مقاله پژوهشی

تأثیر محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط کم‌آبیاری بر برخی صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک و عملکرد گندم

امیرعطا صالحی[۱]، فرهاد فرهوش [۱*]، غلامعباس اکبری[۲]، الیاس سلطانی[۲] و بهرام میرشکاری[۱]

[۱] گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران

[۲] گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت:۱۴۰۰/۰۹/۱۵، تاریخ پذیرش نهایی:۱۴۰۱/۰۴/۱۴)

چکیده

در این تحقیق به اثرات کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط تنش کم‌آبیاری در مراحل قبل از گلدهی و پر شدن دانه‌ها در گندم پرداخته شد. بدین منظور، این گیاه در مراحل پنجه‌زنی و خوشه‌دهی توسط غلظت ۰/۰۲ درصد نانو دی‌اکسیدتیتانیوم محلول‌پاشی شد و برخی صفات نظیر ارتفاع بوته، شاخص سطح برگ، تعداد پنجه بارور، تعداد دانه، وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک ،شاخص برداشت، محتوای نسبی آب برگ، محتوای کلروفیل کل، محتوای پرولین و مالون‌دی‌آلدئید و فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، و سوپر اکسید دیسموتاز مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان‌دهنده اثرات مثبت کاربرد این نانو ذرات در رشد رویشی و زایشی گیاه گندم در شرایط عادی و تنش بود، به‌طوری‌که در شرایط تنش خشکی موجب افزایش تعداد پنجه‌های بارور، افزایش تعداد دانه و وزن هزار دانه در مقایسه با عدم کاربرد نانو ذرات در شرایط تنش شد. در شرایط عادی و تنش کم‌آبیاری کاربرد این نانو ذرات در زمان پنجه‌زنی اثرات مطلوب‌تری بر خصوصیات رویشی و عملکردی گیاه در مقایسه با زمان خوشه‌دهی داشت و موجب افزایش شاخص برداشت گندم در شرایط خشکی شد. از سویی، کاربرد نانو ذرات تیتانیوم به‌طور موثری از آثار سوء تنش خشکی در زمان‌های قبل از گلدهی و پر شدن دانه‌ها کاست و موجب افزایش فعالیت پرولین شد، همچنین کاربرد ماده مذکور با افزودن بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان از تجمع مالون‌دی‌آلدئید جلوگیری نمود، به‌طوری‌که اتفاقات اخیر موجب افزایش توانایی گندم در مواجه با شرایط تنش خشکی گردید.

کلمات کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، تنش خشکی، کم‌آبیاری ،گندم ، محلول‌پاشی، نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم

مقدمه

از قرن‌هایی دور در میان گیاهان زراعی قابل کشت و کار برای بشر، همواره گندم از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده است. کشت و تولید جهانی گندم از سایر محصولات بیشتر بوده و میزان تولید سالانه آن در جهان ۸/۷۳۷ میلیون تن و مصرف معادل ۷۱۸ میلیون تن است که کشور چین با تولید ۱۳۱ میلیون تن در رتبه نخست، سه کشور قزاقستان، روسیه و اوکراین جمعاً با تولید ۱۰۵ میلیون تن در رتبه دوم و کشور هند با تولید ۹۷ میلیون تن در رتبه سوم تولید این محصول قرار دارند (Bond and Liefert, 2017). در کشور ما نیز در سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۳ میزان تولید گندم حدود ۱۱/۸۲۰ میلیون تن گزارش شده که معادل ۶۲/۹۰ درصد از کل تولید

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: farahvash@iaut.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

محصولات زراعی کشور است. آمار جهانی و داخلی تولید گندم نیز نشان می‌دهد که ایران از نظر تولید گندم در رتبه پانزدهم دنیا قرار دارد (FAO, 2017).

یکی از عواملی که به‌طور مستقیم بر میزان رشد و عملکرد گندم تأثیرگذار بوده و به‌طور محسوسی می‌تواند از شاخص عملکرد این گیاه بکاهد، بروز تنش خشکی با کم‌آبی در زمان رشد گیاه می‌باشد. نتایج تحقیقات (Thornton *et al.*, 2014) نشان داد که تنش خشکی یکی از اصلی‌ترین فاکتورهای اثرگذار بر ترکیبات بذر، میزان پروتئین، عملکرد دانه و درنهایت کیفیت دانه کنجد می‌باشد. بنابراین آبیاری در دوره خشکی به‌ویژه در مرحله زایشی تأثیر مهمی بر رشد گیاه و عملکرد دانه دارد؛ زیرا تعداد سنبله در واحد سطح به همراه تعداد دانه در سنبله تعیین‌کننده اصلی عملکرد دانه به شمار می‌رود (Shepherd *et al.*, 2002). هم‌چنین تنش خشکی می‌تواند باعث پژمردگی گیاه (Schulze *et al.*, 2002)، کاهش محتوی آب نسبی برگ (Mahmodian *et al.*, 2010)، کاهش کلروفیل (Alonso *et al.*, 2002) و تنش‌های اکسیداتیو (طباطبایی، ۱۳۹۳) در گیاه شود.

یکی از مهم‌ترین عوامل بازدارنده رشد غلات موردنیاز بشر و به‌خصوص گندم، تنش کم‌آبی و خشکی وارده به گیاه می‌باشد که سالانه سبب کاهش چشمگیری در عملکرد غلات مختلف می‌شود. تنش خشکی، کمبود آب در خاک یا اتمسفر می‌باشد که باعث کاهش معنی‌دار در محتوای آب گیاه و پتانسیل فشاری (تورژسانس) سلول می‌شود و در بیشتر موارد باعث کاهش سرعت رشد و عملکرد نهایی محصول می‌شود (Wang *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2008). تنش خشکی می‌تواند رشد گیاه را از طریق ایجاد تغییرات مورفولوژیکی و فیزیولویکی در ساختار گیاه تحت تأثیر قرار دهد (Jaleel *et al.*, 2010). بنابراین با کاهش رشد و نمو گیاه افت شدیدی نیز در عملکرد محصول به‌وجود می‌آید. علاوه‌بر تغییرات فیزیولوژیکی که بر اثر کمبود آب در گیاه ایجاد می‌شود، صدمات تنش اکسیداتیو نیز از عوامل مهم محدودکننده رشد و تولیدات گیاهی است که در اثر فقدان شرایط مناسب ایجاد می‌شود. بیشترین خسارت در گیاهان که از طریق تنش‌های محیطی ایجاد می‌شود، در ارتباط با خسارت اکسیداتیو در سطوح مختلف سلولی است (طباطبایی، ۱۳۹۳) که شرایط تنش باعث شکل‌گیری گونه‌های فعال اکسیژن ازجمله رادیکال سوپر اکسید، پراکسید هیدروژن، رادیکال هیدروکسیل و اکسیژن منفرد می‌شود (Owolade *et al.*, 2008).

نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم با کاهش رادیکال آزاد اکسیژن و مالون‌دی‌آلدئید و افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی باعث کاهش اثرات منفی تنش می‌شود (Lei *et al.*, 2007) و با افزایش آسیمیلاسیون کربن فتوسنتزی و فعال نمودن آنزیم روبیسکو (کمپلکس روبیسکو و روبیسکو اکتیواز) باعث افزایش کربوکسیلاسیون و متعاقب آن افزایش رشد گیاهان می‌گردد (Gao *et al.*, 2008). نتایج مطالعات (منصوری و همکاران، ۱۳۹۶) نشان داد که استفاده از این ماده در شرایط تنش خشکی می‌تواند سبب افزایش عملکرد در گیاه زیره سبز شود. همچنین (Jaberzadeh *et al.*, 2013) گزارش کردند که نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط تنش خشکی سبب افزایش تعداد سنبله در گندم می‌شود. طبق مطالب بیان شده و نیز به‌علت اینکه تنش خشکی از دیرباز در کشور ما عامل محدودکننده رشد گیاهان زراعی بوده است، در این تحقیق به بررسی اثر نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بر رشد و عملکرد گندم پرداخته شد و اثرات این ماده در شرایط عادی و کم‌آبی مورد مقایسه قرار گرفت. از سویی، در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در مورد امکان استفاده از نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط تنش خشکی بر روی گیاهان مختلف انجام پذیرفته است.

به‌عنوان مثال منصوری و همکاران (۱۳۹۶) به‌منظور بررسی اثر محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بر عملکرد تعدادی از اکوتیپ‌های زیره سبز تحت تنش خشکی مشاهده کردند که محلول‌پاشی نانو ذرات تیتانیوم با غلظت ۰/۰۳ درصد می‌توان باعث کاهش اثرات سوء تنش خشکی بر این گیاه شود و عملکرد را افزایش دهد. همچنین (Jaberzadeh *et al.*,

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

2013) با بررسی اثر نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بر عملکرد گندم در شرایط تنش خشکی نتیجه گرفتند که کاربرد این ماده با غلظت ۰/۰۲ درصد موجب افزایش تعداد سنبله در شرایط تنش شد. بنابراین با توجه به اینکه گندم یکی از مهم‌ترین غلات موردنیاز انسان است و همچنین تنش خشکی عاملی بازدارنده در تولید این محصول به شمار می‌رود، در این تحقیق به بررسی اثرات کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بر گیاه گندم در شرایط تنش خشکی پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق طی سال‌های ۱۳۹۴ الی ۱۳۹۶ در مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران واقع در شهرستان پاکدشت با مشخصات عرض جغرافیایی ۳۳ درجه شمالی، طول جغرافیایی ۵۱ درجه شرقی و ارتفاع ۱۱۸۰ متری از سطح دریا بر روی گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.) انجام شد. لازم به ذکر است که تاریخ کشت توصیه‌شده گندم در منطقه مورد بررسی و با توجه به دمای هوا و ویژگی‌های جغرافیایی ناحیه، اواسط آبان بود که رعایت گردید. این آزمایش در قالب بلوک‌های کامل تصادفی به‌صورت اسپلیت پلات در ۴ تکرار اجرا شد و دارای دو فاکتور اصلی آبیاری و فاکتور فرعی محلول‌پاشی با نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بود. به‌صورتی‌که فاکتور اصلی یا آبیاری در سه سطح شامل آبیاری کامل (I_1)، قطع آبیاری قبل از گلدهی (I_2) و قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه‌ها (I_3) و فاکتور فرعی یا محلول‌پاشی با نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم نیز در سه سطح شامل محلول‌پاشی در زمان پنجه‌زنی (S_1)، محلول‌پاشی در زمان شروع خوشه‌دهی (S_2) و عدم محلول‌پاشی (S_3) بود که درنهایت به ۳۶ کرت آزمایشی منتهی شد. بر این اساس آبیاری در زمان‌های مورد نظر قطع گردید و تنش خشکی در مرحله قبل از گلدهی (I_2) و در هنگام پر شدن دانه‌ها (I_3) بر گیاهان اعمال گردید. حصاربندی و نخ‌کشی مزرعه به‌منظور جلوگیری از هجوم احتمالی پرندگان و آسیب به جوانه‌ها و دانه‌های گندم در هر دو سال انجام شد. علاوه بر این، اقداماتی ازجمله انتخاب زمینی به مساحت ۴۴۰ مترمربع (سطح زیر کشت مفید ۴۰۰ مترمربع) در مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان و آماده‌سازی آن با شخم و تهیه بستر، کرت بندی زمین مورد نظر و نمونه‌برداری از خاک مزرعه، کاشت بذور گندم به مقدار ۵ کیلوگرم و تکمیل کاشت بذرها و آبیاری به‌صورت مشترک در هر دو سال صورت گرفت. کاشت بذور به‌صورت دستی در دو طرف شیارهای مزرعه انجام شد. هر کرت آزمایشی در این تحقیق شامل ۴ ردیف کاشت به طول ۴ متر با فاصله ردیف ۴۰ سانتی‌متر بود که در هر ردیف ۲ خط کاشت اجرا شد. بین کرت‌های اصلی ۴ متر و بین کرت‌های فرعی ۱۶۰ سانتی‌متر فاصله در نظر گرفته شد. شیوه کشت در این تحقیق به‌صورت شیاری بوده که پس از آماده‌سازی زمین مطابق نقشه طرح کاشت بذرها انجام شد. به‌علاوه اینکه یک ردیف از هر طرف حاشیه محسوب گردید و در مجموع ۲ ردیف حاشیه در هر کرت فرعی در نظر گرفته شد. بعد از کاشت و سبز شدن بذرها و در طی دوره آزمایش، مبارزه با علف‌های هرز به‌صورت دستی و مکانیکی انجام پذیرفت و کود دهی با کود اوره نیز طبق نیاز رقم سیروان و آزمایش‌های خاک مزرعه به‌صورت دوره‌ای و به میزان ۸ کیلوگرم در واحد سطح طرح آزمایشی انجام شد. همچنین در زمان خوشه‌دهی با آفت سن گندم به‌صورت شیمیایی مبارزه به عمل آمد. در مرحله بعد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم تهیه شده در غلظت ۰/۰۲ درصد در زمان‌های مقرر بر روی گیاهان محلول‌پاشی شد (Jaberzadeh *et al*., 2013).

نحوه آماده‌سازی محلول نانو دی‌اکسیدتیتانیوم: طی آزمایشی به‌منظور آماده‌سازی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم، ابتدا ۲۰ گرم دی‌اکسیدتیتانیوم در آب حل و ۰/۰۱ میلی‌لیتر از محلول به حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتر رسانیده شد. بدین گونه، غلظت‌های مختلف دی‌اکسیدتیتانیوم (۰/۰۱ درصد، ۰/۰۲ درصد و ۰/۰۳ درصد) آماده شدند و از دستگاه مافوق صوت (مدل VT۳۰۰ ساخت شرکت BioLogics امریکا با قابلیت توان ۳۰۰ وات و فرکانس خروجی ۲۰ کیلوهرتز) نیز به‌منظور همگن نمودن آن‌ها استفاده شد. ازآنجایی‌که، در میان تیمارهای مختلف تیتانیوم، کاربرد غلظت ۰/۰۲ درصد از این ماده تقریباً

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

در تمام صفات زراعی ازجمله ارتفاع بوته، وزن خوشه، تعداد خوشه، تعداد دانه، وزن ۱۰۰۰ دانه، عملکرد نهایی، زیست‌توده (بیوماس)، گلوتن و نشاسته موجب افزایش شد غلظت ۰/۰۲ درصد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم تحت شرایط تنش کم‌آبی استفاده شد (Jaberzadeh, *et al.*, 2013). همچنین نوری و همکاران (۱۳۹۶) نیز این غلظت را توصیه نموده‌اند. درنتیجه از غلظت ۰/۰۲ درصد از نانو دی‌اکسیدتیتانیوم در این آزمایش استفاده شد و روش تهیه این محلول به این صورت بود که با توجه به آنکه در نانو دی‌اکسیدتیتانیوم تهیه شده (TiO_2=10% w/Lit) هر ۱۰۰۰۰۰ مولکول دی‌اکسیدتیتانیوم در $۱۰^۶$ مولکول آب حل شده است، پس برای جدا نمودن ۰/۰۲ درصد از محلول جهت محلول‌پاشی به ۲۰۰ پی پی‌ام از این ماده نیاز داریم. بنابراین در ۱۰ لیتر آب مقطر، باید ۲۰ سی‌سی از محلول دی‌اکسیدتیتانیوم نانو جهت اسپری کردن بر روی گیاهان افزوده شود. از آن‌جایی‌که محلول‌پاشی توسط سم‌پاش دستی ۲۰ لیتری صورت گرفت، ۴۰ سی‌سی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم جهت محلول‌پاشی استفاده شد.

