نشریه علمی پژوهشی دانش کشاورزی و تولید پایدار
جلد ۳۴ شماره ۳ / پاییز ۱۴۰۳/ صفحات ۲۱۵-۱۹۳

Efficiency of Phytoprotectants and Phosphorus Solubilizing Bacteria in Modulating of Water Deficit Effects on Wheat

Ali Namvar [1], Hashem Hadi [2*], Raouf Seyedsharifi [3]

Received: 10 September 2023 Accepted: 22 February 2024
1-PhD. Student, Dept. of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran.
2-Associ. Prof., Dept. of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran.
3-Prof., Dept. of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
*Corresponding Author Email: h.hadi@urmia.ac.ir

Abstract

Background and Objective: Drought stress is one of the most common limiting factors for crop production.The present study is aimed to investigation of the effectiveness of external phytoprotectants application and phosphorus-solubilizing bacteria on the tolerance capacity of wheat against drought stress.

Materials and Methods: Field studies were carried out for two years at the research farm of the Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili. Experiment was conducted as a split plot factorial based on randomized complete block design with three replications. The main factor included drought stress at three levels [irrigation at 80% of field capacity (no stress), irrigation at 65% of field capacity (moderate stress) and irrigation at 50% of field capacity (severe stress)]. Sub factor was combination of external phytoprotectants application at five levels [Distilled water as control, Ascorbic acid (1 mM), Tocopherol (1 mM) , Silicon (1 mM) and Zinc NPS (1 mM) and inoculation with phosphorus-solubilizing bacteria at two levels (with and without inoculation)].

Results: The severe water limitation (50% field capacity) compared to non-stress conditions (irrigation at 80% field capacity), led to a significant decrease in wheat yield and yield components. However, the application of organic (ascorbic acid and tocopherol) and mineral (silicon and zinc NPS) phytoprotectants, as well as inoculation with phosphorus-solubilizing bacteria were significant on Chl *a*, Chl *b* content and also, leaf area index and increment of the effective compounds in plant tolerance under stress conditions such as carotenoieds, prolin and slouble sugars. Application of ascorbic acid, silicon, zinc and tocopherol under non-stress conditions (irrigation at 80% field capacity) increased grain yield 12.3, 7.7, 4.7 and 2.9% respectively compared to no application of stress modulators at the same level of irrigation. Also under the severe water limitation, application of stress modulators increased grain yield 28, 18.2, 17.3 and 9.3% in compared to no application of stress modulators at the same level of irrigation

Conclusion: It seems that application of phytoprotectants and inoculation with phosphorus-solubilizing bacteria, can increase grain yield of wheat under water deficit conditions due to improve Chl *a*, Chl *b* content and also, leaf area index and increment of compatible osmolytes such as prolin and slouble sugars.

Keywords: Biofertilizer, Drought Stress, Irrigation, Phytoprotectant, Yield

CC BY NC

DOI: 10.22034/SAPS.2024.58381.3114

کارآیی محافظ‌های گیاهی و باکتری حل‌کننده‌ی فسفر در تعدیل اثرات کمبود آب بر گندم

علی نامور[۱]، هاشم هادی[۲*]، رئوف سیدشریفی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۶/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۳

۱- دانشجوی دکتری گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- دانشیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۳- استاد گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
* مسئول مکاتبه: Email: h.hadi@urmia.ac.ir

چکیده

مقدمه و اهداف: تنش خشکی یکی از شایع‌ترین عوامل محدودکننده‌ی تولید گیاهان زراعی به‌شمارمی‌رود. مطالعه‌ی حاضر در راستای بررسی میزان تاثیرگذاری کاربرد منابع خارجی محافظ‌های گیاهی مختلف و باکتری حل‌کننده‌ی فسفر روی توان تحملی گندم در برابر تنش خشکی صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها: مطالعات مزرعه‌ای به‌مدت دو سال زراعی در مزرعه‌ی تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی اجرا گردید. آزمایش به صورت اسپیلت پلات فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوکهای کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل تنش خشکی در سه سطح [آبیاری در ۸۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون تنش)، آبیاری در ۶۵ درصد ظرفیت زراعی (تنش متوسط) و آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش شدید)] بود. عامل فرعی به ترکیب دو تیمار کاربرد منابع خارجی محافظ‌های گیاهی در پنج سطح (آب مقطر به‌عنون شاهد، آسکوربیک اسید (۱ میلی‌مولار)، آلفا توکوفرول (۱ میلی‌مولار)، سیلیکون (۱ میلی‌مولار) و نانو ذرات روی (۱ میلی‌مولار) و تلقیح با باکتری حل‌کننده‌ی فسفر در دو سطح (با تلقیح و بدون تلقیح) اختصاص یافت.

یافته‌ها: محدودیت شدید آبیاری (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) در مقایسه با شرایط بدون تنش (آبیاری در ۸۰ درصد ظرفیت زراعی) منجر به کاهش معنی‌داری در عملکرد و اجزای عملکرد گندم گردید. با این وجود، استفاده از محافظ‌های گیاهی آلی (آسکوربیک اسید و توکوفرول) و معدنی (سیلیکون و نانو ذرات روی) و همچنین، تلفیح با باکتری حل‌کننده‌ی فسفر بر محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و همچنین شاخص سطح برگ و ارتقای سطوح ترکیبات موثر در توان تحملی گیاه در شرایط تنش همچون کاروتنوییدها، پرولین و قندهای محلول معنی‌دار بود. کاربرد اسکوربیک اسید، سیلیکون، روی و توکوفرول در شرایط بدون تنش (آبیاری تا ۸۰ درصد ظرفیت زراعی) عملکرد دانه را به ترتیب ۱۲/۳، ۷/۷ ، ۴/۷ و ۲/۹ درصد در مقایسه با عدم کاربرد این تعدیل کننده های تنش در همین سطح از ابیاری افزایش داد. همچنین در شرایط تنش شدید، کاربرد تعدیل کننده های تنش (اسکوربیک اسید، سیلیکون، روی و توکوفرول) به ترتیب عملکرد دانه را ۲۸، ۱۸/۲ ، ۱۷/۳ و ۹/۳ درصد در مقایسه با عدم کاربرد این تعدیل کننده های تنش در همین سطح از ابیاری افزایش داد.

نتیجه گیری: به نظر میرسد استفاده از محافظ‌های گیاهی و تلقیح با باکتری حل‌کننده‌ی فسفر میتواند عملکرد گندم در شرایط کمبود آب را به دلیل بهبود محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و همچنین شاخص سطح برگ و ارتقای اسمولیت‌های سازگار همچون پرولین و قندهای محلول افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، تنش خشکی، کود زیستی، عملکرد، محافظ گیاهی

مقدمه

گندم از اولین گیاهانی است که توسط انسان اهلی شده و جزو مهم‌ترین گیاهان زراعی به‌شمار می‌رود چرا که، زراعت آن در مناطق مختلف و شرایط آب و هوایی متفاوت صورت گرفته و غذای اصلی اغلب مردم جهان را تشکیل می‌دهد. عواملی نظیر؛ هزینه‌های پایین، درآمد نسبتاً مناسب، سازگاری با مناطق مختلف، استفاده از کاه آن جهت تغذیه دام و غیره، باعث شده است که این محصول روز به روز بیشتر مورد توجه کشاورزان قرار گیرد (کریم و همکاران ۲۰۱۲، علی و همکاران ۲۰۱۹، ایشاق و همکاران ۲۰۲۱).

با این‌وجود، گندم در طول فصل رشد با تنش‌های محیطی مختلفی مواجه می‌شود که منجر به کاهش عملکرد این گیاه زراعی می‌گردد. تنش خشکی بارزترین تهدید برای سیستم‌های کشاورزی به‌شمار می‌رود که در مناطق مختلف، حداقل در طول دوره‌ای از رشد، کارکرد و شرایط حیات گیاهان زراعی را متاثر می‌سازد (بوخاری و همکاران ۲۰۲۱). گندم نیز از این قاعده مستثنی نیست و این امر در زمین‌هایی که کشت و کار گندم در آن‌ها به‌صورت دیم صورت می‌گیرد، مشهودتر است (رانا و همکاران ۲۰۱۳). تنش خشکی می‌تواند بسیاری از جنبه‌های رشد و نموی گیاه را تحت تاثیر قرار دهد. محدودیت میزان آب قابل دسترس بر آماس سلول‌ها، پایداری غشاهای سلولی، باز و بسته شدن روزنه‌ها، فتوسنتز، تنفس و تعرق اثر گذاشته و از فرآیندهایی که به‌صورت مستقیم به وجود آب بستگی دارند (نظیر؛ فعالیت‌های آنزیمی)، ممانعت به‌عمل می‌آورد (آزوز و احمد ۲۰۱۵، سه‌لیمان و همکاران ۲۰۲۱). کاهش رشد گیاهان زراعی در شرایط تنش خشکی به‌واسطه‌ی محدود شدن فتوسنتز صورت می‌گیرد (آهلووالیا و همکاران ۲۰۲۱). تنش خشکی با کاهش سطح برگ، انسداد روزنه‌ها، کاهش فعالیت‌های پروتوپلاسمی، کاهش تثبیت دی‌اکسیدکربن، کاهش سنتز پروتئین و کلروفیل، موجب کاهش فتوسنتز می‌شود (حسین و همکاران ۲۰۱۶). با این‌وجود، به‌واسطه‌ی به‌کارگیری برخی از راه‌کارهای مدیریتی، می‌توان توان تحمل تنش خشکی در گیاهان را بالا برده و صدمات ناشی از حضور این عامل تنش‌زا را تا حدودی تعدیل نمود. در این راستا، استفاده از منابع خارجی محافظ‌های گیاهی نظیر؛ هورمون‌های گیاهی، محافظ‌های اسمزی، آنتی‌اکسیدان‌ها و برخی عناصر، از روش‌هایی است که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. مطالعات متعددی نشان می‌دهند که اگر محافظ‌های گیاهی به درستی انتخاب شده و در غلظت و مرحله‌ی مناسب رشدی گیاه به‌کار گرفته شوند، می‌توانند اثرات جبرانی قابل قبولی بر روی عملکرد گیاهان در شرایط تنش داشته باشند (هادی و همکاران ۲۰۱۶، نامور و همکاران ۲۰۱۷).

آسکوربیک اسید و توکوفرول از ترکیبات کلیدی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی به‌شمار رفته و نقش بسیار موثری در تخفیف اثرات تنش اکسیداتیو دارند (مونه‌بوش ۲۰۰۵، فویر و نوکتور ۲۰۱۱). آسکوربیک اسید به‌عنوان بافر ردااکس در سلول‌های گیاهی عمل نموده و در تنظیم فرآیندهای رشد، نمو، متابولیسم و عکس‌العمل به تنش‌ها دخالت می‌نماید (ایشاق و همکاران ۲۰۲۱، نورین و همکاران ۲۰۲۱). به‌علاوه، آسکوربیک اسید به بازسازی آلفا توکوفرول و زئازانتین و همچنین، فعالیت فتوسیستم II کمک شایانی کرده و در کنترل توالی چرخه‌های سلولی و رشد و توسعه‌ی ریشه‌ها موثر است (فویر و نوکتور ۲۰۱۱، آزوز و احمد ۲۰۱۵، حافظ و قریب ۲۰۱۶). آسکوربیک اسید پیش‌ماده‌ی سنتز آنزیم آسکوربات پراکسیداز به‌شمار می‌رود که درتنظیف پراکسید هیدروژن، سوپراکسید، رادیکال هیدروژن و ممانعت از پراکسیداسیون لیپیدها حایز اهمیت است (احمد ۲۰۱۴، دوی‌ودی و همکاران ۲۰۱۹). مالیک و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی اثر کاربرد آسکوربیک اسید در دو رقم گندم تحت شرایط خشکی، گزارش کردند که استفاده از منابع خارجی آسکوربیک اسید در جهت عکس تنش خشکی عمل نموده و تیمار بوته‌های گندم با آسکوربیک اسید در شرایط کمبود آب، منجر به افزایش محتوای پرولین و کلروفیل تحت شرایط تنش خشکی میشود. شفیق و همکاران (۲۰۱۴)

در بررسی اثر محلول‌پاشی آسکوربیک اسید بر روی بوته‌های کلزای قرار گرفته در معرض تنش خشکی (۶۰ درصد ظرفیت زراعی)، کاهش مقادیر مالون‌دی‌آلدهید را در کاربرد آسکوربیک اسید در شرایط خشکی، گزارش کردند. نورین و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند که محلول-پاشی آسکوربیک اسید در جو تحت شرایط تنش، بالاترین مقادیر کلروفیل (a، b و کل) و محتوای پرولین را در مقایسه با بوته‌های تیمار نشده، به خود اختصاص داد.

از سوی دیگر، کنترل گونه‌های فعال اکسیژن، حفظ پایداری رداکس، ممانعت از پراکسیداسیون لیپیدها، حفاظت از کارکردهای غشایی (از جمله؛ غشاهای فتوسنتزی)، هدایت سیگنال‌ها، کنترل تنظیمات فیتوهورمونی و فرآیند پیری از بارزترین کارکردهای توکوفرول در شرایط تنش محسوب می‌گردند که به مقادیر این ترکیب آنتی‌اکسیدانی وابستگی بالایی نشان می‌دهند (مونه‌بوش ۲۰۰۵، آروم و مونه‌بوش ۲۰۱۰، علی و همکاران ۲۰۱۹). حضور توکوفرول تجمع کربوهیدرات‌ها را تسریع می‌کند (حسین و همکاران ۲۰۱۳). جیه و همکاران (۲۰۰۸) با به‌کارگیری سطوح مختلف توکوفرول (۰/۰۵، ۱ و ۱۰ میلی‌مولار) در شرایط تنش خشکی، بیان نمودند که تیمار گیاهان با این ترکیب، موجب ارتقای قابل توجه تجمع پرولین در حضور خشکی می‌شود. از سوی دیگر، مقادیر مالون‌دی‌آلدهید و پراکسیداسیون لیپیدها نیز در نتیجه‌ی استفاده از منابع خارجی توکوفرول کاهش می‌یابد. صادیق و همکاران (۲۰۱۸) اظهار داشتند که محلول‌پاشی آلفا توکوفرول (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) منجر به افزایش معنی‌دار محتوای کلروفیل a و b، میزان پرولین و اجزای عملکرد (تعداد دانه در بوته و وزن هزار دانه) در شرایط تنش خشکی شد. ایمان و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی تاثیر سه سطح از محلول-پاشی توکوفرول (صفر، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) در سویا مشاهده کردند که محتوای کلروفیل a و b، محتوای پرولین و اجزای عملکرد این گیاه واکنش مثبتی به تیمار توکوفرول نشان داده و در شرایط کمبود فرآهمی آب، افزایش معنی‌داری پیدا می‌کنند.

