

Effects of Nano Particles of iron and silicon and Mycorrhiza on Contribution of Dry Matter Remobilization and current Photosynthesis in Grain Yield and some traits of rye under Water Limitation Conditions

Fatemeh basiri rad¹, Raouf Seyed Sharifi^{2*} , Khoshnaz Payandeh³, Sara Mohammadi Kale Sarlou¹

Received: January 4, 2025

Accepted: March 16, 2025

1-MSc and PhD Students respectively, Dept. of Plant Genetics and Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2-Prof., Dept. of Plant Genetics and Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

3-Dept. of Soil Sciences, Ahv. C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Corresponding Author E-mail: raouf_ssharifi@yahoo.com

Abstract

Background & Objectives: Several strategies have been suggested for improving yield of rye (*Secale cereal* L.) under water limitation conditions. In this regard, application of mycorrhiza and nano particles of iron and silicon plays a key role in yield improvements of rye. So, the aims of study was to investigate the effects of nano particles of iron and silicon with mycorrhiza on contribution of dry matter remobilization and current photosynthesis in grain yield and some traits of rye (local ecotype of Ardabil) under water limitation conditions.

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 Ardabil during 2023. The experimental factors included irrigation in three levels (full irrigation as control, irrigation withholding at 50% of booting and heading stages as severe and moderate water limitation, respectively), application of biofertilizers in two levels (with and without mycorrhiza application) and nano iron-silicon oxide foliar application at four levels (foliar application with water as control, foliar application of 0.8 g.L⁻¹ nano iron oxide, 60 mg.L⁻¹ nano silicon, both application nano iron-silicon oxide).

Results: The results showed that irrigation withholding at 50% of booting stage and without of mycorrhiza and nanoparticles of iron and silicon increased dry matter remobilization from stem and shoot (10.4 and 12.5% respectively) and contribution of dry matter remobilization from stem and shoot in grain yield (24.6 and 28.7%) in comparison with application of nanoparticles and mycorrhiza under the same irrigation level. Also, under severe water limitation, both application nano particles of iron and silicon and mycorrhiza increased leaf area index (30.5%), current photosynthesis and the contribution of current photosynthesis in grain yield (29.8 and 15.2%, respectively), the number of grains per spike (30%), spike length (25.3%) and grain yield (26%) in comparison with no application of nanoparticles and mycorrhiza under the same irrigation level.

Conclusion: Based on these results, it seems that application of mycorrhiza with nano particles of iron and silicon can be suggested to increase grain yield of rye under full irrigation and severe water limitation conditions.

Keywords: Chlorophyll Content, Foliar Application, Nano Iron Oxide, Nano Silicon

تأثیر نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا بر سهم فرایند انتقال مجدد و فتوسنتز جاری در عملکرد دانه و برخی صفات چاودار (*Secale cereal L.*) طی شرایط محدودیت آبی

فاطمه بصیری راد^۱، رئوف سیدشریفی*^۲، خوشناز پاینده^۳، سارا محمدی کله سرلو^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶
--------------------------	-------------------------

۱- به ترتیب دانشجویان کارشناسی ارشد و دکتری گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- استاد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- گروه خاکشناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

چکیده

مقدمه و اهداف: راه کارهای متعددی برای بهبود عملکرد چاودار تحت شرایط محدودیت آبی پیشنهاد شده‌اند. در این رابطه کاربرد میکوریزا و نانوذرات آهن و سیلیکون یک نقش کلیدی در بهبود عملکرد چاودار ایفا می کنند. بنابراین اهداف مطالعه ارزیابی تأثیر نانوذرات آهن و سیلیکون با میکوریزا بر سهم فرایند انتقال مجدد و فتوسنتز جاری در عملکرد دانه و برخی صفات چاودار (اکوتیپ محلی اردبیل) در شرایط محدودیت آبی بود.

مواد و روش‌ها: آزمایشی به صورت فاکتوریل بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی طی سال ۱۴۰۱ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل به عنوان شاهد، قطع آبیاری در ۵۰ درصد مراحل سنبله‌دهی و آبستنی به ترتیب به عنوان محدودیت ملایم و شدید آبی)، کاربرد کودهای زیستی در دو سطح (با کاربرد و بدون کاربرد میکوریزا)، محلول‌پاشی نانوآکسید آهن و سیلیکون در چهار سطح (محلول‌پاشی با آب به عنوان شاهد، محلول‌پاشی ۰/۸ گرم در لیتر نانوآکسید آهن، ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سیلیکون، کاربرد توام نانوآکسید آهن و سیلیکون) بود.

یافته‌ها: نتایج نشان دادند که قطع آبیاری در ۵۰ درصد مرحله آبستنی و بدون نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا، میزان انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی (به ترتیب ۱۰/۴ و ۱۲/۵ درصد) و سهم مشارکت ذخایر ساقه و اندام هوایی در عملکرد دانه را (به ترتیب ۲۴/۶ و ۲۸/۷ درصد) در مقایسه با کاربرد نانوذرات و میکوریزا در همین سطح از آبیاری افزایش داد. همچنین در شرایط محدودیت شدید آبی، کاربرد توام نانوذرات و میکوریزا، شاخص سطح برگ (۳۰/۵ درصد)، فتوسنتز جاری و میزان مشارکت فتوسنتز جاری در عملکرد دانه (به ترتیب ۲۹/۸ و ۱۵/۲ درصد)، تعداد دانه در سنبله (۳۰ درصد)، طول سنبله (۲۵/۳ درصد) و عملکرد دانه را (۲۶ درصد) در مقایسه با عدم کاربرد نانوذرات و میکوریزا تحت همان سطح از آبیاری افزایش داد.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج این بررسی به نظر می‌رسد کاربرد میکوریزا با نانوذرات آهن و سیلیکون را می‌توان برای افزایش عملکرد دانه چاودار تحت شرایط آبیاری کامل و محدودیت شدید آبی، پیشنهاد نمود.

واژه‌های کلیدی: نانوآکسید آهن، نانو سیلیکون، محلول‌پاشی، محتوای کلروفیل

مقدمه

غلات یکی از اجزای اصلی رژیم غذایی انسان و عامل موثری در شکل‌گیری تمدن‌های بشری بوده است (یانگ ۲۰۱۸). چاودار (*Secale cereal L.*) به دلیل امکان استفاده دو منظوره، برخورداری از دامنه تحمل بالا به سرما، خشکی و شوری از اهمیت بالایی در بین غلات برخوردار است (نقل از سیدشریفی و خلیل‌زاده ۲۰۱۸).

خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی موثر در کاهش عملکرد گیاهان زراعی است (هادی و همکاران ۲۰۱۶). تشکیل عملکرد نهایی دانه حاصل دو فرآیند فیزیولوژیک، فتوسنتز جاری و انتقال مجدد مواد انباشته شده قبل از گلدهی است (بردار و همکاران ۲۰۰۸). در شرایط مطلوب و دسترسی به منابع کافی، افزایش فتوسنتز جاری موجب می‌شود تعادل بین منبع و مخزن حفظ شده و مواد تولیدی منبع بتواند در مخزن مورد استفاده قرار گیرد. ولی در شرایط تنش، عدم دسترسی به عناصر غذایی، موجب کاهش فتوسنتز جاری و عدم توانایی این فرایند در تامین نیاز مخازن می‌شود، در نتیجه تعادل منبع و مخزن از بین می‌رود و در چنین شرایطی به دلیل روابط فیزیولوژیکی موجود بین منبع و مخزن، در بیشتر موارد منبع میزان انتقال ماده‌ی خشک را افزایش می‌دهد تا شاید بتواند بخشی از نیاز شدید مخازن (دانه‌ها) را برآورده نماید (سیدشریفی و سیاه خلکی ۲۰۱۷). یانگ و ژانگ (۲۰۰۶) اظهار داشتند که اعمال تنش به دلیل تحریک پیری در گیاه، منجر به افزایش انتقال مجدد مواد ذخیره‌ای ساقه به دانه می‌شود. آقایی و همکاران (۲۰۲۴) در بررسی تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری بر سهم انتقال ماده خشک و فتوسنتز جاری در عملکرد دانه عنوان نمودند که در شرایط محدودیت شدید آبی، سهم فرایند فتوسنتز جاری در عملکرد دانه گندم کاهش، ولی سهم فرایند انتقال ماده خشک از ساقه و اندام‌های هوایی در عملکرد دانه در مقایسه با آبیاری کامل افزایش داشت. نتایج مشابهی نیز توسط نریمانی و همکاران (۲۰۲۲)

مبنی بر افزایش سهم فرایند انتقال مجدد و کاهش سهم فتوسنتز جاری در عملکرد دانه تریتیکاله در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی در مقایسه با آبیاری کامل گزارش شده است.

گرچه گیاهان قادرند با ایجاد مکانیسم‌های فیزیولوژیکی در جهت حفظ رشد و جلوگیری از کاهش بیشتر عملکرد به نحو موثری عمل کنند، ولی مدیریت مناسب تغذیه گیاهی، یکی از راه کارهای مناسب برای کمک به تعادل منبع و مخزن، افزایش عملکرد و مقاومت گیاه به تنش‌های خشکی و شوری است. در این راستا استفاده از قارچ‌های میکوریزا (راکلامی و همکاران ۲۰۱۹) و نانوذرات مصنوعی به عنوان محرک‌های فعال (عثمان و همکاران ۲۰۲۰)، یکی از راه کارهای اساسی برای افزایش فتوسنتز، عملکرد و تحمل به تنش‌های محیطی پیشنهاد شده است.

میکوریزا به دلیل افزایش سطح تماس ریشه گیاه با خاک از طریق گسترش شبکه هیفی و افزایش فراهمی عناصر غذایی برای گیاه میزبان، قادر است اثرات ناشی از تنش را تعدیل نماید (عالیپو و همکاران ۲۰۱۷). در واقع میکوریزا با نفوذ در منافذ بسیار ریز خاک و بهبود تغذیه و جذب آب و کربن اضافی، ظرفیت انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی و تولید فیتوهورمون‌ها برای گیاه همزیست را فراهم می‌کند (محمد و بوبا ۲۰۲۰). نتایج بررسی‌ها نشان داده است در شرایط محدودیت آبی محتوای کلروفیل در گیاهان تلقیح شده با میکوریزا در مقایسه با گیاهان بدون میکوریزا، بیش‌تر بوده (الکرکی و همکاران ۲۰۰۴) و از طریق افزایش دوام سطح برگ، فتوسنتز و تثبیت کربن در طول فصل رشد، عملکرد گیاه را افزایش می‌دهد. همچنین میکوریزا با جذب کارآمد برخی عناصر مانند فسفر که به عنوان عنصر کلیدی در انتقال انرژی طی فرایند فتوسنتز مطرح است، در بهبود محتوای کلروفیل و فتوسنتز نقش اساسی ایفا می‌کند (هادی و همکاران ۲۰۱۶). نریمانی و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی تأثیر میکوریزا بر سهم فرایند انتقال ماده خشک و فتوسنتز جاری در عملکرد

دانه تربیتکاله در سطوح مختلف آبیاری، بیشترین میزان انتقال ماده خشک از ساقه و اندام های هوایی و سهم این فرایند در عملکرد دانه را، در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی و عدم کاربرد میکوریزا و کمترین مقادیر این صفات را در شرایط آبیاری نرمال و کاربرد میکوریزا گزارش کردند.

