

تأثیر محلول پاشی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در شرایط کم آبیاری بر برخی صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک و عملکرد گندم

امیر عطا 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 دی اکسید تیتانیوم در شرایط تنش کم آبیاری در مراحل قبل از گلدهی و پر شدن دانه‌ها در گندم پرداخته شد. بدین منظور، این گیاه در مراحل پنجه زنی و خوشه دهی توسط غلظت ۰/۰۲ درصد نانو دی اکسید تیتانیوم محلول پاشی 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 مالون دی آلدئید 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، به طوری که 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 کم آبیاری کاربرد این نانو ذرات در زمان پنجه زنی اثرات مطلوب تری بر خصوصیات رویشی و عملکردی گیاه در مقایسه با زمان خوشه دهی داشت و موجب افزایش شاخص برداشت گندم در شرایط خشکی شد. از سویی، کاربرد نانو ذرات تیتانیوم به طور 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 آنتی اکسیدان از تجمع مالون دی آلدئید جلوگیری نمود، به طوری که اتفاقات اخیر موجب افزایش توانایی گندم در مواجهه با شرایط تنش خشکی گردید.

کلمات کلیدی: آنزیم‌های آنتی اکسیدان، تنش خشکی، کم آبیاری، گندم، محلول پاشی، نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم

مقدمه

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

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

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

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 از جمله 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 رویسکو (کمپلکس رویسکو و رویسکو 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 به علت 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 می‌تواند باعث کاهش اثرات سوء تنش خشکی بر این گیاه شود و عملکرد را افزایش دهد. همچنین (Jaberzadeh *et al.*,

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 در نهایت کیفیت دانه کنگد 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 فیزیولوژیکی 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

2013) با بررسی اثر نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم 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 مهم ترین غلات مورد نیاز انسان است و همچنین تنش خشکی عاملی بازدارنده در تولید این محصول به شمار می رود، در این تحقیق به بررسی اثرات کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر گیاه گندم در شرایط تنش خشکی پرداخته شد.

مواد و روش ها

این تحقیق طی سال های 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 توصیه شده گندم در منطقه مورد بررسی و با توجه به دمای هوا و ویژگی های جغرافیایی ناحیه، اواسط آبان بود که رعایت گردید. این آزمایش در قالب بلوک های کامل تصادفی به صورت اسپلیت پلات در ۴ تکرار اجرا شد و دارای دو فاکتور اصلی آبیاری و فاکتور فرعی محلول پاشی با نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بود. به صورتی که فاکتور اصلی یا آبیاری در سه سطح شامل آبیاری کامل (I₁)، قطع آبیاری قبل از گلدهی (I₂) و قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه ها (I₃) و فاکتور فرعی یا محلول پاشی با نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم نیز در سه سطح شامل محلول پاشی در زمان پنجه زنی (S₁)، محلول پاشی در زمان شروع خوشه دهی (S₂) و عدم محلول پاشی (S₃) بود که در نهایت به ۳۶ کرت آزمایشی منتهی شد. بر این اساس آبیاری در زمان های مورد نظر قطع گردید و تنش خشکی در مرحله قبل از گلدهی (I₂) و در هنگام پر شدن دانه ها (I₃) بر گیاهان اعمال گردید. حصاربندی و نخ کشی مزرعه به منظور جلوگیری از هجوم احتمالی پرندگان و آسیب به جوانه ها و دانه های گندم در هر دو سال انجام شد. علاوه بر این، اقداماتی از جمله انتخاب زمینی به مساحت ۴۴۰

مترمربع (سطح زیر کشت مفید ۴۰۰ مترمربع) در مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان و آماده سازی آن با شخم و تهیه بستر، کرت بندی زمین مورد نظر و نمونه برداری از خاک مزرعه، کاشت بذور گندم به مقدار ۵ کیلوگرم و تکمیل کاشت بذرها و آبیاری به صورت مشترک در هر دو سال صورت گرفت. کاشت بذور به صورت 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 سانتی متر بود که در هر ردیف ۲ خط کاشت اجرا شد. بین کرت های اصلی ۴ متر و بین کرت های فرعی ۱۶۰ سانتی متر فاصله در نظر گرفته شد. شیوه کشت در این تحقیق به صورت شیاری بوده که پس از آماده سازی زمین مطابق نقشه طرح کاشت بذرها انجام شد. به علاوه 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 علف های هرز به صورت دستی و مکانیکی انجام پذیرفت و کود دهی با کود اوره نیز طبق نیاز رقم سیروان و آزمایش های خاک مزرعه به صورت دوره ای و به میزان ۸ کیلوگرم در واحد سطح طرح آزمایشی انجام شد. همچنین در زمان خوشه دهی با آفت سن گندم به صورت شیمیایی مبارزه به عمل آمد. در مرحله بعد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم تهیه شده در غلظت ۰/۰۲ درصد در زمان های مقرر بر روی گیاهان محلول پاشی شد (Jaberzadeh et al., 2013).

نحوه آماده سازی محلول نانو دی اکسید تیتانیوم: طی آزمایشی به منظور آماده سازی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم، ابتدا ۲۰ گرم دی اکسید تیتانیوم در آب حل و ۰/۰۱ میلی لیتر از محلول به حجم ۱۰۰۰ میلی لیتر رسانیده شد. بدین گونه، غلظت های مختلف دی اکسید تیتانیوم (۰/۰۱ درصد، ۰/۰۲ درصد و ۰/۰۳ درصد) آماده شدند و از دستگاه مافوق صوت (مدل VT۳۰۰ ساخت شرکت BioLogics آمریکا با قابلیت توان ۳۰۰ وات و فرکانس خروجی ۲۰ کیلوهرتز) نیز به منظور همگن نمودن آن ها استفاده شد. از آنجایی که، در میان تیمارهای مختلف تیتانیوم، کاربرد غلظت ۰/۰۲ درصد از این ماده تقریباً

در تمام صفات زراعی از جمله ارتفاع بوته، وزن خوشه، تعداد خوشه، تعداد دانه، وزن ۱۰۰۰ دانه، عملکرد نهایی، زیست توده (بیوماس)، گلوتن و نشاسته موجب افزایش شد غلظت ۰/۰۲ درصد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم تحت شرایط تنش کم آبی استفاده شد (Jaberzadeh, et al., 2013). همچنین نوری و همکاران (۱۳۹۶) نیز این غلظت را توصیه نموده اند. در نتیجه از غلظت ۰/۰۲ درصد از نانو دی اکسید تیتانیوم در این آزمایش استفاده شد و روش تهیه این محلول به این صورت بود که با توجه به آنکه در نانو دی اکسید تیتانیوم تهیه شده (TiO₂=10% w/Lit) هر ۱۰۰۰۰۰ مولکول دی اکسید تیتانیوم در ۱۰^۶ مولکول آب حل شده است، پس برای جدا نمودن ۰/۰۲ درصد از محلول جهت محلول پاشی به ۲۰۰ پی پی ام از این ماده نیاز داریم. بنابراین در ۱۰ لیتر آب مقطر، باید ۲۰ سی سی از محلول دی اکسید تیتانیوم نانو جهت اسپری کردن بر روی گیاهان افزوده شود. از آنجایی که محلول پاشی توسط سم پاش دستی ۲۰ لیتری صورت گرفت، ۴۰ سی سی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم جهت محلول پاشی استفاده شد.