روی عنصری ضروری برای موجودات زنده محسوب می‌گردد. این عنصر فلزی می‌تواند نقش بسیار مهمی در افزایش تحمل فلزات سنگین، جلوگیری از تنش‌های آبی، حفاظت از صدمات گونه‌های فعال اکسیژن و ارتقای مقاومت در مقابل محدودیت‌های محیطی ایفا نماید (کریم و همکاران ۲۰۱۲، رامش‌رادی و همکاران ۲۰۱۷، ادریس و همکاران ۲۰۲۱). دخالت روی در بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه ثابت شده و اثرات مثبت کاربرد منابع خارجی روی در تنش‌های محیطی مختلف نظیر؛ دمای بالا، شوری و به‌خصوص خشکی در بسیاری از تحقیقات مشخص شده است (نامور و همکاران ۲۰۱۷، ستار و همکاران ۲۰۲۲). فاران و همکاران (۲۰۱۹) اظهار داشتند که روی موجب کاهش مقادیر مالون‌دی‌آلدهید و افزایش محتوای پرولین، سطح برگ، ارتفاع بوته و عملکرد گندم در شرایط کمبود آب می‌شود.

علاوه بر این، حضور سیلیکون که جزو عناصر کمیاب طبقه‌بندی می‌شود، اثرات مثبتی بر رشد و نمو گیاهان نشان می‌دهد (هادی و همکاران ۲۰۱۶). کاربرد منابع خارجی سیلیکون در شرایط تنش منجر به بهبود روابط آبی، ارتقای سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و بالا رفتن کارآیی سیستم فتوسنتزی و در نتیجه، بهبود مقاومت گیاهان در برابر عوامل نامساعد محیطی می-گردد (پوپه و سومر ۲۰۱۸، بوخاری و همکاران ۲۰۲۱، وانگ و همکاران ۲۰۲۱).

مقصودی و همکاران (۲۰۱۶) طی مطالعه‌ای اثرات کاربرد منابع خارجی سیلیکون بیان داشتند که هرچند کاربرد سیلیکون در هر دو شرایط تنش و بدون تنش موجب افزایش محتوای آب نسبی برگ‌ها، رنگدانه‌های فتوسنتزی و پایداری غشاهای پلاسمایی می‌گردد، ولی این تاثیر در شرایط تنش بسیار بارز و مشهودتر است. په‌ی و همکاران (۲۰۱۲) در گندم گزارش کردند که استفاده از یک میلی‌مولار سیلیکون، منجر به کاهش اثرات مخرب تنش خشکی می‌شود. این محققین اظهار داشتند که به‌کارگیری سیلیکون موجب افزایش محتوای کلروفیل برگ در گیاهان قرار گرفته در معرض تنش خشکی می‌گردد.

اوتمانی و همکاران (۲۰۲۱) در ارزیابی کاربرد منابع خارجی سیلیکون در گندم تحت شرایط کمبود آب، مشاهده کردند که حضور سیلیکون در تنش خشکی منجر به بالا رفتن شاخص کلروفیل شده و نشت یون‌ها را در مقایسه با بوته‌های تیمار نشده، به‌شدت کاهش می‌دهد. طی آزمایشی گزارش شد که کاربرد سیلیکون در گندم موجب بالا رفتن طول سنبله، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی در شرایط تنش خشکی می‌شود (احمد و همکاران ۲۰۱۵). بالا رفتن تعداد سنبله در واحد سطح، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، طول سنبله، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی با کاربرد منابع خارجی سیلیکون در گندم تحت شرایط تنش خشکی توسط بوخاری و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش شده است.

از سوی دیگر، استفاده از کودهای زیستی در کشت محصولات زراعی، می‌تواند در بهبود رشد گیاهان در شرایط مختلف محیطی نقش به‌سزایی داشته باشد. حضور این موجودات در محیط رشد گیاه و برقراری رابطه‌ی مناسب بین آن‌ها، می‌تواند در ارتقای توان مقاومتی گیاه در مقابل تنش‌های زیستی و غیرزیستی حایز اهمیت باشد (سیدشریفی و نامور ۲۰۱۵). باکتری حل کننده‌ی فسفر از مهم‌ترین میکروارگانیسم‌های خاک‌زی هستند که با استفاده از مکانیسم‌های خاصی، می‌توانند مقاومت گیاهان زراعی در برابر تنش خشکی را افزایش داده و اثرات بازدارنده‌ی این تنش را تا حدودی تعدیل نمایند (اعتصامی و ماهش‌واری ۲۰۱۸، یاداو ۲۰۲۱).

با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان اظهار داشت که مطالعه و بررسی اثرات استفاده از منابع خارجی محافظهای گیاهی در حضور باکتری حل کننده‌ی فسفر می‌تواند در ارتقای توان تحملی گیاهان زراعی مختلف از جمله گندم در شرایط تنش خشکی بسیار حایز اهمیت باشد، چرا که به‌واسطه‌ی شناسایی اثرات جبرانی این تیمارها و درک مکانیسم‌های دخیل در این امر، می‌توان تا حدودی اثرات مخرب تنش خشکی را کاهش داده و افت عملکرد به‌وجود آمده از این تنش را جبران نمود. از این‌رو، پژوهش حاضر به‌منظور مطالعه‌ی تاثیر کاربرد منابع خارجی محافظهای گیاهی مختلف و باکتری حل - کننده‌ی فسفر در تعدیل اثرات ناشی از محدودیت آبی در گندم انجام شد.

مواد روش‌ها

مطالعات مزرعه‌ای به‌مدت دو سال زراعی (۱۳۹۴ و ۱۳۹۵) در مزرعه‌ی تحقیقاتی دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی واقع در ۱۰ کیلومتری شرق اردبیل، در اراضی بابلان اجرا گردید. مزرعه در عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه‌ی شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه‌ی شرقی واقع شده و دارای ۱۳۵۰ متر ارتفاع از سطح دریا است. مشخصات آب و هوایی و نتایج آزمایش‌های فیزیکوشیمیایی خاک محل اجرای آزمایش در طول مطالعه، در جدول ۱ و ۲ ارایه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه‌ی محل آزمایش

عمق نمونه‌برداری (cm)	هدایت الکتریکی (ds/m)	pH	SP (٪)	رس (٪)	سیلت (٪)	شن (٪)	بافت
۰-۳۰	۲/۴	۷/۸	۴۷	۲۳	۴۲	۳۵	لومی
آهک (٪)	**کربن آلی (٪)**	**نیتروژن (٪)**	**فسفر (ppm)**	**پتاسیم (ppm)**	**روی (ppm)**	**ظرفیت زراعی (٪)**	**نقطه پژمردگی دایم (٪)**
۱۴/۴۵	۰/۶۲	۰/۰۶	۸/۴	۲۱۲	۰/۹	۲۷/۹۷	۱۲/۶۳

آزمایش به صورت اسپیلت پلات فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوکهای کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل تنش خشکی در سه سطح (آبیاری در ۸۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون تنش)، آبیاری در ۶۵ درصد ظرفیت زراعی (تنش متوسط) و آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش شدید)) بود. عامل فرعی به ترکیب دو تیمار کاربرد منابع خارجی محافظهای گیاهی در پنج سطح (محلول‌پاشی آب مقطر به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی آسکوربیک اسید، محلول-پاشی توکوفرول، محلول‌پاشی نانو ذرات روی و محلول‌پاشی سیلیکون) و تلقیح با باکتری حل کننده‌ی فسفر در دو سطح (با تلقیح و بدون تلقیح) اختصاص یافت. تمامی مواد مورد استفاده از جمله آسکوربیک اسید، توکوفرول، نانوذرات روی و سیلیکون، باکتری حل کننده فسفات از شرکت جهان کیمیای ارومیه تهیه شد. آماده‌سازی زمین شامل شخم و دیسک‌زنی طی هر دو سال، در اوایل بهار انجام گرفت و عملیات کاشت، به محض مساعد شدن شرایط جوی، در ۱۲ و ۱۶ اردیبهشت (به‌ترتیب در سال اول و دوم) صورت پذیرفت. بذور گندم (رقم چمران) در کرت‌هایی متشکل از ۷ ردیف با فاصله‌ی بین ردیفی ۲۵ سانتی‌متر و تراکم ۴۰۰ بوته در متر مربع با سه تکرار کشت گردید. طول هر ردیف ۴ متر در نظر گرفته شد. در واقع، هر تکرار شامل ۳ کرت اصلی (سطوح مختلف آبیاری) و هر کرت اصلی در برگیرنده‌ی ۱۰ کرت فرعی (ترکیب سطوح مختلف محلول‌پاشی محافظهای گیاهی و تلقیح با باکتری حل کننده‌ی فسفر) بود. برای جلوگیری از تداخل تیمارهای مورد بررسی به خصوص سطوح آبیاری، بین کرت‌ها ۱/۵ متر و بین تکرارها ۳ متر به‌صورت نکاشت لحاظ گردید. به‌منظور تضمین جوانه‌زنی بذرها و استقرار یکنواخت بوته‌ها، تمام کرت‌های مورد مطالعه تا مرحله‌ی آغاز طویل شدن ساقه (مطابق با مرحله‌ی ۳۰ زادوکس) با توجه به نیاز منطقه آبیاری شدند و آبیاری‌های بعدی در طول فصل رشد، بر اساس تیمارهای آبیاری به‌کار گرفته شده، صورت پذیرفت. کنترل علف‌های‌هرز در طول دوره‌ی رشد به‌صورت دستی انجام شد. کوددهی با توجه به آزمون خاک صورت گرفت (جدول ۱)، ولی با توجه به بازدارندگی کود فسفاته از فعالیت باکتری حل کننده‌ی فسفر، مقادیر کود فسفاته مورد استفاده به نصف تقلیل داده شد. از این‌رو، کودهای نیتروژن، فسفر و پتاسیم به ترتیب در مقادیر ۹۰، ۳۵ و ۶۰ کیلوگرم در هکتار مورد استفاده قرار گرفت که به فرم اوره، سوپرفسفات‌تریپل و نیترات پتاسیم بودند. تمام مقادیر کودهای فسفر و پتاسیم به-هنگام کاشت به‌کار برده شد در حالی‌که، نصف کود نیتروژن به‌هنگام کاشت و نصف دیگر در مرحله‌ی طویل شدن ساقه اعمال گردید. سایر عملیات زراعی به-جز مواردی که تحت مطالعه بودند، به‌صورت یکسان برای تمام کرت‌ها به اجرا در آمد.

به‌منظور تلقیح بذور گندم به‌هنگام کاشت، از کود فسفات بارور ۲ استفاده شد که از دو نوع باکتری محلول‌کننده‌ی فسفر شامل؛ پانتوآ آگلومرانس (سویه‌ی P5) و سودوموناس پوتیدا (سویه‌ی P13) تشکیل شده (دارای 10^7 CFU تا 10^8) و به‌ترتیب با استفاده از دو سازوکار ترشح اسیدهای آلی و اسید فسفاتاز، باعث تجزیه‌ی ترکیبات فسفره‌ی نامحلول و در نتیجه، قابل جذب شدن آن‌ها برای گیاه می‌گردند. به‌منظور تلقیح، ابتدا بذور با مقداری آب مقطر مرطوب شد و محتوای بسته‌ی کود زیستی فسفات بارور ۲ که به فرم پودری می‌باشد، با بذور مخلوط گردید. به‌دلیل حساسیت باکتری‌ها به نور مستقیم، کلیه‌ی مراحل تلقیح در سایه و دور از نور خورشید صورت گرفت و بلافاصله پس از تلقیح، کشت بذور انجام شد.

محلول‌پاشی منابع خارجی محافظهای گیاهی شامل آسکوربیک اسید (۱ میلی‌مولار)، آلفا توکوفرول (۱ میلی‌مولار)، سیلیکون (۱ میلی‌مولار) و نانو ذرات روی (۱ میلی‌مولار)، در سه مرحله؛ در آغاز پنجه‌زنی، آغاز مرحله‌ی چکمه‌ای و آغاز گل‌دهی که به‌ترتیب معادل با مراحل ۲۰، ۴۰ و ۶۰ زادوکس است، به‌کار گرفته شد و محلول‌پاشی آب مقطر در کرت‌هایی که محافظهای گیاهی در آن‌ها اعمال نمی‌شد، به‌عنوان شاهد لحاظ گردید. برای تهیه‌ی محلول توکوفرول، ابتدا

مقدار تعیین‌شده‌ی این ترکیب در میزان بسیار کمی از متانول (در حد قطره) حل گردید و سپس با آب مقطر به حجم مورد نظر رسانده شد (لاالارخ و شهباز ۲۰۱۸). همچنین، به‌منظور افزایش حلالیت سیلیکون و نانوذرات روی، ابتدا این ذرات در آب دیونیزه به‌حالت معلق در آورده شده و سپس به‌مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه اولتراسونیک (۱۰۰ وات و ۴۰ کیلوهرتز) قرار گرفتند (ریضوان و همکاران، ۲۰۱۸). نانو ذرات روی استفاده شده در این مطالعه، اکسید روی بود که فرم سفید پودری داشت. این نانو ذرات دارای سطح ویژه‌ی بیشتر از ۳۰ مترمربع بر گرم، اندازه‌ی ذرات کوچک‌تر از ۳۰ نانومتر و خلوص ۹۹ درصد بودند.

جدول ۲- میزان دما و بارندگی منطقه‌ی مورد مطالعه طی دو سال زراعی

پارامتر / ماه	میانگین حداکثر دما (°C)		میانگین حداقل دما (°C)		میانگین ماهانه دما (°C)		میانگین بارندگی ماهانه (mm)	
	سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم
اردیبهشت	۲۱/۱	۲۱/۲	۸	۷/۶	۱۴	۱۲/۹	۲۶/۷	۳۵/۷
خرداد	۲۵/۵	۲۶	۱۱/۴	۹/۷	۱۸/۵	۱۷/۹	۱۰/۹	۲۶/۵
تیر	۲۷/۷	۲۶/۷	۱۴/۹	۱۳/۱	۲۱/۳	۱۹/۹	۹/۷	۷
مرداد	۲۶/۴	۲۹	۱۳/۲	۱۱/۸	۱۹/۸	۲۰/۴	۰/۹	۳/۶
شهریور	۲۴/۸	۲۳/۴	۱۱/۸	۱۰/۴	۱۸/۳	۱۶/۹	۳/۱	۰/۴

تیمارهای آبیاری به‌صورت آبیاری در ۸۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون تنش)، ۶۵ درصد ظرفیت زراعی (تنش متوسط) و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش شدید) اعمال گردید. زمان‌های آبیاری مزرعه بر اساس تعیین رطوبت خاک به روش وزنی از طریق نمونه‌برداری خاک در اواسط روز و عمق توسعه‌ی ریشه تعیین شد. به‌منظور یکسان بودن آب قابل دسترس برای گیاهان، میزان آب آبیاری برای هرکرت، با در نظر گرفتن عمق توسعه‌ی ریشه، مساحت کرت و ظرفیت زراعی خاک، بر حسب متر مکعب محاسبه و به کرت‌ها اضافه گردید. در این مطالعه، روش آبیاری سطحی مورد استفاده قرار گرفت و مقدار آب مورد استفاده، با کنتور آب کنترل شد. رابطه‌ی زیر در راستای محاسبه‌ی میزان آب آبیاری (In) بر حسب متر مکعب، به‌کار گرفته شد (رستم‌زا و همکاران ۲۰۱۱)؛

$$In = [(Fci - \Theta i) \times D \times A] / 100$$

در این رابطه، Fci: بیان‌گر مقدار رطوبت خاک در ظرفیت زراعی، Θi: نشان‌دهنده‌ی مقدار رطوبت خاک به‌هنگام نمونه‌برداری، D: عمق نفوذ ریشه (متر) و A: مساحت هر کرت (متر مربع) می‌باشد.