در هر سال ۶ مرحله نمونه‌برداری مرتبط با آن سال انجام شد. نمونه‌برداری اول در هر دو سال قبل از محلول‌پاشی و در مرحله پنجه‌زنی صرفاً جهت بررسی سطح برگ و دست‌یابی به روند شاخص سطح برگ انجام شد و البته اندازه‌گیری این صفت تا نمونه‌برداری پنجم ادامه یافت (لازم به ذکر است، در نمونه‌برداری آخر به‌دلیل اینکه زمان برداشت محصول بود، سطح برگ سبزی وجود نداشت). بنابراین پس از انجام اولین نمونه‌برداری، اقدام به محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم گردید (تیمار S_1). نمونه‌برداری دوم در سال‌های اول و دوم بعد از محلول‌پاشی S_1 صورت گرفت. لازم به ذکر است که چون در این مرحله از نمونه‌برداری هیچ تنش خشکی (تیمارهای I_2 و I_3) اعمال نشده بود، سطوح I_1 تا I_3 یکی بودند و از طرفی نیز تیمارهای S_2 و S_3 هنوز اعمال نشده بودند. نمونه‌برداری سوم در سال‌های اول و دوم بعد از محلول‌پاشی S_2 صورت گرفت. در این مرحله از نمونه‌برداری، مزرعه در حال تشکیل خوشه بود و هنوز از غلاف برگ خارج نشده بود. همچنین هنوز هیچ تنش خشکی (تیمارهای I_2 و I_3) بر گیاهان اعمال نشده بود (سطوح I_1 تا I_3 یکی بودند). نمونه‌برداری چهارم در سال‌های اول و دوم بعد از تنش خشکی I_2 صورت گرفت. نمونه‌برداری پنجم در سال‌های اول و دوم بعد از تنش خشکی I_3 صورت گرفت. در این مرحله از نمونه‌برداری، سطوح I_2 و I_3 در حال زرد شدن بودند، به‌طوری‌که ۹۰ درصد آن‌ها زرد شده بود، اما سطح I_1 هنوز سبز مانده بود و تنها بخش کمی از آن به زردی تغییر رنگ داده بود. به‌علاوه اینکه دانه‌ها در حال تشکیل شدن بودند و تیمار I_2 در این نمونه‌برداری در سال دوم فاقد سطح برگ بود. و نمونه‌برداری آخر در سال‌های اول و دوم برای تعیین عملکرد نهایی گیاه گندم اجرا گردید. پس از انجام هر مرحله از نمونه‌برداری و اعمال تیمارهای مورد نظر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک مربوطه مورد بررسی قرار گرفت.

ارتفاع بوته: ارتفاع بوته عبارت است از فاصله بین سطح زمین تا انتهای خوشه در ساقه اصلی بدون احتساب طول ریشک. ارتفاع بوته گیاهان مورد بررسی با استفاده از خط‌کش با دقت میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

شاخص سطح برگ: شاخص سطح برگ (LAI) بیان‌کننده نسبت سطح برگ به سطح زمین اشغال شده توسط گیاه است و با استفاده از دستگاه Leaf Area Meter مدل WinDIAS Leaf Image Analysis System اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری تعداد پنجه بارور، تعداد دانه و وزن هزاردانه: تعداد پنجه بارور در واحد سطح که یکی از مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده عملکرد دانه محسوب می‌شود، در چهارچوبی به مساحت یک متر پس از انتخاب تصادفی ۵ سنبله بارور و شمارش تعداد پنجه‌های بارور از بوته‌ها به‌دست آمد. جهت اندازه‌گیری تعداد دانه، پنج بوته در هر کرت به‌طور تصادفی از قسمت‌های غیر حاشیه‌ای جدا گردید و سنبله‌های مربوط به هر کرت در پاکت جداگانه‌ای با ذکر مشخصات قرار داده‌شده و پس از کوبیدن سنبله‌ها و شمارش تعداد دانه‌ها میانگین تعداد دانه‌ها در هر ۵ بوته برای هر کرت محاسبه شد. برای اندازه‌گیری وزن هزار دانه به نمونه‌گیری از محصول دانه

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

برداشت شده در هر کرت مبادرت گردید و شمارش بذور به‌صورت دستی انجام و با ترازوی ۰/۰۰۱ گرم توزین شد.

اندازه‌گیری عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت: برای تعیین عملکرد بیولوژیک یا وزن خشک کل در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک بوته‌های برداشت شده از یک مترمربع از هر کرت به مدت ۲۴ ساعت در داخل آونی با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و با ترازوی حساس ۰/۰۰۱ گرم توزین شدند (یعقوبیان و همکاران، ۱۳۹۶). شاخص برداشت نیز از تقسیم عملکرد دانه (برحسب کیلوگرم در هکتار) بر عملکرد بیولوژیک (برحسب کیلوگرم در هکتار) حاصل شد و نتیجه به‌دست آمده برحسب درصد بیان شد. برای محاسبه عملکرد دانه نیز از اندازه‌گیری وزن دانه‌های موجود در مابقی محدوده مورد نظر در مرحله رسیدگی کامل استفاده گردید (جعفری و همکاران، ۱۳۹۷).

اندازه‌گیری محتوای آب نسبی برگ: اندازه‌گیری محتوای آب نسبی برگ (RWC) با کمک روش Morant-Manceau (۲۰۰۴) صورت گرفت و با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

خشک برگ- وزن‌تر برگ) = محتوای آب نسبی برگ

۱۰۰ × (وزن خشک برگ− وزن تورمی برگ) ÷ (وزن

اندازه‌گیری محتوای کلروفیل کل: برای اندازه‌گیری کلروفیل کل، ۰/۱ گرم نمونه برگ توزین شد و با استفاده از نیتروژن مایع نمونه کوبیده شد. سپس ۲۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد برای استخراج کلروفیل به نمونه اضافه شد و نمونه در دستگاه سانتریفیوژ به مدت پنج دقیقه و ۵۰۰۰ دور سانتریفیوژ شد و از محلول رویی برای تعیین میزان کلروفیل استفاده شد. در آخر میزان جذب در طول‌موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر قرائت شد و مقدار کلروفیل برحسب میلی‌گرم در گرم وزن‌تر بیان گردید (Arnon, 1949).

اندازه‌گیری پرولین: برای اندازه‌گیری محتوای پرولین در گیاه از روش (Bates *et al.*, 1973) استفاده شد. ابتدا ۰/۵ گرم از نمونه گیاهی پس از خارج ساختن از فریزر توزین شد و به آن‌ها ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالسیلیک ۳ درصد اضافه و در هاون چینی خوب سائیده و هموژنیزه شدند. سپس مخلوط حاصل در درون لوله آزمایش ریخته شده ۱۰ دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. ۲ میلی‌لیتر از عصاره صاف شده برداشته و در یک لوله آزمایش ریخته شد. سپس به هر لوله ۲ میلی‌لیتر معرف نین هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک اضافه گردید. لوله‌های آزمایش در بن ماری با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت قرار داده شدند و پس از یک ساعت لوله‌ها جهت خاتمه واکنش در داخل حمام یخ گذاشته شدند. پس از سرد شدن لوله‌ها، به آن‌ها ۴ میلی‌لیتر تولوئن افزوده و ۳۰ ثانیه هم زده شد. پس از تشکیل دو فاز مجزا قسمت رنگی برداشته شد و توسط اسپکتروفتومتر میزان جذب آن‌ها در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر قرائت گردید. آنگاه غلظت پرولین برحسب میکرومول بر گرم ماده‌تر با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

عدد خوانده‌شده توسط دستگاه)= پرولین

(۵ ÷ وزن نمونه) ÷ (۵/۱۱۵ ÷ تولوئن مصرفی×

اندازه‌گیری مالون‌دی‌آلدئید: جهت اندازه‌گیری مالون‌دی-آلدئید بافت گیاهی استخراج و با آب مقطر شستشو داده شد. سپس ۰/۲ گرم از آن به قطعات کوچک تقسیم و با هموژنایزر در دو میلی‌لیتر محلول تری‌کلرواستیک‌اسید پنج درصد در مجاورت یخ هموژن گردید. سپس در ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ و محلول روئی برداشت شد. ۰/۵ میلی‌لیتر از این محلول با ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول تیوباربیتوریک اسید و تری‌کلرواستیک ۲۰ درصد مخلوط و در ۹۶ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۵ دقیقه نگهداری شد. سپس در شرایط سرد در ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت پنج دقیقه سانتریفوژ و جذب محلول روئی در طول‌موج ۵۳۲ نانومتر اندازه‌گیری شد. از محلول تیوباربیتوریک اسید و تری‌کلرواستیک ۲۰ درصد نیز به‌عنوان شاهد استفاده شد (Ohkawa *et al.*, 1979).

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز: فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز به روش Nakano and Asada (۱۹۸۱) مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌طوری‌که با بررسی میزان پراکسیداسیون آسکوربات با افزایش جذب در طول‌موج ۲۹۰ نانومتر انجام شد. مخلوط واکنش شامل بافر فسفات ۵۰ میلی-

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

مولار با pH برابر ۷، اسید آسکوربیک ۰/۵ میلی‌مولار، پراکسید هیدروژن ۱/۲ میلی‌مولار و EDTA به میزان ۰/۱ میلی‌مولار بود. واکنش با افزودن ۲۰۰ میکرومولار عصاره آنزیمی در حجم نهایی ۳ میلی‌لیتر آغاز گردید. با اضافه کردن پراکسید هیدروژن فعالیت آنزیمی شروع شد.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز: فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز بر اساس روش (Minami and Yoshikawa, 1979) مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین‌صورت که محلول واکنش شامل بافر تریس با غلظت ۵۰ میلی‌مول و با pH برابر ۸/۲ به همراه ۰/۱ میلی‌مول EDTA مقدار ۱/۴۲ درصد از Triton X- 1 ۰/۰۵ میلی‌مول از نیترو بلو تترازولیم و پیروگالول با غلظت ۱۶ میلی‌مول بود که به دو میلی‌لیتر از این محلول برای انجام واکنش ۱۰۰ میکرولیتر عصاره بافت گیاه اضافه شد و در دمای آزمایشگاه بعد از یک دقیقه تغییر جذب نوری آن در ۵۲۰ نانومتر با اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. بر اساس منحنی استاندارد، مقدار فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز مشخص گردید.

آنالیز داده‌ها توسط نرم‌افزار آماری SPSS ویرایش ۱۶، انجام شد و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵٪ ارزیابی و برای رسم نمودار از نرم‌افزارExcel 2016 استفاده گردید.

نتایج و بحث

در جداول ۱ و ۲ اثرات ساده تیمارهای کم‌آبی، اثرات ساده تیمارهای محلول‌پاشی با نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم، اثرات متقابل میان این تیمارها و همچنین اثرات زمان بر صفات اندازه‌گیری شده در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، مورد بررسی آماری قرار گرفته است. به‌طوری‌که اثرات ساده تیمارهای کم‌آبی و محلول‌پاشی به‌همراه اثرات متقابل آنها بر روی صفات مورفولوژیک، صفات مرتبط با عملکرد و صفات فیزیولوژیک گیاه گندم معنی‌دار شده است. به عبارت دیگر اثرات ساده و متقابل تیمارهای این آزمایش بر صفات مورد بررسی اثر مثبت و معنی‌داری داشته‌اند. همچنین از آن‌جایی‌که این تحقیق در دو سال متوالی به مرحله اجرا درآمد، اثرات زمان نیز بر صفات مورد بررسی (به‌جز محتوای آب نسبی و کلروفیل کل) معنی‌دار شده است و با گذشت زمان تغییراتی در آن‌ها رخ داده است.

ارتفاع بوته: نمودار ۱ نشان‌دهنده این مسئله است که کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم توانسته است به‌طور معنی‌داری سبب کاهش اثر منفی تنش کم‌آبی بر ارتفاع گیاه شده و موجبات رشد بهتر و افزایش ارتفاع را در این گیاهان فراهم آورد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، کاربرد این ماده در زمان قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه‌ها ارتفاع را در هر دو زمان مصرف نانو ذرات (مراحل پنجه‌زنی و خوشه‌دهی) در مقایسه با قطع آبیاری در زمان گلدهی و استفاده از این ماده حاصل کرده است هرچند این اختلاف معنی‌دار نمی‌باشد. در مورد تیمارهای بدون تنش خشکی هم کاربرد این ماده به‌خصوص در زمان پنجه‌زنی تأثیر مثبتی بر افزایش ارتفاع گیاهان گندم مورد بررسی داشته است.

تنش خشکی یا کم‌آبی اثرات مخرب زیادی بر گیاه داشته و با تحمیل شرایط سخت بر گیاه، سبب کاهش رشد و عملکرد در گیاهان مختلف می‌شود. نتایج سایر تحقیقات (Hassanpour *et al.*, 2008) نشان داده است خشکی زمانی رخ می‌دهد که پتانسیل آب خاک به‌اندازه‌ای منفی شود که امکان دسترسی گیاه به آب، به زیر میزان مطلوب برای رشد و نمو برسد و در این شرایط گیاه برای بقا، از رشد خود می‌کاهد. همچنین با توجه به اینکه در زمان اعمال تنش خشکی بر گیاه در مرحله گلدهی تنها بخش کوچکی از خوشه خارج شده است، قطع آبیاری در این مرحله (در مقایسه با قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه‌ها) بر روی طول پدانکل و همچنین ارتفاع بوته اثر نامساعدتری داشته است و با نتایج پاک نژاد و همکاران (۱۳۹۶) هم سو می‌باشد. به‌علاوه اینکه تنش خشکی باعث کاهش ارتفاع گیاه و طول پدانکل می‌شود (Kilic and Yagbasanlar, 2010).