در هر سال ۶ مرحله نمونه برداری مرتبط با آن سال انجام شد. نمونه برداری اول در هر دو سال قبل از محلول پاشی و در مرحله پنجه زنی صرفاً جهت بررسی سطح برگ و دست یابی به روند شاخص سطح برگ انجام شد و البته اندازه گیری این صفت تا نمونه برداری پنجم ادامه یافت (لازم به ذکر است، در نمونه برداری آخر به دلیل اینکه زمان برداشت محصول بود، سطح برگ سبزی وجود نداشت). بنابراین پس از انجام اولین نمونه برداری، اقدام به محلول پاشی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم گردید (تیمار S₁). نمونه برداری دوم در سال های اول و دوم بعد از محلول پاشی S₁ صورت گرفت. لازم به ذکر است که چون در این مرحله از نمونه برداری هیچ تنش خشکی (تیمارهای I₂ و I₃) اعمال نشده بود، سطوح I₁ تا I₃ یکی بودند و از طرفی نیز تیمارهای S₂ و S₃ هنوز اعمال نشده بودند. نمونه برداری سوم در سال های اول و دوم بعد از محلول پاشی S₂ صورت گرفت. در این مرحله از نمونه برداری، مزرعه در حال تشکیل خوشه بود و هنوز از غلاف برگ خارج نشده بود.

همچنین هنوز هیچ تنش خشکی (تیمارهای I₂ و I₃) بر گیاهان اعمال نشده بود (سطوح I₁ تا I₃ یکی بودند). نمونه برداری چهارم در سال های اول و دوم بعد از تنش خشکی I₂ صورت گرفت. نمونه برداری پنجم در سال های اول و دوم بعد از تنش خشکی I₃ صورت گرفت. در این مرحله از نمونه برداری، سطوح I₂ و I₃ در حال زرد شدن بودند، به طوری که ۹۰ درصد آن ها زرد شده بود، اما سطح I₁ هنوز سبز مانده بود و تنها بخش کمی از آن به زردی تغییر رنگ داده بود. به علاوه اینکه دانه ها در حال تشکیل شدن بودند و تیمار I₂ در این نمونه برداری در سال دوم فاقد سطح برگ بود. و نمونه برداری آخر در سال های اول و دوم برای تعیین عملکرد نهایی گیاه گندم اجرا گردید. پس از انجام هر مرحله از نمونه برداری 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 خط کش با دقت میلی متر اندازه گیری شد.

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

اندازه گیری تعداد پنجه بارور، تعداد دانه و وزن هزار دانه: تعداد پنجه بارور در واحد سطح که یکی از مهم ترین عامل تعیین کننده عملکرد دانه محسوب می شود، در چهارچوبی به مساحت یک متر پس از انتخاب تصادفی ۵ سنبله بارور و شمارش تعداد پنجه های بارور از بوته ها به دست آمد. جهت اندازه گیری تعداد دانه، پنج بوته در هر کرت به طور تصادفی از قسمت های غیر حاشیه ای جدا گردید و سنبله های مربوط به هر کرت در پاکت جداگانه ای با ذکر مشخصات قرار داده شده و پس از کوبیدن سنبله ها و شمارش تعداد دانه ها میانگین تعداد دانه ها در هر ۵ بوته برای هر کرت محاسبه شد. برای اندازه گیری وزن هزار دانه به نمونه گیری از محصول دانه

حاصل در درون لوله آزمایش ریخته شده ۱۰ دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. ۲ میلی لیتر از عصاره صاف شده برداشته و در یک لوله آزمایش ریخته شد. سپس به هر لوله ۲ میلی لیتر معرف نین هیدرین و ۲ میلی لیتر اسید استیک اضافه گردید. لوله های آزمایش در بن ماری با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت قرار داده شدند و پس از یک ساعت لوله ها جهت خاتمه واکنش در داخل حمام یخ گذاشته شدند. پس از سرد شدن لوله ها، به آنها ۴ میلی لیتر 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 طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت گردید. آنگاه غلظت پرولین برحسب میکرومول بر گرم ماده تر با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

عدد خوانده شده توسط دستگاه = پرولین

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

اندازه گیری مالون دی آلدئید: جهت اندازه گیری مالون دی-

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 میلی لیتر محلول تری کلرواستیک اسید 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 میلی لیتر از این محلول با ۰/۵ میلی لیتر از محلول تیوباربتوریک اسید و تری کلرواستیک ۲۰ درصد مخلوط و در ۹۶ درجه سانتی گراد به مدت ۲۵ دقیقه نگهداری شد. سپس در شرایط سرد در ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت پنج دقیقه سانتریفیوژ و جذب محلول روئی در طول موج ۵۳۲ نانومتر اندازه گیری شد. از محلول تیوباربتوریک اسید و تری کلرواستیک ۲۰ درصد نیز به عنوان شاهد استفاده شد (Ohkawa et al., 1979).

اندازه گیری فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز: فعالیت

آنزیم آسکوربات پراکسیداز به روش Nakano and Asada (۱۹۸۱) مورد ارزیابی قرار گرفت. به طوری که با بررسی میزان پراکسیداسیون آسکوربات با افزایش جذب در طول موج ۲۹۰ نانومتر انجام شد. مخلوط واکنش شامل بافر فسفات ۵۰ میلی-

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

اندازه گیری عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت: برای

تعیین عملکرد بیولوژیک یا وزن خشک کل در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک بوته های برداشت شده از یک مترمربع از هر کرت به مدت ۲۴ ساعت در داخل آونی با دمای ۷۵ درجه سانتی گراد 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 به دست آمده برحسب درصد بیان شد. برای محاسبه عملکرد دانه نیز از اندازه گیری وزن دانه های موجود در مابقی محدوده مورد نظر در مرحله رسیدگی کامل استفاده گردید (جعفری و همکاران، ۱۳۹۷).

اندازه گیری محتوای آب نسبی برگ: اندازه گیری محتوای

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

خشک برگ - وزن تر برگ) = محتوای آب نسبی برگ
 $100 \times (\text{وزن خشک برگ} - \text{وزن توری برگ}) \div (\text{وزن تر برگ} - \text{وزن خشک برگ})$

اندازه گیری محتوای کلروفیل کل: برای اندازه گیری

کلروفیل کل، ۰/۱ گرم نمونه برگ توزین شد و با استفاده از نیتروژن مایع نمونه کوبیده شد. سپس ۲۰ میلی لیتر 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 روئی برای تعیین میزان کلروفیل استفاده شد. در آخر میزان جذب در طول موج های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد و مقدار کلروفیل برحسب میلی گرم در گرم وزن تر بیان گردید (Arnon, 1949).