در شرایط تنش محلولپاشی عناصر به فرم نانوذرات به دلیل سرعت جذب و انتقال با سرعتی مناسب در طول دوره رشد، و تجمع بیشتر این ذرات در مقایسه با فرم معمولی، به عنوان یک راهکار مفید و موثر توصیه شده است (آقایی و همکاران ۲۰۲۴). از این رو در بررسی های مختلفی اثرات مفید کاربرد نانوذرات بر فتوسنتز (رحمان و همکاران ۲۰۲۴) و عملکرد (فنگ و همکاران ۲۰۲۴) گزارش شده است.

آهن از عناصر ضروری کم مصرف و موثر در سنتز کلروفیل، انتقال الکترون و بهبود عملکرد فتوسیستم های گیاهی است و کمبود آن در بیشتر مناطق خشک و نیمه خشک به دلیل محدودیت آبی و جذب کم و تحرک پایین این عنصر در خاک (هوچموث ۲۰۱۱)، ضمن آسیب به کلروفیل و تخریب ساختار کلروپلاست، موجب کاهش فتوسنتز می شود (توفک و همکاران ۲۰۲۱). نظری و همکاران (۲۰۲۱) اظهار داشتند که محلولپاشی نانو اکسید آهن با بهبود حجم و وزن ریشه، شاخص سطح برگ و فتوسنتز جاری، موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد.

سیلیکون نیز یکی دیگر از عناصر موثر در محافظت گیاهان از اثرات مخرب کم آبی بوده و بهره وری گیاهان تحت شرایط تنش را، بهبود می بخشد (تریپاتی و همکاران ۲۰۱۶). این عنصر با تاخیر در پیری برگ ها، بهبود محتوای کلروفیل و فعالیت آنزیم روبیسکو، ضمن افزایش پایداری گیاه در شرایط محدودیت آبی (لیانگ و همکاران ۲۰۰۶؛ احمد و همکاران ۲۰۱۱) در افزایش کارایی فتوسنتزی و سیستم دفاعی گیاه موثر بوده و با افزایش سطح برگ و جذب نور توسط برگ ها، در بهبود فتوسنتز و کاهش اثرات منفی ناشی از تنش موثر است (ورما و همکاران ۲۰۲۰). در این راستا آقائی و همکاران (۲۰۲۴) افزایش عملکرد دانه تربیتکاله در شرایط تنش با

محلولپاشی نانو اکسید آهن و سیلیکون را، به افزایش شاخص سطح برگ، بهبود فتوسنتز جاری و سهم این فرایند در عملکرد دانه نسبت دادند. احمدی نورالدین و همکاران (۲۰۲۱) اظهار داشتند که محلولپاشی نانو سیلیکون در شرایط محدودیت آبی در گندم با افزایش محتوای کلروفیل و وزن و حجم ریشه، موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد. برخی محققان گزارش کردند که کاربرد سیلیکون تحت شرایط محدودیت آبی از طریق افزایش جذب عناصر و شاخص سطح برگ، میزان فتوسنتز را افزایش داده و با انتقال مواد فتوسنتزی بیشتر به اندام زایشی، موجب افزایش تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و در نهایت عملکرد دانه گندم شد (اپستین و بلوم ۲۰۰۵). داداش زاده و سیدشریفی (۲۰۱۸) اظهار داشتند که محلولپاشی نانو اکسید آهن در جو تحت شرایط محدودیت آبی، منجر به افزایش محتوای کلروفیل، ارتفاع بوته، طول سنبله، تعداد دانه در سنبله و عملکرد دانه شد.

مواجه شدن بخشی از دوران رشد زایشی غلاتی مانند چاودار با محدودیت آبی در بیشتر مناطق مناطق خشک و نیمه خشک کشور، و از طرفی به دلیل کمبود عناصر ریزمغذی در بیشتر خاک های کشور و اهمیت محلولپاشی این عناصر به شکل نانوذرات در افزایش سرعت جذب، انتقال و تجمع بیشتر نانوذرات در مقایسه با فرم معمول، و همچنین کاربرد قارچ میکوریزا در تعدیل بخشی از اثرات ناشی از محدودیت آبی و بررسی های محدود انجام شده در این راستا، موجب شد تا اثر این عوامل بر سهم فرایند انتقال مجدد و فتوسنتز جاری در عملکرد دانه و برخی صفات چاودار در شرایط محدودیت آبی مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش ها

آزمایش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۱ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل به عنوان شاهد، قطع آبیاری در ۵۰ درصد مراحل سنبله دهی و آبستنی تا

مقیاس BBCH اعمال شد. نانواکسید آهن (Nano- Fe_2O_3) از موسسه تجهیزات آزمایشگاهی و شیمیایی جهان کیمیا ارومیه و نانوسیلیکون ($\text{SiO}_2\text{-Nano}$) محصول شرکت Nanomaterial US Research بود که از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه شد و مشخصات آنها در جدول ۱ آورده شده است.

پایان دوره رشد گیاه)، کاربرد میکوریزا در دو سطح (عدم کاربرد به عنوان شاهد و کاربرد میکوریزا)، محلول پاشی نانواکسید آهن و سیلیکون در چهار سطح (محلول پاشی با آب به عنوان شاهد، محلول پاشی ۰/۸ گرم در لیتر نانواکسید آهن، ۶۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکون، کاربرد توام نانواکسید آهن و سیلیکون) بود. محلول پاشی نانوذرات سیلیکون و آهن در مراحل پنجه دهی و ساقه دهی به ترتیب معادل با کد ۲۱ و ۳۰ از

جدول ۱- مشخصات نانواکسید آهن و نانوسیلیکون

نوع نانوذرات	خلوص (%)	میانگین اندازه ذرات (nm)	سطح ویژه ذرات	رنگ
نانواکسید آهن	۹۹	<۳۰	$>30 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	پودری قرمز آجری
نانوسیلیکون	۹۹	۲۰-۳۰	$>30 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	پودری سفید

انجام شد. نتایج حاصل از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در گلدان ها در جدول ۲ آورده شده است.

از چاودار رقم محلی اردبیل با تراکم ۴۰۰ بذر در مترمربع (۵۰ بذر در هر گلدان) که تراکم مطلوب و توصیه شده زارعین محلی برای این رقم است، استفاده شد. کاشت در گلدان هایی با قطر و ارتفاع ۴۰ سانتی متر

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در گلدان های آزمایشی

مشخصه pH	هدایت الکتریکی خاک	بافت خاک	عصاره اشباع	رس	سیلت	شن	کربن آلی	نیترژن	روی	فسفر	پتاسیم
۷/۸	$\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$					%			$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		
مقادیر	۱/۳۸	سیلتی	۴۷	۱۹/۵	۴۲	۳۸/۵	۰/۷۲	۰/۰۴	۱/۲	۲۷/۳	۲۵۵

کلروفیل کل با استفاده از روش آرنون (۱۹۶۷) محاسبه شد. برای این منظور ۰/۲ گرم از بافت برگ پرچم را با استون ۸۰ درصد به تدریج له کرده 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 ۴۷۰ و ۶۴۵ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر برای ارزیابی محتوای کلروفیل a و b قرائت شد. مجموع محتوای

اولین آبیاری بعد از کاشت و آبیاری های بعدی بسته به شرایط محیطی و نیاز گیاه زراعی و براساس سطوح مشخص شده در آزمایش انجام شد. در طول دوره رشد، کنترل علف های هرز به طریقه دستی انجام شد. گلدان ها در شرایط گلخانه ای در دمای ۲۴ تا ۳۰ درجه سانتی گراد با طول دوره روشنایی ۱۶-۱۵ ساعت (با استفاده از ترکیبی از لامپ های معمولی و مهتابی) نگهداری شدند. دو هفته بعد از قطع آبیاری در مرحله سنبله دهی نسبت به اندازه گیری شاخص سطح برگ و محتوای کلروفیل کل اقدام شد. اندازه گیری محتوای

خشک ساقه در برداشت اول، $SDMM^8$ وزن خشک ساقه در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک می‌باشد.

$$CSAG = \left(\frac{SDMT}{GY} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه $CSAG^9$ سهم ذخایر ساقه در عملکرد دانه برحسب درصد، $SDMT$ میزان انتقال ماده خشک از ساقه بر حسب گرم در بوته و GY عملکرد دانه بر حسب گرم در بوته می‌باشد.

$$CP = GY - DMT \quad \text{رابطه ۵}$$

در این رابطه CP^{10} میزان فتوسنتز جاری برحسب گرم در بوته، GY عملکرد دانه برحسب گرم در بوته و DMT میزان انتقال ماده خشک بر حسب گرم در بوته می‌باشد.

$$SSPG = \left(\frac{CP}{GY} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۶}$$

در این رابطه $CCPG^{11}$ سهم نسبی فتوسنتز جاری در دانه برحسب درصد، CP میزان فتوسنتز جاری بر حسب گرم در بوته و GY عملکرد دانه برحسب گرم در بوته می‌باشد.

به‌منظور اندازه‌گیری وزن و حجم ریشه، ریشه‌ها از گلدان‌ها خارج و برای خشک شدن در آون با دمای 70 ± 5 درجه به مدت ۷۲ ساعت قرار داده شد. سپس وزن خشک ریشه با ترازوی دیجیتالی با دقت 0.01 گرم توزین شد. حجم ریشه‌ها نیز با استفاده از حجم مشخصی از آب در استوانه مدرج اندازه‌گیری شد. برای ارزیابی عملکرد دانه، طول سنبله و تعداد دانه در هر سنبله، در زمان رسیدگی تعداد هشت بوته به ظاهر مشابه در هر گلدان برداشت و میانگین داده‌های حاصل، به‌عنوان ارزش این صفات در تحلیل داده‌ها استفاده شد. لازم به یادآوری است که بوته‌های برخوردار از محدودیت شدید آبی به دلیل تکمیل سریع‌تر طول دوره رشدی در مقایسه با بوته‌های با محدودیت ملایم آبی و آبیاری کامل، زودتر برداشت شدند. برای تجزیه داده‌ها

کلروفیل a و b به عنوان محتوای کلروفیل کل در نظر گرفته شد.