اندازه‌گیری صفات مورد مطالعه

عملکرد و اجزای عملکرد به‌هنگام رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه مورد ارزیابی قرار گرفت، در حالی‌که سایر صفات مورد مطالعه (شامل؛ شاخص سطح برگ، محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، محتوای پرولین، محتوای قندهای محلول، محتوای مالون‌دی‌آلدهید،) در اواسط دوره‌ی گل‌دهی (مطابق با مرحله‌ی ۶۵ زدوکس) و مدتی پس از اعمال آخرین مرحله از محلول‌پاشی محافظ‌های گیاهی، به‌ترتیبی که توضیح داده خواهد شد، اندازه‌گیری گردید.

جهت اندازه‌گیری شاخص سطح برگ، پنج بوته از خطوط اصلی هر کرت به تصادف انتخاب شده و سطح برگ آن‌ها توسط دستگاه سطح برگ‌سنج (LI-COR model 3100 LI Area Meter) اندازه‌گیری و شاخص سطح برگ برای هر کرت محاسبه گردید. در راستای اندازه‌گیری محتوای کلروفیل و کاروتنویید پرچم برگ، ۰/۱ گرم از پرچم برگ تازه با استفاده از ازت مایع پودر گردید و با ۲ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد مخلوط شد و در نهایت عمل ورتکس انجام گرفت. سپس، نمونه‌ها به‌مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردیدند. مقدار جذب نور محلول صاف‌شده‌ی عصاره‌ی پرچم برگ، در طول موج‌های ۶۴۵، ۶۶۳ و ۴۷۰ نانومتر به‌ترتیب برای کلروفیل a، کلروفیل

b و محتوای کاروتنوییدها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر یووی‌دار (PG Instrument LTD T80^{+} UV/VIS, UK) قرائت گردید. در نهایت، مقادیر رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی مطابق روابط زیر محاسبه و به‌صورت میلی‌گرم در گرم وزن تر (mg g^{-1} F_W) بیان شد (لیچتن‌تالر ۱۹۸۷).

Chl *a* (mg g^{-1} F_W) = 12.25 × $A_{663.2}$ – 2.79 × $A_{646.8}$

Carotenoids (mg g^{-1} F_W) = (1000 × A_{470} – 1.82 × Cl *a* – 85.02 × Cl *b*)/198

در این روابط، A مقدار جذب نمونه توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج مربوطه می‌باشد.

محتوای پرولین پرچم برگ، از طریق روش به‌یتس و همکاران (۱۹۷۳) تعیین گردید. بدین منظور، به ۰/۵ گرم نمونه‌ی برگ پرچم تازه‌ی پودر شده با ازت مایع، ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالیسیلیک سه درصد اضافه شد و محلولی یکنواخت تهیه گردید. سپس به‌مدت ۱۵ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. دو میلی‌لیتر از محلول صاف شده‌ی رویی هر نمونه به لوله‌های درب‌دار منتقل شد و سپس به هرکدام ۲ میلی‌لیتر معرف ناین‌هیدرین و ۲ میلی‌لیتر استیک اسید گلاسیال اضافه گردید. مخلوط حاصل به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در حمام آب گرم قرار داده شد. پس از سرد شدن لوله‌ها، محلول را به لوله‌های شیشه‌ای منتقل نموده و ۴ میلی‌لیتر تولوئن به هر لوله اضافه گردید. لوله‌های آزمایش به‌خوبی تکان داده شدند تا پرولین در تولوئن محلول شده و دو لایه‌ی کاملا مشخص حاوی تولوئن (لایه‌ی فوقانی قرمز رنگ) و فاقد تولوئن (لایه‌ی بی‌رنگ زیرین) تشکیل گردد. در نهایت، میزان جذب فاز رویی قرمز رنگ حاوی پرولین محلول، در طول موج ۵۲۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفوتومتر با بلانک تولوئن قرائت گردید. با استفاده از معادله‌ی رگرسیون و منحنی استاندارد حاصل از غلظت و جذب نوری محلول‌های استاندارد ال-پرولین، محتوای پرولین موجود در نمونه‌ها بر حسب میکرومول در گرم وزن تر (µmol g^{-1} F_W) محاسبه گردید.

محتوای قندهای محلول کل از طریق روش دوبویس و همکاران (۱۹۵۶) و با استفاده از فنل‌سولفوریک اسید اندازه‌گیری شد. بدین منظور، ۰/۱ گرم نمونه‌ی پرچم برگ تازه‌ی پودر شده با ازت مایع، با ۳ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد عصاره‌گیری گردید. نمونه‌های حاصل با استفاده از کاغذ صافی و قیف، صاف شده و به‌مدت ۵ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردیدند. سپس، به ۵۰ میکرولیتر از محلول‌های همگن صاف شده، فنل ۵ درصد (۰/۵ میلی‌لیتر) و سولفوریک اسید ۹۸ درصد (۲/۵ میلی‌لیتر) اضافه گردید. پس از افزودن اسید، مخلوط واکنش به‌مدت یک ساعت در دمای اتاق قرار داده شد. با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر میزان جذب نوری نمونه‌ها در طول موج ۴۸۵ نانومتر قرائت گردید. محتوای قندهای محلول کل با استفاده از منحنی استاندارد غلظت‌های مختلف گلوکز محاسبه و بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن تر (mg g^{-1} F_W) بیان گردید.

میزان مالون‌دی‌آلدهید با روش پیشنهادی هیت و پیکر (۱۹۶۸) تعیین شد. ۰/۵ گرم از بافت تازه‌ی پرچم برگ پودر شده با ازت مایع، در ۵ میلی‌لیتر از تری‌کلرو استیک اسید (TCA) ۰/۱ درصد (w/v) به‌صورت یکنواخت حل، و به‌مدت ۱۵ دقیقه در ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. سپس به ۲ میلی‌لیتر از محلول رویی، ۲ میلی‌لیتر تیوباربیوتریک اسید (TBA) ۰/۵ درصد (w/v) اضافه شد. مخلوط حاصل به‌مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب گرم ۹۵ درجه‌ی سانتی‌گرادی قرار داده شد و پس از این مرحله، واکنش آن با استفاده از حمام یخ متوقف گردید. در وهله‌ی بعد، نمونه‌ها به‌مدت ۵ دقیقه در ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند و جذب مایع رویی در طول موج ۵۳۲ نانومتر با اسپکتروفتومتر قرائت گردید. محتوای مالون‌دی‌آلدهید بر اساس ضریب خاموشی ۱۵۵ میلی‌مولار در سانتی‌متر (155 mM cm^{-1}) محاسبه گردید و در نهایت، بر حسب نانومول در گرم وزن تر (nmol g^{-1} F_W) بیان شد.

عملیات برداشت در هر کرت به‌صورت مجزا و با در نظر گرفتن زمان رسیدگی فیزیولوژیکی آن کرت صورت گرفت. تعداد روز از کاشت تا برداشت به‌عنوان طول دوره‌ی رشد هر کرت لحاظ گردید. به‌هنگام رسیدگی هر کرت، با در نظر گرفتن اثرات حاشیه‌ای، سطحی معادل با یک متر مربع برداشت گردید. بوته‌های برداشت شده به آزمایشگاه منتقل گردیده و پس از جداسازی سنبله‌ها، به‌صورت جداگانه به‌مدت ۴۸ ساعت

در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گرادی آون قرار داده شدند تا وزن خشک آن‌ها ثابت گردد. سپس، صفاتی مانند؛ سنبله در واحد سطح (تعداد)، عملکرد بیولوژیکی (گرم در واحد سطح) و عملکرد دانه (گرم در واحد سطح) در نمونه‌های خشک شده تعیین گردید. به‌صورت هم‌زمان، ۱۰ بوته به‌صورت تصادفی از هر کرت انتخاب شده و تعداد دانه در هر سنبله در آن‌ها تعیین شد (بوخاری و همکاران ۲۰۲۱). ارزیابی وزن هزار دانه (گرم)، از طریق شمارش بذور توسط دستگاه بذر شمار و توزین آن‌ها با ترازوی دیجیتال، صورت پذیرفت. در راستای ارزیابی معنی‌داری تیمارهای بررسی شده بر صفات مورد مطالعه، تجزیه‌ی واریانس (*ANOVA*) داده‌ها به کار گرفته شد. برای این‌منظور از نرم‌افزار *SAS* استفاده گردید. تفاوت‌های معنی‌دار بین میانگین‌های تیماری، با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (*LSD*) در سطح احتمال ۵ درصد ارزیابی شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه‌ی واریانس صفات مورد مطالعه در گندم تحت تاثیر تیمارهای آبیاری، کاربرد محافظ‌های گیاهی و تلقیح با باکتری حل کننده‌ی فسفر حاکی از آن بود که تمام تیمارهای به‌کار گرفته شده اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک و پنج درصد بر صفات عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، ارتفاع بوته، وزن هزار دانه، تعداد دانه در سنبله، تعداد سنبله در واحد سطح، طول دوره رشد، محتوای کلروفیل a وb، شاخص سطح برگ، محتوای مالون دی‌الدئید، محتوای پرولین و قندهای محلول داشت (جدول ۳ و ۴). اثر ترکیب تیماری رژیم-های مختلف آبیاری و محلول‌پاشی محافظ‌های گیاهی بر صفات عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد سنبله در واحد سطح، میزان کلروفیل *a* و *b*، محتوای کاروتنویید، محتوای پرولین و محتوای قندهای محلول معنی‌دار بود. از سوی دیگر، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیکی، ارتفاع بوته، تعداد دانه در سنبله، تعداد سنبله در واحد سطح، کلروفیل *a* و *b*، شاخص سطح برگ، محتوای پرولین و محتوای قندهای محلول نیز به‌صورت معنی‌داری تحت تاثیر اثر متقابل تیمارهای آبیاری و حضور کود زیستی قرار گرفتند. افزون بر این، کاربرد توام کود زیستی و محافظ‌های گیاهی اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه، ارتفاع بوته، تعداد دانه در سنبله، شاخص سطح برگ، محتوای پرولین و مقادیر قندهای محلول نشان داد (جدول ۳ و ۴).

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری، محافظ‌های گیاهی و کود زیستی

منابع تغییر	صفت / Df	میانگین مربعات						
		عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیکی	ارتفاع بوته	وزن هزار دانه	تعداد دانه در سنبله	تعداد سنبله در واحد سطح	طول دوره رشد
سال (Y)	۱	۸۲۹۷۹/۸۳ **	۲۷۲۵۰۴/۶۲ **	۴/۳۹ ns	۱/۳۴ ns	۱۰۶/۹۳ **	۶۳/۳۱ *	۴۰۸/۰۰ **
r × Y	۴	۳۳۶/۶۰	۱۲۶۴/۴۳	۱۴/۰۸	۰/۳۵	۰/۴۵	۳۶/۱۳	۰/۶۲
آبیاری (I)	۲	۹۰۷۷۸۴/۳۹ **	۲۷۵۶۲۹۱/۵۱ **	۱۵۴۳۵/۲۰ **	۵۲۱/۵۳ **	۹۵۳/۹۴ **	۸۳۳۸۷/۶۳ **	۲۹۶۰/۱۰ **
Y × I	۲	۲۴۵۶/۷۲ *	۳۱۸۴/۹۴ ns	۱۶/۷۱ ns	۱/۰۲ ns	۰/۷۳ ns	۷۴/۶۳ ns	۵۳/۲۷ **
r (Y × I)	۸	۲۴۱/۷۷	۷۵۷/۲۵	۲/۲۴	۰/۱۸	۰/۶۰	۵۳/۱۱	۱/۵۴
محافظ گیاهی (P)	۴	۲۰۷۶۰/۶۸ **	۶۹۱۳۱/۹۷ **	۳۶۹/۶۳ **	۲۰/۶۴ **	۳۱/۴۴ **	۱۱۴۱/۴۲ **	۴۶/۱۴ **
کود زیستی (B)	۱	۷۷۲۴۲/۵۰ **	۱۳۶۹۸۹/۳۱ **	۱۲۵۶/۴۸ **	۴۰/۷۴ **	۹۲/۲۷ **	۴۴۶۸/۲۵ **	۱۴۷/۶۰ **
Y × P	۴	۶۵/۹۴ ns	۴۰۹/۳۲ ns	۱/۳۳ ns	۰/۰۷ ns	۰/۳۳ ns	۱/۸۴ ns	۰/ ۷۱ ns
Y × B	۱	۷۱۴/۰۹ ns	۱۷۱۱/۹۲ ns	۲/۰۴ ns	۰/۰۴ ns	۰/۹۸ ns	۲/۵۸ ns	۰/ ۲۷ ns
I × P	۸	۱۰۴۹۳/۶۱ *	۱۴۵۵/۲۷ ns	۱۶/۱۹ ns	۱/۲۶ **	۰/۷۹ ns	۱۷۱/۳۰ *	۲/۳۵ ns
I × B	۲	۲۳۳۲۱/۶۶ **	۲۴۶۵۳/۰۳ **	۴۸/۲۳ *	۰/۳۸ ns	۱/۹۶ *	۹۱۰/۸۰ **	۵/۳۷ ns
P × B	۴	۸۸۷۵/۴۳ *	۲۳۱۲//۵۵ ns	۵۲/۶۰ *	۱/۰۲ ns	۱۲/۱۵ **	۲۴/۹۴ ns	۱/۰۳ ns
Y × I × P	۸	۲۵/۳۱ ns	۱۷۱/۷۹ ns	۰/۳۷ ns	۰/۰۳ ns	۰/۰۷ ns	۱/۷۴ ns	۰/۳۱ ns
Y × I × B	۲	۵۳/۹۳ ns	۷۶/۶۵ ns	۰/۲۲ ns	۰/۰۳ ns	۰/۱۵ ns	۰/۰۵ ns	۰/ ۰۰۵ ns
Y × P × B	۴	۱۷/۰۱ ns	۱۱۴/۷۱ ns	۰/۱۹ ns	۰/۰۴ ns	۰/۰۴ ns	۰/۷۴ ns	۰/۰۳۶ ns
I × P × B	۸	۴۵/۸۶ ns	۱۷۱/۱۷ ns	۵/۰۷ ns	۰/۳۸ ns	۰/۱۹ ns	۷/۶۰ ns	۰/۳۱ ns
Y × I × P × B	۸	۹/۰۵ ns	۵۸/۳۴ ns	۰/۱۶ ns	۰/۰۳ ns	۰/۰۱ ns	۱/۳۳ ns	۰/۰۶ ns
خطا	۱۰۸	۴۳۹/۶۴	۲۲۹۵/۵۳	۱۳/۹۹	۰/۴۴	۰/۶۴	۶۷/۳۲	۲/۲۴

ns، * و ** به‌ترتیب معنای غیرمعنی‌داری، معنی‌دار در سطح پنج درصد و معنی‌دار در سطح یک درصد می‌باشد.