اندازه گیری پرولین: برای اندازه گیری 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 میلی لیتر اسید سولفوسالسیلیک ۳ درصد اضافه و در هاون چینی خوب سائیده و هموژنیزه شدند. سپس مخلوط

سال متوالی به مرحله اجرا درآمد، اثرات زمان نیز بر صفات مورد بررسی (به جز محتوای آب نسبی و کلروفیل کل) معنی دار 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 به اندازه‌ای 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

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 نرم‌افزار Excel 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

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**	۰/۰۹۴*	۰/۰۵۰۲**
فاکتور S (محلول پاشی)	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*	۰/۰۶۵**	۰/۰۲۳**
S × I	۴	۰/۹۷**	۰/۶۴۴**	۰/۰۲**	۰/۳۳**	۰/۸۲**	۰/۷۲**	۰/۸۶*
I × T	۲	۰/۱۴ ^{ns}	۰/۱۷ ^{ns}	۰/۱۹ ^{ns}	۰/۲۷ ^{ns}	۰/۱۶ ^{ns}	۰/۱۴ ^{ns}	۰/۱۹ ^{ns}
S × T	۲	۰/۲ ^{ns}	۰/۰۸ ^{ns}	۰/۲۲ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}	۰/۸۱ ^{ns}	۰/۴۱ ^{ns}	۰/۰۶ ^{ns}
I × S × T	۴	۰/۵۵ ^{ns}	۰/۰۶ ^{ns}	۰/۴۸ ^{ns}	۰/۷۱ ^{ns}	۰/۷۴ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}	۰/۰۶ ^{ns}
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 معنی داری، * معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد و ** معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد

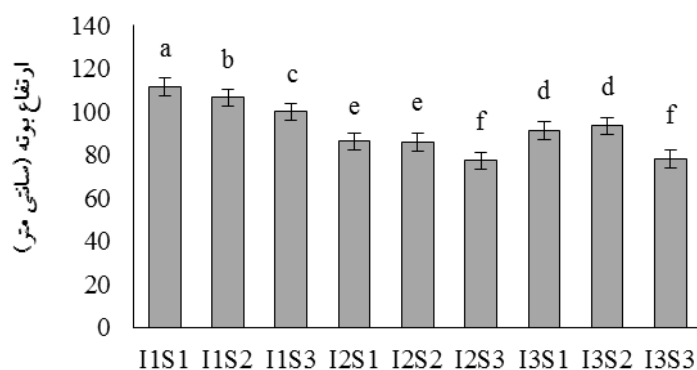
جدول ۲- جدول تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر صفات فیزیولوژیک و آنزیم‌های آنتی اکسیدان

منابع تغییرات	درجه آزادی	محتوای آب نسبی	کلروفیل کل	مالون دی آلدئید	پرویلین	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 (محلول پاشی)	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	۱۳/۱۱ ^{ns}	۱۴/۰۹ ^{ns}	۱۳/۱۸ ^{ns}	۸/۴۴ ^{ns}	۱۹/۰۵ ^{ns}	۱۴/۰۹ ^{ns}
S × T	۲	۱۶/۴۳ ^{ns}	۱۹/۱۱ ^{ns}	۲۰/۲۵ ^{ns}	۱۸/۴۶ ^{ns}	۲۸/۳۷ ^{ns}	۲۲/۴۱ ^{ns}
I × S × T	۴	۱۷/۵۳ ^{ns}	۲۲/۴۳ ^{ns}	۲۶/۱۵ ^{ns}	۱۶/۴۱ ^{ns}	۱۳/۲۹ ^{ns}	۱۸/۷۷ ^{ns}
T (زمان)	۱	۹/۷۶ ^{ns}	۱۲/۰۳ ^{ns}	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 معنی داری، * معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد و ** معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد

است. بر اساس نتایج تحقیقات (Yang, 2006) کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم می تواند جذب نیتروژن را تحت تأثیر قرار داده و سبب جذب مقادیری بالاتر از عنصر حیاتی در

میکرو به ریشه گیاهان نقش دارند (امینیان و همکاران، ۱۳۹۶). بدین ترتیب کاربرد دی اکسید تیتانیوم به صورت ذرات نانو در این تحقیق نیز منجر به افزایش رشد و عملکرد گیاه گندم شده



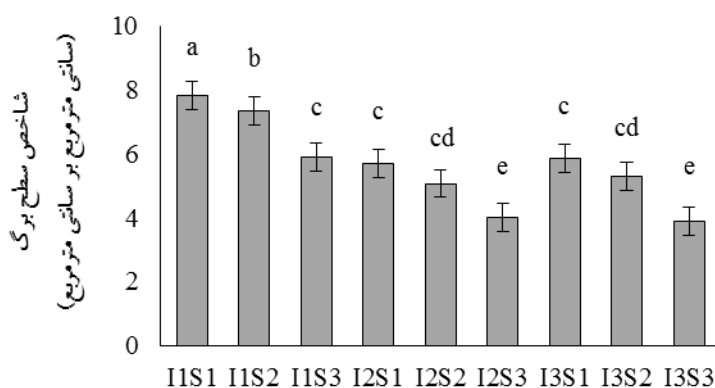
نمودار ۱- اثر متقابل تنش کم آبی و کاربرد نانو ذرات دی اکسیدتیتانیوم بر ارتفاع گندم. تیمارهای کم آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها)، تیمارهای محلول پاشی (S1: محلول پاشی در مرحله پنجه زنی، S2: محلول پاشی در مرحله خوشه دهی، S3: عدم محلول پاشی)

دنبال آن کاهش رشد و نمو آن‌ها به خصوص 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). به علاوه 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) با وجود 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

گیاهان شود. پس در نتیجه 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 قابل تأمل این است که در هر دو مرحله اعمال تنش خشکی، محلول پاشی نانو ذرات دی اکسیدتیتانیوم در مرحله پنجه زنی 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 کم آبی را در این صفت به آستانه سطح برگ گیاهان تنش نیافته برساند. در مورد گیاهان تنش نیافته نیز کاربرد این عنصر در مرحله پنجه زنی نتایج بهتری را نسبت به مرحله خوشه دهی به خود اختصاص داده است.

از آنجایی که ایران جزو مناطق خشک و نیمه خشک دنیا محسوب می‌شود و نوسانات بارندگی زیادی در این کشور وجود دارد، ریسک مواجه شدن گیاهان با تنش کم آبی و به



نمودار ۲- اثر متقابل تنش کم آبی و کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر شاخص سطح برگ گندم. تیمارهای کم آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها)، تیمارهای محلول پاشی (S1: محلول پاشی در مرحله پنجه زنی، S2: محلول پاشی در مرحله خوشه دهی، S3: عدم محلول پاشی)

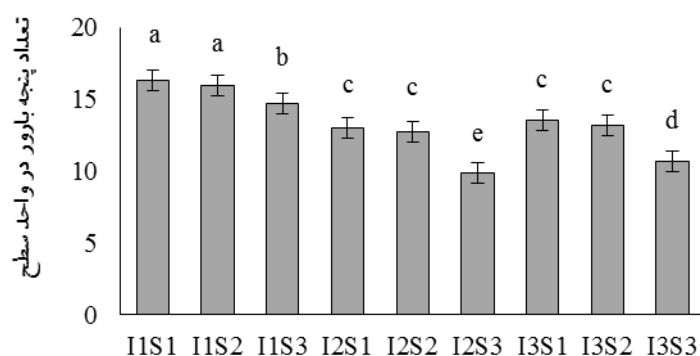
تغییر مسیر آب و مواد غذایی از برگ‌ها به سوی دانه‌ها، از سطح برگ نیز کاسته شد. این کاهش سطح برگ به وضوح در مقایسه‌ای میان تیمارهای I1S3، I2S3 و I3S3 قابل رؤیت می‌باشد. این روند در شاخص‌های مرتبط با سطح برگ نظیر LAD و LWR نیز دیده شد. بنابراین سطح برگ شاخصی است که با زمان اثر مستقیمی دارد. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۱) درمی‌یابیم که تأثیر سال بر میانگین شاخص سطح برگ گیاه گندم معنی‌دار می‌باشد.