به منظور برآورد میزان انتقال مجدد و سهم این فرایند در عملکرد دانه، نمونه‌برداری از زمان پرشدن دانه تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک انجام شد (بحرینی و همکاران ۲۰۱۱). بدین ترتیب که در مجموع پنج مرحله و در هر مرحله دو بوته به فواصل زمانی هر چهار روز یکبار، برداشت شد. بوته‌های برداشت شده به ساقه، برگ و سنبله تفکیک و پس از خشک کردن (قراردادن در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت) به اندام‌های مختلف توزین و میزان انتقال ماده خشک، سهم فرایند انتقال مجدد از بخش رویشی به دانه و میزان مشارکت ذخایر ساقه در عملکرد دانه با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند (بحرینی و همکاران ۲۰۱۱).

$$DMT = DMA - DMM \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن DMT^1 میزان انتقال ماده خشک کل اندام هوایی 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.

$$CDMAG = \left(\frac{DMT}{GY} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه $CDMAG^4$ سهم فرایند انتقال مجدد ماده خشک کل در تشکیل دانه برحسب درصد، DMT میزان انتقال ماده خشک بر حسب گرم در بوته و GY^5 عملکرد دانه بر حسب گرم در بوته می‌باشد.

$$SDMT = SDMM - SDMA \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه $SDMT^6$ میزان انتقال ماده خشک از ساقه برحسب گرم در بوته، $SDMA^7$ حداکثر وزن

¹-Dry Matter Translocation

²-Dry Matter at Anthesis

³-Dry Matter at Maturity

⁴-Contribution of Dry Matter Assimilates to Grain

⁵-Grain Yield

⁶-Stem Dry Matter Translocation

⁷-Stem Dry Matter at Anthesis

⁸-Stem Dry Matter at Maturity

⁹-Contribution of Stem Assimilates to Grain

¹⁰-Current photosynthesis

¹¹-Contribution Current photosynthesis in grain

از نرم افزار SAS (نسخه ۹/۱) استفاده شد. میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند.

نتایج و بحث

نتایج مندرج در جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی هر یک از تیمارهای مورد بررسی اعم از سطوح آبیاری، کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون،

میکوریزا و اثر ترکیب تیماری هر سه عامل بر میزان انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی، سهم فرایند انتقال مجدد از اندام هوایی در عملکرد دانه، میزان مشارکت ذخایر ساقه در عملکرد دانه، میزان فتوسنتز جاری و سهم این فرایند در عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۳).

جدول ۳- تجزیه واریانس تاثیر میکوریزا و نانوذرات آهن و سیلیکون بر سهم فرایند انتقال مجدد و فتوسنتز جاری در عملکرد دانه چاودار در شرایط قطع آبیاری

میانگین مربعات							منابع تغییر
میانگین	سهم انتقال	سهم انتقال	انتقال ماده	سهم انتقال	انتقال	درجه آزادی	
سهم فتوسنتز جاری	سهم فتوسنتز جاری	سهم انتقال مجدد از اندام هوایی در عملکرد دانه	انتقال ماده خشک از اندام هوایی	سهم انتقال ماده خشک از ساقه در عملکرد دانه	انتقال ماده خشک از ساقه		
۳۰۲/۱۰۲**	۳/۷۰۲**	۶/۴۲۳ ^{ns}	۰/۱۴۶۶**	۳۰۲/۱۰۲**	۰/۱۱۵**	۲	تکرار
۲۵/۱۹۵*	۰/۰۶۶*	۱۲/۶۴۲*	۰/۰۰۱۷*	۲۵/۱۹۵*	۰/۰۰۳ ^{ns}	۲	قطع آبیاری (I)
۲۹/۴۲۱**	۰/۱۰۰**	۱۳/۲۹۲**	۰/۰۰۱۷**	۲۹/۴۲۱**	۰/۰۰۳*	۳	محلول پاشی (F)
۴۸/۵۴۴**	۰/۰۸۹*	۱۷/۲۸۵*	۰/۰۰۲۴*	۴۸/۵۴۴**	۰/۰۰۳**	۱	کود زیستی (B)
۹۰/۸۱۹**	۰/۲۴۵**	۳۷/۹۶۶*	۰/۰۰۴۶**	۹۰/۸۱۹**	۰/۰۰۷**	۶	I×F
۶۴/۹۶۳**	۰/۱۴۴**	۲۲/۳۹**	۰/۰۰۲۷**	۶۴/۹۶۳**	۰/۰۱۱**	۲	I×B
۴۳/۰۸۸**	۰/۰۹۸**	۱۵/۱۱۲**	۰/۰۰۲۴**	۴۳/۰۸۸**	۰/۰۰۸**	۳	B×F
۸۸/۱۵۱**	۰/۲۵۶**	۳۹/۸۸۶**	۰/۰۰۵۵**	۸۸/۱۵۱**	۰/۰۰۷**	۶	I×F×B
۷/۹	۰/۰۱۸	۳/۱۴	۰/۰۰۴	۷/۹	۰/۰۰۱	۴۶	خطا
۴/۳	۸/۴	۸/۹	۴/۹	۹/۲	۵/۶		ضریب تغییرات (%)

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

انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی و سهم

این فرایندها در عملکرد دانه: نتایج نشان داد که در شرایط محدودیت آبی و عدم کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا، میزان انتقال مجدد ماده خشک از ساقه و اندام هوایی (به ترتیب ۱۳/۵ و ۱۰/۴ درصد) و سهم این فرایندها در عملکرد دانه (به ترتیب ۲۸/۷ و ۲۴/۶ درصد) در مقایسه با کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا در همین سطح از سطوح آبیاری، افزایش یافت (جدول ۴). به نظر می‌رسد بخشی از افزایش انتقال ماده خشک در شرایط محدودیت آبی می‌تواند ناشی از تاثیر محدودیت آبی در کاهش محتوای کلروفیل (جدول ۵) و پیرو آن در کاهش

فتوسنتز جاری و سهم این فرایند در عملکرد دانه باشد (جدول ۴). چرا که عملکرد نهایی دانه حاصل دو فرایند فیزیولوژیک، فتوسنتز جاری و انتقال مجدد ماده انباشته شده قبل از گلدهی است (بردار و همکاران ۲۰۰۸) و سهم انتقال ماده خشک در عملکرد دانه به روابط منبع و مخزن در طول پرشدن دانه مربوط می‌شود (آسنگ و ون هرواردن ۲۰۰۳). از این رو در شرایط محدودیت آبی کاهش سهم فتوسنتز جاری (جدول ۵) و عدم توانایی این فرایند در تامین نیاز مخازن (دانه‌ها)، موجب می‌شود تعادل منبع و مخزن بهم خورد. در چنین شرایطی به نظر می‌رسد به دلیل روابط فیزیولوژیکی موجود بین منبع و مخزن، منبع میزان انتقال ماده خشک را افزایش

می‌دهد تا شاید بتواند بخشی از نیاز شدید مخازن (دانه‌ها) را برآورده نماید (سیدشریفی و سیاه خلکی ۲۰۱۷). ولی کاربرد توأم نانوذرات آهن و سیلیکون با میکوریزا حتی در شرایط محدودیت شدید آبی (قطع آبیاری در مرحله آبستنی)، به دلیل کمک به بهبود محتوای کلروفیل کل (جدول ۶) و افزایش سهم فتوسنتز جاری در عملکرد دانه (جدول ۵)، موجب شد میزان انتقال مجدد از ساقه و اندام هوایی و سهم این فرایندها در عملکرد دانه نسبت به شرایط عدم محلول‌پاشی نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا تحت چنین سطحی از سطوح آبیاری، کاهش یابد (جدول ۷).

بخش دیگری از افزایش میزان انتقال ماده خشک از ساقه و اندام‌های هوایی و سهم این فرایندها در عملکرد دانه در شرایط عدم کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون با میکوریزا می‌تواند به کاهش وزن و حجم ریشه (جدول ۶)، کاهش محتوای کلروفیل و شاخص سطح برگ (جدول ۶) نسبت داده شود که ضمن کاهش میزان فتوسنتز جاری و سهم این فرایند در عملکرد دانه (جدول ۶)، موجب می‌شود گیاه تا حدودی میزان انتقال ماده خشک و سهم این فرایندها در عملکرد دانه را افزایش دهد تا اینکه از افت بیشتر عملکرد در شرایط تنش جلوگیری کند. نتایج مشابهی نیز مبنی براینکه استفاده از نانو ذرات روی، آهن و سیلیکون به دلیل افزایش سهم فتوسنتز جاری موجب کاهش انتقال مجدد ماده خشک به دانه می‌شود توسط دیگر محققان گزارش شده است (نریمانی و سیدشریفی ۲۰۲۳، آقایی و همکاران ۲۰۲۴). محققان دیگر نیز افزایش انتقال ماده خشک گندم در شرایط محدودیت آبی را، نسبت به آبیاری کامل گزارش کرده و اظهار داشتند که به هنگام وقوع خشکی در مرحله ساقه‌روی تا گلدهی، بخش بیشتری از مواد فتوسنتزی به دانه‌ها انتقال یافته و موجب افزایش انتقال ماده خشک در این مرحله می‌شود (لیو و همکاران ۲۰۲۰). عبادی و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که کاربرد قارچ میکوریزا تحت شرایط محدودیت

آبی با بهبود شاخص کلروفیل و فتوسنتز جاری، منجر به کاهش انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی و سهم این فرایندها در عملکرد دانه جو شد.