اما از سویی دیگر نتایج سایر تحقیقات (Moaveni *et al.*, 2011) نشان داد که ارتفاع بوته گندم در پاسخ به تیمارهای مختلف نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم افزایش یافته است، زیرا نانو ذرات در تحریک رشد رویشی و تسهیل در جذب عناصر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

جدول ۱- جدول تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر صفات مورفولوژیک و صفات مرتبط با عملکرد

منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع بوته	شاخص سطح برگ	تعداد دانه	تعداد پنجه بارور	وزن هزاردانه	عملکرد بیولوژیک	شاخص برداشت
تکرار	۳	۰/۴۲	۰/۶۶	۰/۶۲	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۶۶	۰/۱۴
فاکتور I (کم آبیاری)	۲	۰/۰۷۰**	۰/۴۸*	۰/۹**	۰/۳۰۸**	۰/۵۱**	۰/۵۳*	۰/۵۲**
خطای I	۲	۰/۰۷۰**	۰/۴۸*	۰/۱۵*	۰/۲۳۹**	۰/۰۹**	۰/۰۰۹۴*	۰/۰۵۰۲**
فاکتور S (محلول‌پاشی)	۲	۰/۲**	۰/۴۳۴**	۰/۱*	۰/۱۷۴*	۰/۷۲**	۰/۷۹**	۰/۴**
خطای S	۲	۰/۰۲**	۰/۴۳۴**	۰/۰۸۹**	۰/۳۸۱**	۰/۱*	۰/۰۰۶۵**	۰/۰۲۳**
S × I	۴	۰/۹۷**	۰/۶۴۴**	۰/۰۲**	۰/۳۳**	۰/۸۲**	۰/۷۲**	۰/۸۶*
I × T	۲	۰/۱۴ns	۰/۱۷ns	۰/۱۹ns	۰/۲۷ns	۰/۱۶ns	۰/۱۴ns	۰/۱۹ns
S × T	۲	۰/۲ns	۰/۰۸ns	۰/۲۲ns	۰/۰۳ns	۰/۸۱ns	۰/۴۱ns	۰/۰۶ns
I × S × T	۴	۰/۵۵ns	۰/۰۶ns	۰/۴۸ns	۰/۷۱ns	۰/۷۴ns	۰/۰۳ns	۰/۶ns
T (زمان)	۱	۰/۲۸**	۰/۷۲۳**	۰/۳۷*	۰/۴۹**	۰/۸۳*	۰/۲۶**	۰/۰۷**
خطای کل	۶	۰/۲۳	۰/۸۸۵	۰/۵۱	۰/۸۹	۰/۶۴	۰/۰۷	۰/۱۴

ns اثر غیر معنی‌داری، * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

جدول ۲- جدول تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر صفات فیزیولوژیک و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان

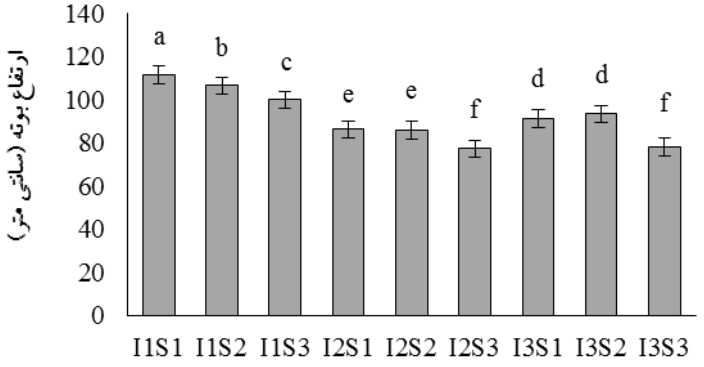
منابع تغییرات	درجه آزادی	محتوای آب نسبی	کلروفیل کل	مالون دی‌آلدئید	پرولین	سوپر اکسید دیسموتاز	آسکوربات پراکسیداز
تکرار	۳	۰/۲۱	۰/۰۷	۰/۸۶	۰/۶۶	۰/۶۱	۰/۹
فاکتور I (کم آبیاری)	۲	۱۸/۵**	۵/۶۵*	۴/۲*	۱۲/۹۲*	۵/۲۷**	۴/۰۱*
خطای I	۲	۰/۴۹	۰/۶۶	۰/۷۳	۰/۱۲	۰/۹۳	۰/۹۱
فاکتور S (محلول‌پاشی)	۲	۴۱/۲۲**	۱۳/۶۳**	۱۷/۸۳**	۸۹/۲**	۳۱/۶۹**	۷۶/۳۹**
خطای S	۲	۰/۹۴	۰/۵۷	۰/۵۹	۰/۴۷	۰/۹۱	۰/۷۷
S × I	۴	۱۹/۵۱*	۱۸/۵۷**	۱۱/۴۱*	۶/۹**	۱۸/۸**	۱۰/۴۸*
I × T	۲	۱۳/۱۱ns	۱۴/۰۹ns	۱۳/۱۸ns	۸/۴۴ns	۱۹/۰۵ns	۱۴/۰۹ns
S × T	۲	۱۶/۴۳ns	۱۹/۱۱ns	۲۰/۲۵ns	۱۸/۴۶ns	۲۸/۳۷ns	۲۲/۴۱ns
I × S × T	۴	۱۷/۵۳ns	۲۲/۴۳ns	۲۶/۱۵ns	۱۶/۴۱ns	۱۳/۲۹ns	۱۸/۷۷ns
T (زمان)	۱	۹/۷۶ns	۱۲/۰۳ns	۷/۲۷**	۱۵/۱۲**	۱۷/۰۳**	۱۰/۶۱**
خطای کل	۶	۱/۴۲	۱/۰۸	۰/۸۹	۱/۳۴	۱/۲۴	۱/۹۲۷

ns اثر غیر معنی‌داری، * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

میکرو به ریشه گیاهان نقش دارند (امینیان و همکاران، ۱۳۹۶). بدین ترتیب کاربرد دی‌اکسیدتیتانیوم به‌صورت ذرات نانو در این تحقیق نیز منجر به افزایش رشد و عملکرد گیاه گندم شده است. بر اساس نتایج تحقیقات (Yang, 2006) کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم می‌تواند جذب نیتروژن را تحت تأثیر قرار داده و سبب جذب مقادیری بالاتر از عنصر حیاتی در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]



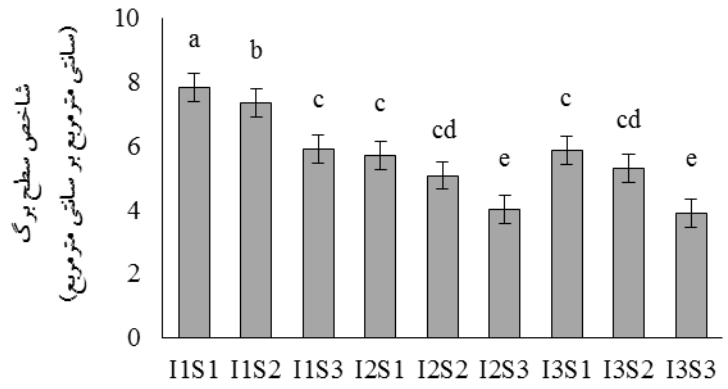
نمودار ۱- اثر متقابل تنش کم‌آبی و کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بر ارتفاع گندم. تیمارهای کم‌آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها) ،تیمارهای محلول‌پاشی (S1: محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول‌پاشی)

گیاهان شود. پس درنتیجه به رشد و عملکرد بهتری در گیاه منجر می‌شود که افزایش ارتفاع بوته در اثر کاربرد این ماده می‌تواند گواهی بر این ادعا باشد. بنابراین یافته‌های این تحقیق نیز با این محققین کاملاً در یک جهت قرار دارند. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۱) در می‌یابیم که تأثیر سال بر میانگین ارتفاع گیاه گندم معنی‌دار می‌باشد.

شاخص سطح برگ: نمودار ۲ نشان می‌دهد که عنصر تیتانیوم توانسته است تا بر اثرات سوء تنش خشکی بر کاهش سطح برگ گیاه گندم غلبه کرده و سبب افزایش این شاخص مهم در گیاهان تیمار شده با نانو ذرات این عنصر شوند. نکته قابل‌تأمل این است که در هر دو مرحله اعمال تنش خشکی، محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در مرحله پنجه‌زنی اثرات بهتری را بر سطح برگ گیاه بر جای گذاشته است. در هر صورت استفاده از این ماده توانسته است تا سطوح بالاتری از این شاخص را در گیاهان تیمار شده با آن به وجود آورد و وضعیت گیاهان تحت تنش کم‌آبی را در این صفت به آستانه سطح برگ گیاهان تنش نیافته برساند. در مورد گیاهان تنش نیافته نیز کاربرد این عنصر در مرحله پنجه‌زنی نتایج بهتری را نسبت به مرحله خوشه‌دهی به خود اختصاص داده است.

از آن‌جایی‌که ایران جزو مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا محسوب می‌شود و نوسانات بارندگی زیادی در این کشور وجود دارد، ریسک مواجه شدن گیاهان با تنش کم‌آبی و به دنبال آن کاهش رشد و نمو آن‌ها به‌خصوص برای محصولات زراعی مانند گندم بسیار بالا است. تنش خشکی یکی از علل اصلی خسارت به گیاهان زراعی در سرتاسر جهان از طریق کاهش میانگین عملکرد تا میزان ۵۰ درصد است (Inamullah *et al*., 1999). نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که تنش خشکی باعث کاهش سطح برگ، مقدار کلروفیل برگ، فتوسنتز و نهایتاً کاهش عملکرد دانه می‌شود (Athar and Ashraf, 2005). به‌علاوه اینکه سرعت پیری برگ پرچم در اثر تنش خشکی افزایش می‌یابد که در این وضعیت نیتروژن و مواد محلول برگ پرچم به دانه‌ها منتقل می‌شوند و در برگ خود تخریبی روی می‌دهد (جعفرنژاد و همکاران، ۱۳۹۲). در آزمایش بر روی گیاه جو، تنش رطوبتی بعد از ۹ روز باعث کاهش سطح برگ و طول ریشه در دو رقم جو شد و همچنین میزان وزن خشک قسمت هوایی و ریشه در زمان تنش کاهش زیادی نسبت به شاهد نشان داد. این امر در حقیقت از طریق فقدان آب درون سلولی و آسیب به فرآیندهای متابولیکی و فیزیولوژیکی در گیاه اعمال می‌شود (Anjum *et al*., 2003). همچنین طبق گزارش (هاشمی دزفولی و همکاران،۱۳۷۷) باوجود شرایط آب و هوایی متغیر و عملیات زراعی مختلف حدود نیمی از نوسانات عملکرد مربوط به دوام سطح برگ بوده و تداوم دوام برگ بر روی بوته می‌تواند منجر به افزایش عملکرد شود. بر این اساس یکی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]



نمودار ۲- اثر متقابل تنش کم‌آبی و کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر شاخص سطح برگ گندم. تیمارهای کم‌آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها) ،تیمارهای محلول‌پاشی (S1: محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول‌پاشی)

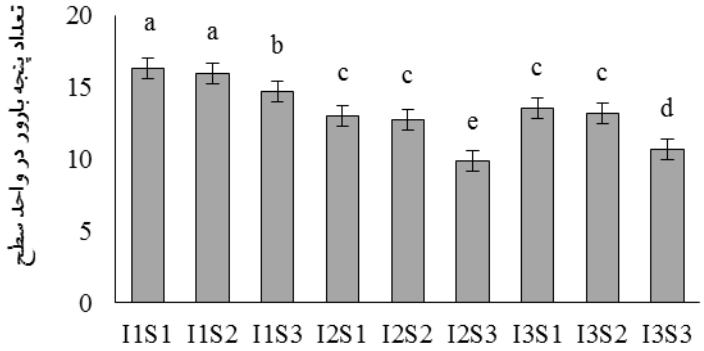
از راهکارهای کاهش اثرات زیان بار تنش‌های غیر زیستی استفاده از روش‌های تغذیه معدنی ازجمله تیتانیوم می‌باشد که بی‌شک درصورتی‌که در مقیاس نانو به کار گرفته شود، نه‌تنها از خصوصیات منحصربه‌فرد نانو ذرات سود برده می‌شود، بلکه در صورت استفاده با غلظت‌های مناسب مقرون به صرفه بوده و اثر سمیت در پی نخواهد داشت (Qi *et al*., 2013). تیتانیوم از لحاظ فراوانی نهمین عنصر موجود در پوسته زمین است که البته از جهت فلز انتقالی در جایگاه دوم قرار دارد و شواهد نشان می‌دهد که این عنصر می‌تواند تا حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد باعث افزایش محصول دهی در گیاهان شود (Feizi *et al*., 2013). نتایج این تحقیق نیز حاکی از این است کاربرد این ماده به‌صورت ذرات نانو می‌تواند سبب رشد بهتر گیاه از یک سو و افزایش تحمل آن به تنش خشکی شود. (نوری و همکاران، ۱۳۹۶) با بررسی اثر محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بر رشد و عملکرد گیاه عدس گزارش کردند که تیمار نانو دی‌اکسیدتیتانیوم باعث افزایش در صفات کمی و کیفی گیاه شد و غلظت‌های مختلف این ماده بر صفات رویشی و زایشی گیاه اثر معنی‌داری داشت.

در طی نمونه‌برداری‌های مختلف در هر دو سال و با افزایش رشد گیاه، شاخص سطح برگ نیز از خود افزایش نشان داد و توسعه سطح برگ سبب بهبود جذب نور، فتوسنتز بیشتر و افزایش رشد گیاه گردید، اما با شروع دوره زایشی گیاه و تغییر مسیر آب و مواد غذایی از برگ‌ها به سوی دانه‌ها، از سطح برگ نیز کاسته شد. این کاهش سطح برگ به‌وضوح در مقایسه‌ای میان تیمارهای I_1S_3، I_2S_3 و I_3S_3 قابل‌رؤیت می‌باشد. این روند در شاخص‌های مرتبط با سطح برگ نظیر LAD و LWR نیز دیده شد. بنابراین سطح برگ شاخصی است که با زمان اثر مستقیمی دارد. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۱) درمی‌یابیم که تأثیر سال بر میانگین شاخص سطح برگ گیاه گندم معنی‌دار می‌باشد.

تعداد پنجه بارور: بر اساس نمودار ۳ محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط عادی و قطع آبیاری توانسته است تا تولید تعداد پنجه بارور را افزایش دهد به‌طوری‌که محلول‌پاشی در زمان پنجه‌زنی و محلول‌پاشی در مرحله شروع خوشه‌دهی به‌ترتیب ۱۷/۱۴ درصد و ۱۵/۴۱ درصد نسبت به عدم محلول‌پاشی سبب تولید بیشتر پنجه بارور شدند. با نگاهی به نتایج می‌توان دریافت که اولاً محلول‌پاشی در زمان پنجه دهی توانسته است تا تعداد پنجه بارور بیشتری را تولید نماید و ثانیاً اثرات کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در تیمار قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه‌ها بر این صفت بهتر بوده است.