تعداد پنجه بارور: بر اساس نمودار ۳ محلول پاشی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در شرایط عادی و قطع آبیاری توانسته است تا تولید تعداد پنجه بارور را افزایش دهد به طوری که محلول پاشی در زمان پنجه زنی و محلول پاشی در مرحله شروع خوشه دهی به ترتیب ۱۷/۱۴ درصد و ۱۵/۴۱ درصد نسبت به عدم محلول پاشی سبب تولید بیشتر پنجه بارور شدند. با نگاهی به نتایج می‌توان دریافت که اولاً محلول پاشی در زمان پنجه دهی توانسته است تا تعداد پنجه بارور بیشتری را تولید نماید و ثانیاً اثرات کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم 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 به عنوان مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده عملکرد دانه بیان نموده‌اند و معتقدند که وجود

از راهکارهای کاهش اثرات زیان بار تنش‌های غیر زیستی استفاده از روش‌های تغذیه معدنی از جمله تیتانیوم می‌باشد که بی‌شک در صورتی که در مقیاس نانو به کار گرفته شود، نه تنها از خصوصیات منحصر به فرد 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 به صورت 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 محلول پاشی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر رشد و عملکرد گیاه عدس گزارش کردند که تیمار نانو دی اکسید تیتانیوم 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 نمونه برداری‌های 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



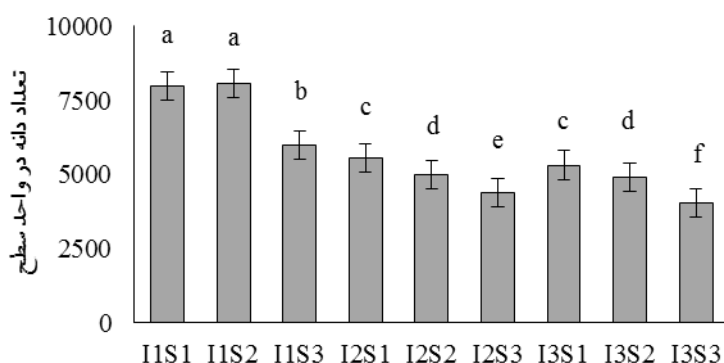
نمودار ۳- اثر متقابل تنش کم آبی و کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر تعداد پنجه بارور گندم. تیمارهای کم آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها)، تیمارهای محلول پاشی (S1: محلول پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول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

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 کم آبی توانسته است سبب تولید تعداد دانه بیشتری در گیاه شود و محلول پاشی این ماده در مرحله پنجه‌زنی اثرات معنی‌دار بیشتری بر تولید دانه در گندم داشته است، به طوری که محلول پاشی در زمان پنجه‌زنی و محلول پاشی در مرحله شروع خوشه‌دهی به ترتیب ۲۲/۱۲ درصد و ۱۲/۳۰ درصد نسبت به عدم محلول پاشی 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 کم آبی، سبب تولید تعداد دانه بیشتری در گندم شود، زیرا محلول پاشی 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 چیاپانه و

تراکم بهینه به تولید حداکثر پنجه بارور در گندم کمک می‌کند، اما نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تنش کم آبی بر کاهش تعداد پنجه‌های بارور در گیاه مؤثر بوده است به طوری که قطع آبیاری قبل از گلدهی و قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه‌ها به ترتیب 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 مرحله پر شدن دانه‌ها، گیاه فرصت بیشتری برای رشد و نمو عادی داشته است و قطع آبیاری در مرحله قبل از گرده‌افشانی، این زمان موردنیاز برای رشد بهتر گیاه را کوتاه‌تر کرده است. هنگامی که تنش خشکی ۱۵ روز پس از گرده‌افشانی اعمال شود، به دلیل دانه‌بندی قبل از این مرحله، فقط اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد، ولی در پنجه‌هایی که از نظر مراحل نمو عقب‌تر باشند تعداد دانه در سنبله نیز کاهش می‌یابد (Gibson and Paulsen, 1999). بنابراین کاربرد عنصر تیتانیوم به صورت 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



نمودار ۴- اثر متقابل تنش کم آبی و کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر تعداد دانه گندم. تیمارهای کم آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها)، تیمارهای محلول پاشی (S1: محلول پاشی در مرحله پنجه زنی، S2: محلول پاشی در مرحله خوشه دهی، S3: عدم محلول پاشی)

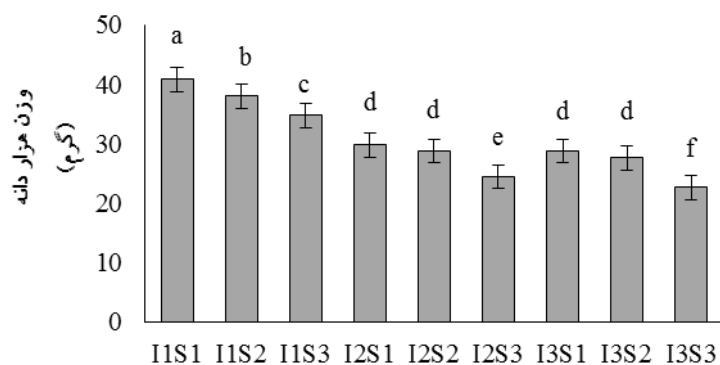
اما به کارگیری نانو دی اکسید تیتانیوم در شرایط تنش خشکی توانسته است با مساعد کردن شرایط تنش برای گیاه به افزایش سوخت و ساز گیاه و به دنبال آن بزرگ تر شدن این مخزن کمک شایانی نماید تا شرایط رشد عادی برای گیاه در این شرایط شبیه سازی شود. به نظر می رسد که در شرایط تنش خشکی، گیاه تنها به فتوسنتز جاری متکی نبوده و با کمک عنصر تیتانیوم توانسته است مواد فتوسنتزی کافی را با سرعت مناسب از اندام های هوایی (ساقه ها) به دانه ها 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 در نتیجه کاهش قابل ملاحظه ای در عملکرد این صفت با کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم 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) درمی یابیم که تأثیر سال بر میانگین وزن هزار دانه گیاه گندم معنی دار می باشد.

