (2018). Foliar zinc applications in prunus: from lab experience to orchard management. *Scientia Horticulturae*, 233, 233-237.
16. Alloway, B.J. (2008). Zinc in soils and crop nutrition, second ed. international zinc association and international fertilizer industry association, brussels, Belgium/Paris, France.
17. Souri, M. K. & Dehnavard, S. (2018). Tomato plant growth, leaf nutrient concentrations and fruit quality under nitrogen foliar applications. *Advances in Horticultural Science*, 32(1), 41-47.
18. Adil, M., Bashir, S., Bashir, S., Aslam, Z., Ahmad, N., Younas, T., Asghar, R.M.A., Alkahtani, J., Dwiningsih, Y. & Elshikh, M.S. (2022). Zinc oxide nanoparticles improved chlorophyll contents, physical parameters, and wheat yield under salt stress. *Frontiers in Plant Science*, 13,932861.
19. Ruiz, J. M., Baghour, M. & Romero, L. (2000). Efficiency of the different genotypes of tomato in relation to foliar content of Fe and the response of some bioindicators. *Journal of Plant Nutrition*, 23(11-12), 1777-1786.
20. Tawfk, M.M., Mohamed, M.H., Sadak, M.Sh. & Thalooh, A.T. (2021). Iron oxide nanoparticles effect on growth, physiological traits and nutritional contents of *Moringa oleifera* grown in saline environment. *Bulletin of the National Research Centre*, 45,177.
21. Tripathi, D.K., Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D.K. & Dubey, N.K. (2016). Silicon nanoparticles more efficiently alleviate arsenate toxicity than silicon in maize cultivar and hybrid differing in arsenate tolerance. *Frontiers in Environmental Science*, 4,46-58.
22. Desoky, E.S.M., Mansour, E., Yasin, M.A., El Sobky E.S.E. & Rady, M.M. (2020). Improvement of drought tolerance in five different cultivars of *Vicia faba* with foliar application of ascorbic acid or silicon. *Span. Journal of Agricultural Research*, 18, 16.

23. Rady, M.M., Elrys, A.S., El-Maati, M.F.A. & Desoky, E.S.M. (2019). Interplaying roles of silicon and proline effectively improve salt and cadmium stress tolerance in *Phaseolus vulgaris* plant. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, 558–568.
24. Verma, K.K., Liu, X.H., Wu, K.C., Singh, R.K., Song, Q.Q., Malviya, M.K., Song, X.P., Singh, P., Verma, C.I. & Li, Y.R. (2020). The impact of silicon on photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under different soil moisture levels. *Silicon*, 12, 1355–1367.
25. Shah, A.A., Yasin, N.A., Akram, K., Ahmad, A., Khan, W.U., Akram, W. & Akbar, M. (2021). Ameliorative role of *Bacillus subtilis* FBL-10 and silicon against lead induced stress in *Solanum melongena*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 486–496.
26. Zaheer, M.M., Yasin, N.A., Ahmad, S.R., Khan, W.U., Ahmad, A., Ali, A. & S. U. Rehman, S.U. (2018). Amelioration of cadmium stress in gladiolus (*Gladiolus grandiflora* L.) by application of potassium and silicon. *Journal of Plant Nutrition*, 41, 461–476.
27. Aghaei, F., Seyed Sharifi, R. & Farzaneh, S. (2024). Effects of inoculation with plant growth promoting rhizobacteria and nanoparticles on the dry matter transfer process and yield triticale (*Triticosecale* Wittmack) under irrigation regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 22(2), 197-210. [In Persian]
28. Aghaei, F., Seyed Sharifi, R. & Narimani, H. (2023). Effects of foliar application of nanoparticles (zinc and silicon) and putrescine on chlorophyll fluorescence indices, dry matter remobilization and the contribution of this process in grain yield of wheat under salinity stress. *Plant Process and Function*, 56(12), 263-284. [In Persian]
29. Arnon, A.N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23, 112-121.
30. Seyed Sharifi, R. & Gholinejad, E. (2021). Evaluation of Agronomic and Morphophysiological Traits of Crops. Mohaghegh Ardabili university press. 410. [In Persian]
31. Barnett, K.H. & Pearce, P.B. (1983). Source-sink ratio alteration and its effect on physiological parameters in maize. *Crop Science*, 23 (2), 101-109.