برخی از محققین نظیر (Donaldson *et al*., 2001) تعداد پنجه بارور در واحد سطح را به‌عنوان مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده عملکرد دانه بیان نموده‌اند و معتقدند که وجود

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]



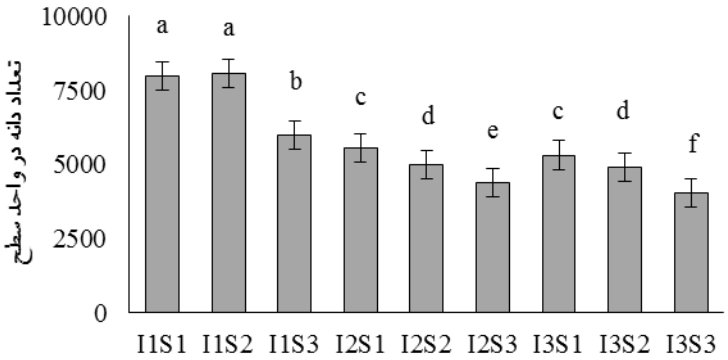
نمودار ۳- اثر متقابل تنش کم‌آبی و کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر تعداد پنجه بارور گندم. تیمارهای کم‌آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها) ،تیمارهای محلول‌پاشی (S1: محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول‌پاشی)

تراکم بهینه به تولید حداکثر پنجه بارور در گندم کمک می‌کند، اما نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تنش کم‌آبی بر کاهش تعداد پنجه‌های بارور در گیاه مؤثر بوده است به‌طوری‌که قطع آبیاری قبل از گلدهی و قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه‌ها به‌ترتیب ۲۰/۸۲ درصد و ۱۶/۶۶ درصد نسبت به آبیاری کامل سبب کاهش تولید پنجه بارور شدند. برخی محققین دلیل این امر را اثرات منفی کاهش آب بر عدم تلقیح گل‌های هر پنجه و تولید کمتر سر آغازه آن نسبت دادند (Sharif *et al*., 2006). در این پژوهش کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در مرحله پنجه‌زنی سبب تولید تعداد پنجه بارور بیشتری در گیاه شد و دلیل این امر را می‌توان این‌طور بیان نمود که تا زمان قطع آبیاری در مرحله‌ی پر شدن دانه‌ها، گیاه فرصت بیشتری برای رشد و نمو عادی داشته است و قطع آبیاری در مرحله‌ی قبل از گرده‌افشانی، این زمان موردنیاز برای رشد بهتر گیاه را کوتاه‌تر کرده است. هنگامی‌که تنش خشکی ۱۵ روز پس از گرده‌افشانی اعمال شود، به‌دلیل دانه‌بندی قبل از این مرحله، فقط اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد، ولی در پنجه‌هایی که از نظر مراحل نموی عقب‌تر باشند تعداد دانه در سنبله نیز کاهش می‌یابد (Gibson and Paulsen, 1999). بنابراین کاربرد عنصر تیتانیوم به‌صورت نانو ذرات اثرات مثبتی بر افزایش تعداد سنبله بارور در گیاه گندم داشته است و با نتایج (جابرزاده و همکاران، ۱۳۸۹) مطابقت دارد. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۱) درمی‌یابیم که تأثیر سال بر میانگین تعداد پنجه بارور گیاه گندم معنی‌دار می‌باشد.

تعداد دانه: همان‌طور که در نمودار ۴ مشاهده می‌شود، کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم همزمان با تنش کم‌آبی توانسته است سبب تولید تعداد دانه بیشتری در گیاه شود و محلول‌پاشی این ماده در مرحله‌ی پنجه‌زنی اثرات معنی‌دار بیشتری بر تولید دانه در گندم داشته است، به‌طوری‌که محلول‌پاشی در زمان پنجه‌زنی و محلول‌پاشی در مرحله شروع خوشه‌دهی به ترتیب ۲۲/۱۲ درصد و ۱۲/۳۰ درصد نسبت به عدم محلول‌پاشی سبب تولید تعداد دانه بیشتری شدند. همچنین در شرایط غیر تنش نیز این ماده به تولید دانه در گیاه افزایش معنی‌داری بخشیده است، اما در زمان مصرف آن اثرات معنی‌داری دیده نشده است.

بر اساس نمودار ۴ کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط تنش توانسته است تا با بهبود شرایط رشد و نمو و افزایش مقاومت آن به تنش کم‌آبی، سبب تولید تعداد دانه بیشتری در گندم شود، زیرا محلول‌پاشی با غلظت مناسب نانو دی‌اکسیدتیتانیوم در مرحله ساقه روی منجر به افزایش طول دوره زایشی می‌شود (نوری و همکاران، ۱۳۹۶). هر چه تعداد دانه در گیاه بیشتر باشد، گیاه دارای مخزن بزرگتری برای دریافت مواد فتوسنتزی تولید شده است و افزایش این صفت منجر به افزایش عملکرد گیاه خواهد شد (رضایی چیانه و

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]



نمودار ۴- اثر متقابل تنش کم‌آبی و کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بر تعداد دانه گندم. تیمارهای کم‌آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها) ،تیمارهای محلول‌پاشی (S1: محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول‌پاشی)

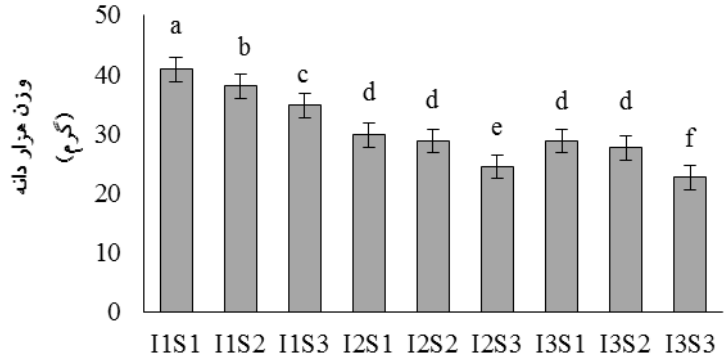
همکاران، ۱۳۹۱). نتایج تحقیقات (امینیان و همکاران، ۱۳۹۶) نیز بر روی گیاه گلرنگ نشان داد که بیشترین تعداد دانه در طبق در شرایط آبیاری معمولی و اعمال نانو دی‌اکسیدتیتانیوم حاصل شد که با تعداد دانه در طبق در همین شرایط آبیاری و عدم استفاده از نانو دی‌اکسیدتیتانیوم و تعداد دانه در طبق در شرایط کم‌آبیاری و عدم استفاده از نانو دی‌اکسیدتیتانیوم اختلاف آماری نداشت. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۱) درمی‌یابیم که تأثیر سال بر میانگین تعداد دانه در واحد سطح گیاه گندم معنی‌دار می‌باشد.

وزن هزاردانه: بر اساس نمودار ۵ کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط عادی و تنش کم‌آبی توانسته است تا وزن هزار دانه بالاتری را در گندم تولید نماید و مقادیر بالاتری از این صفت در شرایط عادی و هر دو تیمار تنش کم‌آبی با محلول‌پاشی این ماده در مرحله‌ی پنجه‌زنی مشاهده شد.

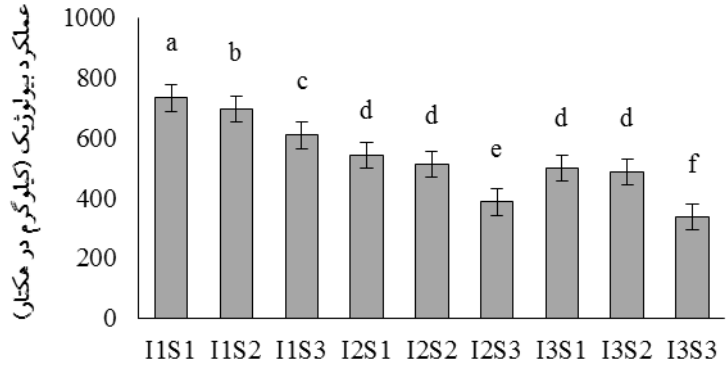
محدود شدن آبیاری در مرحله زایشی به‌دلیل اینکه طول دوره پر شدن دانه کاهش می‌یابد، گیاه با محدودیت منبع مواجه شده و مواد کمتری به دانه‌ها منتقل می‌شود. بنابراین، هرگونه تنش کم‌آبی در طی این مراحل می‌تواند بر روابط منبع و مخزن تأثیر منفی بگذارد. بنابراین کاهش تأمین مواد پرورده در طول این دوره سبب محدود شدن گنجایش ذخیره دانه و کاهش وزن آن خواهد شد (رضایی چیانه و همکاران، ۱۳۹۱) . اما به‌کارگیری نانو دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط تنش خشکی توانسته است با مساعد کردن شرایط تنش برای گیاه به افزایش سوخت‌وساز گیاه و به‌دنبال آن بزرگ‌تر شدن این مخزن کمک شایانی نماید تا شرایط رشد عادی برای گیاه در این شرایط شبیه‌سازی شود. به‌نظر می‌رسد که در شرایط تنش خشکی، گیاه تنها به فتوسنتز جاری متکی نبوده و با کمک عنصر تیتانیوم توانسته است مواد فتوسنتزی کافی را با سرعت مناسب از اندام‌های هوایی (ساقه‌ها) به دانه‌ها منتقل نمایند که این موضوع در ابتدا باعث حفظ نسبی مقادیر وزن هزار دانه و در ادامه باعث بالا رفتن مقادیر آن در گیاه شده است که درنتیجه کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در عملکرد این صفت با کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم مشاهده نشده است (Mottaghi *et al.*, 2009). لازم به ذکر است که نتایج سایر تحقیقات نیز بر این موضوع دلالت دارد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین با مشاهده نتایج جدول (۱) درمی‌یابیم که تأثیر سال بر میانگین وزن هزار دانه گیاه گندم معنی‌دار می‌باشد.

عملکرد بیولوژیک: مطابق با نمودار ۶ مشاهده می‌شود که کاربرد دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط عادی و تنش خشکی سبب افزایش عملکرد بیولوژیک گیاه گندم در مقایسه با عدم کاربرد این ماده شده است، به‌طوری‌که محلول‌پاشی در زمان پنجه‌زنی و محلول‌پاشی در مرحله شروع خوشه‌دهی به ترتیب ۲۰/۶۷

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]



نمودار ۵- اثر متقابل تنش کم‌آبی و کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر وزن هزار دانه گندم. تیمارهای کم‌آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها) ،تیمارهای محلول‌پاشی (S1: محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول‌پاشی)



نمودار ۶- اثر متقابل تنش کم‌آبی و کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر عملکرد بیولوژیک گندم. تیمارهای کم‌آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها) ،تیمارهای محلول‌پاشی (S1: محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول‌پاشی)

درصد و ۱۲/۶۹ درصد نسبت به عدم محلول‌پاشی سبب افزایش عملکرد بیولوژیک شدند. در شرایط تنش اگرچه میان گیاهان تیمار شده با این ماده در هر دو زمان اعمال خشکی اختلاف معنی‌داری دیده نمی‌شود، اما کاربرد این ماده در شرایط خشکی قبل از گلدهی از یک سو تأثیر بهتری بر عملکرد گندم داشته است و از سویی دیگر محلول‌پاشی آن در مرحله پنجه‌زنی نتایج بهتری را در مقایسه با مرحله خوشه‌دهی حاصل نموده است.

کاهش عملکرد بیولوژیک و ماده خشک گیاه در اثر تنش خشکی درنتیجه کاهش فشار تورژسانس سلولی و به دنبال آن کاهش نمو سلولی و رشد اندام‌های گیاه می‌باشد (گلدانی و رضوانی مقدم، ۱۳۸۴). در این تحقیق نیز قطع آبیاری قبل از گلدهی و قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه‌ها به‌ترتیب ۲۴/۷۵ درصد و ۲۶/۸۴ درصد نسبت به آبیاری کامل سبب کاهش عملکرد بیولوژیک شدند. نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که اعمال تنش رطوبتی به‌ویژه پس از مرحله ظهور بساک کاهش معنی‌داری در شاخص‌های مرتبط با عملکرد گیاه به دنبال دارد (Campuzano *et al.*, 2008) که با نتایج این تحقیق نیز مطابقت دارد. از سویی (گلپرور و همکاران، ۱۳۸۱) نیز بیان داشتند که بین عملکرد بیولوژیک و تعداد دانه در گیاه

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

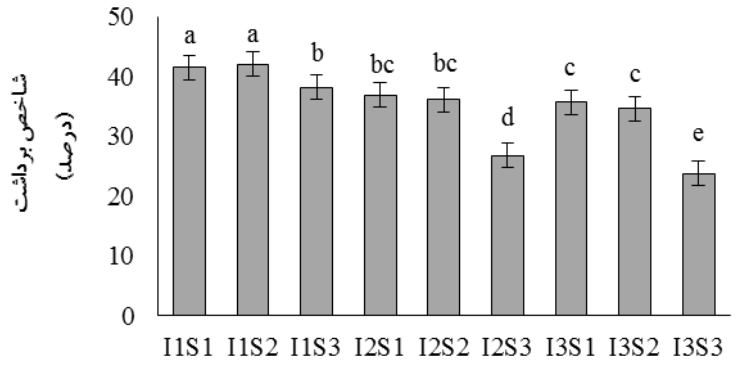
که منجر به عملکرد نهایی دانه می‌شود رابطه معنی‌دار و مثبتی برقرار است که در پژوهش حاضر نیز این همبستگی مشاهده می‌شود. همچنین این همبستگی در مورد کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم نیز دیده می‌شود، زیرا یافته‌های (نوری و همکاران، ۱۳۹۶) نیز روشن‌کننده این مطلب است که عملکرد بیولوژیک گیاه عدس با محلول‌پاشی نانو دی‌اکسیدتیتانیوم در غلظت ۰/۰۲ درصد افزایش یافته است. نتایج این آزمایش نیز در راستای تأیید تحقیقات این پژوهشگران بر کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم برای غلبه بر آثار سوء تنش خشکی دلالت دارد. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۱) درمی‌یابیم که تأثیر سال بر میانگین عملکرد بیولوژیک گیاه گندم معنی‌دار می‌باشد.

شاخص برداشت: همچنین با نگاهی به نمودار ۷ درمی‌یابیم که کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط عادی و تنش خشکی توانسته است تا به‌صورت معنی‌داری شاخص برداشت گندم را در مقایسه با عدم کاربرد این ماده افزایش دهد. بر اساس این نمودار اگرچه میان گیاهان تیمار شده با این ماده در شرایط تنش اختلاف معنی‌داری وجود ندارد، اما چند نکته حائز اهمیت می‌باشد. نکته‌ی اول اینکه کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بر گیاهان تحت تنش خشکی در مرحله‌ی پنجه‌زنی اثرات مفیدتری در مقایسه با استفاده از این ماده در مرحله‌ی خوشه‌دهی دارد. به‌علاوه اینکه کاربرد این نانو ذرات در هنگام تنش خشکی در مرحله‌ی گلدهی شاخص برداشت بالاتری را در مقایسه با تنش خشکی در مرحله‌ی پر شدن دانه‌ها حاصل نموده‌اند. نکته‌ی کلی دیگر نیز اثرات مفید استفاده از عنصر تیتانیوم به‌صورت ذرات نانو بر شاخص برداشت گیاه گندم می‌باشد.