فتوسنتز جاری و سهم این فرایندها در عملکرد دانه: معنی‌دار شدن برهم‌کنش توأم محلول‌پاشی نانوذرات آهن و سیلیکون، میکوریزا و سطوح آبیاری بر فتوسنتز جاری و سهم این فرایند در عملکرد دانه (جدول ۳) و مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین میزان فتوسنتز جاری و سهم این فرایند در عملکرد دانه (به‌ترتیب ۲/۱۸ میلی‌گرم از بوته و ۷۸/۷۴ درصد) از محلول‌پاشی توأم نانوذرات آهن و سیلیکون در شرایط آبیاری کامل بدست آمد که از افزایش به‌ترتیب ۸۶/۳ و ۳۲/۴ درصدی این صفات نسبت به عدم محلول‌پاشی نانوذرات (آهن و سیلیکون) تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی برخوردار بود (جدول ۴). بخشی از بالا بودن فتوسنتز جاری را در کاربرد نانوذرات، میکوریزا و سطوح آبیاری می‌توان به تأثیر مثبت این تیمارها در افزایش محتوای کلروفیل، شاخص سطح برگ و بهبود حجم و وزن ریشه (جدول ۴) نسبت داد. در این راستا احمدی نوالدین‌وند و همکاران (۲۰۲۱) نیز افزایش عملکرد دانه در شرایط محدودیت آبی با کاربرد نانوسیلیکون را، به افزایش شاخص سطح برگ نسبت دادند. نتایج مشابهی نیز توسط نظری و همکاران (۲۰۲۱) مبنی بر اینکه کاربرد نانو اکسید آهن و سیلیکون، با کمک به افزایش وزن و حجم ریشه و شاخص سطح برگ، منجر به افزایش فتوسنتز جاری و سهم این فرایند در عملکرد دانه تریتیکاله می‌شود، گزارش شده است. آقائی و همکاران (۲۰۲۴) بیان داشتند در شرایط بهینه، فتوسنتز جاری بیش‌ترین سهم را در وزن دانه تریتیکاله داشت، ولی در شرایط تنش به دلیل اثر منفی تنش بر میزان فتوسنتزی جاری، سهم فرایند انتقال مجدد به دانه‌ها تا حدودی در مقایسه با شرایط مطلوب (آبیاری کامل) افزایش یافت تا از کاهش بیشتر عملکرد در شرایط تنش جلوگیری شود.

جدول ۴- مقایسه میانگین تاثیر میکوریزا و نانوذرات آهن و سیلیکون بر سهم فرایند انتقال مجدد و فتوسنتز جاری در عملکرد دانه چاودار در شرایط قطع آبیاری

ترکیب تیماری	انتقال ماده خشک از اندام هوایی (g.plant ⁻¹)	سهم انتقال ماده خشک از اندام هوایی در عملکرد دانه (%)	انتقال ماده خشک از ساقه (g.plant ⁻¹)	سهم انتقال ماده خشک از ساقه در عملکرد دانه (%)	فتوسنتز جاری (g.plant ⁻¹)	سهم فتوسنتز جاری در عملکرد دانه (%)
I ₁ ×F ₁ ×B ₁	۰/۶۰ ^{ej-m}	۲۴/۰۲ ^{g-i}	۰/۳۹۹ ^{j-l}	۱۵/۶۴ ^{g-i}	۱/۹۵ ^{bc}	۷۵/۹۷ ^{a-c}
I ₁ ×F ₁ ×B ₂	۰/۶۴۶ ^{g-k}	۲۷/۵۹ ^{f-h}	۰/۴۲۵ ^{h-j}	۱۷/۹۷ ^{f-h}	۱/۷۳ ^{cd}	۷۲/۴۱ ^{b-d}
I ₁ ×F ₂ ×B ₁	۰/۶۹۵ ^{c-h}	۳۲/۱۸ ^{b-f}	۰/۴۵۴ ^{d-i}	۲۰/۸۵ ^{b-f}	۱/۵ ^{E-j}	۶۷/۸۱ ^{d-h}
I ₁ ×F ₂ ×B ₂	۰/۶۶۳ ^{e-i}	۲۹/۹۸ ^{ef}	۰/۴۲۸ ^{h-j}	۱۸/۷۷ ^{ef}	۱/۶۴ ^{d-g}	۷۰/۰۲ ^{de}
I ₁ ×F ₃ ×B ₁	۰/۵۸۸ ^{lm}	۲۲/۱۳ ⁱ	۰/۳۹ ^{kl}	۱۴/۴۷ ⁱ	۲/۱۱ ^{ab}	۷۷/۸۶ ^a
I ₁ ×F ₃ ×B ₂	۰/۵۹۶ ^{k-m}	۲۳/۳ ^{hi}	۰/۳۹۵ ^{j-l}	۱۵/۲۲ ^{hi}	۲ ^{ab}	۷۶/۶۹ ^{ab}
I ₁ ×F ₄ ×B ₁	۰/۶۵۵ ^{f-j}	۲۸/۱۶ ^{fg}	۰/۴۳ ^{g-j}	۱۸/۳۴ ^{e-g}	۱/۷۲ ^{de}	۷۱/۸۳ ^{cd}
I ₁ ×F ₄ ×B ₂	۰/۵۷۷ ^m	۲۱/۲۵ ⁱ	۰/۳۷۷ ^l	۱۳/۷۳ ⁱ	۲/۱۸ ^a	۷۸/۷۴ ^a
I ₂ ×F ₁ ×B ₁	۰/۶۴۵ ^{g-k}	۲۸/۴۷ ^{fg}	۰/۴۲۷ ^{h-j}	۱۸/۶۳ ^{ef}	۱/۶۵ ^{d-g}	۷۱/۵۳ ^{cd}
I ₂ ×F ₁ ×B ₂	۰/۶۶۷ ^{e-i}	۲۹/۸۷ ^{ef}	۰/۴۴۶ ^{e-i}	۱۹/۸ ^{d-f}	۱/۵۶ ^{d-j}	۷۰/۱۲ ^{de}
I ₂ ×F ₂ ×B ₁	۰/۷۰۹ ^{b-f}	۳۳/۲۸ ^{b-e}	۰/۴۷۲ ^{a-f}	۲۱/۹۶ ^{b-d}	۱/۴۵ ^{f-j}	۶۶/۷۱ ^{e-h}
I ₂ ×F ₂ ×B ₂	۰/۶۴۳ ^{h-l}	۲۸/۵ ^{fg}	۰/۴۴۵ ^{f-i}	۱۹/۹۲ ^{d-f}	۱/۵۸ ^{d-i}	۷۱/۵ ^{cd}
I ₂ ×F ₃ ×B ₁	۰/۶۷۵ ^{d-i}	۳۰/۳۳ ^{ef}	۰/۴۵۳ ^{d-i}	۲۰/۱۶ ^{c-f}	۱/۴۲ ^{h-j}	۶۹/۶۷ ^{de}
I ₂ ×F ₃ ×B ₂	۰/۷۳۱ ^{a-d}	۳۵/۴۱ ^{b-d}	۰/۴۸۲ ^{a-d}	۲۳/۰۱ ^{bc}	۱/۳۷ ^{i-k}	۶۴/۵۸ ^{f-h}
I ₂ ×F ₄ ×B ₁	۰/۶۷۱ ^{e-i}	۳۰/۲۶ ^{ef}	۰/۴۴۵ ^{f-i}	۱۹/۸۶ ^{d-f}	۱/۵۷ ^{d-i}	۶۹/۷۳ ^{de}
I ₂ ×F ₄ ×B ₂	۰/۶۳۷ ^{i-l}	۲۷/۹۸ ^{fg}	۰/۴۲۲ ^{i-k}	۱۸/۳۱ ^{e-g}	۱/۶۷ ^{d-f}	۷۲/۰۱ ^{cd}
I ₃ ×F ₁ ×B ₁	۰/۷۷۸ ^a	۴۰/۵۴ ^a	۰/۵۰۸ ^a	۲۶/۱۳ ^a	۱/۱۷ ^k	۵۹/۴۵ ⁱ
I ₃ ×F ₁ ×B ₂	۰/۷ ^{c-g}	۳۱/۹۱ ^{b-f}	۰/۴۶۲ ^{b-g}	۲۰/۸۶ ^{b-f}	۱/۵۹ ^{d-i}	۶۸/۰۸ ^{d-h}
I ₃ ×F ₂ ×B ₁	۰/۷۵۸ ^{ab}	۳۶/۵۲ ^{ab}	۰/۴۹۷ ^{ab}	۲۳/۶۵ ^{ab}	۱/۳۵ ^{jk}	۶۳/۴۷ ^{hi}
I ₃ ×F ₂ ×B ₂	۰/۶۸۱ ^{d-i}	۳۱/۱۷ ^{d-f}	۰/۴۵۹ ^{c-h}	۲۰/۸۱ ^{b-f}	۱/۵۳ ^{d-i}	۶۸/۸۲ ^{d-f}
I ₃ ×F ₃ ×B ₁	۰/۷۲۸ ^{a-d}	۳۴/۳۷ ^{b-e}	۰/۴۸۲ ^{a-e}	۲۲/۵۱ ^{b-d}	۱/۶ ^{d-h}	۶۵/۶۲ ^{e-h}
I ₃ ×F ₃ ×B ₂	۰/۷۵۱ ^{a-c}	۳۵/۸۳ ^{bc}	۰/۴۹۴ ^{a-c}	۲۳/۲۸ ^{ab}	۱/۳۸ ^{h-k}	۶۴/۱۶ ^{gh}
I ₃ ×F ₄ ×B ₁	۰/۷۱۸ ^{b-e}	۳۳/۷۳ ^{b-e}	۰/۴۷۷ ^{a-f}	۲۲/۱۸ ^{b-d}	۱/۴۴ ^{g-j}	۶۶/۲۶ ^{e-h}
I ₃ ×F ₄ ×B ₂	۰/۶۸۵ ^{d-i}	۳۱/۴۹ ^{c-f}	۰/۴۶۰ ^{c-h}	۲۰/۹۶ ^{b-e}	۱/۵۲ ^{d-i}	۶۸/۵ ^{d-g}
LSD	۰/۰۵۶	۴/۶۱	۰/۰۳۶	۲/۹۱	۰/۲۲۴	۴/۶۱

I₁, I₂ و I₃ به ترتیب آبیاری کامل، قطع آبیاری در مرحله سنبله دهی و آبستنی. F₁, F₂, F₃ و F₄ به ترتیب عدم محلول پاشی، محلول پاشی نانو اکسید آهن، نانو سیلیکون، محلول پاشی توام نانو اکسید آهن و نانو سیلیکون. B₁ و B₂ به ترتیب عدم کاربرد و کاربرد قارچ میکوریزا. میانگین های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

هر سه عامل بر شاخص سطح برگ، وزن صد دانه، تعداد دانه در سنبله، طول سنبله، وزن و حجم ریشه و عملکرد دانه معنی دار بود (جدول ۵).