جدول ۴- تجزیه‌ی واریانس صفات مورد مطالعه تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری، محافظ‌های گیاهی و کود زیستی

منابع تغییر	صفت / Df	میانگین مربعات						
		کلروفیل a	کلروفیل b	شاخص سطح برگ	محتوای مالون دی آلدهید	محتوای کاروتنویید	محتوای پرولین	قند محلول
سال (Y)	۱	۰/۱۹ ns	۰/۰۰۳ ns	۳/۷۰ **	۰/۷۶ *	۰/۰۰۱۵ ns	۰/۵۸ ns	۱۵/۵۹ **
r × Y	۴	۰/۰۴	۰/۰۱۵	۰/۳۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۴۹	۰/۳۳
آبیاری (I)	۲	۷۲/۲۷ **	۱۲/۱۹ **	۶۵/۱۷ **	۴۱۷/۵۹ **	۰/۵۷ **	۳۸۳/۲۹**	۱۴۲۳۵/۷۸**
Y × I	۲	۰/۶۱ *	۰/۱۴ **	۰/۲۸ ns	۰/۸۵ *	۰/۰۱۹ **	۲/۶۲ *	۱۱/۶۱ **
r (Y × I)	۸	۰/۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱	۰/۱۶
محافظ گیاهی (P)	۴	۱/۳۷ **	۰/۳۱ **	۱/۳۶ **	۱/۲۴ **	۰/۰۴ **	۲/۷۹ **	۴۵/۲۲ **
کود زیستی (B)	۱	۵/۲۹ **	۱/۰۴ **	۱/۹۹ **	۵/۲۹ **	۰/۰۹ **	۶/۳۲ **	۲۵۴/۹۶ **
Y × P	۴	۰/۰۰۶ ns	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۵ ns	۰/۰۳ ns	۰/۰۰۰۳ ns	۰/۰۰۶ ns	۰/۰۰۶ ns
Y × B	۱	۰/۰۱ ns	۰/۰۱ ns	۰/۳۵ ns	۰/۰۰۰۰ ns	۰/۰۰۰۴ ns	۰/۰۰۵ ns	۰/۰۸۷ ns
I × P	۸	۰/۲۸ **	۰/۰۷ **	۰/۶۱ *	۰/۰۲۱ ns	۰/۰۰۵ **	۰/۲۴ ns	۳۱/۳۱ **
I × B	۲	۰/۳۷ **	۰/۰۶ *	۱/۲۴ **	۰/۵۷ ns	۰/۰۰۱ ns	۱/۷۷ **	۱۵۴/۹۵ **
P × B	۴	۰/۰۸ ns	۰/۰۱ ns	۰/۵۲ *	۰/۰۶ ns	۰/۰۰۱۵ ns	۱/۰۴ *	۷/۸۰ *
Y × I × P	۸	۰/۰۰۵ ns	۰/۰۰۱ ns	۰/۰۰۸ ns	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۰۰۱ ns	۰/۰۱ ns	۰/۰۰۱ ns
Y × I × B	۲	۰/۰۰۱ ns	۰/۰۰۴ ns	۰/۰۰۱ ns	۰/۰۰۰۴ ns	۰/۰۰۰۰ ns	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۰۰۱ ns
Y × P × B	۴	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۰۰ ns	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۰۰۰ ns	۰/۰۰۰۰ ns	۰/۰۰۰۶ ns	۰/۰۰۱۸ ns
I × P × B	۸	۰/۰۰۹ ns	۰/۰۰۱ ns	۰/۰۱ ns	۰/۰۶ ns	۰/۰۰۰۱ ns	۰/۰۲ ns	۰/۲۹ ns
Y × I × P × B	۸	۰/۰۰۵ ns	۰/۰۰۰۵ ns	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۰۱ ns	۰/۰۰۰۰ ns	۰/۰۰۰۹ ns	۰/۰۰۱ ns
خطا	۱۰۸	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۰۰۸	۰/۲۵	۰/۴

ns، * و ** به‌ترتیب معنای غیرمعنی‌داری، معنی‌دار در سطح پنج درصد و معنی‌دار در سطح یک درصد می‌باشد.

بوته‌هایی که در ۸۰ درصد ظرفیت زراعی آبیاری شده بودند، بالاترین مقادیر عملکرد دانه و بیولوژیکی را نشان دادند (جدول ۵). همچنین، محلول‌پاشی آسکوربیک اسید و حضور کود زیستی نیز منجر به بالاترین عملکرد دانه و بیولوژیکی در گندم گردید. پایین‌ترین میزان عملکرد دانه و بیولوژیکی در گیاهان آبیاری شده در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، بدون محلول-پاشی محافظ‌های گیاهی و عدم تلقیح کود زیستی ثبت شد (جدول ۵). در سطوح مختلف آبیاری، آسکوربیک اسید، سیلیکون، نانو ذرات روی و توکوفرول، به‌ترتیب بالاترین کارآیی را در افزایش عملکرد دانه نشان دادند به‌طوری‌که بیشترین مقدار عملکرد دانه در بوته‌های تیمار شده با آسکوربیک اسید در سطح آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و کم‌ترین مقدار این صفت در عدم استفاده از محافظ‌های گیاهی و آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به‌دست آمد (جدول۷). از سوی دیگر، با در نظر گرفتن نتایج ارایه شده در جدول ۷، می‌توان اظهار داشت که استفاده از محافظ‌های گیاهی در تمام سطوح آبیاری به‌کار گرفته شده منجر به افزایش عملکرد دانه و بیولوژیکی در گندم گردید، هر چند کارآیی استفاده از این ترکیبات در آبیاری ۶۵ درصد زراعی (که شاید بتوان به‌عنوان تنش متوسط در نظر گرفت)، بالاتر بود. از سوی دیگر، تلقیح بوته‌های گندم در آبیاری ۸۰ و ۶۵ درصد ظرفیت زراعی منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد دانه و بیولوژیکی گردید ولی در آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی تاثیر معنی‌داری از خود نشان نداد (جدول ۸). بیشترین تاثیر مثبت حضور کود زیستی در سطح آبیاری ۶۵ درصد ظرفیت زراعی مشاهده گردید به‌طوری‌که، تلقیح در این سطح آبیاری به ترتیب موجب افزایش ۲۰/۸۷ و ۱۱/۶۸ درصدی عملکرد دانه و بیولوژیکی شد. در مورد اثر متقابل محافظ‌های گیاهی و کود زیستی نیز می‌توان اظهار داشت که استفاده از تمام محافظ‌های گیاهی مطالعه شده (آسکوربیک اسید، توکوفرول، سیلیکون و نانو روی) در حضور کود زیستی منجر به حصول عملکرد دانه‌ی بالاتری گردید هر چند بالاترین مقدار عملکرد دانه در بوته‌های تیمار شده با آسکوربیک اسید و کود زیستی مشاهده شد (جدول ۹).

جدول ۵- مقایسه‌ی میانگین اثرات آبیاری، محافظ‌های گیاهی و کود زیستی بر صفات مورد مطالعه در گندم

صفت / تیمار	عملکرد دانه (g.m-2)	عملکرد بیولوژیکی (g.m-2)	ارتفاع بوته (cm)	وزن هزار دانه (g)	تعداد دانه در سنبله	تعداد سنبله (m2)	طول دوره رشد (day)
آبیاری							
۸۰ درصد ظرفیت زراعی	۴۷۸/۰۰ **a**	۱۰۶۹/۰۵ **a**	۸۹/۳۴ **a**	۳۸/۷۰ **a**	۳۲/۷۴ **a**	۴۲۰/۹۹ **a**	۱۵۷/۸۶ **a**
۶۵ درصد ظرفیت زراعی	۳۸۲/۳۵ **b**	۹۱۵/۸۳ **b**	۷۸/۳۹ **b**	۳۶/۴۳ **b**	۲۹/۷۶ **b**	۳۹۴/۱۹ **b**	۱۵۲/۵۶ **b**
۵۰ درصد ظرفیت زراعی	۲۳۳/۸۹ **c**	۶۴۵/۷۳ **c**	۵۷/۷۵ **c**	۳۲/۸۵ **c**	۲۴/۸۴ **c**	۳۴۷/۳۳ **c**	۱۴۳/۹۵ **c**
محافظ گیاهی							
شاهد	۳۳۴/۸۸ **e**	۸۲۸/۱۱ **d**	۶۹/۸۰ **d**	۳۴/۹۰ **c**	۲۷/۸۳ **d**	۳۷۸/۹۵ **d**	۱۴۹/۷۵ **d**
آسکوربیک اسید	۳۹۷/۹۱ **a**	۹۴۴/۹۱ **a**	۷۵/۸۱ **bc**	۳۶/۷۶ **a**	۲۹/۲۱ **b**	۳۹۳/۲۶ **a**	۱۵۲/۷۵ **a**
توکوفرول	۳۵۱/۰۹ **d**	۸۵۶/۴۱ **c**	۷۵/۱۰ **c**	۳۵/۷۱ **b**	۲۸/۷۲ **c**	۳۸۵/۴۱ **c**	۱۵۱/۰۸ **c**
سیلیکون	۳۷۶/۰۵ **b**	۸۸۸/۷۹ **b**	۷۸/۰۳ **a**	۳۶/۶۴ **a**	۲۹/۴۵ **b**	۳۸۸/۵۰ **b**	۱۵۲/۰۵ **ab**
روی	۳۶۳/۸۰ **c**	۸۶۶/۱۵ **c**	۷۷/۰۷ **ab**	۳۵/۹۷ **b**	۳۰/۳۶ **a**	۳۹۱/۴۰ **a**	۱۵۱/۶۶ **bc**
کود زیستی							
عدم تلقیح	۳۴۴/۰۳ **b**	۸۴۹/۲۸ **b**	۷۲/۵۲ **b**	۳۵/۵۲ **b**	۲۸/۴۰ **b**	۳۸۲/۵۲ **b**	۱۵۰/۵۵ **b**
تلقیح	۳۸۵/۴۶ **a**	۹۰۴/۴۶ **a**	۷۷/۸۰ **a**	۳۶/۴۷ **a**	۲۹/۸۳ **a**	۳۹۲/۴۹ **a**	۱۵۲/۳۶ **a**
سال							
سال اول	۳۴۳/۲۸ **b**	۸۳۷/۹۶ **b**	-	-	۲۸/۳۴ **b**	۳۸۴/۳۷ **b**	۱۴۹/۹۵ **b**
سال دوم	۳۸۶/۲۲ **a**	۹۱۵/۷۸ **a**	-	-	۲۹/۸۸ **a**	۳۹۰/۶۳ **a**	۱۵۲/۹۶ **a**

در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارندLSD میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون، بر اساس آزمون

جدول ۶- مقایسه‌ی میانگین اثرات آبیاری، محافظ‌های گیاهی و کود زیستی بر صفات مورد مطالعه در گندم

صفت / تیمار	کلروفیل *a* (mg g^{-1}FW)	کلروفیل *b* (mg g^{-1}FW)	شاخص سطح برگ	مالون دی آلدهید (nmol.gFW^{-1})	کاروتنویید (mg g^{-1}FW)	پرولین (µmol.gFW^{-1})	قند محلول (mg g^{-1}FW)
آبیاری							
۸۰ درصد ظرفیت زراعی	۳/۴۰ a	۱/۲۸ a	۴/۴۹ a	۱/۵۱ c	۰/۲۴ b	۳/۴۱ c	۱۵/۵۲ c
۶۵ درصد ظرفیت زراعی	۲/۴۱ b	۰/۸۳ b	۳/۷۳ b	۳/۵۷ b	۰/۳۳ a	۶/۵۸ b	۳۳/۹۲ b
۵۰ درصد ظرفیت زراعی	۱/۲۳ c	۰/۳۸ c	۲/۴۳ c	۶/۷۵ a	۰/۱۳ c	۸/۴۱ a	۴۶/۱۲ a
محافظ گیاهی							
شاهد	۲/۰۶ c	۰/۷۰ c	۳/۲۸ c	۴/۱۹ a	۰/۱۹ e	۵/۷۱ c	۳۰/۳۶ e
آسکوربیک اسید	۲/۲۳ b	۰/۷۷ b	۳/۵۲ b	۳/۸۵ c	۰/۲۲ c	۶/۲۷ ab	۳۲/۴۴ b
توکوفرول	۲/۴۴ a	۰/۸۸ a	۳/۴۹ b	۳/۷۰ d	۰/۲۵ b	۶/۰۵ b	۳۱/۳۰ d
سیلیکون	۲/۴۷ a	۰/۸۹ a	۳/۷۵ a	۴/۰۳ b	۰/۲۸ a	۶/۲۱ ab	۳۱/۸۵ c
روی	۲/۵۳ a	۰/۹۲ a	۳/۷۴ a	۳/۹۵ bc	۰/۲۱ d	۶/۴۴ a	۳۳/۳۱ a
کود زیستی							
عدم تلقیح	۲/۱۷ b	۰/۷۵ b	۳/۴۵ b	۴/۱۲ a	۰/۲۱ b	۵/۹۵ b	۳۰/۶۶ b
تلقیح	۲/۵۲ a	۰/۹۱ a	۳/۶۶ a	۳/۷۷ b	۰/۲۵ a	۶/۳۲ a	۳۳/۰۴ a
سال							
سال اول	-	-	۳/۴۱ b	۴/۰۱ a	-	-	۳۲/۱۴ a
سال دوم	-	-	۳/۷۰ a	۳/۸۸ b	-	-	۳۱/۵۶ b

در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارندLSDمیانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون، بر اساس آزمون

بیشترین ارتفاع بوته در بوته‌های آبیاری شده در ۸۰ درصد ظرفیت زراعی (شرایط بدون تنش) ثبت گردید. از سوی دیگر، کاربرد سیلیکون منجر به بیشترین ارتفاع بوته در گندم شد که البته اختلاف معنی-داری با نانو روی نشان نداد. محلول‌پاشی آسکوربیک اسید و توکوفرول (به‌عنوان محافظ‌های گیاهی آلی) از این حیث در رتبه بعدی قرار داشتند و استفاده از آب مقطر به‌عنوان شاهد نیز کوتاه‌ترین بوته‌ها را نشان داد (جدول ۵) . استفاده از کود زیستی در تمام سطوح آبیاری منجر به افزایش ارتفاع بوته‌ها گردید هر چند این افزایش در آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی معنی‌دار نبود (جدول ۸). به‌علاوه، بالاترین ارتفاع بوته در حضور باکتری حل‌کننده‌ی فسفر و کاربرد آسکوربیک اسید ثبت شد که البته اختلاف معنی‌داری با استفاده از

نانو ذرات روی و تلقیح نشان نداد (جدول ۹). بیشترین وزن هزار دانه در سطح

آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و همچنین بوته-های تیمار شده با کود زیستی مشاهده گردید. از سوی دیگر، محلول‌پاشی آسکوربیک اسید بالاترین وزن هزار دانه را نشان داد که از نظر آماری با کاربرد سیلیکون در یک سطح بود. استفاده از توکوفرول و نانو روی نیز از نظر آماری تاثیر یکسانی بر وزن هزار دانه داشت و عدم استفاده از محافظ گیاهی (محلول‌پاشی با آب مقطر) نیز پایین‌ترین میزان این صفت را بروز داد (جدول ۵). سنگین‌ترین دانه‌ها در پایین‌ترین میزان تنش (آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی) و کاربرد آسکوربیک اسید مشاهده گردید که البته در این سطح آبیاری تفاوت معنی داری با کاربرد سیلیکون نشان نداد. پایین‌ترین میزان این صفت نیز در آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و کاربرد آب مقطر به‌عنوان شاهد ثبت شد (جدول ۷).