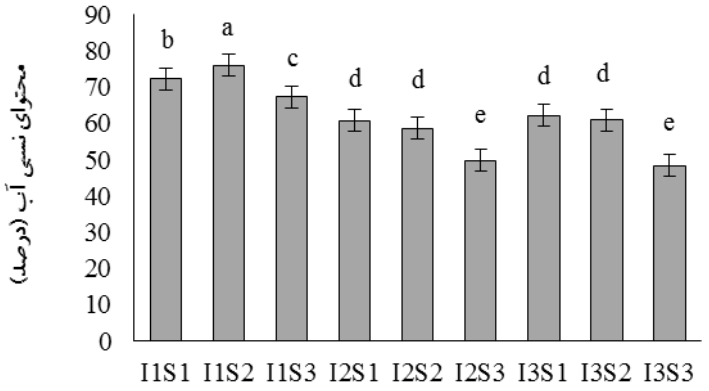
شاخص برداشت یکی از شاخص‌های مهم فیزیولوژیکی گیاه است که بیانگر درصد انتقال مواد فتوسنتزی از اندام‌های رویشی گیاه به دانه‌ها می‌باشد (نوری و همکاران، ۱۳۹۶). کمبود آب نیز از جمله عوامل محدودکننده رشد و نمو گیاه بوده که علاوه بر کاهش ماده خشک تولیدی، موجب اختلال در تسهیم کربوهیدرات‌ها به دانه و درنتیجه کاهش شاخص برداشت می‌شود (Rezaie Soukht Abandani and Ramezani, 2010)، اما تیمار نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم باعث افزایش شاخص برداشت در گیاهان تنش تحت تنش و غیر تنش یافته گردید. میانگین شاخص برداشت در زمانی که نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط تنش خشکی در مرحله‌ی قبل از گلدهی بر گیاه اعمال شدند، ۳۶/۹۸ و ۳۶/۱۵ درصد به‌ترتیب برای کاربرد این ماده در مراحل پنجه‌زنی و خوشه‌دهی و همچنین ۳۵/۷۷ و ۳۴/۶۸ درصد به‌ترتیب در مراحل پنجه‌زنی و خوشه‌دهی در تیمار قطع آبیاری در زمان پر شدن دانه‌ها بود که در مقایسه با گیاهان تحت تنش و تیمار نشده با نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم شاخص برداشت بالاتری به حساب می‌آید. جابرزاده و همکاران (۱۳۸۹) با بررسی اثر نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بر گندم گزارش نمودند که بیشترین میزان شاخص برداشت در آبیاری معمولی مربوط به مرحله ساقه دهی و غلظت ۰/۰۳ درصد و در تنش خشکی بیشترین میزان شاخص برداشت مربوط به مرحله گلدهی و غلظت ۰/۰۳ درصد بوده است. نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در تحریک رشد رویشی و تسهیل در جذب عناصر میکرو به ریشه گیاهان نقش دارند. بدین ترتیب منجر به افزایش رشد و عملکرد گیاهان زراعی در شرایط عدم وقوع تنش می‌شود. از طرفی این عنصر با کنترل بیماری‌های گیاهی و تقویت سیستم ایمنی گیاهان زراعی نیز موجب افزایش عملکرد در شرایط عدم بروز تنش می‌گردد (Bowen *et al.*, 1992). همچنین با مشاهده نتایج جدول (۱) درمی‌یابیم که تأثیر سال بر میانگین شاخص برداشت گیاه گندم معنی‌دار می‌باشد.

محتوای نسبی آب برگ: نمودار ۸ نشان‌دهنده این مطلب است که استفاده از نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط تنش خشکی می‌تواند محتوای نسبی آب گیاه را بالا ببرد. اگرچه میان این تیمارها اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد، اما با نگاهی به این نمودار می‌توان دریافت که اولاً در هر دو زمان اعمال تنش خشکی کاربرد این ماده در مرحله پنجه‌زنی نتیجه بهتری داشته است و ثانیاً کاربرد این نانو ذرات در تیمار قطع آبیاری در زمان پر شدن دانه‌ها اثرات بیشتری بر محتوای آب نسبی گیاه داشته است. در شرایط غیر تنش نیز این ماده سبب افزایش

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]



نمودار ۷- اثر متقابل تنش کم‌آبی و کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر شاخص برداشت گندم. تیمارهای کم‌آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها) ،تیمارهای محلول‌پاشی (S1: محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول‌پاشی)



نمودار ۸- اثر متقابل تنش کم‌آبی و کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر محتوای آب نسبی برگ گندم. تیمارهای کم‌آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها) ،تیمارهای محلول‌پاشی (S1: محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول‌پاشی)

معنی‌داری در این صفت شد، به‌نحوی‌که محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی بهترین نتیجه را به خود اختصاص داد.

از بارزترین علائم فیزیولوژیکی کمبود رطوبت خاک، کاهش محتوای نسبی آب برگ‌ها می‌باشد (Nautiyal *et al.*, 2002)، به‌طوری‌که با افزایش شدت تنش خشکی، شرایط جذب آب برای گیاهان مشکل‌تر شده و درنتیجه مقدار آب موجود در سلول‌های گیاهی کاهش می‌یابد. درنتیجه کاهش محتوای نسبی آب باعث تأثیر منفی بر تقسیم یاخته‌ای و رشد و نمو گیاه می‌شود (Ahmadi Azar *et al.*, 2015). بسیاری از محققان معتقدند که کاهش میزان محتوای رطوبت نسبی برگ در اثر تنش خشکی مربوط به انسداد روزنه‌ها می‌باشد و علت انسداد روزنه‌ها را نیز تجمع هورمون اسید آبسزیک می‌دانند، به‌طوری‌که این هورمون در شرایط تنش خشکی در ریشه ساخته شده و در سلول‌های روزنه‌ای تجمع می‌یابد (Liu and Huang, 2000). بر این اساس برخی مطالعات، محتوای نسبی آب برگ را به‌عنوان یک شاخص قابل اطمینان تحمل به خشکی در گیاهان معرفی می‌کنند (Sinclair and Ludlow, 1985). به‌عنوان مثال مطالعات نشان دادند که با افزایش شدت تنش آبی، میزان محتوای آب نسبی برگ نیز کاهش می‌یابد (Rahbarian *et al.*, 2010). نتایج تحقیقات

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

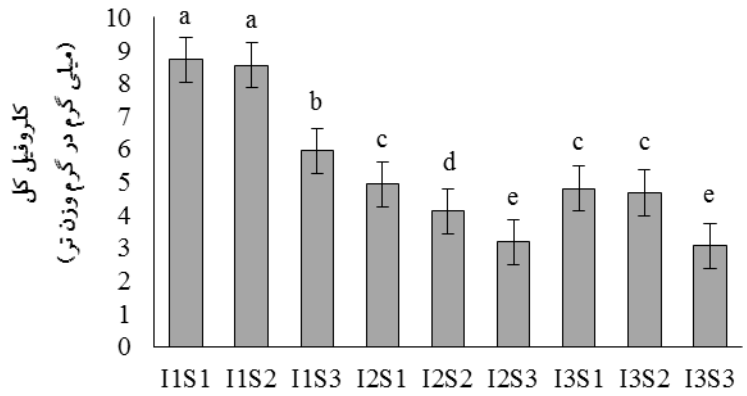
(Tarumingkeng, and Coto, 2003) نیز دلایل کاهش محتوای نسبی آب برگ را تأخیر در رشد ریشه و فعالیت آن و همچنین افزایش میزان تبخیر و تعرق بیان می‌کند. بنابراین کاهش محتوای نسبی آب برگ در اثر تنش رطوبتی، اثرات منفی در سیستم و ساختار فتوسنتزی گیاه به دنبال دارد (Siddique *et al*., 2000). علاوه بر مطالبی که عنوان شد، یکی از سازوکارهای افزایش محتوای نسبی آب برگ تنظیم اسمزی است که در ارقام نخود، فستوک و گندم به اثبات رسیده است (Moinuddin nand Khana-Chopra, 2004) و همبستگی مثبت و معنی‌داری نیز بین وزن مخصوص برگ پرچم و عملکرد گندم در شرایط تنش رطوبت مشاهده شده است (Subhani, and Chowdhry, 2000). برگ‌های ضخیم‌تر علاوه بر کاهش تعرق از میزان فتوسنتز بالایی برخوردارند. در اثر کاهش تعرق، میزان محتوای نسبی آب برگ افزایش و تأثیرات منفی تنش خشکی کاهش می‌یابد (Siddique *et al*., 2000). گزارش‌های متعددی نشان می‌دهند که ارقام متحمل به تنش کمبود آب توانایی بالایی در حفظ محتوای آب نسبی برگ نسبت به ارقام حساس دارند (Martinez *et al*., 2004). بر این اساس تحقیقات نشان دادند که با افزایش تنش خشکی در گندم، محتوای آب نسبی برگ کاهش می‌یابد، ولی این کاهش همیشه اتفاق نمی‌افتد و ارقام متحمل‌تر محتوای آب نسبی برگ بالاتری دارند (Schonfeld *et al*., 1988). در این آزمایش نیز با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان این‌طور گزارش نمود که در طی تنش خشکی، تعادل آب گیاهان به هم خورده و درنتیجه محتوای آب نسبی برگ و پتانسیل آب برگ کاهش می‌یابد (Bajji *et al*., 2001). با توجه به مطالب ذکر شده و از آن‌جایی‌که گندم مورد آزمایش در حساس‌ترین شرایط رشد زایشی با تنش کم‌آبی روبرو شده است، لذا کاهش رشد رویشی و زایشی در این گیاه دور از انتظار نمی‌باشد. در این شرایط تنش سنگین، گیاه از تمامی راهکارهایی که می‌تواند برای بقای خود به کار گیرد استفاده کرده و با کاهش رشد زایشی، از روند انتقال مواد ذخیره‌ای به سوی دانه‌ها کاسته است. درنتیجه مواد موجود برای حفظ اندام‌های گیاهی در شرایط تنش مورد استفاده قرار گرفته و به این دلیل شاهد کاهش عملکرد گندم مورد بررسی در این آزمایش بوده‌ایم. البته از آن‌جایی‌که نسبت به بسیاری از ارقام دیگر به شرایط نامساعد محیطی و خشکی مقاوم‌تر می‌باشد، تفاوت معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ‌ها بین ژنوتیپ‌ها در شرایط آبیاری کامل و تنش آبیاری ممکن است به‌دلیل سازوکارهای متفاوتی باشد که گیاهان مختلف را از یکدیگر متمایز می‌نماید. این سازوکارها می‌تواند شامل بسته‌تر شدن روزنه‌ها، افزایش سنتز هورمون اسید آبسزیک، پایداری غشاهای سلولی برگ و یا اندازه حجم سلول‌ها باشد (Moinuddin nand Khana-Chopra, 2004). از سویی دیگر کاربرد عنصر تیتانیوم روند زوال و کاهش رشد رویشی و زایشی گیاه را در شرایط کم‌آبی مختل کرده و با افزایش محتوای نسبی آب موجبات عملکرد بهتر آن را فراهم ساخته است. به عبارت دیگر کاربرد دی‌اکسیدتیتانیوم به‌صورت نانو ذرات با دسترسی بهتر گیاه به آب و مواد غذایی سبب رشد بهتر و افزایش مقاومت گیاه به شرایط کم‌آبی شده است و از این طریق موجب افزایش رشد رویشی و بهبود عملکرد گندم هم در شرایط تنش و هم در شرایط غیر تنش گردیده است. طبق نظر پژوهشگران، تیتانیوم پتانسیل زیادی در جهت بهبود فعالیت‌های فیزیولوژیک گیاهان دارد

(Berahmand *et al*., 2012) که در این تحقیق نیز با اثر مثبت بر محتوای آب نسبی برگ گیاه، تحمل شرایط تنش کم‌آبی را برای آن تسهیل نموده است. در تحقیق مشابهی نیز گزارش شده است که استفاده از نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در گیاه ریحان تحت تنش خشکی اثرات منفی تنش را بهبود بخشیده و با افزایش محتوای آب در دسترس گیاه، به رشد بهتر آن کمک نموده است (Kiapour *et al*., 2015). نتایج تحقیقات (Aghdam *et al*., 2016) نیز با تحقیق حاضر هم‌راستا می‌باشد. مطابق جدول (۲) هیچ‌گونه اختلاف معنی‌داری بین دو سال آزمایش در مورد این صفت وجود نداشت.

محتوای کلروفیل کل: بر اساس نمودار ۹ محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط خشکی بر گیاه توانسته است

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]



نمودار ۹- اثر متقابل تنش کم‌آبی و کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر محتوای کلروفیل کل گندم. تیمارهای کم‌آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها) ،تیمارهای محلول‌پاشی (S1: محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول‌پاشی)

تا محتوای کلروفیل کل را به شکل معنی‌داری افزایش دهد. اگرچه میان تیمارهای I_2S_1، I_3S_1 و I_3S_2 اختلاف معنی‌داری دیده نشد، اما می‌توان به این نکته پی برد که استفاده از این ماده در شرایط تنش کم‌آبی در مرحله پنجه‌زنی اثرات بهتری شرایط غیر تنش و به‌خصوص در مرحله پنجه‌زنی نیز این اثر مثبت به شکل کاملاً معنی‌داری قابل‌رؤیت می‌باشد.

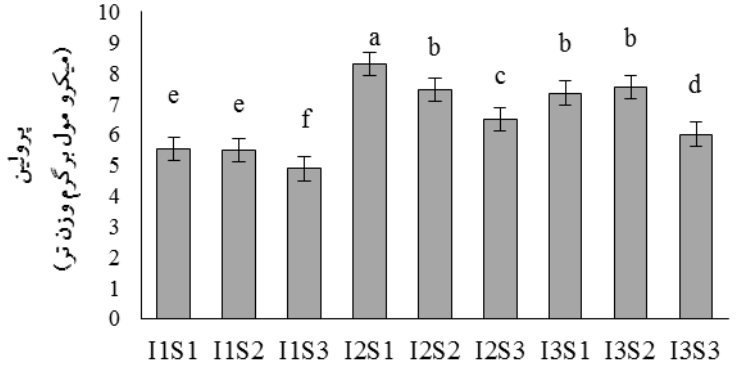
کلروفیل‌ها مولکول‌هایی ضروری هستند که مسئولیت دریافت انرژی خورشیدی در سیستم‌های فتوسنتری را به عهده دارند (Tanaka and Tanaka, 2006). غلظت کلروفیل به‌عنوان یک شاخص برای ارزیابی قدرت منبع شناخته شده است، لذا کاهش آن در شرایط تنش‌های محیطی همچون تنش خشکی در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک عامل محدودکننده غیر روزنه‌ای به حساب آید. تنش کم‌آبی بر بخش نوری فتوسنتز بیشترین تأثیر را دارد. بروز تنش اکسیداتیو ناشی از کمبود رطوبت در کلروپلاست‌ها باعث تولید انواع اکسیژن فعال می‌گردد. رادیکال‌های ایجاد شده بسیار زیان بار بوده و اثرات نامطلوبی را بر پروتئین‌ها و مراکز واکنش فتوسیستم II می‌گذارد (Jin *et al*., 2003). به‌گونه‌ای که افزایش مقدار و زمان قرارگیری گیاهان در شرایط تنش خشکی سبب افزایش روند تخریب رنگریزه‌های کلروفیل می‌شود (Jiang and Huang, 2001). از دیگر عوامل کاهش بر محتوای کلروفیل گیاه دارد. درهرحال محلول‌پاشی عنصر تیتانیوم به‌صورت نانو ذرات در شرایط خشکی اثرات سودمندی بر محتوای کلروفیل کل گیاه گندم داشته است و در کلروفیل‌ها، رقابت آنزیم گلوتامیل کیناز (آنزیم کاتالیز کننده پرولین) و آنزیم گلوتامات لیگاز (اولین آنزیم مسیر بیوسنتز کلروفیل) در شرایط تنش خشکی می‌باشد که باعث شده تا پیش سازگلوتامات، بیشتر به مصرف پرولین برسد و درنتیجه بیوسنتز کلروفیل با محدودیت مواجه شود. نتایج تحقیقات (Schutzz and Fangmeier, 2001) نشان داد که کاهش میزان کلروفیل در شرایط تنش خشکی به علت تجزیه آن است. همچنین (Ashraf *et al*., 1994) کاهش غلظت کلروفیل را در شرایط تنش خشکی به اثر فعالیت آنزیم کلروفیلاز، پراکسیداز، ترکیبات فنلی و درنهایت تجزیه کلروفیل نسبت دادند. بنابراین تنش کم‌آبی باعث شکسته شدن کلروپلاست‌ها و کاهش میزان کلروفیل می‌شود. در اثر خشکی تشکیل پلاستیدهای جدید، کلروفیل a و b کاهش یافته و نسبت آن‌ها تغییر می‌کند (Misra, and Sricastatva, 2000). همچنین یکی از دلایل این کاهش، افزایش میزان فعالیت آنزیم کلروفیلاز است که تحت شرایط تنش خشکی بیان این آنزیم القاء می‌شود (Ranjan *et al*., 2001). در نتایج این تحقیق نیز همانند یافته‌های اکثر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