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی هریک از تیمارهای مورد بررسی اعم از سطوح آبیاری، کاربرد نانوذرات، میکوریزا و اثر ترکیب تیماری

جدول ۵- تجزیه واریانس تاثیر میکوریزا و نانوذرات بر عملکرد و برخی صفات چاودار در شرایط قطع آبیاری

میانگین مربعات								درجه آزادی	منابع تغییر
حجم ریشه	وزن ریشه	عملکرد دانه	تعداد دانه در سنبله	طول سنبله	وزن صد دانه	کلروفیل کل	شاخص سطح برگ		
۰/۸۲۷۸**	۰/۰۳۱۵**	۱/۶۳**	۵۹/۰۴۱**	۴۷/۹۴۳**	۰/۰۸۴۱ ^{ns}	۱/۳۳۲**	۰/۶۱۸۳**	۲	تکرار
۰/۳۵۳۳**	۰/۰۲۰۳**	۰/۱۰۹**	۳۰۲**	۲۸/۷۸۹**	۱/۳۲۲**	۱/۰۸۷**	۰/۴۱۶۷**	۲	قطع آبیاری (I)
۰/۲۱۸۲**	۰/۰۱۴۱**	۰/۱۵۲**	۴۸/۸۲۸**	۴/۱۳۳**	۰/۳۰۲**	۰/۵۴**	۰/۲۴۵۵**	۳	محلول پاشی (F)
۰/۶۷۸۶**	۰/۰۴۳۶**	۰/۱۲**	۵۷۲/۳۴۷**	۵۱/۷۱۴**	۲/۱۸۷**	۱/۹۹۴**	۰/۷۸۶۴**	۱	کود زیستی (B)
۰/۰۲۸۸ ^{ns}	۰/۰۰۱۶ ^{ns}	۰/۰۴۴**	۲۳/۰۳۷**	۲/۳۴**	۰/۱۲۹**	۰/۱۲۸**	۰/۰۲۹۱ ^{ns}	۶	I×F
۰/۰۳۸۱ ^{ns}	۰/۰۰۱۷ ^{ns}	۰/۰۲۰۷**	۱/۷۲۲ ^{ns}	۰/۰۵۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۶ ^{ns}	۰/۰۲۲۳ ^{ns}	۲	I×B
۰/۰۲۹۹ ^{ns}	۰/۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۱۲ ^{ns}	۱۰/۹۰۲ ^{ns}	۱/۳۲۶ ^{ns}	۰/۰۹*	۰/۰۸۶*	۰/۰۳۵۵ ^{ns}	۳	B×F
۰/۰۶۲۳**	۰/۰۰۳۸**	۰/۲۴۹**	۱۹/۷۲۲*	۱/۷۳۴*	۰/۱۰۸**	۰/۰۱۵ ^{ns}	۰/۰۵۲۲**	۶	I×F×B
۰/۰۱۳۱	۰/۰۰۰۸	۰/۰۱	۷/۲۴۴	۰/۶۷۳	۰/۰۳۱	۰/۰۲۳	۰/۰۱۵۷	۴۶	خطا
۶/۷	۵/۵	۹/۸	۶/۸	۵/۸	۷/۱	۶/۳	۷/۹	ضریب تغییرات (%)	

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

شاخص سطح برگ: مقایسه میانگین‌ها نشان داد که

در تمامی سطوح آبیاری، کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا منجر به افزایش شاخص سطح برگ در مقایسه با سطح شاهد (عدم کاربرد نانوذرات و میکوریزا) شد. در سطح ثابت از عدم کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا، آبیاری کامل به ترتیب از افزایش ۲۲/۱ و ۱۸/۵ درصدی شاخص سطح برگ نسبت به قطع آبیاری در مرحله آبستنی و خوشه‌دهی برخوردار بود (جدول ۶). نتایج مشابهی نیز مبنی بر اینکه محدودیت ملایم و شدید آبی موجب کاهش سطح برگ می‌شود توسط دیگر محققان گزارش شده است (بازال و سابو ۲۰۲۰). کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا منجر به بهبود شاخص سطح برگ شد. طوری که در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، کاربرد توام نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا منجر به افزایش ۳۰ درصدی شاخص سطح برگ نسبت به عدم کاربرد نانوذرات و میکوریزا در همین سطح از سطوح آبیاری شد (جدول ۶). روند مشابهی نیز مبنی بر افزایش شاخص سطح برگ با کاربرد نانوذرات آهن و

سیلیکون و میکوریزا در دیگر سطوح آبیاری مشاهده شد (جدول ۶). بخشی از افزایش شاخص سطح برگ با کاربرد سیلیکون می‌تواند ناشی از تاثیر این ماده در تاخیر پیری برگ، افزایش استحکام و ضخامت برگ و برافراشته ماندن برگ‌ها باشد (ساواس و همکاران ۲۰۱۵). بخش دیگری از افزایش شاخص سطح برگ با کاربرد نانوآکسید آهن همانند نانوسیلیکون، می‌تواند ناشی از تاثیر این ماده در افزایش محتوای کلروفیل کل (جدول ۶) و میزان فتوسنتزی جاری (جدول ۴) باشد. میکوریزا نیز به دلیل کمک به افزایش وزن و حجم ریشه (جدول ۶) و بهبود دسترسی به آب و جذب بهتر عناصر به‌ویژه نیتروژن و فسفر و نیز افزایش فعالیت احیاکننده نیترات یعنی نیترات ردوکتاز و سنتز پروتئینی، می‌تواند موجب افزایش سطح برگ (گیری و همکاران ۲۰۰۴) و به تبع آن افزایش شاخص سطح برگ شود. برخی محققان افزایش سطح برگ با کاربرد میکوریزا در گیاهان تحت شرایط محدودیت آبی را، به کاهش پیری برگ، افزایش محتوای کلروفیل یا کاهش تخریب آن نسبت دادند (بومسما و وین ۲۰۰۸).

جدول ۶- مقایسه میانگین تاثیر میکوریزا و نانوذرات آهن و سیلیکون بر عملکرد و برخی صفات چاودار در شرایط قطع آبیاری

ترکیب تیماری	شاخص سطح برگ	طول سنبله (cm)	دانه در سنبله	وزن صد دانه (g)	عملکرد دانه (g.plant ⁻¹)	حجم ریشه (cm ³ .plant ⁻¹)	وزن ریشه (g.plant ⁻¹)
I ₁ ×F ₁ ×B ₁	۱/۶ ^{c-j}	۱۳/۸۳ ^{c-i}	۳۹ ^{f-k}	۲/۵۳ ^{d-g}	۲/۵۶ ^{bc}	۱/۶ ^{d-i}	۰/۵۴۵ ^{c-j}
I ₁ ×F ₁ ×B ₂	۱/۷۶ ^{d-g}	۱۵/۶۱ ^{a-d}	۴۵/۳۳ ^{a-d}	۲/۸۴ ^{a-c}	۲/۱۷ ^{defghi}	۱/۷۶ ^{c-e}	۰/۵۸۲ ^{d-f}
I ₁ ×F ₂ ×B ₁	۱/۶۳ ^{c-i}	۱۴/۴۱ ^{d-h}	۴۰/۳۳ ^{e-i}	۲/۶۳ ^{c-g}	۲/۲۸ ^{defg}	۱/۵۴ ^{g-j}	۰/۵۳۵ ^{g-j}
I ₁ ×F ₂ ×B ₂	۱/۹۸ ^{a-c}	۱۶/۱۵ ^{a-c}	۴۷ ^{a-c}	۲/۹۸ ^{ab}	۲/۳۳ ^d	۱/۹۵ ^{ab}	۰/۶۳۱ ^{a-c}
I ₁ ×F ₃ ×B ₁	۱/۵۳ ^{h-k}	۱۵/۵۱ ^{a-d}	۴۵ ^{a-d}	۲/۸۸ ^{a-c}	۲/۱۵ ^{efghi}	۱/۵۷ ^{f-i}	۰/۵۳۳ ^{g-k}
I ₁ ×F ₃ ×B ₂	۲/۰۱ ^a	۱۶/۳۱ ^{ab}	۴۷/۶۶ ^{ab}	۳/۰۱ ^{ab}	۲/۲۶ ^{defgh}	۲ ^a	۰/۶۳۹ ^{ab}
I ₁ ×F ₄ ×B ₁	۱/۹۹ ^{ab}	۱۴/۸۳ ^{c-g}	۴۲ ^{d-g}	۲/۷۴ ^{b-d}	۲/۲۸ ^{defg}	۱/۹۶ ^{ab}	۰/۶۳۴ ^{ab}
I ₁ ×F ₄ ×B ₂	۲/۰۴ ^a	۱۶/۶۹ ^a	۴۹ ^a	۳/۰۶ ^a	۲/۷۶ ^a	۲/۰۳ ^a	۰/۶۵ ^a
I ₂ ×F ₁ ×B ₁	۱/۳۵ ^{kl}	۱۱/۸۶ ^{kl}	۳۳/۳۳ ^{lm}	۱/۹۷ ^{jk}	۲/۳ ^{def}	۱/۳۶ ^{jk}	۰/۴۸۷ ^{kl}
I ₂ ×F ₁ ×B ₂	۱/۷۳ ^{d-h}	۱۳/۶۶ ^{g-j}	۴۳/۶۶ ^{b-c}	۲/۷۶ ^{b-c}	۲/۵ ^c	۱/۶۱ ^{d-h}	۰/۵۴۵ ^{c-j}
I ₂ ×F ₂ ×B ₁	۱/۶۶ ^{e-h}	۱۲/۵۵ ^{i-l}	۳۵/۳۳ ^{j-m}	۲/۱۷ ^{ij}	۲/۱۶ ^{efghi}	۱/۴۲ ^{i-k}	۰/۴۹۹ ^{j-l}
I ₂ ×F ₂ ×B ₂	۱/۷ ^{d-h}	۱۴/۷۶ ^{d-g}	۴۲/۶۶ ^{c-f}	۲/۶۸ ^{c-f}	۲/۲۱ ^{defghi}	۱/۷ ^{c-g}	۰/۵۷۱ ^{d-h}
I ₂ ×F ₃ ×B ₁	۱/۵۳ ^{h-k}	۱۳/۳۵ ^{h-j}	۳۷ ^{h-l}	۲/۴۲ ^{f-i}	۲/۷ ^{ab}	۱/۵۴ ^{g-j}	۰/۵۲۸ ^{h-k}
I ₂ ×F ₃ ×B ₂	۱/۷۷ ^{c-f}	۱۵/۱ ^{b-f}	۴۳/۳۳ ^{b-f}	۲/۷۳ ^{b-d}	۲/۱۳ ^{ghi}	۱/۷۶ ^{c-e}	۰/۵۸۷ ^{c-e}
I ₂ ×F ₄ ×B ₁	۱/۸ ^{b-c}	۱۳/۷۷ ^{f-i}	۳۹/۶۶ ^{e-j}	۲/۴۲ ^{f-i}	۲/۱۶ ^{efghi}	۱/۷۹ ^{b-d}	۰/۵۹۴ ^{b-d}
I ₂ ×F ₄ ×B ₂	۱/۹ ^{a-d}	۱۵/۶۱ ^{a-d}	۴۵/۳۳ ^{a-d}	۲/۸۴ ^{a-c}	۲/۳۱ ^{de}	۱/۸۷ ^{a-c}	۰/۶۱۳ ^{a-d}
I ₃ ×F ₁ ×B ₁	۱/۳۱ ^l	۱۱/۴۵ ^l	۳۱/۶۶ ^m	۱/۸۵ ^k	۱/۷۵ ^j	۱/۳۱ ^k	۰/۴۷ ^l
I ₃ ×F ₁ ×B ₂	۱/۶ ^{e-j}	۱۵/۱۵ ^{b-e}	۳۸ ^{g-k}	۲/۴۳ ^{f-i}	۲/۰۴ ^{ij}	۱/۶۸ ^{d-g}	۰/۵۷۱ ^{d-i}
I ₃ ×F ₂ ×B ₁	۱/۴۱ ^l	۱۲/۵ ^{i-l}	۳۵/۳۳ ^{j-m}	۲/۱۶ ^{ij}	۲/۱۱ ^{hij}	۱/۷۴ ^{c-f}	۰/۵۷۶ ^{d-g}
I ₃ ×F ₂ ×B ₂	۱/۵۳ ^{h-k}	۱۲/۹۴ ^{i-k}	۳۶/۳۳ ^{i-l}	۲/۲۷ ^{hi}	۲/۱۹ ^{defghi}	۱/۵۲ ^{g-j}	۰/۵۲۴ ^{i-k}
I ₃ ×F ₃ ×B ₁	۱/۴۱ ^{i-l}	۱۲/۳۷ ^{j-l}	۳۴/۶۶ ^{k-m}	۲/۱۹ ^{ij}	۲/۵ ^c	۱/۴۴ ^{h-k}	۰/۵۰۳ ^{j-k}
I ₃ ×F ₃ ×B ₂	۱/۵۷ ^{f-j}	۱۳/۲۹ ^{i-k}	۳۷/۶۶ ^{g-l}	۲/۳۷ ^{hi}	۲/۶ ^{abc}	۱/۵۸ ^{e-i}	۰/۵۴ ^{f-j}
I ₃ ×F ₄ ×B ₁	۱/۵۷ ^{g-j}	۱۲/۸۴ ^{i-k}	۳۶/۳۳ ^{i-l}	۲/۴۳ ^{f-i}	۲/۱۴ ^{fghi}	۱/۵۵ ^{g-i}	۰/۵۳۶ ^{f-j}
I ₃ ×F ₄ ×B ₂	۱/۷۱ ^{d-h}	۱۴/۳۵ ^{d-h}	۴۱/۳۳ ^{d-h}	۲/۶۳ ^{c-g}	۲/۲۰ ^{defghi}	۱/۷ ^{c-g}	۰/۵۷۳ ^{d-h}
LSD	۰/۲۰۶	۱/۳۴	۴/۴۲	۰/۲۹	۰/۱۶۷	۰/۱۸۸	۰/۰۴