جدول ۷- مقایسه‌ی میانگین اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و محافظ‌های گیاهی

تیمار آبیاری	صفت محافظ گیاهی	عملکرد دانه ($g.m^{-2}$)	وزن هزار دانه (g)	تعداد سنبله (m^2)	کلروفیل *a* ($mg\ g^{-1}FW$)	کلروفیل *b* ($mg\ g^{-1}FW$)	شاخص سطح برگ	کاروتنویید ($mg\ g^{-1}FW$)	قند محلول ($mg\ g^{-1}FW$)
۸۰ درصد	شاهد	۴۵۲/۸۱ **d**	۳۷/۹۶ **bc**	۴۱۳/۲۲ **c**	۳/۱۱ **d**	۱/۱۷ **d**	۴/۲۵ **b**	۰/۲۰۷ **g**	۱۶/۳۰ **k**
ظرفیت زراعی	آسکوربیک اسید	۵۰۸/۶۸ **a**	۳۹/۵۲ **a**	۴۲۴/۷۰ **a**	۳/۳۳ **c**	۱/۲۲ **cd**	۴/۳۴ **b**	۰/۲۲۹ **fg**	۱۵/۰۳ **h**
	توکوفرول	۴۶۶/۱۷ **cd**	۳۸/۳۸ **b**	۴۱۹/۰۱ **b**	۳/۷۰ **a**	۱/۴۴ **a**	۴/۴۵ **b**	۰/۲۵۱ **ef**	۱۶/۰۸ **kl**
	سیلیکون	۴۸۸/۰۱ **b**	۳۹/۱۸ **a**	۴۲۳/۲۵ **ab**	۳/۵۲ **b**	۱/۳۴ **b**	۴/۷۱ **a**	۰/۲۸۹ **d**	۱۵/۵۹ **l**
	روی	۴۷۴/۳۳ **bc**	۳۸/۴۷ **b**	۴۲۴/۷۵ **a**	۳/۳۶ **bc**	۱/۲۸ **bc**	۴/۷۳ **a**	۰/۲۱۹ **g**	۱۴/۶۰ **h**
۶۵ درصد	شاهد	۳۴۷/۷۶ **h**	۳۴/۷۸ **f**	۳۸۱/۶۲ **f**	۲/۰۱ **h**	۰/۶۴ **h**	۳/۳۸ **e**	۰/۲۷۰ **de**	۳۰/۷۷ **j**
ظرفیت زراعی	آسکوربیک اسید	۴۲۳/۶۷ **e**	۳۷/۴۴ **cd**	۴۰۲/۷۷ **d**	۲/۲۴ **g**	۰/۷۵ **g**	۳/۷۷ **cd**	۰/۳۲۳ **c**	۳۵/۲۷ **g**
	توکوفرول	۳۶۴/۰۴ **gh**	۳۶/۱۴ **e**	۳۹۲/۰۱ **e**	۲/۴۱ **g**	۰/۸۲ **g**	۳/۶۴ **d**	۰/۳۶۱ **b**	۳۲/۶۹ **i**
	سیلیکون	۳۹۸/۸۶ **f**	۳۷/۳۷ **d**	۳۹۴/۸۳ **e**	۲/۶۰ **f**	۰/۹۲ **f**	۳/۹۴ **c**	۰/۴۱۱ **a**	۳۳/۸۵ **h**
	روی	۳۷۷/۴۹ **g**	۳۶/۴۰ **e**	۳۹۹/۷۴ **d**	۲/۷۹ **e**	۱/۰۲ **e**	۳/۹۳ **c**	۰/۲۹۲ **d**	۳۷/۰۰ **f**
۵۰ درصد	شاهد	۲۰۴/۰۸ **l**	۳۱/۹۵ **i**	۳۴۲/۰۱ **i**	۱/۰۶ **k**	۰/۳۱ **k**	۲/۲۱ **h**	۰/۱۰۵ **k**	۴۴/۰۰ **e**
ظرفیت زراعی	آسکوربیک اسید	۲۶۱/۴۴ **i**	۳۳/۳۳ **g**	۳۵۲/۳۱ **g**	۱/۱۴ **jk**	۰/۳۴ **jk**	۲/۴۵ **fg**	۰/۱۳۳ **ij**	۴۷/۰۴ **b**
	توکوفرول	۲۲۳/۰۶ **k**	۳۲/۵۹ **h**	۳۴۵/۲۱ **hi**	۱/۲۱ **jk**	۰/۳۸ **ijk**	۲/۳۶ **gh**	۰/۱۴۹ **hi**	۴۵/۱۳ **d**
	سیلیکون	۲۴۱/۲۸ **j**	۳۳/۳۶ **g**	۳۴۷/۴۱ **h**	۱/۳۰ **ij**	۰/۴۰ **ij**	۲/۵۸ **f**	۰/۱۶۵ **h**	۴۶/۰۹ **c**
	روی	۲۳۹/۵۸ **jk**	۳۳/۰۴ **gh**	۳۴۹/۷۲ **gh**	۱/۴۳ **i**	۰/۴۷ **i**	۲/۵۶ **fg**	۰/۱۲۵ **jk**	۴۸/۳۳ **a**

میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون، بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند

استفاده از محافظ‌های گیاهی منجر به افزایش تعداد دانه در سنبله در مقایسه با عدم کاربرد این ترکیبات (شاهد) شد، به‌طوری‌که در بین محافظ‌های گیاهی، بیشترین تعداد دانه در سنبله به کاربرد نانو روی تعلق داشت. سیلیکون و آسکوربیک اسید نیز از این حیث در رتبه بعدی قرار داشتند (جدول ۵). تلقیح بوته‌ها با کود زیستی در تمام سطوح آبیاری موجب افزایش تعداد دانه در سنبله گردید به‌طوری‌که بیشترین مقدار این صفت در آبیاری ۸۰ درصد زراعی و حضور کود زیستی و پایین‌ترین میزان آن در آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم استفاده از کود زیستی مشاهده شد (جدول ۸). از سوی دیگر، محلول‌پاشی نانو روی در حضور کود زیستی بیشترین مقدار تعداد دانه در سنبله را نشان داد در حالی‌که، عدم استفاده از محافظ‌های گیاهی و عدم تلقیح بوته‌ها، کم‌ترین میزان این صفت را بروز داد (جدول ۹).

همان‌گونه که در جدول ۵ مشخص است، بیشترین تعداد سنبله در واحد سطح در سطح اول آبیاری (۸۰ درصد ظرفیت زراعی)، محلول‌پاشی آسکوربیک اسید و تلقیح با کود زیستی ثبت گردید. بر طبق نتایج این جدول می‌توان اظهار داشت که استفاده از آسکوربیک اسید تفاوت معنی‌داری با محلول‌پاشی نانو روی نداشت و از نظر این صفت سیلیکون و توکوفرول در رتبه‌های بعدی قرار داشتند. استفاده از آسکوربیک اسید در آبیاری ۸۰

درصد ظرفیت زراعی بالاترین تعداد سنبله در واحد سطح را نشان داد که البته تفاوت معنی‌داری با کاربرد نانو روی و سیلیکون نداشت. پایین‌ترین میزان این صفت در تمام سطوح آبیاری از عدم کاربرد محافظ‌های گیاهی مشاهده گردید (جدول ۷). به‌علاوه، تلقیح بوته-های گندم در تمام سطوح آبیاری موجب افزایش تعداد سنبله در واحد سطح گردید، هر چند این افزایش در سومین سطح آبیاری (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) معنی-دار نبود (جدول ۸). هر چند طول دوره‌ی رشد تحت تاثیر برهم‌کنش تیمارهای مورد مطالعه قرار نگرفت ولی، اثر تمام تیمارها (آبیاری، محافظ گیاهی و کود زیستی) بر این ویژگی معنی‌دار بود (جدول ۵). بیشترین تعداد روز از کاشت تا برداشت در آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و کم‌ترین آن در آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده گردید. همچنین، کاربرد تمام محافظ‌های گیاهی در مقایسه با عدم کاربرد این ترکیبات، موجب افزایش طول دوره‌ی رشد گردید که از این لحاظ، آسکوربیک اسید در بالاترین سطح قرار داشت که البته اختلاف معنی‌داری با سیلیکون نشان نداد. از سوی دیگر، بوته‌های تلقیح شده با کود زیستی دارای طول رشد بالاتری نسبت به بوته‌های تلقیح نشده بودند (جدول ۵).

جدول ۸- مقایسه‌ی میانگین اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و کود زیستی

صفت		عملکرد دانه ($g.m^{-2}$)	ارتفاع بوته (cm)	تعداد دانه در سنبله	شاخص سطح برگ	پرولین ($\mu mol.gFW^{-1}$)	قند محلول ($mg\ g^{-1}FW$)
تیمار							
محافظ گیاهی	کود زیستی						
آب مقطر	عدم تلقیح	۳۱۹/۹۸ **g**	۶۸/۲۱ **f**	۲۷/۲۱ **g**	۳/۲۰ **e**	۵/۵۸ **f**	۲۹/۴۱ **i**
	تلقیح	۳۴۹/۷۹ **de**	۷۱/۴۰ **e**	۲۸/۴۵ **ef**	۳/۳۶ **de**	۵/۸۳ **ef**	۳۱/۳۰ **f**
آسکوربیک اسید	عدم تلقیح	۳۷۵/۲۴ **c**	۷۳/۰۴ **cde**	۲۸/۴۸ **ef**	۳/۴۲ **cd**	۶/۰۷ **cde**	۳۱/۱۶ **f**
	تلقیح	۴۲۰/۵۸ **a**	۷۸/۵۹ **b**	۲۹/۹۴ **bc**	۳/۶۳ **b**	۶/۴۷ **ab**	۳۳/۷۳ **b**
توکوفرول	عدم تلقیح	۳۳۱/۸۵ **fg**	۷۲/۲۵ **de**	۲۸/۰۳ **f**	۳/۳۹ **d**	۵/۸۵ **ef**	۳۰/۱۳ **h**
	تلقیح	۳۷۰/۳۳ **c**	۷۷/۹۵ **b**	۲۹/۴۰ **d**	۳/۵۸ **bc**	۶/۲۴ **bcd**	۳۲/۴۷ **d**
سیلیکون	عدم تلقیح	۳۵۶/۲۷ **d**	۷۴/۹۸ **c**	۲۸/۷۱ **e**	۳/۶۲ **b**	۶/۰۱ **ed**	۳۰/۶۳ **g**
	تلقیح	۳۹۵/۸۴ **b**	۸۱/۰۸ **a**	۳۰/۲۲ **b**	۳/۸۷ **a**	۶/۴۰ **bc**	۳۳/۰۷ **c**
روی	عدم تلقیح	۳۳۶/۸۲ **ef**	۷۴/۱۴ **cd**	۲۹/۵۷ **cd**	۳/۶۱ **b**	۶/۲۲ **bcd**	۳۱/۹۸ **e**
	تلقیح	۳۹۰/۷۸ **b**	۸۰/۰۰ **ab**	۳۱/۱۵ **a**	۳/۸۶ **a**	۶/۶۶ **a**	۳۴/۶۵ **a**

میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون، بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند

جدول ۹- مقایسه‌ی میانگین اثر متقابل سطوح مختلف محافظ‌های گیاهی و کود زیستی

صفت		عملکرد دانه ($g.m^{-2}$)	عملکرد بیولوژیکی ($g.m^{-2}$)	ارتفاع بوته (cm)	تعداد دانه در سنبله	تعداد سنبله (m^2)	کلروفیل *a* ($mg\ g^{-1}FW$)	کلروفیل *b* ($mg\ g^{-1}FW$)	شاخص سطح برگ	پرولین ($\mu mol.gFW^{-1}$)	قند محلول ($mg\ g^{-1}FW$)
تیمار											
آبیاری	کود زیستی										
۸۰ درصد	عدم تلقیح	۴۶۱/۶۶ b	۱۰۵۲/۲۵ b	۸۶/۷۲ ab	۳۲/۲۳ b	۴۱۷/۴۱ b	۳/۲۱ b	۱/۱۹ ab	۴/۳۸ b	۳/۳۳ e	۱۶/۱۰ e
ظرفیت زراعی	تلقیح	۴۹۴/۳۴ a	۱۰۸۵/۸۵ a	۹۱/۹۵ a	۳۳/۲۵ a	۴۲۴/۵۷ a	۳/۶۰ a	۱/۳۸ a	۴/۶۱ a	۳/۵۰ e	۱۴/۹۴ f
۶۵ درصد	عدم تلقیح	۳۴۶/۳۸ d	۸۶۴/۸۶ d	۷۴/۸۴ c	۲۸/۹۰ d	۳۸۴/۸۱ d	۲/۱۷ d	۰/۷۳ c	۳/۵۷ d	۶/۲۷ d	۳۱/۳۶ d
ظرفیت زراعی	تلقیح	۴۱۸/۶۷ c	۹۶۶/۸۰ c	۸۱/۹۵ b	۳۰/۶۲ c	۴۰۳/۵۸ c	۲/۶۵ c	۰/۹۲ b	۳/۹۰ c	۶/۹۰ c	۳۶/۴۷ c
۵۰ درصد	عدم تلقیح	۲۲۹/۴۱ f	۶۳۹/۷۴ f	۵۶/۹۹ d	۲۴/۰۷ f	۳۴۵/۳۵ f	۱/۱۴ f	۰/۳۵ e	۲/۳۹ e	۸/۲۴ b	۴۴/۵۲ b
ظرفیت زراعی	تلقیح	۲۳۸/۳۷ f	۶۵۱/۷۲ f	۵۸/۵۱ d	۲۵/۶۲ e	۳۴۹/۳۲ f	۱/۳۱ e	۰/۴۱ e	۲/۴۷ e	۸/۵۷ a	۴۷/۷۲ a

میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون، بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند

مقادیر کلروفیل *a* و *b* به‌صورت معنی‌داری تحت تاثیر اثرات اصلی تیمارهای مطالعه شده (آبیاری، محافظ گیاهی و کود زیستی) و برهم‌کنش تیمارهای آبیاری و محافظ‌های گیاهی و همچنین، آبیاری و کود زیستی قرار گرفتند (جدول ۴). هر چند که بالاترین مقدار این رنگیزه‌ها در آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی توکوفرول ثبت گردید ولی، بیشترین میزان کلروفیل *a* و *b* در آبیاری‌های ۶۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (شرایط تنش) از کاربرد نانو روی مشاهده شد. شاید اشاره به این نکته نیز ضروری باشد

که در سومین سطح آبیاری (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) کاربرد نانو روی تفاوت معنی‌داری با سیلیکون (در مورد کلروفیل a) و سیلیکون و توکوفرول (در مورد کلروفیل b) نشان نداد (جدول ۷). این امر شاید به‌نوعی نشان‌دهنده‌ی کارکرد متفاوت محافظ‌های گیاهی در شرایط حضور و عدم حضور عامل تنش‌زا و همچنین، شدت حضور عامل تنش‌زا باشد. به‌علاوه، بالاترین مقادیر کلروفیل a و b در آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و حضور کود زیستی ثبت گردید و پایین‌ترین میزان این رنگیزه‌ها در آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم تلفیح با کود زیستی مشاهده شد (جدول ۸).