محققین کاهش محتوای کلروفیل کل گیاه در اثر اعمال تنش خشکی مشاهده می‌شود. با کاهش میزان کلروفیل کل، از رشد و نمو و توسعه اندام‌های گیاهی نیز کاسته می‌شود و به دنبال آن شاخص‌های مرتبط با رشد گیاه از قبیل ارتفاع، تعداد و سطح برگ، وزن‌تر و وزن خشک اندام هوایی گیاه و غیره کاهش می‌یابند که می‌توان به ارتباط میان این صفات با محتوای کلروفیل کل پی برد. درنتیجه رشد رویشی ضعیف گیاه، رشد اندام‌های زایشی نیز به‌دلیل کم شدن مواد ذخیره‌ای تحت تأثیر قرار گرفته و به کاهش صفات مرتبط با عملکرد مانند تعداد و وزن دانه، وزن هزار دانه عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت منتهی می‌شود. به عبارت دیگر می‌توان این‌طور بیان نمود که رشد رویشی و زایشی تابعی از روابط آبی گیاه است. زمانی که آب کافی برای فعل و انفعالات زیستی، فیزیولوژیک و بیولوژیکی گیاه در دسترس باشد، افزایش محتوای کلروفیل سبب بالا رفتن راندمان فتوسنتزی گیاه می‌شود و با رشد بهتر، ذخیره‌سازی مواد غذایی موردنیاز برای ورود به فاز زایشی بیشتر انجام می‌شود و درنتیجه عملکرد گیاه افزایش می‌یابد. کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در این شرایط سخت می‌تواند کارایی دستگاه فتوسنتزی را بهبود بخشد. این عنصر توانایی گیاه را برای جذب نور خورشید افزایش می‌دهد و بر تولید و تبدیل انرژی نورانی به الکترون فعال و فعالیت‌های شیمیایی تأثیر گذاشته و درنهایت باعث افزایش کارایی فتوسنتز در گیاه میشود (Akbari *et al*., 2014). به‌علاوه اینکه از آن‌جایی‌که نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم سبب افزایش جذب نیتروژن می‌شود، بنابراین میزان سنتز کلروفیل در گیاهان نیز افزایش می‌یابد (Yang *et al*., 2006). در همین راستا (Chao and Choi, 2005) گزارش کردند که عنصر تیتانیوم قادر است از طریق افزایش فتوسنتز میزان رشد گیاه را به‌طور معنی‌داری افزایش دهد. نتایج تحقیقات (Morteza *et al*., 2013) بر روی گیاه ذرت نشان داد که محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم سبب افزایش محتوای کلروفیل کل می‌گردد. این محققین دلیل افزایش این رنگیزه‌ها را نسبت به تیمار شاهد تثبیت غشای کلروپلاست و محافظت کلروپلاست از پیری در زمان گلدهی گیاه ذرت توسط نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم عنوان کردند. درواقع این نانو ذرات می‌توانند ساختار کلروفیل و دریافت نور خورشید توسط این رنگیزه‌ها را بهبود بخشند. در تحقیق دیگری (Yang *et al*., 2006) گزارش کردند از آن‌جایی‌که نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم سبب افزایش جذب و متابولیسم نیتروژن می‌شود، بنابراین میزان سنتز کلروفیل در گیاه اسفناج افزایش می‌یابد. نتایج این پژوهش هم با یافته‌های این محققین کاملاً همسو می‌باشد. مطابق جدول (۲) هیچ‌گونه اختلاف معنی‌داری بین دو سال آزمایش در مورد این صفت وجود نداشت.

محتوای پرولین: همان‌طور که در نمودار ۱۰ مشاهده می‌شود، استفاده از نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط تنش خشکی توانسته است تا به‌صورتی معنی‌دار سبب افزایش محتوای پرولین در گیاه شود. نکته قابل‌تأمل در این نمودار این مسئله است که اعمال تنش خشکی به گیاه در مراحل قبل از گلدهی و پر شدن دانه‌ها خود سبب بالا رفتن محتوای این اسید آمینه در گیاه شده است به‌طوری‌که قطع آبیاری قبل از گلدهی و قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه‌ها به‌ترتیب ۴۱/۸۳ درصد و ۲۳/۰۵ درصد نسبت به آبیاری کامل سبب افزایش محتوای پرولین شدند. و از طرفی کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم نیز بر مقادیر این ماده افزوده است، به‌طوری‌که محلول‌پاشی در زمان پنجه‌زنی و محلول‌پاشی در مرحله شروع خوشه‌دهی به‌ترتیب ۳۰/۸۱ درصد و ۲۸/۱۷ درصد نسبت به عدم محلول‌پاشی سبب تولید تعداد دانه بیشتری شدند. در شرایط غیر تنش نیز این مسئله به وضوح قابل‌رؤیت است. یکی از راهکارهای گیاهان برای مقابله با کمبود آب در سلول به‌علت تنش خشکی، انباشت اسیدهای آمینه سازگار کننده مانند پرولین، گلایسین، آلانین و والین است. بین تجمع پرولین و سازش به تنش اسمزی در گیاهان همبستگی مثبت وجود دارد (Bates, 1973) که در نتایج این آزمایش نیز مشاهده می‌گردد. ضمن اینکه در زمانی که گیاه تحت شرایط کمبود آب قرار می‌گیرد، غلظت پرولین ممکن است تا ۱۰۰ برابر شرایط طبیعی نیز افزایش یابد، زیرا سلول‌های گیاهی در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

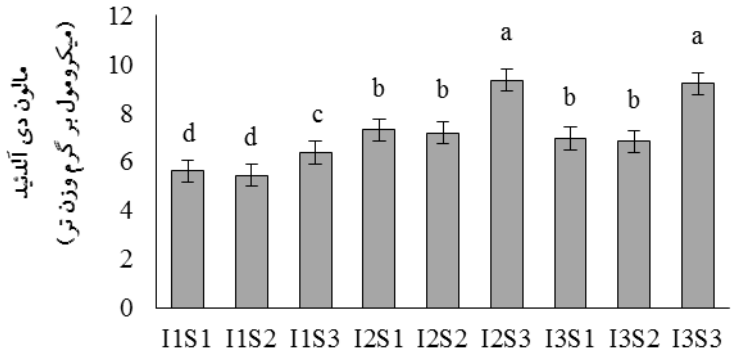


نمودار ۱۰- اثر متقابل تنش کم‌آبی و کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر محتوای پرولین گندم. تیمارهای کم‌آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها) ،تیمارهای محلول‌پاشی (S1: محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول‌پاشی)

پاسخ به تنش خشکی و شوری شروع به سنتز و تجمع برخی از آمینو اسیدها از قبیل پرولین می‌نماید (Masinde, 2005). از سویی دیگر کاربرد عنصر تیتانیوم به‌صورت نانو ذرات نیز توانسته است هم در شرایط تنش و هم در شرایط غیر تنش به مقادیر پرولین درونی گیاه بیفزاید. رسولی و همکاران (۱۳۹۵) نیز نتایج مشابهی در این زمینه به‌دست آوردند. بر اساس نتایج این محققین گیاهانی که در شرایط تنش کم‌آبیاری قرار می‌گیرند، تغییراتی در خصوصیات فیزیولوژیکی خود ایجاد می‌کنند تا به تنش وارد آمده واکنش نشان دهند و از طرفی با اسپری کردن نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم با تغییراتی از قبیل افزایش در میزان پرولین، کربوهیدرات محلول و کاهش در میزان حداقل فلورسانس کلروفیل از آسیب دیدن گیاه کاسته می‌شود. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۲) درمی‌یابیم که تأثیر سال بر محتوای پرولین گیاه گندم معنی‌دار می‌باشد.

محتوای مالون‌دی‌آلدئید: مطابق نمودار ۱۱ مشاهده می‌شود که استفاده از نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در هنگام تنش خشکی و زمان بدون تنش به‌صورت معنی‌داری موجب کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدئید در گیاه شده است، به‌طوری‌که محلول‌پاشی در زمان پنجه‌زنی و محلول‌پاشی در مرحله شروع خوشه‌دهی به‌ترتیب ۲۸/۶۱ درصد و ۳۳/۳۲ درصد نسبت به عدم محلول‌پاشی سبب کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدئید شدند و عدم مصرف این ماده بر روی گیاهان تنش یافته بیشترین محتوای این بیومارکر را نشان داده است. همچنین کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در تیمار تنش خشکی در زمان پر شدن دانه‌ها مقادیر کمتری از این صفت را در مقایسه با اعمال تیمار خشکی در زمان قبل از گلدهی نشان می‌دهد. به‌علاوه اینکه کاربرد این ماده در مرحله خوشه‌دهی در هر دو زمان اعمال تنش کم‌آبی نتایج بهتری را نسبت به مرحله پنجه‌زنی نشان داد. یکی از اولین ساختارهای سلول گیاهی که در شرایط تنش‌های محیطی آسیب می‌بیند، لیپیدهای غشای سلول هستند (Liang *et al*., 2003)، زیرا درنتیجه افزایش برخی ترکیبات فعال اکسیژن از قبیل رادیکال‌های سوپراکسید، پراکسید هیدروژن و رادیکال‌های هیدروکسیل، غشای سلولی در گیاهان تحت تنش آسیب می‌بیند و الکترولیت‌ها به بیرون از سلول تراوش می‌کند. درنتیجه این اتفاق باعث می‌شود که لایه درون سلول بار منفی پیدا کند (Blume and Ebercon 1981). افزایش این ترکیبات به بسیاری از ساختارها و اجزای سلول نظیر چربی‌ها، پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و اسیدهای نوکلئیک صدمه می‌زنند و با تغییر ساختار غشاء در اثر پراکسیداسیون چربی‌ها و پروتئین‌ها (Liang *et al*., 2003) تراوایی غشای سلولی را افزایش می‌دهند که منجر به نشت الکترولیت‌های موجود در داخل سلول به سمت بیرون می‌شود (Blume and Ebercon 1981) و درنتیجه رشد گیاه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. با کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

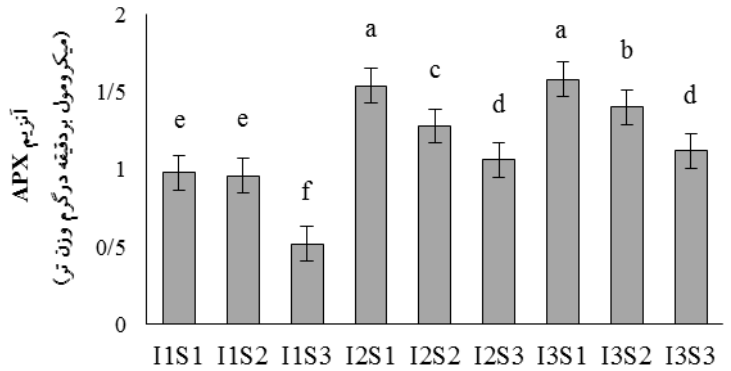


نمودار ۱۱- اثر متقابل تنش کم‌آبی و کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر محتوای مالون دی‌آلدئید گندم. تیمارهای کم‌آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها) ،تیمارهای محلول‌پاشی (S1: محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول‌پاشی)

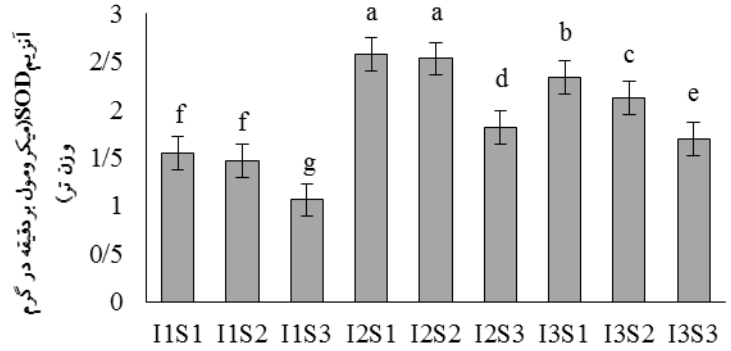
شرایط تنش کم‌آبی، میزان انباشت مالون‌دی‌آلدئید کاهش معنی‌داری پیدا کرد که دلیل این امر را می‌توان به فعالیت آنزیمی بالاتر این گیاهان در اثر مصرف این ماده نسبت داد، زیرا گزارش‌های متعددی مبنی بر کاهش اثرات مخرب تنش خشکی توسط نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم ارائه شده است. این ماده با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش رادیکال‌های آزاد اکسیژن و مالون‌دی‌آلدئید باعث کاهش اثرات تنش خشکی می‌شود (Zheng *et al.*, 2007) از طرفی نتایج تحقیقات (Aghdam *et al.*, 2016) نیز نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۲) درمی‌یابیم که تأثیر سال بر محتوی مالون‌دی‌آلدئید گیاه گندم معنی‌دار می‌باشد.