I₁, I₂ و I₃ به ترتیب آبیاری کامل، قطع آبیاری در مرحله سنبله دهی و آبستنی. F₁, F₂, F₃ و F₄ به ترتیب عدم محلول پاشی، محلول پاشی نانو اکسید آهن، نانو سیلیکون، محلول پاشی توام نانو اکسید آهن و نانو سیلیکون. B₁ و B₂ به ترتیب عدم کاربرد و کاربرد قارچ میکوریزا. میانگین های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

کلروفیل کل: معنی دار شدن اثر ترکیب تیماری

سطوح آبیاری در نانوذرات و سطوح میکوریزا در نانوذرات بر محتوای کلروفیل کل (جدول ۳) و مقایسه میانگین ها نشان داد که با افزایش محدودیت آبی محتوای کلروفیل کل کاهش یافت در صورتی که با کاربرد نانو سیلیکون و میکوریزا، محتوای کلروفیل کاهش کمتری را نشان داد (جدول ۷). به نظر می رسد

محدودیت آبی با افزایش برخی از تنظیم کننده های رشد نظیر اتیلن و آبسازیک اسید، فعالیت کلروفیلاز را تحریک کرده و همین امر میتواند منجر به کاهش سنتز کلروفیل و افزایش تجزیه آن شده (شوتز و فانگمیر ۲۰۰۱) با اختلال در جذب برخی عناصر مهم نظیر آهن که در سنتز کلروفیل و رنگدانه های آن ضروری می باشد (هادی و همکاران ۲۰۱۶)، موجب کاهش محتوای

ضروری موثر در ساختار کلروفیل نظیر آهن، از کاهش سنتز و یا افزایش تجزیه کلروفیل جلوگیری نموده و منجر به افزایش محتوای کلروفیل کل می‌شود.

کلروفیل تحت چنین شرایطی می‌شود. از این‌رو در چنین شرایطی کاربرد برخی تعدیل‌کننده‌های تنش نظیر نانوذرات آهن و میکوریزا با تعدیل اثرات ناشی از محدودیت آبی، ضمن کمک به بهبود برخی عناصر

جدول ۷- مقایسه میانگین تاثیر نانوذرات آهن و سیلیکون بر محتوای کلروفیل کل در شرایط قطع آبیاری

کلروفیل کل (mg.g FW ⁻¹)				سطوح آبیاری
F ₄	F ₃	F ₂	F ₁	
۲/۸۱ ^a	۲/۸۵ ^a	۲/۵ ^{bc}	۲/۴۹ ^{bc}	I ₁
۲/۶۴ ^{ab}	۲/۴۶ ^{bc}	۲/۲۸ ^{cd}	۲/۰۹ ^d	I ₂
۲/۴۲ ^{bc}	۲/۱۲ ^d	۲/۴۲ ^{bc}	۲/۰۴ ^d	I ₃
۰/۲۸۱				LSD
کلروفیل کل (mg.g FW ⁻¹)				سطوح میکوریزا
F ₄	F ₃	F ₂	F ₁	
۲/۵ ^{bc}	۲/۳۶ ^{cd}	۲/۱۴ ^{cd}	۲/۰۴ ^c	B ₁
۲/۷۴ ^a	۲/۵۹ ^{a-c}	۲/۶۶ ^{ab}	۲/۳۷ ^{cd}	B ₂
۰/۲۴۳				LSD

I₁, I₂ و I₃ به ترتیب آبیاری کامل، قطع آبیاری در مرحله سنبله‌دهی و آبستنی. F₁, F₂, F₃ و F₄ به ترتیب عدم محلول‌پاشی، محلول‌پاشی نانوآکسید آهن، نانوسیلیکون، محلول‌پاشی توام نانوآکسید آهن و نانوسیلیکون. B₁ و B₂ به ترتیب عدم کاربرد و کاربرد قارچ میکوریزا. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

کربوکسیلاز و فتوسنتز برگ‌ها ناشی شود (گونگ و همکاران ۲۰۲۳). نتایج مشابهی نیز توسط دیگر محققان مبنی بر افزایش محتوای رنگدانه‌های مختلف فتوسنتزی در شرایط محدودیت آبی با کاربرد سیلیکون گزارش شده است (مروارد و همکاران ۲۰۱۸).

بخشی از بهبود محتوای کلروفیل با کاربرد میکوریزا را می‌توان به اثر مثبت این قارچ در جذب عناصر غذایی مورد نیاز از قبیل نیتروژن و منیزیم (بگوم و همکاران ۲۰۱۹) و افزایش وزن و حجم ریشه (جدول ۶) نسبت داد. در واقع میکوریزا از طریق نفوذ در حفرات بسیار ریزخاک، نفوذ ریشه‌های موبین گیاه به نقاط غیرقابل دسترس خاک را افزایش داده و فواید متعددی از جمله بهبود تغذیه و جذب آب، جذب کربن اضافی، افزایش ظرفیت انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی، افزایش تولید فیتوهورمون‌ها را برای گیاه درگیر فراهم آورده و موجب افزایش محتوای کلروفیل در غلات می‌شود (بوبا و محمد ۲۰۲۰).

بیشترین محتوای کلروفیل کل (۲/۸۵ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ) در شرایط آبیاری کامل و محلول-پاشی با نانو سیلیکون بدست آمد که اختلاف آماری معنی‌داری با همین سطح از سطوح آبیاری در محلول-پاشی توام با نانوآکسید آهن و سیلیکون نداشت (جدول ۷). در شرایط محدودیت شدید آبی کاربرد توام نانوآکسید آهن و سیلیکون توانست محتوای کلروفیل کل را ۱۸/۶ درصد در مقایسه با عدم کاربرد نانوذرات همین سطح از سطوح آبیاری افزایش دهد. همچنین مقایسه میانگین اثر ترکیب تیماری کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون و مایکوریزا نشان داد که بیشترین محتوای کلروفیل کل (۲/۷۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ) در محلول‌پاشی توام نانوذرات با کاربرد میکوریزا بدست آمد که در مقایسه با عدم نانوذرات و میکوریزا از افزایش ۳۴ درصدی برخوردار بود (جدول ۷). برخی محققان اظهار داشتند که افزایش محتوای کلروفیل با کاربرد نانوسیلیکون می‌تواند از تاثیر این ماده در کاهش تولید پراکسید هیدروژن، فعالیت بیوفسفات

وزن صد دانه: مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بالاترین وزن صد دانه ($3/06$ گرم) در شرایط آبیاری کامل با کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا بدست آمد که در مقایسه با محدودیت شدید آبی (قطع آبیاری در مرحله آبستنی) و عدم کاربرد نانو آهن و سیلیکون و میکوریزا از افزایش $16/7$ درصدی برخوردار بود (جدول ۶). بخشی از کاهش وزن صد دانه می‌تواند ناشی از اثر محدودیت آبی بر کاهش محتوای کلروفیل کل (جدول ۶) و میزان فتوسنتز جاری باشد (جدول ۴). به طوری که در شرایط عدم کاربرد میکوریزا و نانو ذرات، محدودیت شدید آبی منجر به کاهش 41 درصدی وزن صد دانه در مقایسه با کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا در همین سطح از سطوح آبیاری شد (جدول ۶). این در حالی است که کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا با تعدیل اثرات ناشی از محدودیت آبی بواسطه افزایش وزن و حجم ریشه (جدول ۶)، افزایش محتوای کلروفیل (جدول ۷) و فتوسنتز جاری (جدول ۴) منجر به افزایش وزن صد دانه در تمامی سطوح آبیاری شد (جدول ۶).