همان‌گونه که در جدول ۴ نیز مشاهده می‌شود، شاخص سطح برگ به‌صورت معنی‌داری تحت تاثیر اثرات اصلی و متقابل آبیاری، محافظ گیاهی و کود زیستی قرار گرفت. شاید بتوان اظهار داشت که به‌نوعی محافظ‌های معدنی مطالعه شده در این آزمایش (سیلیکون و نانو روی)، کارکرد بهتری در مقایسه با محافظ‌های آلی (آسکوربیک اسید و توکوفرول) از نظر تعدیل اثرات مخرب تنش خشکی در سطح برگ نشان دادند به‌طوری‌که در اولین سطح آبیاری (۸۰ درصد ظرفیت زراعی) بالاترین مقادیر سطح برگ در کاربرد سیلیکون و روی ثبت گردید و آسکوربیک اسید و توکوفرول از این حیث در رتبه‌ی بعدی قرار داشتند. دومین سطح آبیاری (۶۵ درصد ظرفیت زراعی) نیز روند کم و بیش مشابهی نشان داد در حالی‌که در سومین سطح آبیاری (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) تاثیرگذاری محافظ‌های معدنی و آلی در سطح برگ از نظر آماری تقریبا مشابه بود (جدول ۷). همچنین، حضور کودهای زیستی در آبیاری ۸۰ و ۶۵ درصد ظرفیت زراعی موجب افزایش معنی‌دار شاخص سطح برگ شد درحالی که، این افزایش در آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی معنی‌دار نبود (جدول ۸). از سوی دیگر بالاترین میزان شاخص سطح برگ با استفاده از محلول‌پاشی سیلیکون و نانو روی در حضور کود زیستی به‌دست آمد و پایین‌ترین میزان این شاخص نیز در عدم استفاده از محافظ گیاهی و کود زیستی ثبت گردید (جدول ۹).

مالون‌دی‌آلدهید (MDA) از محصولات نهایی پراکسیداسیون اسیدهای چرب غیراشباع به‌شمار می‌رود که بیان‌گر صدمات وارد شده به غشاها می‌باشد (آزوز و احمد ۲۰۱۵، حسین و همکاران ۲۰۱۶). آبیاری، محافظ گیاهی و کود زیستی تاثیر معنی‌داری بر محتوای مالون‌دی‌آلدهید نشان دادند (جدول ۴). بالاترین مقادیر مالون‌دی‌آلدهید در آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده گردید در حالی‌که کمترین میزان این ترکیب در آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی ثبت شد (جدول ۶). استفاده از محافظ‌های گیاهی موجب کاهش معنی‌داری در محتوای مالون‌دی‌آلدهید گردید به‌طوری‌که، پایین‌ترین میزان این ترکیب در محلول‌پاشی توکوفرول مشاهده شد. کاربرد محافظ‌های گیاهی معدنی (سیلیکون و روی) از نظر آماری تاثیر یکسانی بر محتوای مالون‌دی‌آلدهید نشان دادند (جدول ۶). از سوی دیگر، تلقیح بوته‌های گندم با کود زیستی موجب کاهش معنی‌داری در محتوای مالون‌دی‌آلدهید گردید (جدول ۶). حضور کاروتنوییدها در متابولیسم‌های اولیه و ثانویه‌ی گیاه ضروری است. این دسته از ترکیبات در کارکردهای متنوعی از جمله؛ فتوسنتز، فتومورفوژنز و رشد و نمو گیاه مشارکت نموده و در حفاظت گیاه در برابر تنش اکسیداتیو ایفای نقش می‌کنند (حسین و همکاران ۲۰۱۶). سمولیکوا و همکاران (۲۰۱۱) بیان نمودند که تجمع کاروتنوییدها در گیاهان تحت شرایط محیطی تنش‌زا افزایش می‌یابد. در حالت کلی می‌توان اظهار داشت که محتوای کاروتنویید بوته‌های گندم در آبیاری ۶۵ درصد ظرفیت زراعی بالاتر از دو سطح دیگر آبیاری (۸۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) بود (جدول ۶). بالاترین مقادیر محتوای کاروتنویید از ترکیب تیماری آبیاری ۶۵ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی سیلیکون به‌دست آمد. در این سطح آبیاری، پس از سیلیکون به‌ترتیب استفاده از محافظ‌های گیاهی توکوفرول، آسکوربیک اسید و نانو روی بیشترین کارآیی را از لحاظ افزایش محتوای کاروتنوییدها نشان دادند (جدول ۷). به‌علاوه، حضور کود زیستی منجر به افزایش معنی‌دار محتوای کاروتنویید گردید (جدول ۶).

در شرایط کمبود دسترسی آب، پتانسیل آب خاک کاهش می‌یابد، از این‌رو گیاه به‌منظور تداوم جذب آب و حفظ تورژسانس سلولی، پتانسیل اسمزی سلول‌ها و در

نتیجه بافت‌های خود را کاهش می‌دهد. این عمل به‌واسطه‌ی تجمع دادن طیف وسیعی از ترکیبات تنظیم‌کننده‌ی اسمزی آلی و غیرآلی نظیر پرولین و قندهای محلول صورت می‌گیرد (سه‌لیمان و همکاران، ۲۰۲۱). همان‌گونه که در جدول ۶ مشخص است، بالاترین محتوای پرولین در آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی ثبت گردید. از سوی دیگر، هر چند بوته‌های تیمار شده با نانو روی بالاترین محتوای پرولین را نشان دادند، ولی تفاوت معنی‌داری با کاربرد سیلیکون و آسکوربیک اسید نداشتند. همچنین، حضور کود زیستی در آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری در محتوای پرولین ایجاد نکرد ولی در دو سطح دیگر آبیاری (۶۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) موجب افزایش معنی‌دار مقادیر پرولین شد (جدول ۸). حضور توام کود زیستی و محلول‌پاشی نانو روی منجر به حصول بیشترین محتوای پرولین گردید که البته تفاوت معنی‌داری با کاربرد آسکوربیک اسید در کنار کود زیستی نداشت (جدول ۹). سومین سطح آبیاری (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) بالاترین مقادیر قندهای محلول را نشان داد و بیشترین محتوای قندهای محلول از برهم‌کنش سطح سوم آبیاری و کاربرد روی ثبت شد (جدول ۷). در همین سطح از آبیاری کمترین مقادیر قندهای محلول از عدم کاربرد محافظ گیاهی به‌دست آمد. به‌علاوه، حضور کود زیستی در سطوح آبیاری دوم و سوم (۶۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) منجر به افزایش محتوای قندهای محلول شد ولی کاربرد کود زیستی در آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی موجب کاهش مقادیر قندهای محلول گردید. به‌طوری‌که، بالاترین مقدار این صفت در آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و کاربرد کود زیستی و کمترین محتوای قندهای محلول در آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و حضور کود زیستی مشاهده شد (جدول ۸). از سوی دیگر، تلقیح کود زیستی در کنار محلول‌پاشی نانو روی، بالاترین کارآیی را در افزایش محتوای قندهای محلول داشت (جدول ۹).

خشکی از مهمترین تنش‌هایی است که منجر به تغییر در فرآیندهای فیزیولوژیکی، مورفولوژیکی، اکولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی گیاهان زراعی می‌گردد (آهلووالیا و همکاران ۲۰۲۱). خشکی به‌صورت قابل ملاحظه‌ای رشد و توسعه‌ی گیاه و در نتیجه عملکرد را کاهش می‌دهد. رشد و نمو گیاه به تقسیم، طویل شدن و تمایز سلول‌ها بستگی دارد. تمامی این مراحل از طریق کاهش آماس، مختل شدن فعالیت آنزیم‌ها و کاهش انرژی تامین شده از فتوسنتز، تحت تاثیر خشکی قرار می‌گیرند (حسین و همکاران ۲۰۱۶، سه‌لیمان و همکاران ۲۰۲۱). کمبود آب در غالب موارد باعث کوتاه‌تر شدن طول دوره‌ی رشد و طول دوره‌ی پر شدن دانه و همچنین، تسریع پیری در گندم می‌شود (رانا و همکاران ۲۰۱۳). از آن‌جا که همبستگی مستقیمی بین سطح برگ و مقادیر تولید دانه در گندم وجود دارد، پیری زودرس و کوتاه شدن دوره‌ی زندگی گندم، تاثیری جدی بر عملکرد این گیاه دارد (رانا و همکاران ۲۰۱۳). پیری برگ‌ها به موازات فرآیندهایی نظیر؛ کاهش محتوای کلروفیل، افت مقادیر پروتئین‌های محلول و تغییر نسبت کلروفیل a به b رخ می‌دهد که در غالب موارد با افزایش گونه‌های فعال اکسیژن، پراکسیداسیون لیپیدها و صدمات غشایی (افزایش نشت غشاها) همراه می‌شود (سمولیکوا و همکاران ۲۰۱۱، مونه‌بوش ۲۰۰۷).

سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی در راستای مقابله با صدمات تنش اکسیداتیو، به دو دسته‌ی آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی تقسیم می‌شوند. سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی غیرآنزیمی از ترکیباتی با وزن مولکولی پایین تشکیل شده است که نقش بسیار مؤثری در تعدیل اثرات تنش اکسیداتیو دارد. تعدادی از ترکیبات نظیر؛ آسکوربیک اسید و گلوتاتیون در فاز مایع و حضور آب عمل می‌نمایند در حالی‌که، آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی چربی‌دوست مانند؛ توکوفرول و بتاکاروتن در غشاهای پلاسمایی و در کنار ترکیبات لیپیدی فعال هستند (هادی و همکاران ۲۰۱۶، فویر و نوکتور ۲۰۱۱). شاید بتوان اظهار داشت که کارآمدترین تاثیر استفاده از منابع خارجی آسکوربیک اسید در شرایط تنش‌زا، مربوط به حفاظت از لیپیدها و پروتئین‌ها از صدمات اکسیداتیو می‌باشد (نورین و همکاران ۲۰۲۱). در عین‌حال، آسکوربیک اسید به‌واسطه‌ی افزایش دادن رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، هدایت روزنه‌ای، میزان فتوسنتز، پتانسیل دفاع آنتی‌اکسیدانی و رشد گیاه، تاثیر به‌سزایی در بهبود ظرفیت مقاومتی گیاهان در حضور عوامل تنش‌زا دارد (ازه‌دین و همکاران ۲۰۱۱، ایشاق و همکاران ۲۰۲۱). حافظ و قریب (۲۰۱۶) در بررسی تاثیر دو سطح

از محلول‌پاشی آسکوربیک اسید (صفر و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در گندم تحت شرایط تنش خشکی بیان نمودند که تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار تعداد دانه در سنبله، تعداد سنبله در واحد سطح و وزن هزار دانه می‌گردد. این محققین کاهش تعداد و وزن دانه‌ی گندم در شرایط تنش خشکی را به کاهش فتوسنتز، تسریع پیری برگ‌ها و محدودیت مخزن در این شرایط نسبت داده و اظهار داشتند که کاهش تعداد دانه در هر سنبله، شاید به افت تعداد سنبلچه‌ها در شرایط تنش خشکی مربوط باشد. با این‌حال، استفاده از آسکوربیک اسید به‌دلیل بهبود محتوای کلروفیل و سطح برگ (به‌خصوص پرچم برگ)، موجب بهبود اجزای عملکرد مطالعه شده توسط این محققین تحت شرایط کمبود آب گردید. از سوی دیگر، مشاهده شد بوته‌های گندمی که با آسکوربیک اسید محلول‌پاشی شده بودند، مقادیر کلروفیل، سطح پرچم برگ و محتوای آب نسبی بالاتری نسبت به بوته‌های محلول‌پاشی نشده در شرایط خشکی نشان دادند. در نهایت بیان گردید که مجموع عوامل ذکر شده منجر به افزایش هشت درصدی عملکرد دانه در اثر کاربرد آسکوربیک اسید تحت شرایط خشکی می‌گردد. ایشاق و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند که استفاده از منابع خارجی آسکوربیک اسید، میزان تعرق، هدایت روزنه‌ای، مقادیر تبادلات گازی، فتوسنتز خالص و کارآیی مصرف آب در گندم را تحت شرایط تنش افزایش می‌دهد. همچنین، بالاترین مقادیر کلروفیل a و b، محتوای پرولین و پروتئین‌های محلول در حضور تنش، در بوته‌های گندم تیمار شده با آسکوربیک اسید ثبت گردید. کاربرد آسکوربیک اسید در شرایط عدم فرآهمی آب، علاوه بر بالا بردن غلظت پتاسیم و کلسیم در اندام‌های هوایی، منجر به افزایش وزن هزار دانه، تعداد دانه در سنبله، تعداد سنبله در واحد سطح، عملکرد دانه و طول سنبله شد. این محققین اظهار داشتند که آسکوربیک اسید به‌دلیل مشارکت فعال در هومئوستازی یونی و تنظیمات اسمزی، نقش موثری در ارتقای توان تحملی گندم در مقابل تنش‌های محیطی دارد. در مطالعه‌ی دیگری که بر روی گندم صورت گرفته، اظهار شده است که کاربرد آسکوربیک اسید به‌واسطه‌ی افزایش دادن محتوای کلروفیل، کاروتنوییدها، تجمع پرولین، سطح برگ و کاهش دادن مقادیر پراکسید هیدروژن بافت‌های گیاهی، در ارتقای توان مقاومتی گیاه و تعدیل خسارات تنش‌ها موثر است (ازه‌دین و همکاران ۲۰۱۱). افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی، محتوای درونی آسکوربیک اسید، میزان کاروتنوییدها و به تاخیر انداختن پیری برگ‌ها (افزایش طول دوره‌ی رشد) تحت شرایط تنش، در آزمایشات فاروک (۲۰۱۱) بر روی تاثیر محلول‌پاشی آسکوربیک اسید در گندم نیز گزارش شده است.