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز: بر اساس نتایج به دست آمده از نمودار ۱۲ مشاهده می‌شود که استفاده از عنصر تیتانیوم به‌صورت نانو ذرات توانسته است تا به شکل معنی‌داری در شرایط تنش خشکی فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز را افزایش دهد. بر این اساس کاربرد این ماده هم در شرایط تنش و هم در شرایط غیر تنش فعالیت این آنزیم را افزایش داده است، به‌طوری‌که محلول‌پاشی در زمان پنجه‌زنی و محلول‌پاشی در مرحله شروع خوشه‌دهی به‌ترتیب ۵۵/۳۶ درصد و ۳۲/۶۲ درصد نسبت به عدم محلول‌پاشی سبب افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز شدند. همچنین فعالیت این آنزیم در مرحله‌ی پنجه‌زنی بیشتر از خوشه‌دهی بوده است. تنش‌های محیطی با افزایش تولید انواع اکسیژن فعال به بیومولکول‌های حیاتی سلول نظیر لیپیدها، DNA، پروتئین‌ها و برخی نقاط کلیدی آسیب وارد کرده و درنهایت متابولیسم سلول را مختل می‌نمایند. گیاهان برای مقابله با تنش‌های اکسیداتیو ایجاد شده، دارای سیستم دفاعی با کارایی بالایی هستند که می‌تواند رادیکال‌های آزاد را از بین برده و یا خنثی کنند. آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاه قادرند اکسیژن‌های رادیکال آزاد را حذف و یا خنثی کنند (Bayer and Imlay Fridovich, 1991). آسکوربات پراکسیداز یکی از مهم‌ترین آنزیم‌های دفاعی است که نقش مهمی در جمع‌آوری و احیای کامل پراکسید هیدروژن دارد (Blokhina and Fagerstedt, 2010). بر مبنای نتایج این تحقیق می‌توان این‌طور بیان نمود که در هر دو مرحله کم‌آبی مورد بررسی در این آزمایش میزان فعالیت این آنزیم برای مقابله‌ی گیاه با شرایط نامساعد بالا رفته است، به‌طوری‌که قطع آبیاری قبل از گلدهی و قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه‌ها به‌ترتیب ۲۳/۸۱ درصد و ۴۶/۰۳ درصد نسبت به آبیاری کامل سبب افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز شدند. کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم نیز در این شرایط به کمک گیاه آمده و با اثر بر افزایش فعالیت آنزیمی گیاه، سبب بالا رفتن دوباره‌ی فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز شده است. در شرایط غیر تنش نیز استفاده از این

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]



نمودار ۱۲- اثر متقابل تنش کم‌آبی و کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز گندم. تیمارهای کم‌آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها) ،تیمارهای محلول‌پاشی (S1: محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول‌پاشی)



نمودار ۱۳- اثر متقابل تنش کم‌آبی و کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بر فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز گندم. تیمارهای کم‌آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها) ،تیمارهای محلول‌پاشی (S1: محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول‌پاشی)

ماده فعالیت این آنزیم را افزایش داده است. بنابراین می‌توان این‌طور نتیجه گرفت افزایش فعالیت آنزیمی در گیاه در شرایط تنش خشکی رخ می‌دهد، اما استفاده از عنصر تیتانیوم سبب افزایش این فعالیت در بافت‌های گیاهی شده است. نتایج تحقیقات عباسی و همکاران (۱۳۹۷) نیز با یافته‌های این پژوهش کاملاً هم‌راستا می‌باشند. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۲) درمی‌یابیم که تأثیر سال بر فعالیت آسکوربات پراکسیداز گیاه گندم معنی‌دار می‌باشد.

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز: نمودار ۱۳ نشان‌دهنده این مطلب است که محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط تنش کم‌آبی می‌تواند فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز را به‌صورت معنی‌داری بالا ببرد. مطابق با نتایج این نمودار مشاهده می‌شود که تنش خشکی خود عاملی است که می‌تواند فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را بیفزاید. به‌علاوه این نانو ذرات در شرایط تنش و غیر تنش نیز قادر به افزایش فعالیت این آنزیم می‌باشند. آنزیم آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز یکی از مهم‌ترین آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی است که با شناسایی رادیکال سوپر اکسید آن را به مولکول‌های آب و اکسیژن تجزیه می‌کند (مظفری و همکاران، ۱۳۹۵). با کاهش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز مقدار رادیکال‌های

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

سوپراکسید در سلول افزایش می‌یابد که نتیجه آن آسیب به ساختار سلول‌های گیاهی، بروز اختلالات متابولیسمی و نهایتاً مرگ سلولی می‌باشد (Breusegem *et al.*, 2001). بنا به گزارش (Baisak *et al.*, 1994) فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در طی کمبود آب افزایش معنی‌داری را نشان می‌دهد. همچنین تحقیقات نشان داده‌اند که نانو ذرات تیتانیوم قادر است با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی از اثرات مخرب تنش اکسیداتیو و مرگ سلول گیاهی جلوگیری کند (Lei *et al.*, 2008). علاوه بر این تیتانیوم سبب بهبود صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاهان می‌شود (Berahmand *et al.*, 2012). در آزمایشی که توسط (Soltani *et al.*, 2013) بر روی گیاه عدس انجام شد اثر محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بر صفات عملکرد دانه، برخی از اجزاء مرتبط با عملکرد دانه، فعالیت‌های آنزیم‌های کاتالاز، اکسیداز و آسکوربات پراکسیداز معنی‌دار بود. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۲) درمی‌یابیم که تأثیر سال بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز گیاه گندم معنی‌دار می‌باشد.

نتیجه‌گیری

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین و درعین‌حال آسیب‌رسان‌ترین تنش‌های غیر زیستی در دنیا و به‌ویژه در ایران است که سالانه سبب خسارات زیادی به انواع گیاهان می‌شود. نتایج این تحقیق بر روی گندم نیز نشان داد که کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در تمامی مراحل رشد رویشی و زایشی اثرات مثبتی بر این گیاه داشته است و با افزایش مقاومت گیاه در این شرایط، به رشد بهتر و عملکرد بالاتر آن کمک شایانی می‌نماید. بر اساس یافته‌های این تحقیق، استفاده از نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم در شرایط قطع آبیاری در زمان‌های قبل از گلدهی و پر شدن دانه‌ها که حساس‌ترین مراحل گیاه به خشکی می‌باشد، بسیار مفید بوده است. همچنین با اینکه مصرف این عنصر در مراحل پنجه‌زنی و خوشه‌دهی اثرات زیادی بر گندم داشته است، اما کاربرد آن در زمان پنجه‌زنی سبب اثرات مطلوب‌تری بر خصوصیات رویشی و عملکردی گیاه می‌شود. از طرفی استفاده از نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم می‌تواند در شرایط تنش خشکی سبب محافظت از سلول‌های گیاه در برابر تنش‌های اکسیداتیو شده و با افزایش میزان پرولین بافت‌های گیاهی، از تجمع مالون‌دی‌آلدئید جلوگیری نماید. به‌علاوه، بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش، کاربرد نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سبب کاهش انواع گونه‌های فعال اکسیژن و به دنبال آن مالون‌دی‌آلدئید در گیاه می‌شود و با افزایش مقاومت گیاه در این شرایط، به رشد بهتر و عملکرد بالاتر آن کمک شایانی می‌نماید. بنابراین بر اساس نتایج به‌دست آمده از این تحقیق و تأیید یافته‌های سایر محققین، اثر نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم به‌صورت محلول‌پاشی در شرایط کم‌آبیاری بر گندم به‌صورت کاملاً موفقیت‌آمیزی مؤثر بوده و بر استفاده‌ی بیش از پیش این ماده تأکید می‌شود.

منابع

احمدی، ع. و سی و سه مرده، ع. (۱۳۸۲) روابط بین شاخص‌های رشد، مقاومت به خشکی و عملکرد در کولتیوارهای گندم اصلاح شده برای اقلیم‌های مختلف ایران در شرایط تنش و عدم تنش خشکی. مجله علوم کشاورزی ایران ۳۴: ۶۷۹-۶۶۷.

امینیان، ر.، پاک نژاد، م. و حسینی، س. م. (۱۳۹۶) تأثیر نانو دی‌اکسیدتیتانیوم بر عملکرد و اجزای عملکرد گلرنگ تحت شرایط آبیاری معمولی و تنش کم‌آبیاری. تنش‌های محیطی در علوم زراعی ۱۰: ۳۹۰-۳۷۷.

پاک نژاد، ف.، فاطمی ریکا، ز. و ایلکایی دهنو، م. ن. (۱۳۹۶) بررسی اثر تنش آخر فصل بر عملکرد و اجزای عملکرد ده رقم جو (*Hordeum vulgare* L.) در منطقه کرج. تنش‌های محیطی در علوم زراعی ۱۰: ۴۰۱-۳۹۱.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

جابرزاده، ا.، معاونی، پ. و توحیدی مقدم مرادی، ا. (۱۳۸۹) بررسی اثر محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بر روی برخی خصوصیات زراعی در گندم. فصلنامه علمی پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهان ۲: ۳۰۱-۲۹۵.

جعفرنژاد، ا.، آقایی، ح. و نجفیان، گ. (۱۳۹۲) صفات مؤثر بر عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم در شرایط آبیاری مطلوب و تنش خشکی دوره زایشی. مجله به نژادی گیاهان زراعی و باغی ۱: ۲۲-۱۱.

جعفری، ن.، آقایاری، ف. و پاک نژاد، ف. (۱۳۹۷) تأثیر روش‌های مختلف کم‌آبیاری بر عملکرد و کارآیی مصرف آب گندم رقم پارسی ۱۲: ۵۹۸-۵۸۱.

رضایی چیانه، ا.، زهتاب سلماسی، س.، قاسمی گلعذانی ک. و دل‌آذر، ع. (۱۳۹۱) اثر تیمارهای آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد سه توده بومی رازیانه. نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار ۲۲(۴): ۵۷-۷۱.

طباطبایی، س. ع. (۱۳۹۳) اثر پیش تیمار بذر جو با سالسیلیک اسید بر رشد گیاهچه، مقدار پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت تحت شرایط تنش خشکی. مجله به زراعی کشاورزی دانشگاه تهران ۲: ۴۸۶-۴۷۵.

طوسی کهل، پ.، اصفهانی، م.، ربیعی، ب. و ربیعی، م. (۱۳۹۱) تغییرات شاخص‌های رشد و برداشت روغن کلزا (رقم هایولا ۴۰۱) در غلظت‌ها و زمان‌های متفاوت محلول‌پاشی کود نیتروژن مکمل. مجله تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی ۶: ۱۸۹-۱۷۹.

عباسی، ا.، لطفی، ر. و جانمحمدی، م. (۱۳۹۷) پاسخ مکانسیم دفاعی آنتی‌اکسیدانی و تغییرات عملکردی گندم به تنش خشکی با کاربرد غلظت‌های مختلف نانو سیلیکون و نانو تیتانیوم. نشریه زراعت دیم ایران ۷: ۱۰۹-۷۹.

گلپرور، ا .ر.، قنادها، م .ر. و زالی، ع. (۱۳۸۱) تعیین بهترین صفات گزینش برای بهبود عملکرد ژنوتیپ‌های گندم نان در شرایط تنش خشکی. مجله نهال و بذر۱۸: ۱۴۴-۱۵۵.

گلدانی، م. و رضوانی مقدم، پ. (۱۳۸۴) اثر سطوح خشکی و تاریخ کاشت بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام دیم و آبی نخود در مشهد. مجله پژوهش‌های زراعی ایران۲: ۲۲۹-۲۳۹.

مظفری، ا.، حبیبی، د.، اصغر زاده، ا. و مشهدی اکبر بوجار، م. (۱۳۹۵) بررسی تحمل به تنش خشکی دو رقم گندم تلقیح شده با رایزوباکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) تحت شرایط گلخانه. فصلنامه علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی ۳۱: ۳۹-۲۱.

منصوری، م.، اکبری، غ. ع. و مرتضویان، س. م. م. (۱۳۹۶) اثر محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بر عملکرد و اجزای عملکرد اکوتیپ‌های مختلف زیرهٔ سبز تحت تنش خشکی. به زراعی کشاورزی۱۹: ۴۷۳-۴۶۱.

نوری، ح.، معاونی، پ. و سلطانیه، م. (۱۳۹۶) اثر محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم بر کلروفیل، عملکرد و اجزای عملکرد عدس (*Lens culinaris* Medik). پژوهش‌های حبوبات ایران ۸: ۶۸-۵۷.

هاشمی دزفولی، ا.، ع. کوچکی و م. بنایان. (۱۳۷۷) افزایش عملکرد گیاهان زراعی (ترجمه). چاپ سوم. انتشارات دانشگاه مشهد.

یعقوبیان، ا.، قاسمی، س. و یعقوبیان، ی. (۱۳۹۶) اثر تاریخ کاشت و کود اوره بر برخی صفات مورفولوژیک، عملکرد و اجزای عملکرد گندم در شرایط آب و هوایی شهرستان هشترود. فصلنامه بوم‌شناسی گیاهان زراعی ۱۳: ۶۴-۵۳.

Aebi, H. (1984) Catalase in vitro. Methods Enzymology 105: 121-126.

Aghdam, M. T. B., Mohammadi, H. and Ghorbanpour, M. (2016) Effects of nanoparticulate anatase titanium dioxide on physiological and biochemical performance of *Linum usitatissimum* (Linaceae) under well-watered and drought stress conditions. Brazilian Journal of Botany 39: 139-146.

Ahmadi Azar, F., Hasanloo, T., Imani, A. and Feiziasl, V. (2015). Water stress and mineral zeolite application on growth and some physiological characteristics of Mallow (*Malva sylvestris*). Iranian Journal of Biology 28: 459 - 74.

Akbari, G. A., Morteza, E., Moaveni, P., Alahdadi, I., Bihamta, M. R. and Hasanloo, T. (2014) Pigments apparatus and anthocyanins reactions of borage to irrigation, methylalchol and titanium dioxide. International Journal of Biosciences, 4: 192-208.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

Alonso, M., Rozados, M. J., Vega, J. A., Perez-Gorostiaga, P., Cuinas, P., Fonturbel, M. T. and Fernandes, C. (2002) Biochemical responses of Pinus Pinaster tree to fire- induced trunk girdling and crown scorch: secondary metabolites and pigments as needle chemical indicators. Journal of Chemical Ecology 28: 687-700.

Anjum, M., Rasool, Y. E., Wahid, A. and Anjum, S. (2003) Water stress in barley (*Hordeum vul*gare L.): effect on morphological characters. Pakistan Journal of Agricultural Science 40: 43-44.

Ariano, S., Bartolomeo, D., Cristos, X. and Andras, M. (2005) Antioxidant defenses in Olive trees during drought stress: changes in activity of some antioxidant enzymes. Functional Plant Biology 32: 45-53.

Arnon, D. I. (1949) Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in Beta vulgaris. Plant Physiology 24: 1-15.

Ashraf, M., Azim, Y. A. R., Khan, A. H. and Ala, S. A. 1994. Effect of water stress on total phenols, peroxidase activity and chlorophyll content in wheat (*Triticum aestivum* L.). Acta Physiologia Plantarum 16: 185-191.

Athar, H. R. and Ashraf, M. (2005) Photosynthesis under drought stress. In: Handbook of Photosynthesis (ed. Pessarakli, M.) Pp. 793-804. Taylor and Francis, New York.

Baisak, R., Rana, D., Acharya, R. B. B. and Kar, M. (1994) Alternations in the activities of active oxygen scavenging of wheat leaves of Oryza sativa during drought. Journal of Experimental of Botany 48: 2075-2085.

Bajji, M., Lutts, S. and Kinet, J. M. (2001) Water deficit effects on solute contribution to osmotic adjustment as a function of leaf ageing in three durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars performing differently in arid conditions. Plant Science 160: 669-681.