عملکرد بیولوژیک: مطابق با نمودار ۶ مشاهده می شود که کاربرد دی اکسید تیتانیوم در شرایط عادی و تنش خشکی سبب افزایش عملکرد بیولوژیک گیاه گندم در مقایسه با عدم کاربرد این ماده شده است، به طوری که محلول پاشی در زمان پنجه زنی و محلول پاشی در مرحله شروع خوشه دهی به ترتیب ۲۰/۶۷

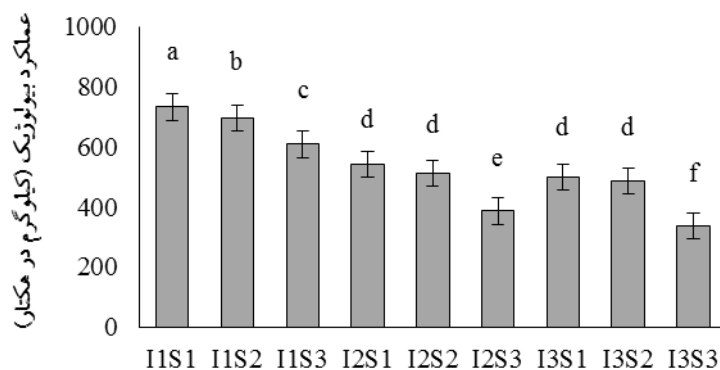
همکاران، ۱۳۹۱). نتایج تحقیقات (امینیان و همکاران، ۱۳۹۶) نیز بر روی گیاه گلرنگ نشان داد که بیشترین تعداد دانه در طبق در شرایط آبیاری معمولی و اعمال نانو دی اکسید تیتانیوم حاصل شد که با تعداد دانه در طبق در همین شرایط آبیاری و عدم استفاده از نانو دی اکسید تیتانیوم و تعداد دانه در طبق در شرایط کم آبیاری و عدم استفاده از نانو دی اکسید تیتانیوم اختلاف آماری نداشت. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۱) درمی یابیم که تأثیر سال بر میانگین تعداد دانه در واحد سطح گیاه گندم معنی دار می باشد.

وزن هزار دانه: بر اساس نمودار ۵ کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در شرایط عادی و تنش کم آبی 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 کم آبی با محلول پاشی این ماده در مرحله پنجه زنی مشاهده شد.

محدود شدن آبیاری در مرحله زایشی به دلیل اینکه طول دوره پر شدن دانه کاهش می یابد، گیاه با محدودیت منبع مواجه شده و مواد کمتری به دانه ها منتقل می شود. بنابراین، هرگونه تنش کم آبی در طی این مراحل می تواند 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 چیاپه و همکاران، ۱۳۹۱).



نمودار ۵- اثر متقابل تنش کم آبی و کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر وزن هزار دانه گندم. تیمارهای کم آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها)، تیمارهای محلول پاشی (S1: محلول پاشی در مرحله پنجه زنی، S2: محلول پاشی در مرحله خوشه دهی، S3: عدم محلول پاشی)



نمودار ۶- اثر متقابل تنش کم آبی و کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر عملکرد بیولوژیک گندم. تیمارهای کم آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها)، تیمارهای محلول پاشی (S1: محلول پاشی در مرحله پنجه زنی، S2: محلول پاشی در مرحله خوشه دهی، S3: عدم محلول پاشی)

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 به ترتیب 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 به ویژه پس از مرحله ظهور بساک کاهش معنی داری در شاخص‌های مرتبط با عملکرد گیاه به دنبال دارد (Campuzano *et al.*, 2008) که با نتایج این تحقیق نیز مطابقت دارد. از سوی (گلپور و همکاران، ۱۳۸۱) نیز بیان داشتند که بین عملکرد بیولوژیک و تعداد دانه در گیاه

درصد و ۱۲/۶۹ درصد نسبت به عدم محلول پاشی سبب افزایش عملکرد بیولوژیک شدند. در شرایط تنش اگرچه میان گیاهان تیمار شده با این ماده در هر دو زمان اعمال خشکی اختلاف معنی داری دیده نمی‌شود، اما کاربرد این ماده در شرایط خشکی قبل از گلدهی از یک سو تأثیر بهتری بر عملکرد گندم داشته است و از سوی دیگر محلول پاشی آن در مرحله پنجه زنی نتایج بهتری را در مقایسه با مرحله خوشه دهی حاصل نموده است.

کاهش عملکرد بیولوژیک و ماده خشک گیاه در اثر تنش خشکی در نتیجه کاهش فشار تورژانس سلولی و به دنبال آن

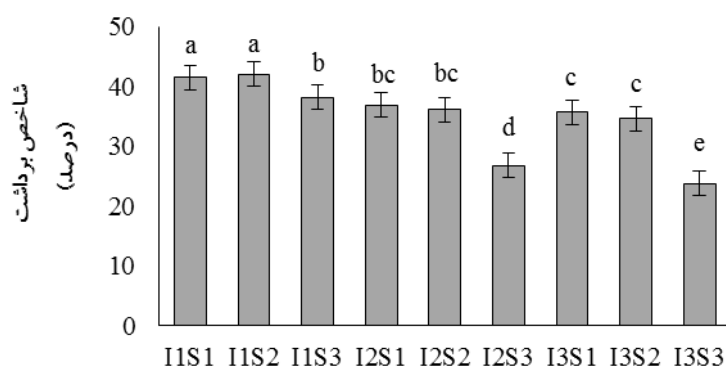
که منجر به عملکرد نهایی دانه می شود رابطه معنی دار و مثبتی برقرار است که در پژوهش حاضر نیز این همبستگی مشاهده می شود. همچنین این همبستگی در مورد کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم نیز دیده می شود، زیرا یافته های (نوری و همکاران، ۱۳۹۶) نیز روشن کننده این مطلب است که عملکرد بیولوژیک گیاه عدس با محلول پاشی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در غلظت ۰/۰۲ درصد افزایش یافته است. نتایج این آزمایش نیز در راستای تأیید تحقیقات این پژوهشگران بر کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم برای غلبه بر آثار سوء تنش خشکی دلالت دارد. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۱) درمی یابیم که تأثیر سال بر میانگین عملکرد بیولوژیک گیاه گندم معنی دار می باشد.

شاخص برداشت: همچنین با نگاهی به نمودار ۷ درمی یابیم که کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در شرایط عادی و تنش خشکی توانسته است تا به صورت معنی داری 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 معنی داری وجود ندارد، اما چند نکته حائز اهمیت می باشد. نکته ی اول اینکه کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر گیاهان تحت تنش خشکی در مرحله ی پنجه زنی اثرات مفیدتری در مقایسه با استفاده از این ماده در مرحله ی خوشه دهی دارد. به علاوه اینکه کاربرد این نانو ذرات در هنگام تنش خشکی در مرحله ی گلدهی شاخص برداشت بالاتری را در مقایسه با تنش خشکی در مرحله ی پر شدن دانه ها حاصل نموده اند. نکته ی کلی دیگر نیز اثرات مفید استفاده از عنصر تیتانیوم به صورت ذرات نانو بر شاخص برداشت گیاه گندم می باشد.

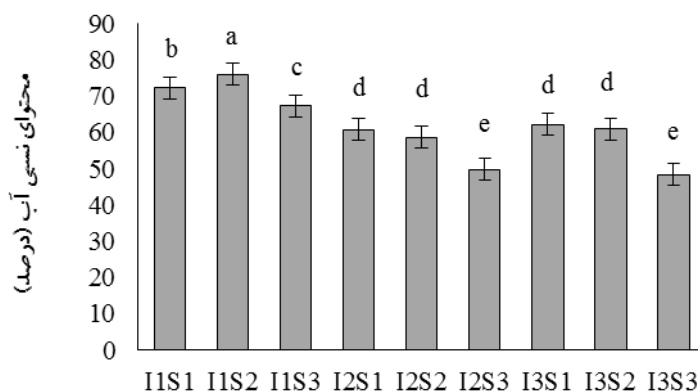
شاخص برداشت یکی از شاخص های مهم فیزیولوژیکی گیاه است که بیانگر درصد انتقال مواد فتوسنتزی از اندام های رویشی گیاه به دانه ها می باشد (نوری و همکاران، ۱۳۹۶). کمبود آب نیز از جمله عوامل محدودکننده رشد و نمو گیاه بوده که علاوه بر کاهش ماده خشک تولیدی، موجب اختلال در تسهیم کربوهیدرات ها به دانه و در نتیجه کاهش شاخص برداشت می شود (Rezaie Soukht Abandani and Ramezani,)