توکوفرول نقش حایز اهمیتی در رشد و نمو گیاه، هدایت سیگنال‌ها، کنترل تنظیمات فیتوهورمونی و فرآیند پیری بر عهده دارد (آروم و مونه‌بوش ۲۰۱۰). اورابی و عبدالحمید (۲۰۱۶) به منظور بررسی اثرات محلول‌پاشی آلفا توکوفرول (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در شرایط تنش، آزمایشی را طرح‌ریزی و مشاهده نمودند که استفاده از این تیمار ارتفاع بوته، وزن خشک اندام‌های هوایی، تعداد دانه در بوته و عملکرد دانه را در حضور شرایط تنش‌زا افزایش داده و باعث بهبود پارامترهای رشدی باقلا می‌شود. از سوی دیگر، کاربرد آلفا توکوفرول محتوای کربوهیدرات‌ها و پروتئین خام دانه‌ها را افزایش داده و در کنار پایین آوردن میزان مالون‌دی‌آلدهید، منجر به بالا رفتن مقادیر پرولین و کاروتنوییدها در گیاه گردید. این محققین بهبود عملکرد و اجزای عملکرد توسط آلفا توکوفرول تحت شرایط تنش را به افزایش کارآیی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی نسبت داده و بیان نمودند که منابع خارجی آلفا توکوفرول قادر به تعدیل اثرات تنش اکسیداتیو و ارتقای توان تحملی گیاه در شرایط نامساعد محیطی می‌باشد. به‌علاوه، طی مطالعه‌ی دیگری، محلول‌پاشی آلفا توکوفرول در گندم تحت شرایط تنش، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش داده و منجر به افزایش مقادیر درونی آسکوربیک اسید، کاروتنوییدها و فنول‌ها گردید. همچنین، محتوای پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپیدها پایین آمده و پایداری غشاها بهبود یافت. وقوع چنین حالتی در شرایط تنش در نهایت موجب به تاخیر افتادن پیری و افزایش طول دوره‌ی رشد گندم در حضور عوامل تنش‌زا گردید (فاروک ۲۰۱۱).

علی و همکاران (۲۰۱۹) کاربرد مقادیر مختلف آلفا توکوفرول بر ویژگی‌های فیزیو-بیوشیمیایی گندم در شرایط محدودیت دسترسی آب را مورد بررسی قرار داده و مشاهده نمودند که طول سنبله، تعداد دانه در

سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و تعداد روز تا رسیدگی در حضور آلفا توکوفرول تحت شرایط تنش خشکی افزایش معنی‌داری پیدا می‌کند. به‌علاوه، محتوای آب نسبی، رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل *a*، *b*، کل و *a/b*)، مقادیر کاروتنوییدها، فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای و تعرق در اثر استفاده از آلفا توکوفرول به‌هنگام محدودیت دسترسی آب افزایش یافت. از سوی دیگر، بالاترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و همچنین، بیشترین مقادیر درونی آلفا توکوفرول، آسکوربیک اسید، فلاوونوییدها و ترکیبات فنولی در بوته‌های تیمار شده با آلفا توکوفرول که در معرض تنش خشکی قرار گرفته بودند، ثبت گردید. در عین‌حال، حضور منابع خارجی آلفا توکوفرول در شرایط کمبود دسترسی آب، مقادیر مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن را به‌صورت معنی‌داری کاهش داد. با در نظر گرفتن نتایج مشاهده شده در این آزمایش، اظهار گردید که کاربرد منابع خارجی آلفا توکوفرول به‌واسطه‌ی بهبود روابط آبی، حفاظت از سیستم فتوسنتزی و ارتقای ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی، می‌تواند رشد و عملکرد گندم در شرایط تنش خشکی را افزایش دهد که در واقع می‌توان آن را به‌عنوان ارتقای توان تحمل گندم در محدودیت دسترسی آب تعبیر نمود. در این مطالعه، بالاترین مقدار آلفا توکوفرول استفاده شده، قادر به افزایش ۱۵/۰۹ درصدی عملکرد در حضور تنش خشکی بود که با توجه به این‌که، این مقدار معادل افزایشی در حدود ۵۵۶/۵ کیلوگرم دانه در هکتار می‌باشد، میتوان اظهار کرد که کاربرد منابع خارجی آلفا توکوفرول در مناطقی که با خشکی‌های متعدد در طول فصل رشد گندم مواجه می‌شوند، می‌تواند از توجیه اقتصادی قابل قبولی برخوردار باشد (علی و همکاران ۲۰۱۹). کاهش نشتی غشاهای پلاسمایی، افت مقادیر مالون‌دی‌آلدهید، پایین آمدن محتوای پراکسید هیدروژن، نزول تولید سینگلت اکسیژن، افزایش میزان کلروفیل *b* و کلروفیل کل، ارتقای سطح کاروتنوییدها، افزایش تجمع پرولین، بالا رفتن مقادیر قندهای محلول و محتوای پروتئین‌ها در اثر به‌کار بردن منابع خارجی آلفا توکوفرول (صفر، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۸ و ۱ میلی‌مولار) تحت شرایط تنش، توسط یه و همکاران (۲۰۱۷) به اثبات رسیده است.

از عمده‌ترین فرآیندهایی که از حضور سیلیکون تأثیر می‌پذیرند، می‌توان به شاخص‌های فتوسنتزی و روابط آبی گیاه اشاره نمود (نامور و همکاران ۲۰۱۷). تیمار گیاهان با غلظت‌های مناسب سیلیکون منجر به افزایش محتوای کلروفیل، ارتقای فعالیت روبیسکو، بالا رفتن شاخص SPAD، بهبود میزان فتوسنتز خالص، افزایش غلظت درون سلولی دی‌اکسیدکربن، بالا رفتن هدایت روزنه‌ای و بهبود کارآیی فلورسانس کلروفیل می‌شود (پوپه و سومر ۲۰۱۸، بوخاری و همکاران ۲۰۲۱). افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها و کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن القا شده توسط سیلیکون، موجب کاهش خسارات فتواکسیداتیو و حفاظت از غشای کلروپلاست و در نتیجه افزایش توان تحمل خشکی در گیاه می‌گردد (هادی و همکاران ۲۰۱۶). از سوی دیگر، بیان شده است که استفاده از سیلیکون حجم و وزن ریشه و در نتیجه، جذب آب را افزایش می‌دهد (وانگ و همکاران ۲۰۲۱). بوخاری و همکاران (۲۰۲۱) مشاهده نمودند که کاربرد منابع خارجی سیلیکون در شرایط تنش خشکی، علاوه بر ارتقای سطوح کاروتنوییدها، پرولین، آمینو اسیدهای آزاد و قندهای محلول در گندم، منجر به افزایش معنی‌دار فتوسنتز خالص، میزان تعرق برگ‌ها و هدایت روزنه‌ای در مقایسه با بوته‌های تیمار نشده نیز می‌گردد. این نتایج با اظهارات وانگ و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد. اوتمانی و همکاران (۲۰۲۱) مشاهده کردند که حضور سیلیکون در تنش خشکی منجر به بالا رفتن شاخص کلروفیل، شاخص سطح برگ، محتوای آب نسبی، طول ریشه و ارتفاع بوته شده و نشت یون‌ها را در مقایسه با بوته‌های تیمار نشده، به‌شدت کاهش می‌دهد. علاوه بر این، مشاهده گردید که استفاده از سیلیکون در تنش کم‌آبی، اجزای عملکرد گندم (شامل؛ تعداد سنبله در واحد سطح، تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه) را بهبود بخشیده و در نتیجه، موجب افزایش عملکرد گندم در این شرایط می‌شود. بالا رفتن تعداد سنبله در واحد سطح، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، طول سنبله، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی با کاربرد منابع خارجی سیلیکون در گندم تحت شرایط تنش خشکی توسط بوخاری و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش شده است.

روی به واسطه‌ی دخالت در تنظیم فرآیندهای فتوسنتزی، سنتز پروتئین‌ها و فعال‌سازی آنزیم‌ها، نقش مهمی در هدایت فرآیندهای بیولوژیکی گیاهان دارد (هادی و همکاران ۲۰۱۶). به‌علاوه، روی از طریق تنظیم مقادیر درونی هورمون‌های گیاهی از جمله؛ اکسین‌ها، جیبرلین‌ها و آبسیزیک اسید نیز در فرآیندهای زایشی گیاه تاثیرگذار است. همچنین، روی عنصری کلیدی برای سنتز کلروفیل به‌شمار می‌رود (ستار و همکاران ۲۰۲۲). رامش‌رادی و همکاران (۲۰۱۷) آزمایشی را با به‌کارگیری سطوح مختلف نانو ذرات روی تحت شرایط خشکی در گیاه برنج طرح‌ریزی کرده و به این نتیجه رسیدند که تیمار بوته‌های قرار گرفته در معرض تنش خشکی توسط روی، موجب افزایش معنی‌دار شاخص کلروفیل، بالا رفتن محتوای آب نسبی و کاهش نشت الکترولیت‌ها می‌شود. همچنین مشاهده گردید که ارتفاع بوته، تعداد پنجه در بوته، عملکرد تک بوته، بیوماس کل و شاخص برداشت، به‌واسطه‌ی حضور روی در شرایط تنش کم‌آبی بالا می‌رود. از سوی دیگر، این محققین گزارش نمودند که کاربرد روی هم در شرایط تنش و هم در غیاب عامل تنش‌زا، موجب افزایش مقادیر روی در برگ‌ها و دانه‌ها می‌گردد. در این مطالعه سطوح نسبی بیان Cu/Zn سوپراکسید دیسموتاز که به عنصر روی به‌عنوان کوفاکتور نیاز دارد نیز بررسی شد و اظهار گردید که مقادیر بالای این آنزیم با میزان روی قابل دسترس همبستگی بالایی نشان می‌دهد. در نهایت نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که تیمار نانو ذرات روی، کارآیی بالایی در بهبود رشد و ارتقای توان تحملی گیاه در برابر تنش‌های محیطی از جمله تنش خشکی دارد. همچنین، کریم و همکاران (۲۰۱۲) پیشنهاد نمودند که اثرات مخرب تنش خشکی در گندم می‌تواند با افزایش شاخص کلروفیل، بهبود فتوسنتز خالص و تولید ماده‌ی خشک بیشتر، تعدیل شود و تمامی این عوامل به‌واسطه‌ی استفاده از منابع خارجی روی قابل دسترس هستند. مشاهدات ادریس و همکاران (۲۰۲۱) بیان‌گر این بود که تیمار گندم با نانو ذرات روی تاثیر معنی‌داری در افزایش ارتفاع بوته، وزن خشک اندام‌های هوایی، وزن خشک ریشه، وزن دانه و طول سنبله در شرایط تنش خشکی دارد. در این مطالعه مشخص گردید که کاربرد منابع خارجی نانو ذرات روی به‌هنگام عدم دسترسی آب کافی، محتوای کلروفیل a و b را افزایش داده و در مقابل، نشت الکترولیت‌ها، مقادیر پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، بالاترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تحت شرایط تنش خشکی، در بوته‌های تیمار شده با نانو ذرات روی ثبت گردید. این محققین اظهار داشتند که استفاده از غلظت‌های مناسب روی، شرایط رشد گیاه تحت شرایط نامساعد محیطی را به‌وضوح بهبود می‌بخشد که شاید این امر مدیون کاهش صدمات اکسیداتیو اندام‌های هوایی و بهبود جذب آب اندام‌های زیرزمینی در حضور روی باشد.

باکتری حل کننده‌ی فسفر (PSB) این توانایی را دارند که فسفر را از شکل نامحلول به فرم محلول و قابل استفاده برای گیاه تبدیل نمایند (سیدشریفی و نامور ۲۰۱۵، آزاروال و همکاران ۲۰۲۰). این باکتری‌ها از سال ۱۹۵۰ به‌عنوان کود زیستی به‌کار گرفته می‌شوند و اثرات مثبتی بر رشد و نمو گیاهان نشان می‌دهند (آهلووالیا و همکاران ۲۰۲۱). اختر و همکاران (۲۰۲۱) تاثیر تلقیح گندم با باکتری‌های محلول‌کننده‌ی فسفر تحت شرایط تنش خشکی را مورد ارزیابی قرار داده و دریافتند که حضور این باکتری‌ها منجر به ارتقای فتوسنتز خالص، افزایش هدایت روزنه‌ای، بالا رفتن محتوای کلروفیل و کاروتنوییدها، افزایش محتوای آب نسبی، ارتقای تجمع پرولین و قندهای محلول و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز) در شرایط عدم فرآهمی آب کافی می‌شود. این محققین اظهار داشتند که باکتری حل - کننده‌ی فسفر از طریق دخالت در تجمع اسمولیت‌ها و سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه، به حفظ آماس سلول‌ها و بهبود روابط آبی کمک شایانی نموده و موجب ارتقای رشد و تحمل گیاهان در حضور عوامل تنش‌زا می‌گردند. در مجموع می‌توان اظهار داشت که باکتری حل - کننده‌ی فسفر به‌واسطه‌ی افزایش توسعه‌ی سیستم ریشه‌ای و در نتیجه، فرآهمی بیشتر عناصر غذایی و آب، افزایش جذب عناصر غذایی (به‌خصوص فسفر) و ایجاد هومئوسازی یونی در گیاه، تولید فیتوهورمون‌هایی نظیر؛ ایندول‌استیک‌اسید، سیتوکنین و جیبرلین‌ها، تولید آنزیم ACCدی‌آمیناز، ارتقای سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی، تولید محافظ‌های اسمزی، تولید اگزوپلی-

ساکاریدها، تولید ترکیبات ارگانیک فرار نظیر؛ سیانید هیدروژن، القای بیان ژن‌های مربوط به تنش خشکی در گیاه مانند؛ APX1 و SAMS1، تولید سیدروفورها و کنترل پاتوژن‌های گیاهی در ارتقای توان تحملی گیاه در شراط تنش موثرند (سیدشریفی و نامور ۲۰۱۵، اعتصامی و ماهش‌واری ۲۰۱۸، آهلووالیا و همکاران ۲۰۲۱، یاداو ۲۰۲۱).

نتیجه‌گیری

محدودیت شدید آبی (آبیاری تا ۵۰ درصد ظزفیت زراعی) موجب کاهش ۱۰۴ درصدی عملکرد دانه گندم نسبت به آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی گندم شد. همچنین آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش شدید) بیشترین اثر را در کاهش اجزای عملکرد این گیاه داشت. با این وجود، استفاده از محافظهای گیاهی آلی (آسکوربیک اسید و توکوفرول) و معدنی (سیلیکون و نانو ذرات روی) در هر دو شرایط تنش شدید و بدوت تنش در افزایش عملکرد دانه موثر بود. طوری که در شرایط بدون تنش (آبیاری تا ۸۰ درصد ظرفیت زراعی) کاربرد اسکوربیک اسید، سیلیکون، روی و توکوفرول به ترتیب عملکرد دانه را ۱۲/۳، ۷/۷ ، ۴/۷ و ۲/۹ درصد در مقایسه با عدم کاربرد این تعدیل کننده های تنش در همین سطح از ابیاری افزایش داد. ولی بیشترین تاثیر این محافظ های گیاهی الی بر عملکرد دانه در شرایط تنش شدید بود. طوری که کاربرد اسکوربیک اسید، سیلیکون، روی و توکوفرول به ترتیب عملکرد دانه را ۲۸، ۱۸/۲ ، ۱۷/۳ و ۹/۳ درصد در مقایسه با عدم کاربرد این تعدیل کننده های تنش در همین سطح از ابیاری افزایش داد. این امر در مناطقی که با کمبود آب مواجه هستند و یا کشت و کار گندم به‌صورت دیم صورت می‌گیرد، می‌تواند امیدبخش باشد. اثرات جبرانی کاربرد محافظهای گیاهی بررسی شده به‌واسطه‌ی بهبود شرایط فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b و همچنین شاخص سطح برگ) و ارتقای سطوح ترکیبات موثر در افزایش توان تحملی گیاه در شرایط تنش (کاروتنوییدها، پرولین و قندهای محلول) موثر بود. کاهش مقادیر مالون‌دی‌آلدهید در شرایط تنش نیز می‌تواند گواهی بر کارکرد مثبت استفاده از محافظهای گیاهی در این شرایط باشد. از سوی دیگر، حضور باکتری حل کننده‌ی فسفر در تعدیل صدمات تنش خشکی و افزایش صفات مختلف از جمله کلروفیل a، کلروفیل b ، شاخص سطح برگ، پرولین و قندهای محلول و کاهش محتوای مالون دی الدئید نیز موثر بود. با این وجود، این میکروارگانیسم‌ها در شرایط تنش متوسط (آبیاری ۶۵ درصد ظرفیت زراعی) قادر بودند از عملکرد موثرتری برخوردار باشند که شاید به‌دلیل ماهیت زنده و تاثیرگذاری شرایط محیطی بر آن‌ها باشد. از این‌رو، با در نظر گرفتن نتایج به‌دست آمده، می‌توان به‌طور کلی بیان نمود که استفاده از محافظهای گیاهی و تلقیح با باکتری حل کننده‌ی فسفر در گندم قادر به بهبود کارکرد این گیاه در شرایط کمبود آب می‌باشد.