Bates, L. S., waldren, R. P. and teare, I. D. (1973) Rapid determination of free proline for water- stress studies. Plant and soil 39: 205-207.

Bayer, W. J. and Imlay Fridovich, I. (1991) Superoxide dismutase. Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology 40: 221-253.

Berahmand, A. A., Panahi, A. G., Sahabi, H., Feizi, H., Moghaddam, P. R., Shahtahmassebi, N. and Gallehgir, O. (2012) Effects silver nanoparticles and magnetic field on growth of fodder maize (*Zea mays* L.). Biological trace element research149: 419-424.

Blokhina, O. K. and Fagerstedt, V. (2010) Oxidative metabolism, ROS and NO under oxygen deprivation. Plant Physiology and Biochemistry 48: 359-373.

Blume, A. and Ebercon, A. (1981) Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat. Crop Science 27: 43-47.

Bond, J. and Liefert, O. (2017) Wheat Outlook. United States Department of Agriculture.

Bowen, P., Menzies, J., Ehert, D., Samuel, L. and Glass, A. D. M. (1992) Soluble silicon sprays inhibit powdery development in grape leaves. Journal of American Society of Horticultural Science 117: 906-912.

Breusegem, F. V., Vranova, E., Dat, J. F. and Inze, D. (2001) The role of active oxygen species in plant signal transduction. Plant Science 161: 405-414.

Campuzano, G. E., Miralles, D. J. and Slafer, G. A. (2008). Genotypic variability and response to water stress of pre- and post-anthesis phases in triticale. European Journal of Agronomy 28: 171-177.

Chance, B. and Maehly, C. (1995) Assay catalase and peroxidase. Methods Enzymology 11: 764-775.

Chao, S. H. L. and Choi, H. S. (2005) Method for Providing Enhanced Photosynthesis. Korea Research Institute of Chemical Technology, Jeonju.

Chen, W. P., Li, P. H. and Chen, T. H. (2000) Glycine betaine increase chilling tolerance and reduce chilling-induced lipid peroxidation in *Zea mays* L. Plant, Cell and Environment 23: 609-618.

Donaldson, E., Schillinger, F. W. and Dofing, S. M. (2001) Stravproduction and grain yield in relationships winter wheat. Crop Science 41: 100-106.

FAO. (2017) FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. Available online at: http://www.fao.org/faostat/en/.

Feizi, H., Kamali, M., Jafari, L. and Moghaddam, P. R. (2013) Phytotoxicity and stimulatory impacts of nanosized and bulk titanium dioxide on fennel (*Foeniculum vulgare* Mill). Chemosphere 91: 506-511.

Gao, F., Liu, C., Zheng, Qu., Yang, C. L., Su, F. M. and Hong, F. (2008) Was improvement of spinach growth by nano-TiO2 treatment related to the changes of rubisco activase? Biometals 21: 211-217.

Gibson, L. R. and Paulsen, G. M. (1999) Yield components wheat grown under high temperature stress during reproductive growth. Crop Science 39: 1841-1846.

Guo, X. Y., Zhang, X. S. and Huang, Z. Y. (2010) Drought tolerance in three hybrid poplar clones submitted to different watering regimes. Journal of Plant Ecology 3: 79-87.

Hassanpour, J., Kaffi, M. and Mirahadi, M. J. (2008) Effect of drought stress on yield and some physiological characteristics of barley. Iranian Journal of Agricultural Science 1: 165-171.

Inamullah, Z., Swati, A., Latif, A. and Siraj-u-Din, M. (1999) Evaluation of lines for drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). Scientific Khyber 12: 39-48.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

Jaberzadeh, A., Moaveni, P., Tohidi Moghadam, H. R. and Zahedi, H. (2013) Influence of bulk and nanoparticles titanium foliar application on some agronomic traits, seed gluten and starch contents of wheat subjected to water deficit stress. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca 41: 201-207.

Jaleel, C. A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H. J., Somasundaram, R. and Panneerselvam, R. (2009) Drought stress plants: A review on morphological characteristics and pigments composition. International Journal of Agriculture and Biology 11: 100-105.

Jiang Y, B. and Huang. (2001). Drought and heat stress injury to two cool-season turf grasses in relation to antioxidant metabolism and lipid peroxidation. Crop Science. 41:436-442.

Jin, E.S., Yokthongwattana, K., Polle, J. E. W. and Melis, A. (2003). Role of the reversible xanthophyll cycle in the photosystem II damage and in dunaliella salina. Plant physiology 132: 325-364.

Kiapour, H., Moaveni, P., Habibi, D. and Sani, B. (2015) Evaluation of the application of gibbrellic acid and titanium dioxide nanoparticles under drought stress on some traits of basil (*Ocimum basilicum* L.). International Journal of Agronomy and Agricultural Research 4: 138-150.

Kilic, H. and Yagbasanlar, T. (2010) The effect of drought stress on grain yield, yield components and some quality traits of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. durum) cultivars. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca 38: 164-170.

Lei, Z., Mingyu, S., Chao, L., Liang, C., Hao, H., Xiao, W. and Fashui, H. (2007) Effects of nanoanatase TiO2 on photosynthesis of spinach chloroplasts under different light illumination. Biological trace element research, 119: 68-76.

Lei, Z., Mingyu, S., Xiao, W., Chao, L., Chunxiang, Q., Liang, C. and Fashui, H. (2008) Antioxidant stress is promoted by nano-anatase in spinach chloroplasts under UV-B radiation. Biological Trace Element Research 121: 69-79.

Li, Q. F., Ma, C. C. and Shang, Q. L. (2007) Effects of silicon on photosynthesis and antioxidative enzymes of maize under drought stress. Ying Yong sheng tai xue bao. Journal of Applied Ecology 18: 531-536.

Liang, Y., Chen, Q., Liu, W., Zhang, W. and Ding, R. (2003) Exogenous silicone (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid per oxidation in roots or salt- stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). Journal of Plant Physiology 99: 872-878.

Liu, X. and Huang, B. (2000) Heat stress injury in relation to membrane lipid peroxidation in creeping bentgrass. Crop Science Society of America 40: 503-510.

Mahmodian, M., Esmaeilzade Moghaddam, M. and Nasri, M. (2010) Canopy response, leaf chlorophyll, somatal conductance and yield of bread wheat cultivars to drought sress. Journal of Ecophysiology of Crops 3: 144-158.

Martinez, J. P., Luttus, S., Schanck, A. and Banjji, M. (2004) Is osmotic adjustment required for water stress resistance in the Mediterranean shrub *Atriplex halimus* L. Journal of Plant Physiology 16: 1041-1051.

Masinde, P. W., Stutzel, H., Agong, S. G. and Fricke, A. (2005) Plant growth, water relations, and transpiration of spiderplant [*Gynandropsis gynandra* (L.) Briq.] under water-limited conditions. Journal of the American Society for Horticultural Science 130: 469-477.

Minami, M. and Yoshikawa, H. (1979) A simplified assay method of superoxide dismutase activity for clinical use. Clinica Chimica Acta 92: 337-342.

Misra, A. and Sricastatva, N. K. (2000). Influence of water stress on Japanese mint. Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants 7: 51-58.

Moaveni, P., Aliabadi Farahani, H. and Maroufi, K. (2011) Effect of TiO2 nanoparticles spraying on wheat (*Triticum Aestivum* L.) under field condition. Advances in Environmental Biology 5: 2208-2210.

Moinuddin, A. and Khana-Chopra, R. (2004). Osmotic adjustment in Chickpea in relation to seed yield and yield parameters. Crop Science 44: 449-455.

Morant-Manceau, A., Pradier, E. and Tremblin, G. (2004) Osmotic adjustment, gas exchanges and chlorophyll fluorescence of a hexaploid triticale and its parental species salt stress. Journal of Plant Physiology 169: 25-33.

Morteza, E., Moaveni, M., Aliabadi Farahani, H. and Kiyani, M. (2013) Study of photosynthetic pigments changes of maize (*Zea mays* L.) under nano Tio2 spraying at various growth stages. Springer Plus. 2: 1-5.

Mottaghi, M., Najafian, G. and Bihamta, M. R. (2009) Effect of end of season drought stress on grain yield and quality of bakery in hexaploid wheat genotypes. Journal of Agricultural Sciences of Iran 11: 209-306.

Nakano, Y. and Asada, K. (1981) Hydrogen peroxide scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplast. Plant Cell Physiology 22: 867-880.

Nautiyal, P. C., Rachaputi, N. R. and Joshi, Y. C. (2002) Moisture-deficit-induced changes in leaf-water content, leaf carbon exchange rate and biomass production in groundnut cultivars differing in specific leaf area. Field Crops Research 74: 67-79.

Ohkawa, H., Ohishi, N. and Yagi, Y. (1979) Assay of lipid peroxides in tissues by thiobarbituric acid reaction. Annual Biochemstry 95: 351-358.

Omidi–Tabrizi, A. H. (1998) Correlation Between Traits and Path Analysis for Grain and Oil Yield in Spring Safflower. Seed and Plant Improvement Institute, Karaj.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

Owolade, O. F., Ogunleti, D. O. and Adenekan, M. O. (2008) Titanium dioxide affects diseases, development and yield of edible cowpea. Journal of Environmental Agricultural and Food Chemistry 7: 2942-2947.

Patel, P. K. and Hemantaranjan, A. (2012). Antioxidant defence system in chickpea (*Cicer arietinum* L.): influence by drought stress implemented at pre- and post-anthesis stage. American Journal of Plant Physiology 7: 164-173.

Qi, M., Liu, Y. and Li, T. (2013). Nano-TiO2 improves the photosynthesis of tomato leaves under mild heat stress. Biological Trace Element Research 156: 323-328.

Rahbarian, P., Afsharmaneshb, G. and Shirzadic, M. H. (2010). Effects of drought stress and manure on relative water content and cell membrane stability in dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.). Plant Ecophysiol 2: 13-9.

Ranjan, R., Bohra, S. P. and Jeet, A. M. (2001). Book of Plant Senescence. Jodhpur, Agrobios, New York.

Rezaie Soukht Abandani, R. and Ramezani, R. (2010) Effect of irrigation period and nitrogen fertilizer on growth physiological index and yield of forage corn (hybrid s.c 704) in Mazandaran province conditions. Journal of Crop Physiology 2: 19-44.

Schonfeld, M. A., Johnson, R. C., Carver, B. F. and Mornhinweg, D. W. (1988) Water relations in winter wheat as drought resistance indicators. Crop Science 28: 526-531.

Schulze, E. D., Beck, E. and Muller-Hohenstein, K. (2002) Plant Ecology. Springer, Berlin.

Schutzz, M. and Fangmeier, A. (2001). Growth and yield responses of spring wheat (*Triticum aestivum* L. CV. Minaret). Pollution 114: 187-189.

Sharif, S., Saffari, M. and Imam, Y. (2006) Effect of drought stress and sycocel on yield and yield components of valfajr cultivars. Journal of Agricultural Science and Technology 10: 280-290.

Shepherd, A., Ginn, S. M. C. M. and Wyseure, G. C. L. (2002) Simulation of the effect of water shortage on the yields of winter wheat in North-East England. Ecological Modeling 147: 41-52.

Siddique, M. R. B., Hamid, A. and Islam, M. S. (2000) Drought stress effects on water relations of wheat. Botany Bulletin Academic Science 41: 35-39.

Sinclair, T. R. and Ludlow, M. M. (1985) Who thought plant thermodynamics? The unfulfilled potential of plant water potential. Australian Journal of Plant Physiology 33: 312-317.

Soltani, M., Moaveni, P. and Noori, H. (2013) The effect of foliar application of nanoparticles of titanium dioxide on yield and antioxidant enzyme activities in lentil (*Lens culinaris* Medik.) Journal of Plant Ecophysiology Research Special Issue: 78-88.

Subhani, G. M. and Chowdhry, M. A. (2000) Correlation and path coefficient analysis in bread wheat under drought stress and normal conditions. Pakistan Journal of Biological Science 3: 72-77.

Tanaka, A. and Tanaka, R. (2006) Chlorophyll metabolism. Plant Biology 9: 248-255.

Tarumingkeng, R. C. and Coto, Z. (2003) Effects of Drought Stress on Growth and Yield of Soybean. Science Philosopy Agricultural University, Kisman.

Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M. and Challinor, A. J. (2014) Climate variability and vulnerability to climate change: a review. Global Change Biology 20: 3313-3328.

Ullah, A., Sun, H., Yang, X. and Zhang, X. (2017) Drought coping strategies in cotton: Increased crop per drop. Plant Biotechnology Journal 15: 271-284.

Wang, W. B., Kim, Y. H., Lee, H. S., Kim, K. Y., Deng, X. P. and Kwak, S. S. (2009) Analysis of antioxidant enzyme activity during germination of alfalfa under salt and drought stresses. Plant Physiology and Biochemistry 47: 570-577.

Yang, F., Hong, F., You, W., Liu, C., Gao, F., Wu, C. and Yang, P. (2006) Influences of nano-anatase TiO2 on the nitrogen metabolism of growing spinach. Biological Trace Element Research 110: 179-190.

Zheng, L., Su, M., Liu, Ch., Chen, L., Huang, H., Wu, X., Liu, X., Yang Gao, F. and Hong, F. (2007) Effects of Nanoanatase TiO2 on photosynthesis of spinach chloroplasts under different light illumination. Biological Trace Element Research 119: 68-76.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]

Effect of foliar application of titanium dioxide nanoparticles in water deficit irrigation on some morphological and physiological traits and wheat yield

Amir Ata Salehi[1], Farhad FarahVash[1*], Gholam Abbas Akbari[2], Elias Soltani[2], Bahram Mirashkari[1]

[1]Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

[2]Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 06/12/2021, Accepted: 05/07/2022)

Abstract

In this study, the effects of application of titanium dioxide nanoparticles under water deficit irrigation stress in the pre-flowering and grain filling stages on wheat were investigated. For this purpose, this plant was sprayed with %0.02 titanium dioxide in tillering and heading stages and some traits such as plant height, leaf area index, number of fertile tillers, number of seeds, 1000 seed weight, biological yield, harvest index, relative leaf water content, total chlorophyll content, proline and malondialdehyde content and ascorbate peroxidase as well as superoxide dismutase activity were examined. The results showed the positive effects of the application of these nanoparticles on the vegetative and reproductive growth of wheat under normal conditions and stress, so that under drought stress increased the number of fertile tillers, increased the number of seeds and 1000 seed weight was compared with the non-application of nanoparticles under stress conditions.Under normal conditions and low irrigation stress, application of these nanoparticles during tillering had more favorable effects on vegetative and functional characteristics of the plant compared to the clustering time and increased wheat harvest index in drought conditions. On the other hand, the application of titanium nanoparticles effectively reduced the adverse effects of drought stress in the pre-flowering and grain filling periods whereas increased proline activity. Recent events have increased the ability of wheat to withstand drought stress.

Keywords: Antioxidant enzymes, Drought stress, Water deficit irrigation, Wheat, Foliar application, Titanium dioxide nanoparticles

Corresponding author, Email: - farahvash@iaut.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-03]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.25.3]