اما تیمار نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم باعث افزایش شاخص برداشت در گیاهان تنش تحت تنش و غیر تنش یافته گردید. میانگین شاخص برداشت در زمانی که نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در شرایط تنش خشکی در مرحله ی قبل از گلدهی بر گیاه اعمال شدند، ۳۶/۹۸ و ۳۶/۱۵ درصد به ترتیب برای کاربرد این ماده در مراحل پنجه زنی و خوشه دهی و همچنین ۳۵/۷۷ و ۳۴/۶۸ درصد به ترتیب در مراحل پنجه زنی و خوشه دهی در تیمار قطع آبیاری در زمان پر شدن دانه ها بود که در مقایسه با گیاهان تحت تنش و تیمار نشده با نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم شاخص برداشت بالاتری به حساب می آید. جابریزاده و همکاران (۱۳۸۹) با بررسی اثر نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم 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 دی اکسید تیتانیوم 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 می شود. از طرفی این عنصر با کنترل بیماری های گیاهی و تقویت سیستم ایمنی گیاهان زراعی نیز موجب افزایش عملکرد در شرایط عدم بروز تنش می گردد (Bowen et al., 1992). همچنین با مشاهده نتایج جدول (۱) درمی یابیم که تأثیر سال بر میانگین شاخص برداشت گیاه گندم معنی دار می باشد.

محتوای نسبی آب برگ: نمودار ۸ نشان دهنده این مطلب است که استفاده از نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در شرایط تنش خشکی می تواند محتوای نسبی آب گیاه را بالا ببرد. اگرچه میان این تیمارها اختلاف معنی داری مشاهده نشد، اما با نگاهی به این نمودار می توان دریافت که اولاً در هر دو زمان اعمال تنش خشکی کاربرد این ماده در مرحله پنجه زنی نتیجه بهتری داشته است و ثانیاً کاربرد این نانو ذرات در تیمار قطع آبیاری در زمان پر شدن دانه ها اثرات بیشتری بر محتوای آب نسبی گیاه داشته است. در شرایط غیر تنش نیز این ماده سبب افزایش



نمودار ۷- اثر متقابل تنش کم آبی و کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر شاخص برداشت گندم. تیمارهای کم آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها)، تیمارهای محلول پاشی (S1: محلول پاشی در مرحله پنجه زنی، S2: محلول پاشی در مرحله خوشه دهی، S3: عدم محلول پاشی)



نمودار ۸- اثر متقابل تنش کم آبی و کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر محتوای آب نسبی برگ گندم. تیمارهای کم آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها)، تیمارهای محلول پاشی (S1: محلول پاشی در مرحله پنجه زنی، S2: محلول پاشی در مرحله خوشه دهی، S3: عدم محلول پاشی)

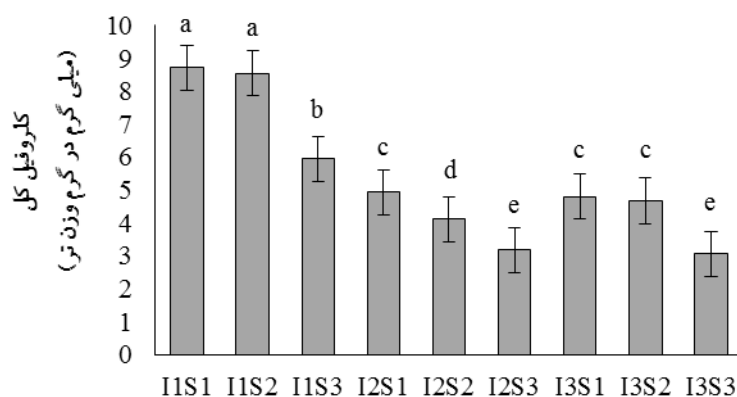
رطوبت نسبی برگ در اثر تنش خشکی مربوط به انسداد روزنه‌ها می‌باشد و علت انسداد روزنه‌ها را نیز تجمع هورمون اسید آبسزیک می‌دانند، به طوری که این هورمون در شرایط تنش خشکی در ریشه ساخته شده و در سلول‌های روزنه‌ای تجمع می‌یابد (Liu and Huang, 2000). بر این اساس برخی مطالعات، محتوای نسبی آب برگ را به عنوان یک شاخص قابل اطمینان تحمل به خشکی در گیاهان معرفی می‌کنند (Sinclair and Ludlow, 1985). به عنوان مثال مطالعات نشان دادند که با افزایش شدت تنش آبی، میزان محتوای آب نسبی برگ نیز کاهش می‌یابد (Rahbarian et al., 2010). نتایج تحقیقات

معنی‌داری در این صفت شد، به نحوی که محلول پاشی در مرحله خوشه دهی بهترین نتیجه را به خود اختصاص داد. از بارزترین علائم فیزیولوژیکی کمبود رطوبت خاک، کاهش محتوای نسبی آب برگ‌ها می‌باشد (Nautiyal et al., 2002)، به طوری که با افزایش شدت تنش خشکی، شرایط جذب آب برای گیاهان مشکل‌تر شده و در نتیجه مقدار آب موجود در سلول‌های گیاهی کاهش می‌یابد. در نتیجه 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

شرایط تنش مورد استفاده قرار گرفته و به این دلیل شاهد کاهش عملکرد گندم مورد بررسی در این آزمایش بوده‌ایم. البته از آنجایی که 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 به دلیل سازوکارهای متفاوتی باشد که گیاهان مختلف را از یکدیگر متمایز می‌نماید. این سازوکارها می‌تواند شامل بسته‌تر شدن روزنه‌ها، افزایش سنتز هورمون اسید آسزیک، 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

(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 در نتیجه محتوای آب نسبی برگ و پتانسیل آب برگ کاهش می‌یابد (Bajji *et al.*, 2001). با توجه به مطالب ذکر شده و از آنجایی که 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. در نتیجه مواد موجود برای حفظ اندام‌های گیاهی در



نمودار ۹- اثر متقابل تنش کم‌آبی و کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر محتوای کلروفیل کل گندم. تیمارهای کم‌آبیاری (II: 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)

بر محتوای کلروفیل گیاه دارد. در حال محلول‌پاشی عنصر تیتانیوم به صورت 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 بیوستتر کلروفیل) در شرایط تنش خشکی می‌باشد که باعث شده تا پیش سازگلوتامات، بیشتر به مصرف پرولین برسد و در نتیجه بیوستتر 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 کلروفیللاز، پراکسیداز، ترکیبات فنلی و در نهایت 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 کلروفیللاز است که تحت شرایط تنش خشکی بیان این آنزیم القاء می‌شود (Ranjan *et al.*, 2001). در نتایج این تحقیق نیز همانند یافته‌های اکثر