32. Sachdev, S., Ansari, S.A., Ansari, M.I., Fujita, M. & Hasanuzzaman, M. (2021). Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants*, 10(2), 277.
33. Somaddar, U., Dey, H.C., Mim, S.K., Sarker, U.K., Uddin, M.R., Ahmed, N.U., Mostofa, M.G. & Saha, G. (2022). Assessing silicon-mediated growth performances in contrasting rice cultivars under salt stress. *Plants*, 11, 1831.
34. Naqve, M., Wang, X., Shahbaz, M., Mahmood, A., Bibi, S. & Fiaz, S. (2021). Alpha tocopherol-induced modulations in the morphophysiological attributes of okra under saline conditions. *Frontiers in Plant Science*, 12, 800251.
35. Song, X., Li, H., Song, J., Chen, W. & Shi, L. (2022). Biochar/vermicompost promotes hybrid pennisetum plant growth and soil enzyme activity in saline soils. *Plant Physiology and Biochemistry*, 183, 96-110.
36. Neocleous, D. & Vasilakakis, M. (2007). Effects of NaCl stress on red raspberry (*Rubus idaeus* L. "Autumn Bliss"). *Scientia Horticulturae*, 112, 282-289.
37. Rizwan, M., Ali, S., Ali, B., Adrees, M., Arshad, M., Hussain, A., Ur Rehman, M.Z. & Waris, A.A. (2019). Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. *Chemosphere*, 214, 269–277.
38. Jamil, M., Rehman, K., Jae lee, J., Man Kim, H.S., Kim, H. & Rha, E.S. (2007). Salinity reduced growth ps2 photochemistry and chlorophyll content in radish. *Science Agriculre*, 64, 111-118.
39. Etesami, H. & Jeong, B.R. (2018). Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 881–896

40. Hadi, H., Seyed Sharifi, R. & Namvar, A. (2016). Phytoprotectants and Abiotic Stresses. University of Urmia Publications. P.282. [In Persian]
41. Welch, R. M. (1995). Micronutrient nutrition of plants. *Critical Reviews in Plant Sciences* 14, 49-82
42. Van, Z.E., Zhang, Y. & Testerink, C. (2020). Salt tolerance mechanisms of plants. *Annual Review Plant Biology*, 71, 403–433
43. Seyed Sharifi, R. & Nazarly, H. (2013). Effects of seed priming with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on grain yield, fertilizer use efficiency and dry matter remobilization of sunflower (*Helianthus annuus* L.) with various levels of nitrogen fertilizer. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 23, 27-45.
44. Abdeldym, E.A., El-Mogy, M.M., Abdellateaf, H.R.L. & Atia, M.A.M. (2020). Genetic characterization, agro-morphological and physiological evaluation of grafted tomato under salinity stress conditions. *Agronomy*, 10, 1948.
45. Lu, Y., Li, Y., Zhang, J., Xiao, Y., Yue, Y., Duan, L., Zhang, M. & Li, Z. (2013). Over expression of arabidopsis molybdenum cofactor sulfurase gen confers drought tolerance in maize (*Zea may* L.). *Plos one*, 8(1), 1-12.
46. Salehi, F., Ahmadi, A., Mirabzadeh, M. & Rafei, H.R. (2020). Evaluation of storage and remobilization of stem dry matter of three wheat cultivars under different moisture regimes in before and after flowering stages. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 51(1), 35-49. [In Persian]
47. Chattha, M.U., Amjad, T., Khan, I., Nawaz, M., Ali, M., Chattha, M.B., Ali, H.M., Ghareeb, R.Y., Abdelsalam, N.R., Azmat, S., Barbanti, L. & Hassan, M.U. (2022). Mulberry based zinc nano-particles mitigate salinity induced toxic effects and improve the grain yield and zinc bio-fortification of wheat by improving antioxidant activities, photosynthetic performance, and accumulation of osmolytes and hormones. *Frontiers in Plant Science*, 13, 920570.