سپاسگزاری

از مسئولین محترم دانشگاه ارومیه و دانشگاه محقق اردبیلی بابت فرآهم نمودن امکانات این آزمایش، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع مورد استفاده

Adrees M, Khan ZS, Hafeez M, Rizwan M, Hussain Kh, Asrar M, Alyemeni MN, Wijaya L and Shafaqat Ali Sh. 2021. Foliar exposure of zinc oxide nanoparticles improved the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) and decreased cadmium concentration in grains under simultaneous Cd and water deficient stress. Ecotoxicology and Environmental Safety, 208: 111627. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111627.

Ahluwalia O, Singh PC and Bhatia R. 2021. A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. Resources, Environment and Sustainability, 5: 100032. DOI: 10.1016/j.resenv.2021.100032.

Ahmad P. 2014. Oxidative damage to plants: antioxidant networks and signaling. Elsevier Inc. Academic Press, 635 pp.

Ahmed M, Qadeer U, Ahmed ZI and Hassan FU. 2015. Improvement of wheat (*Triticum aestivum*) drought tolerance by seed priming with silicon. Archive of Agronomy and Soil Science, 62(3): 299-315. https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1048235

Akhtar N, Noshin Ilyas N, Mashwani ZR, Hayat R, Yasmin H, Noureldeen A and Ahmad P. 2021. Synergistic effects of plant growth promoting rhizobacteria and silicon dioxide nano-particles for amelioration of drought stress in wheat. Plant Physiology and Biochemistry, 166: 160-176. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.05.039.

Ali Q, Ali Sh, Iqbal N, Javed MT, Rizwan M, Khaliq R, Shahid S, Perveen R, Alamri SA, Alyemeni MN,Wijaya L and Ahmad P. 2019. Alpha-tocopherol fertigation confers growth physio-biochemical and qualitative yield enhancement in field grown water deficit wheat (*Triticum aestivum* L.). Scientific Reports, 9: 12924. DOI: 10.1038/s41598-019-49481-7.

Arrom L and Munne-Bosch S. 2010. Tocopherol composition in flower organs of Lilium and its variations during natural and artificial senescence. Plant Science, 179: 289-295. DOI: 10.1016/j.plantsci.2010.05.002.

Azaroual SE, Hazzoumi Z, El Mernissi N, Aasfar A, Kadmiri IM and Bouizgarne B. 2020. Role of inorganic phosphate solubilizing *Bacilli* isolated from moroccan phosphate rock mine and rhizosphere soils in wheat (*Triticum aestivum* L.) phosphorus uptake. Current Microbiology, 77: 2391-2404. DOI: 10.1007/s00284-020-02046-8.

Azooz MM and Ahmad P. 2015. Legumes under environmental stress: yield, improvement and adaptations. Published by John Wiley & Sons, Ltd, 328 p. DOI: 10.1002/9781118917091.

Azzedine F, Gherroucha H and Baka M. 2011. Improvement of salt tolerance in durum wheat by ascorbic acid application. Journal of Stress Physiology and Biochemistry, 7: 27-37.

Bates LS, Waldren RP and Teare ID. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and soil, 39(1): 205-207. DOI: 10.1007/BF00018060.

Bukhari MA, Ahmad Z, Ashraf MY, Afzal M, Nawaz F, Nafees M, Jatoi WN, Malghani NA, Shah AN and Manan A. 2021. Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through improving photosynthetic pigments, biochemical and yield characters. Silicon, 13: 4757-4772. DOI: 10.1007/s12633-020-00797-4.

Bukhari MA, Ahmad Z, Ashraf MY, Afzal M, Nawaz F, Nafees M, Jatoi1 WN, Malghani NA, Shah AN and Manan A. 2021. Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through improving photosynthetic pigments, biochemical and yield characters. Silicon, 13: 4757-4772. DOI:10.1007/s12633-020-00797-4

Dubois M, Gilles KA, Hamilton JK, Rebers PA and Smith F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Analytical Chemistry, 28 (3): 350-356. DOI: 10.1021/ac60111a017.

Dwivedi SK, Arora A and Singh VP. 2019. Effects of exogenously applied plant growth regulators on the physiology and anti-oxidant activity of wheat under water deficit condition. Indian Journal of Plant Physiology, 24: 54-62. DOI:10.1007/s40502-018-0407-3

Emam MM, Khattab HE, Helal NM and Deraz AE. 2014. Effect of selenium and silicon on yield quality of rice plant grown under drought stress. Australian Journal of Crop Science, 8: 596-605. DOI:10.1007/s12633-021-01277-z

Etesami H and Maheshwari DK. 2018. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. Ecotoxicology and Environmental Safety, 156: 225-246. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.03.013 .

Faran M, Farooq M, Rehman A, Nawaz A, Saleem MK, Ali N and Siddique KHM. 2019. High intrinsic seed Zn concentration improves abiotic stress tolerance in wheat. Plant Soil, 437: 195-213.

Farouk S. 2011. Ascorbic acid and tocopherol minimize salt-induced wheat leaf senescence. Journal of Stress Physiology and Biochemistry, 7: 58-79.

Foyer CH and Noctor G. 2011.Ascorbate and glutathione: The heart of the redox hub. Plant Physiology, 155: 2-18. DOI: 10.1104/pp.110.167569.

Hadi H, Seyed sharifi R and Namvar A. 2016. Phytoprotectants and abiotic stresses. Urmia Publication, 354 p. [In Persian].

Hafez EM and Gharib HS. 2016. Effect of exogenous application of ascorbic acid on physiological and biochemical characteristics of wheat under water stress. International Journal of Plant Production, 10: 579-596.

Heath RL and Packer L. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Archives of Biochemistry and Biophysics, 125(1): 189-198. DOI: 10.1016/0003-9861(68)90654-1.

Hossain MA, Wani SH, Bhattacharjee S, Burritt DJ and Tran LSPh. 2016. Drought stress tolerance in plants; physiology and chemistry. Springer International Publishing AG Switzerland. 538 pp. DOI: 10.1007/978-3-319-28899-4.

Hussain N, Irshad F, Jabeen Z, Shamsi IH, Li Z and Jiang L. 2013. Biosynthesis, structural, and functional attributes of tocopherols in planta; past, present, and future perspectives. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 61: 6137-6149. https://doi.org/10.1021/jf4010302

Ishaq H, Nawaz M, Azeem M, Mehwish M and Naseem MB. 2021. Ascorbic acid improves salinity tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) by modulating growth and physiological attributes. Journal of Bioresource Management, 7 (4):1-10. DOI: 10.35691/JBM.1202.0160.

Jie G, Gong-she L, Juan G and Jin Zh. 2008. Effects of Vitamin E on the activities of protective enzymes and membrane lipid peroxidation in *Leymus Chinensis* under drought stress. Chemistry Research of Chinese University, 24(1): 80-83.

Karim M, Zhang YQ, Zhao RR, Chen XP, Zhang FS and Zou CQ. 2012. Alleviation of drought stress in winter wheat by late foliar application of zinc, boron, and manganese. Jornal of Plant Nutrition and Soil Sciences, 175: 142-151. DOI: 10.1002/jpln.201100141.

Lalarukh I and Shahbaz M. 2018. Alpha-tocopherol induced modulations in morpho-physiological attributes of sunflower (*Helianthus annuus*) grown under saline environment. International Journal of Agricultural Biology, 20: 661-668. DOI: 10.17957/IJAB/15.0538.

Lichtenthaler HK. 1987. Chlorophylls and carotenoids: the pigments of photosynthetic biomembranes. In: Method in Enzymology, 148: 350-382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1.

Maghsoudi K, Emam Y and Pessarakli M. 2016. Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. Journal of Plant Nutrition, 39: 1001-1015. DOI:10.1080/01904167.2015.1109108

Malik S, Ashraf M, Arshad M and Malik TA. 2015. Effect of ascorbic acid application on physiology of wheat under drought stress. Pakistan Journal of Agricultural Science, 52(1): 209-217. https://doi.org/10.1590/1519-6984.262459

Munne-Bosch S. 2005. The role of α-tocopherol in plant stress tolerance. Journal of Plant Physiology, 162: 743-748. DOI: 10.1016/j.jplph.2005.04.022.

Namvar A, Hadi H and Seyed Sharifi R. 2017. Role of exogenous phytoprotectants in mitigation of adverse effects of abiotic stresses. Journal of Plant Environmental Physiology, 12 (48): 103-128. [In Persian].

Noreen S, Sultan M, Akhter MS, Shah KH, Ummara U, Manzoor H, Ulfat M, Alyemeni MN and Ahmad P. 2021. Foliar fertigation of ascorbic acid and zinc improves growth, antioxidant enzyme activity and

harvest index in barley (*Hordeum vulgare* L.) grown under salt stress. Plant Physiollogy and Biochemistry, 158: 244-254. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.11.007.

Noreen S, Sultan M, Akhter MS, Shah KH, Ummara U, Manzoor H. Ulfat M, Alyemeni MN and Ahmad P. 2021. Foliar fertigation of ascorbic acid and zinc improves growth, antioxidant enzyme activity and harvest index in barley (*Hordeum vulgare* L.) grown under salt stress. Plant Physiology and Biochemistry, 158: 244-254. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.11.007.

Orabi SA and Abdelhamid MT. 2016. Protective role of α-tocopherol on two Vicia Faba cultivars against seawater induced lipid peroxidation by enhancing capacity of anti-oxidative system. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 15(2): 145-154. DOI: 10.1016/j.jssas.2014.09.001.

Othmani A, Ayed S, Bezzin O, Farooq M, Ayed-Slama O, Slim-Amara H, and Ben Younes M. 2021. Effect of silicon supply methods on durum wheat (*Triticum durum* Desf.) response to drought stress. Silicon, 13: 3047-3057. DOI: 10.1007/s12633-020-00639-3.

Othmani A, Ayed S, Bezzin O, Farooq M, Ayed-Slama O, Slim-Amara H and Ben Younes M. 2021. Effect of silicon supply methods on durum wheat (*Triticum durum* Desf.) response to drought stress. Silicon, 13: 3047-3057.

Pei ZF, Ming DF, Liu D, Wan GL, Geng XX and Gong HJ. 2010. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. Journal of Plant Growth Regulation, 29: 106–115. DOI:10.1007/s00344-009-9120-9

Puppe D and Sommer M. 2018. Experiments, uptake mechanisms, and functioning of silicon foliar fertilization: a review focusing on maize, rice and wheat. Advances in Agronomy, 152: 1-49. DOI: 10.1016/bs.agron.2018.07.003.

Rameshraddy Pavithra GJ, Rajashekar Reddy BH, Mahesh Salimath, Geetha KN and Shankar AG. 2017. Zinc oxide nano particles increases Zn uptake, translocation in rice with positive effect on growth, yield and moisture stress tolerance. Indian Journal of Plant Physiology, 22: 287-294. DOI: 10.1007/s40502-017-0303-2.

Rana RM, Rehman SU, Ahmed J and Bilal M. 2013. A comprehensive overview of recent advances in drought stress tolerance research in wheat (*Triticum aestivum* L.). Asian Journal of Agricultural Biology, 1: 29-37.

Rizwan M, Ali S, Ali B, Adrees M, Arshad M, Hussain A, Zia Rehman M and Waris AA. 2018. Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. Chemosphere, 214: 269-277. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.09.120.

Rostamza M, Chaichi MR, Jahansouz MR and Alimadadi A. 2011. Forage quality, water use and nitrogen utilization efficiencies of pearl millet (*Pennisetum americanum* L.) grown under different soil moisture and nitrogen levels. Agricultural Water Management, 98(10): 1607-1614. DOI: 10.1016/j.agwat.2011.05.014.

Sadiq M, Akram NA and Ashraf M. 2018. Impact of exogenously applied tocopherol on some key physiobiochemical and yield attributes in mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] under limited irrigation regimes. Acta Physiololgy Plant, 40: 131-138. DOI:10.1007/s11738-018-2711-y

Sattar A, Wang X, Ul-Allah S, Sher A, Ijaz M, Irfan M, Abbas T, Hussain S, Nawaz F, Al-Hashimi A, Munqedhi, BMA and Skalicky M. 2022. Foliar application of zinc improves morpho physiological and antioxidant defense mechanisms, and agronomic grain biofortification of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water stress. Saudi Journal of Biological Sciences, 29: 1699-1706. DOI: 10.1016/j.sjbs.2021.10.061.

Seleiman MF, Al-Suhaibani N, Ali N, Akmal M, Alotaibi M, Refay Y, Dindaroglu T, Abdul-Wajid HH and Battaglia ML. 2021. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. Plants, 10 (2): 259. DOI: 10.3390/plants10020259.

Seyed sharifi R and Namvar A. 2015. Biofertilizers in Agronomy. Mohaghegh Ardabili Publication, 261 p. [In Persian].

Shafiq S, Akram NA, Ashraf M and Arshad A. 2014. Synergistic effects of drought and ascorbic acid on growth, mineral nutrients and oxidative defense system in canola (*Brassica napus* L.) plants. Acta Physiology Plant, 36: 1539-1553. DOI:10.1007/s11738-014-1530-z

Smolikova GN, Laman NA and Boriskevich OV. 2011. Role of chlorophylls and carotenoids in seed tolerance to abiotic stressors. Russian Journal of Plant Physiology, 58: 965-973. DOI: 10.1134/S1021443711060161.

Wang M, Wang R, Jose Mur LA, Ruan J, Shen Q and Shiwei Guo Sh. 2021. Functions of silicon in plant drought stress responses. Horticultural Research, 8: 254. DOI: 10.1038/s41438-021-00681-1.

Yadav AN. 2021. Soil microbiomes for sustainable agriculture. Springer Nature Switzerland, 465 p. DOI: 10.1007/978-3-030-73507-4

Ye YR, Wang WL, Zheng CS, Fu DJ, Liu HW and Shen X. 2017. Foliar-application of α tocopherol enhanced salt tolerance of Carex leucochlora. Biologia Plantarum, 61: 565-570. DOI: 10.1007/s10535-017-0709-8.