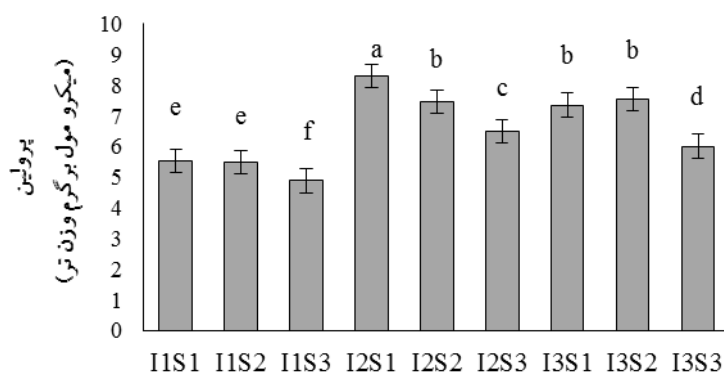
تا محتوای کلروفیل کل را به شکل معنی‌داری افزایش دهد. اگرچه میان تیمارهای I₃S₁، I₂S₁ و I₃S₂ اختلاف معنی‌داری دیده نشد، اما می‌توان به این نکته پی برد که استفاده از این ماده در شرایط تنش کم‌آبی در مرحله پنجه‌زنی اثرات بهتری شرایط غیر تنش و به‌خصوص در مرحله پنجه‌زنی نیز این اثر مثبت به شکل کاملاً معنی‌داری قابل‌رؤیت می‌باشد.

کلروفیل‌ها مولکول‌هایی ضروری هستند که مسئولیت دریافت انرژی خورشیدی در سیستم‌های فتوسنتزی 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 فتوسنتز 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

زمان گلدهی گیاه ذرت توسط نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم عنوان کردند. در واقع 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 آن-جایی‌که 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 به ترتیب 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 به-ترتیب 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، گلايسين، 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

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. در نتیجه رشد رویشی ضعیف گیاه، رشد اندام‌های زایشی نیز به دلیل 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 در نتیجه 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 در نهایت باعث افزایش کارایی فتوسنتز در گیاه می‌شود (Akbari *et al.*, 2014). به‌علاوه اینکه از آن-جایی‌که 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

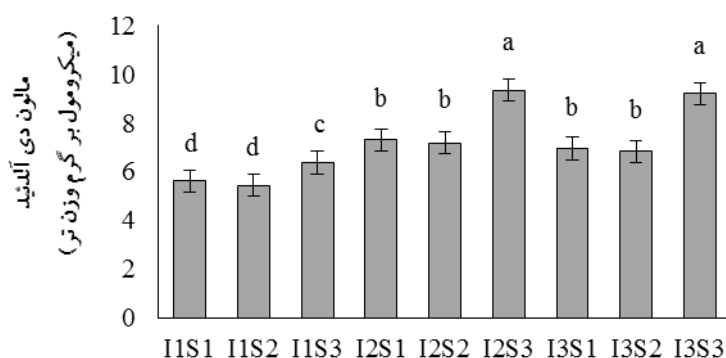


نمودار ۱۰- اثر متقابل تنش کم آبی و کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر محتوای پرولین گندم. تیمارهای کم آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها)، تیمارهای محلول پاشی (S1: محلول پاشی در مرحله پنجه زنی، S2: محلول پاشی در مرحله خوشه دهی، S3: عدم محلول پاشی)

محتوای این بیومارکر را نشان داده است. همچنین کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم 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. به علاوه اینکه کاربرد این ماده در مرحله خوشه دهی در هر دو زمان اعمال تنش کم آبی نتایج بهتری را نسبت به مرحله پنجه زنی نشان داد. یکی از اولین ساختارهای سلول گیاهی که در شرایط تنش‌های محیطی آسیب می‌بیند، لپیدهای غشای سلول هستند (Liang *et al.*, 2003)، زیرا در نتیجه 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. در نتیجه 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 می‌زند 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 در نتیجه رشد گیاه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. با کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در

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 به صورت 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 به دست آوردند. بر اساس نتایج این محققین گیاهانی که در شرایط تنش کم آبیاری 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 دی اکسید تیتانیوم 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 مالون دی‌آلدئید: مطابق نمودار ۱۱ مشاهده می‌شود که استفاده از نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در هنگام تنش خشکی و زمان بدون تنش به صورت معنی‌داری موجب کاهش محتوای مالون دی‌آلدئید در گیاه شده است، به طوری که محلول پاشی در زمان پنجه زنی و محلول پاشی در مرحله شروع خوشه دهی به ترتیب ۲۸/۶۱ درصد و ۳۳/۳۲ درصد نسبت به عدم محلول پاشی سبب کاهش محتوای مالون دی‌آلدئید شدند و عدم مصرف این ماده بر روی گیاهان تنش یافته بیشترین

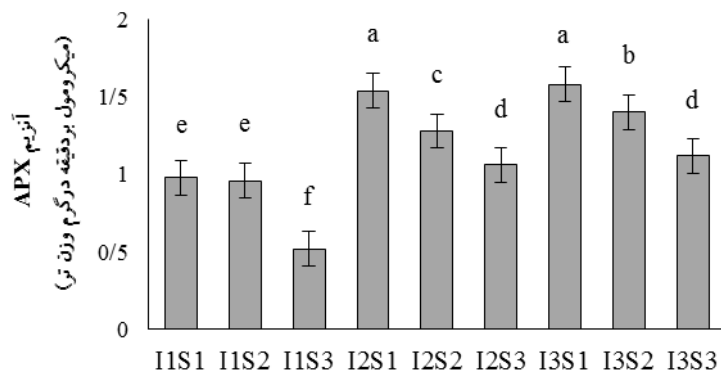


نمودار ۱۱- اثر متقابل تنش کم آبی و کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر محتوای مالون دی آلدئید گندم. تیمارهای کم آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه‌ها)، تیمارهای محلول پاشی (S1: محلول پاشی در مرحله پنجه‌زنی، S2: محلول پاشی در مرحله خوشه‌دهی، S3: عدم محلول پاشی)

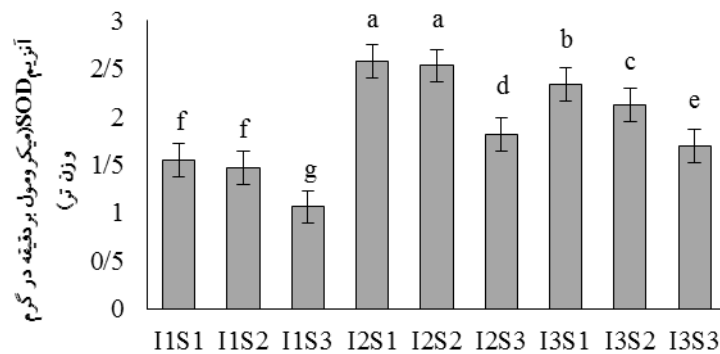
فعالیت این آنزیم در مرحله‌ی پنجه‌زنی بیشتر از خوشه‌دهی بوده است. تنش‌های محیطی با افزایش تولید انواع اکسیژن فعال به بیومولکول‌های حیاتی سلول نظیر لیپیدها، DNA، پروتئین‌ها و برخی نقاط کلیدی آسیب وارد کرده و در نهایت متابولیسم سلول را مختل می‌نماید. گیاهان برای مقابله با تنش‌های اکسیداتیو ایجاد شده، دارای 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, 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 به ترتیب 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

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 محتوای 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 محلول پاشی در زمان پنجه‌زنی و محلول پاشی در مرحله شروع خوشه‌دهی به ترتیب ۵۵/۳۶ درصد و ۳۲/۶۲ درصد نسبت به عدم محلول پاشی سبب افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز شدند. همچنین