تعداد دانه در سنبله و طول سنبله: در شرایط آبیاری کامل بیشترین تعداد دانه در سنبله (49) و طول سنبله ($16/69$ سانتی متر) در کاربرد نانوذرات و میکوریزا بدست آمد که از افزایش به ترتیب 25 و 20 درصدی در مقایسه با عدم کاربرد نانوذرات و میکوریزا در همین سطح از سطوح آبیاری برخوردار بود (جدول ۶). روند مشابهی نیز در دیگر سطوح آبیاری بدست آمد هر چند که میزان این افزایش در شرایط محدودیت شدید آبی، بیشتر از آبیاری کامل بود. طوری که در شرایط محدودیت شدید آبی، کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا از افزایش به ترتیب 30 و 25 درصدی در مقایسه با عدم کاربرد نانوذرات و میکوریزا در همین سطح از سطوح آبیاری برخوردار بود (جدول ۶). به نظر می‌رسد در شرایط محدودیت آبی تنش وارده با صدمه به دانه‌های گرده منجر به افزایش پوکی دانه‌ها و به تبع از آن کاهش تعداد دانه‌های تشکیل شده در سنبله می‌شود (دهقان و همکاران 2017). اولکه و همکاران (2004) بیان کردند در

شرایط خشکی به دلیل خشک شدن دانه گرده و کاهش میزان گل‌های تلقیح شده، به دلیل افزایش درصد دانه‌های پوک، تعداد دانه در سنبله کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی نیز مبنی بر کاهش تعداد دانه در سنبله با محدودیت آبیاری در مرحله گرده افشانی به علت عقیم شدن گل‌های انتهایی سنبله، توسط دیگر محققان گزارش شده است (مصطفی و همکاران 1996).

بخشی از افزایش تعداد دانه در سنبله و طول سنبله در کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا می‌تواند ناشی از تأثیر این عوامل بر افزایش وزن و حجم ریشه‌ای (جدول ۶) باشد که ضمن افزایش دسترسی گیاه به آب و عناصر غذایی، در تعدیل اثرات ناشی از تنش اکسیداتیو و بهبود محتوای کلروفیل (شکل ۲) و فتوسنتز جاری (شکل ۱) موثر بوده و در نهایت به افزایش تعداد دانه در سنبله و در نتیجه طول سنبله منجر شده است. نتایج مشابهی نیز مبنی بر بهبود تعداد دانه در سنبله گیاه جو با کاربرد نانوسیلیکون (قربانیان و همکاران 2017) و قارچ‌های میکوریزیایی (ابوقلیا و خلف اله 2008) در شرایط تنش خشکی گزارش شده است.

وزن و حجم ریشه: وزن و حجم ریشه تحت تأثیر سطوح آبیاری، محلول‌پاشی نانوذرات آهن و سیلیکون و میکوریزا قرار گرفت (جدول ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیشترین وزن و حجم ریشه از کاربرد میکوریزا در شرایط آبیاری کامل و با کاربرد توام نانوسیلیکون و آهن و کمترین آن در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی و عدم کاربرد میکوریزا و نانوذرات بدست آمد (جدول ۶). به نظر می‌رسد در شرایط محدودیت آبی، کاهش میزان فتوسنتز (جدول ۴) منجر به کاهش انتقال مواد فتوسنتزی و تقسیم سلولی، توقف رشد ریشه و در نهایت کاهش وزن ریشه می‌شود (شریفانی و همکاران 2021). در حالیکه گیاهان برخوردار از میکوریزا از طریق ایجاد هیف و گسترش این سیستم در طول ریشه، ضمن کمک به جذب بهتر رطوبت و عناصر غذایی توسط گیاه، منجر به افزایش وزن و حجم ریشه (جدول ۶) و تحمل بهتر گیاه نسبت به شرایط نامساعد محیطی می‌شود (تورک و همکاران

(۲۰۰۶). سیلیکون نیز تحت شرایط تنش می‌تواند با حفاظت از استوانه آوندی به عنوان یک حامل مکانیکی، با سخت شدن دیواره سلولی استوانه آوندی و بافت آندودرمی، رشد طولی ریشه را افزایش دهد (دانتوف و همکاران ۲۰۰۱). از این رو کاربرد سیلیکون موجب افزایش رشد و توسعه حجمی و وزنی ریشه‌ها می‌شود (سان و همکاران ۲۰۰۵). آهن نیز به دلیل اینکه جز اصلی ساختار کلروفیل است، در نتیجه کاربرد آن به خصوص در شرایط محدودیت آبی که امکان جذب این عنصر کم است می‌تواند ضمن افزایش محتوای کلروفیل کل (جدول ۷)، در بهبود فتوسنتز جاری (جدول ۶) و به تبع از آن در افزایش وزن و حجم ریشه موثر واقع شود. به بیانی دیگر بخش دیگری از افزایش وزن و حجم ریشه به واسطه نانو آهن و سیلیکون را می‌توان به اثر این مواد در گسترش شاخص سطح برگ و بهبود فتوسنتز (جدول ۶) نسبت داد. در این راستا نظری و همکاران (۲۰۲۱) 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 تریتیاله شد.

عملکرد دانه: عدم کاربرد نانو آهن و سیلیکون و مایکوریزا در شرایط تنش شدید (قطع آبیاری در مرحله آبستنی)، موجب کاهش ۲۶ درصدی عملکرد دانه نسبت به کاربرد نانوذرات و مایکوریزا در این سطح از سطوح آبیاری شد (جدول ۶). بخشی از اثر سودمند کاربرد نانو سیلیکون و آهن و مایکوریزا در تمامی سطوح آبیاری را می‌توان به افزایش شاخص سطح برگ و وزن و حجم ریشه (جدول ۶)، محتوای کلروفیل کل (جدول ۷) و میزان فتوسنتز جاری (جدول ۴) و تعداد دانه در سنبله نسبت داد. به نظر می‌رسد محدودیت آبی، از بزرگ شدن سلول پیش از تقسیم سلولی جلوگیری نموده و تعداد دانه‌های لقاح یافته و لقاح‌های موفق را کاهش می‌دهد که نتیجه این عوامل از طریق بازداری مراحل مختلف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مانند فتوسنتز، جذب و انتقال یونی و عملکرد را محدود می‌سازد (بلوم ۲۰۰۵)، ضمن آنکه با افزایش محدودیت آبی، به دلیل فرصت کمتر گیاه برای انتقال مواد

فتوسنتزی به سمت بخش اقتصادی، عملکرد دانه کاهش می‌یابد (کرمولاچاپ و همکاران ۲۰۱۴). بخشی از بهبود عملکرد دانه با کاربرد نانو اکسید آهن می‌تواند ناشی از مقادیر بالای pH در خاک آزمایشی (جدول ۲) باشد که امکان دسترسی گیاه به آهن موجود در خاک را که از عناصر تعدیل کننده در شرایط تنش است با مشکل مواجه می‌سازد ولی محلول‌پاشی نانو اکسید آهن با تعدیل بخشی از اثرات ناشی از شرایط تنش، افزایش محتوای کلروفیل (جدول ۷) و شاخص سطح برگ (جدول ۶) و فتوسنتز جاری (جدول ۴) منجر به افزایش عملکرد دانه شده است. محلول‌پاشی نانو سیلیکون نیز از طریق کاهش تخریب رنگدانه‌ها و بهبود ساختار و محتوای کلروفیل (جدول ۷) موجب می‌شود که فتوسنتز جاری تداوم بیشتری داشته و همین امر می‌تواند به بهبود عملکرد دانه در شرایط محدودیت آبی منجر شود (بایبوردی ۲۰۱۶). برخی پژوهشگران، افزایش مقاومت به خشکی در گیاهان با کاربرد نانو سیلیکون را، به حفظ توازن آب و بهبود کارایی فتوسنتزی، نسبت دادند (سوبرامانیان و همکاران ۲۰۰۶).

نتیجه گیری

نتایج نشان دادند در تمامی سطوح آبیاری، کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون با مایکوریزا به صورت توأم و منفرد نقش چشمگیری در افزایش محتوای کلروفیل، شاخص سطح برگ، وزن و حجم ریشه، فتوسنتز جاری و سهم این فرایند عملکرد دانه داشت. ولی برخلاف این صفات ذکر شده مقادیر انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی و سهم مشارکت ذخایر ساقه و کل اندام هوایی در عملکرد دانه در شرایط محدودیت شدید آبی و عدم کاربرد نانوذرات آهن و سیلیکون و مایکوریزا، در مقایسه با آبیاری کامل و کاربرد مایکوریزا و نانوذرات آهن و سیلیکون، افزایش یافت. از آنجایی که تشکیل دانه حاصل دو انتقال ماده خشک و فتوسنتز جاری است. به نظر می‌رسد در شرایط آبیاری کامل با کاربرد مایکوریزا و نانوذرات آهن و سیلیکون به صورت منفرد یا توأم، چون تعادل بین منبع (برگها) و مقصد (دانه‌ها) به نحو

به طور کلی بر اساس نتایج بررسی حاضر می‌توان اظهار داشت که کاربرد میکوریزا با نانوذرات آهن و سیلیکون در تمامی سطوح آبیاری به خصوص در شرایط محدودیت شدید آبی، با تعدیل بخشی از اثرات منفی ناشی از تنش، می‌تواند در بهبود عملکرد دانه چاودار مفید باشد.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از بخشی از پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول مقاله می‌باشد که نویسندگان مراتب قدردانی خود را از یکایک همکاران دخیل ارجمند در دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی اعلام می‌دارند.

مناسبی برقرار می‌شود و مواد تولیدی منبع به دلیل بهبود فتوسنتز جاری و افزایش سهم این فرایند در عملکرد دانه، 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 قطع آبیاری در مرحله آبستنی (محدودیت شدید آبی) و عدم کاربرد نانوذرات آهن و میکوریزا، کاهش محتوای کلروفیل و شاخص سطح برگ از جمله صفاتی هستند که منجر به کاهش فتوسنتز جاری و عدم توانایی منابع در تامین نیاز مقاصد (دانه-ها) می‌شود. در چنین شرایطی است که 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 جلوگیری نماید.