نمودار ۱۲- اثر متقابل تنش کم آبی و کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز گندم. تیمارهای کم آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه ها)، تیمارهای محلول پاشی (S1: محلول پاشی در مرحله پنجه زنی، S2: محلول پاشی در مرحله خوشه دهی، S3: عدم محلول پاشی)



نمودار ۱۳- اثر متقابل تنش کم آبی و کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز گندم. تیمارهای کم آبیاری (I1: آبیاری کامل، I2: قطع آبیاری قبل از گلدهی، I3: قطع آبیاری طی مرحله پر شدن دانه ها)، تیمارهای محلول پاشی (S1: محلول پاشی در مرحله پنجه زنی، S2: محلول پاشی در مرحله خوشه دهی، S3: عدم محلول پاشی)

دی اکسید تیتانیوم در شرایط تنش کم آبی می تواند فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز را به صورت معنی داری بالا ببرد. مطابق با نتایج این نمودار مشاهده می شود که تنش خشکی خود عاملی است که می تواند فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز را بیفزاید. به علاوه این نانو ذرات در شرایط تنش و غیر تنش نیز قادر به افزایش فعالیت این آنزیم می باشند. آنزیم آنتی اکسیدانی سوپر اکسید دیسموتاز یکی از مهم ترین آنزیم های آنتی اکسیدانی است که با شناسایی رادیکال سوپر اکسید آن را به مولکول های آب و اکسیژن تجزیه می کند (مظفری و همکاران، ۱۳۹۵). با کاهش فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز مقدار رادیکال های

ماده فعالیت این آنزیم را افزایش داده است. بنابراین می توان این طور نتیجه گرفت افزایش فعالیت آنزیمی در گیاه در شرایط تنش خشکی رخ می دهد، اما استفاده از عنصر تیتانیوم سبب افزایش این فعالیت در بافت های گیاهی شده است. نتایج تحقیقات عباسی و همکاران (۱۳۹۷) نیز با یافته های این پژوهش کاملاً هم راستا می باشند. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۲) درمی یابیم که تأثیر سال بر فعالیت آسکوربات پراکسیداز گیاه گندم معنی دار می باشد.

فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز: نمودار ۱۳ نشان دهنده این مطلب است که محلول پاشی نانو ذرات

دی اکسید تیتانیوم 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 می نماید. بر اساس یافته های این تحقیق، استفاده از نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در شرایط قطع آبیاری در زمان های قبل از گلدهی و پر شدن دانه ها که حساس ترین مراحل گیاه به خشکی می باشد، بسیار مفید بوده است. همچنین با اینکه مصرف این عنصر در مراحل پنجه زنی و خوشه دهی اثرات زیادی بر گندم داشته است، اما کاربرد آن در زمان پنجه زنی سبب اثرات مطلوب تری بر خصوصیات رویشی و عملکردی گیاه می شود. از طرفی استفاده از نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم می تواند در شرایط تنش خشکی سبب محافظت از سلول های گیاه در برابر تنش های اکسیداتیو شده و با افزایش میزان پرولین بافت های گیاهی، از تجمع مالون دی آلدئید جلوگیری نماید. به علاوه، بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش، کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم با افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی سبب کاهش انواع گونه های فعال اکسیژن و به دنبال آن مالون دی آلدئید در گیاه می شود و با افزایش مقاومت گیاه در این شرایط، به رشد بهتر و عملکرد بالاتر آن کمک شایانی می نماید. بنابراین بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق و تأیید یافته های سایر محققین، اثر نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم به صورت محلول پاشی در شرایط کم آبیاری بر گندم به صورت کاملاً موفقیت آمیزی مؤثر بوده و بر استفاده ی بیش از پیش این ماده تأکید می شود.

سوپراکسید در سلول افزایش می یابد که نتیجه آن آسیب به ساختار سلول های گیاهی، بروز اختلالات متابولیسمی و نهایتاً مرگ سلولی می باشد (Breusegem *et al.*, 2001). بنا به گزارش Baisak *et al.*, 1994) فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان مانند آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در طی کمبود آب افزایش معنی داری را نشان می دهد. همچنین تحقیقات نشان داده اند که نانو ذرات تیتانیوم قادر است با تقویت سیستم آنتی اکسیدانی 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 می شود (Berahmand *et al.*, 2012). در آزمایشی که توسط Soltani *et al.*, 2013) بر روی گیاه عدس انجام شد اثر محلول پاشی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر صفات عملکرد دانه، برخی از اجزاء مرتبط با عملکرد دانه، فعالیت های آنزیم های کاتالاز، اکسیداز و آسکوربات پراکسیداز معنی دار بود. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۲) درمی یابیم که تأثیر سال بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز گیاه گندم معنی دار می باشد.

نتیجه گیری

تنش خشکی یکی از مهم ترین و درعین حال آسیب رسان ترین تنش های غیر زیستی در دنیا و به ویژه در ایران است که سالانه سبب خسارات زیادی به انواع گیاهان می شود. نتایج این تحقیق بر روی گندم نیز نشان داد که کاربرد نانو ذرات

منابع

- احمدی، ع. و سی و سه مرده، ع. (۱۳۸۲) روابط بین شاخص های رشد، مقاومت به خشکی و عملکرد در کولتیوارهای گندم اصلاح شده برای اقلیم های 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 دی اکسید تیتانیوم بر عملکرد و اجزای عملکرد گلرنگ تحت شرایط آبیاری معمولی و تنش کم آبیاری. تنش های 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. تنش های محیطی در علوم زراعی ۱۰: ۴۰۱-۳۹۱.

جابرزاده، ا.، معاونی، پ. و توحیدی مقدم مرادی، ا. (۱۳۸۹) بررسی اثر محلول پاشی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم 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.، آقایی، ف. و پاک نژاد، ف. (۱۳۹۷) تأثیر روش‌های مختلف کم آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم رقم پارسی ۱۲: ۵۹۸-۵۸۱.

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

طباطبایی، س. ع. (۱۳۹۳) اثر پیش تیمار بذر جو با سالیسیلیک 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 محلول پاشی 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.

گلپور، 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 بذر ۱۸: 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 ایران ۲: 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. (۱۳۹۶) اثر محلول پاشی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر عملکرد و اجزای عملکرد اکوتیپ‌های مختلف زیره سبز تحت تنش خشکی. به زراعی کشاورزی ۱۹: ۴۷۳-۴۶۱.

نوری، ح.، معاونی، پ. و سلطانی، م. (۱۳۹۶) اثر محلول پاشی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم 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 هشتگرد. 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., Bihanta, M. R. and Hasanloo, T. (2014) Pigments apparatus and anthocyanins reactions of borage to irrigation, methylalcohol and titanium dioxide. *International Journal of Biosciences*, 4: 192-208.

- 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 vulgare* 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. Pessaraki, 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 research* 149: 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.

- 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 gibberellic 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 of 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 stress. *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 Sricastava, 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 Biochemistry* 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.

- 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.
- Schutz, 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 Philosophy 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.

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

Amir Ata Salehi¹, Farhad FarahVash^{1*}, Gholam Abbas Akbari², Elias Soltani², Bahram Mirashkari¹

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

²Department 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