منابع مورد استفاده

- Aalipour H, Nikbakht A, Etemadi N, Rejali F and Soleimani M. 2020. Biochemical response and interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria during establishment and stimulating growth of Arizona cypress (*Cupressus arizonica* G.) under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 261: 108-123.
- Abo-ghalia HH and Khalafallah AA. 2008. Responses of wheat plants associated with arbuscular mycorrhizal fungi to short-term water stress followed by recovery at three growth stages. *Journal of Applied Science Research*, 4: 570-580.
- Aghaei F, Seyed Sharifi R and 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 with English Abstract). <https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.85595.1280>
- Aghaei F, Seyed Sharif R and Farzaneh S. 2024. Effects of nano iron-silicon oxide on yield and some biochemical and physiological characteristics of *Triticale* under salinity stress. *Silicon Journal*, 32-38. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02917-w>
- Ahmadi Nouraldinvand F, Seyed sharifi R, Siadat SA and Khalilzadeh R. 2021. Effects of nano silicon concentrations and bio-fertilizer on yield and grain filling components of wheat in different irrigation regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 19(1): 91-105. (In Persian with English Abstract). DOI: 10.22067/jcesc.2021.67258.0
- Ahmed M, Ul-hassen F and Khurshid Y. 2011. Does silicon and irrigation have impact on drought tolerance mechanism of sorghum? *Agricultural Water Management*. 98(12):1808-1812. <https://doi.org/10.1016/j.agw.2011.07.003>
- Al-Karaki GN, McMichael B and Zak J. 2004. Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza*, 14: 263-269.
- Arnon AN. 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23: 112-121.
- Asensio DF, Rapparini J and Penuelas J. 2012. AM fungi root colonization increases the the production of essential isoprenoids vs. nonessential isoprenoids especially under drought stress conditions or after jasmonic acid application. *Phytochemistry*, 77:149-161. DOI: 10.1016/j.2011.12.012

- Asseng S and Van Herwaarden AF. 2003. Analysis of the benefits to wheat yield from assimilates stored prior to grain filling in a range of environments. *Plant and Soil*, 256: 217-239.
- Bahrani A, Heidari Sharif Abad H, Tahmasebi Sarvestani Z, Moafpourian GH and Ayneh Band A. 2011. Remobilization of dry matter in wheat: effects of nitrogen application and post-anthesis water deficit during grain filling, *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 39:4, 279-293, DOI: 10.1080/ 0114 0671.2011.599397
- Bardar MD, Kraljevic-Balalic Marija M and Borislav D. 2008. The parameters of grain filling and yield components in common wheat (*Triticum aestivum* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum* L. Var. Durum). *Central European Journal of Biology*, 3(1) : 75-82.
- Basal O and Szabo A. 2020. Ameliorating drought stress effects on soybean physiology and yield by hydrogen peroxide. *Agriculture Conspectus Scientificus*, 85 (3) : 211-218.
- Begum N, Qin C, Ahanger MA, Raza S, Khan MI, Ashraf M, Ahmed N and Zhang L. 2019. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10: 1-15.
- Blum A. 2005. Drought resistance, water use efficiency, and yield potential are they compatible, dissonant, or mutually exclusive. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56(11): 1159-1168.
- Boomsma CR and Vyn TJ. 2008. Maize drought tolerance: Potential improvements through arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Field Crops Research*, 108(1): 14-31.
- Buba T and Muhammad SY. 2020. Combine effects of soil nutrient levels and mycorrhiza inoculums from soils under parkia biglobosa and tamarindus indica on chlorophyll content of some cereal and legume crops. *Scientific Africa*, 8: 36-49.
- 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(7): 832-850.
- Dadashzadeh S and Seyed Sharifi R. 2018. Interaction of irrigation cut, biofertilizers and foliar application of iron on yield and some morphological traits of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Crop Physiology*. 6(9): 5-25. (In Persian).
- Datnoff LE, Synder GH and Korndorfer GH. 2001. *Silicon in agriculture*. Elsevier. Amesterdam. 285 p.
- Dehghan M, Balouchi HR, Yadavi AR and Safikhani F. 2017. Effect of foliar application of brassinolide on grain yield and yield components of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. Sirvan under terminal drought stress conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 19(1): 40-56. (In Persian with English Abstract). DOI: 20.1001.1. 15625 540.1 39 6.19.1.4.0
- Ebadi N, Seyed Sharifi R and Narimani H. 2020. Effects of supplementary irrigation and biofertilizers on grain yield, dry matter remobilization and some physiological traits of barley (*Hordeum vulgare* L.) under rainfed condition. *Journal of Crop Production and Processing*, 10(2):123-135. (In Persian with English Abstract). DOI:10.471 76/ jcpp. 10. 2.25857
- Ehdaei B and Wanies G. 1996. Genetic variation for contribution of pre anthesis assimilates to grain yield in spring wheat. *Journal of Genetics and Breeding*, 50: 47-56.
- Epstein E and Bloom A. 2005. *Mineral Nutrition of Plants Principles and Perspectives*. 2nd ed. Sinecure Associates Sunderland Mass Sinauer Associates Inc.
- Feng Y, Kreslavski VD, Shmarev AN, Ivanov AA, Zharmukhamedov SK, Kosobryukhov A, Yu M, Allakhverdiev SI and 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.

- Ghorbanian H, Janmohammadi M, Ebadi-Segherloo A and Sabaghnia N. 2017. Genotypic response of barley to exogenous application of nanoparticles under water stress condition. In *Annales Universitatis Mariae Curie-Sklodowska, sectio C–Biologia*. 72 (2). <https://doi.org/10.17951/c.2017.72.2.15-27>
- Giri B and Mukerji KG. 2004. Mycorrhizal inoculant alleviates salt stress in *Susana aegyptiaca* and *Sesbania grandiflora* under field conditions, evidence for reduced sodium and improved magnesium uptake. *Mycorrhiza*, 14: 307-312.
- Gong HJ, Chen KM, Chen G, Wang S and Zhang CL. 2003. Effects of silicon on growth of wheat under drought. *Journal of Plant Nutrition*, 26 (5): 1055-1063.
- Hadi H, Seyed Sharifi R and Namvar A. 2016. *Phytoprotectanta and Abiotic Stresses*. Urmia University press. 382 pp.
- Hochmuth G. 2011. Iron (Fe) Nutrition of Plants. University of Florida If as Extension. SI 353.
- Karmolachab A, Bakhshandeh AM, Gharineh MH, Moradi-Talavat MR and Fathi GH. 2014. Effect of silicon application on morphophysiological, yield, and seed mineral elements content of wheat under water stress. *Agricultural and Gardening Production and Processing Journal*, 14:133-144.
- Liang Y, Zhu Y and Christie P. 2006. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Enviroment Pollution*, 147(2): 422-428. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.06.008
- Liu Y, Zhang P, Li M, Chang L, Cheng H, Chai S and 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>
- Merwad AR, Desoky ESM and Rady MM. 2018. Response of water deficit-stressed *Vigna unguiculata* performances to silicon, proline or methionine foliar application. *Scientia Horticulturae*, 228, 132-144.
- Moustafa MA, Boersma LB and Kyonstad WE. 1996. Response of four spring wheat cultivars to drought stress. *Crop Science*, 36: 982-986.
- Narimani H and 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.
- Nazari Z, Seyed Sharifi R and Narimani H. 2021. Effect of bio fertilizers, nano silicon and water limitation on current photosynthesis and dry matter transfer of Triticale. *Crop Physiology*. 13 (51): 5-24. (In Persian).
- Narimani H, Seyed Sharifi R and M Sedgh. 2022. Effect of biofertilizer and putrescine application on grain filling components and dry matter remobilization of triticale (*Triticosecale* Wittmack) under water limitation conditions. *Cereal Research*, 11 (4): 359-373. doi: 10.22124/CR.2022.22374.1726
- Oelke EA, Oplinger ES, Teynor TM, Putnam DH, Doll KA, Kelling BR, Durgan D and Noetzel DM. 2004. Safflower. *Altern Field Crops Manual*, 1-8.
- Raklami A, Bechtaoui N, Tahiri A, Anli, M., Meddich, A and Oufdou, K. 2019. Use of rhizobacteria and mycorrhizae consortium in the open field as a strategy for improving crop nutrition, productivity and soil fertility. *Frontiers in Microbiology*, 10,1106.
- Rehman A, Khan S, Sun F, Peng Z, Feng K, Wang N, Jia Y, Pan Z, He S, Wang L, Qayyum A, Du X and 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.
- Savvas D and Ntatsi, G. 2015. Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196: 66-81.
- Schutz H and Fangmier E. 2001. Growth and yield responses of spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Minaret) to elevated CO₂ and water limitation. *Environmental Pollution*, 114: 187-194.

- Seyed Sharifi R and Khalilzadeh R. 2018. Cereal Crop Production. University of Mohaghegh Ardabili press. 400 pp.
- Seyed Sharifi R and Siahkhalaki MS. 2017. Effects of biofertilizers on growth indices and the contribution of dry matter remobilization in grain yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). Plant Biology, 28(2):326-346. DOI: 20.1001.1.23832592.1394.28.2.11.8
- Subra Manian KS, Santhane Krishnan P and Bala subramanian P. 2006. Responses of field grown tomato plants to arbuscular mycorrhizal fungal colonization under varying intensities of drought stress. Scientia Horticulture, 107: 245-253.
- Sun CW, Liang YC and Romheld V. 2005. Effects of foliar- and root applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildew in cucumis sativus. Journal of Plant Pathology, 54: 678-685.
- Tawfk MM, Mohamed MH, Sadak MSh and Thalooth AT. 2021. Iron oxide nanoparticles effects on growth, physiological traits and nutritional contents of Moringa oleifera grown in saline environment. Bulletin of the National Research Centre, 45:177.
- Tripathi DK, Singh S, Singh VP, Prasad SM, Chauhan DK and Dubey NK. 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.
- Turk MA, Assaf TA, Hameed KM and Al-Tawaha AM. 2006. Effect of soil amendment with olive mill by products under soil solarization on growth and productivity of faba bean and their symbiosis with mycorrhizal. World Journal Agricultural Science, 2(1) : 1817-3047.
- Usman M, Farooq M, Wakeel A, Nawaz A, Cheema SA, Rehman Hu, Ashraf I and Sanaullah M. 2020. Nanotechnology in agriculture: current status, challenges and future opportunities. Science of The Total Environment, 721, 137778.
- Verma KK, Liu XH, Wu KC, Singh RK, Song QQ, Malviya MK, Song XP, Singh P, Verma CI and Li YR. 2020. The impact of silicon on photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under different soil moisture levels. Silicon, 12: 1355–1367.
- Wang M, Christie P, Xiao Z, Wang P, Lio J and Xia R. 2008. Arbuscular mycorrhizal enhancement of iron concentration by Poncirus trifoliata L. Raf and Citrus reticulata Blanco grown on sand medium under different pH. Biology and Fertility of Soils, 45: 65-72.
- Yang J and Zhang J. 2006. Grain filling of cereals under soil drying. New Phytologist, 169, 223-236.
- Yang SY. 2018. Trends of world cereals and pulses following the human populations. Biomedical Journal of Scientific and Technical Research, 11(3): 8509-8512.