

تأثیر نانو اکسید آهن بر عملکرد، برخی صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک گندم در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

حامد نریمانی^۱، رئوف سیدشریفی^{۲*} و ندا عبادی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۲۳)

چکیده

به منظور بررسی تأثیر آبیاری تکمیلی و نانو اکسید آهن بر عملکرد، برخی صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک گندم در شرایط دیم، آزمایشی در سال ۱۳۹۵ به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اردبیل اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل سطوح آبیاری (آبیاری تکمیلی در مراحل آبستنی و خوشه‌دهی و عدم آبیاری یا کشت دیم) و کاربرد نانو اکسید آهن در چهار سطح (عدم کاربرد نانو اکسید آهن به عنوان شاهد و محلول پاشی ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ گرم در لیتر نانو اکسید آهن) بود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد کاربرد ۰/۹ گرم بر لیتر نانو اکسید آهن در شرایط دیم محتوای پروتئین، قند محلول و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت (پراکسیداز، کاتالاز و پلی‌فنل اکسیداز) را به ترتیب ۱۲۹/۸۹، ۱۶۸/۷۶، ۲۷/۶۴، ۹۴/۲ و ۳۱/۷۱ درصد نسبت به عدم کاربرد نانو اکسید آهن در شرایط آبیاری در مرحله آبستنی افزایش داد. همچنین یک افزایش حدود ۷۵/۸۹ و ۳۸/۴۳ درصدی به ترتیب در محتوای پروتئین برگ و عملکرد دانه در کاربرد ۰/۹ گرم در لیتر نانو اکسید آهن و آبیاری تکمیلی در مرحله آبستنی نسبت به عدم محلول پاشی در شرایط دیم وجود داشت. به نظر می‌رسد کاربرد نانو اکسید آهن و آبیاری تکمیلی می‌تواند به واسطه بهبود صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک، عملکرد دانه گندم تحت شرایط دیم را افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: محدودیت آبی، کودهای زیستی، کارایی فوتوشیمیایی فوتوسیستم دو، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت

۱ و ۲. به ترتیب دانشجویان کارشناسی ارشد و استاد، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

* مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: raouf_ssharifi@yahoo.com

مقدمه

خشکی از مهم‌ترین عوامل محیطی محدود کننده رشد گیاهان در نواحی خشک و نیمه‌خشک است و در آینده نزدیک گسترش فعالیت‌های کشاورزی به مناطق با حاصلخیزی کمتر برای تأمین نیازهای فزاینده غذایی، موجب خواهد شد کمبود آب اهمیت بیشتری پیدا کند (۱۹). پاسخ گیاه به تنش خشکی به چندین عامل مهم مانند مرحله رشدی گیاه زراعی، شدت و طول مدت تنش بستگی دارد (۹). علاوه بر صفات مورفولوژیکی که در سازگاری گیاه به شرایط تنش خشکی اهمیت دارد، صفات فیزیولوژیکی نیز اهمیت حیاتی در بقا و سازگاری گیاهان به تنش‌های محیطی دارد. از این‌رو، توجه به تغییرات فیزیولوژیکی ایجاد شده در شرایط محدودیت آبی از جنبه‌های مهم مقاومت به خشکی در گیاهان محسوب می‌شود. از آنجایی که گیاهان نمی‌توانند از تنش‌های محیطی مختلف فرار کنند، به مکانیسم‌هایی نیاز دارند که تنش‌ها را شناسایی کرده و به آنها پاسخ دهند (۴۳). از جمله این سازوکارها، تنظیم اسمزی است. تنظیم اسمزی، یک نوع سازگاری به تنش آبی است که از طریق تجمع مواد محلول درون سلول‌ها، می‌تواند منجر به حفظ تورژسانس سلول‌ها و فرایندهای وابسته به آن در پتانسیل‌های پایین آب شود (۴۹). این تنظیم از طریق تولید بیشتر انواع مختلف مواد آلی مانند پرولین، پروتئین، بتائین و قندهای محلول در ریشه و اندام‌های هوایی انجام شده و به جلوگیری از اتلاف آب از سلول کمک می‌کند (۳۲). اشرف و همکاران (۴) اظهار داشتند تنش خشکی موجب تجزیه و کاهش غلظت پروتئین در برگ‌های بالغ و افزایش تجمع اسیدهای آمینه آزاد نظیر پرولین در گیاهان می‌شود. در شرایط تنش خشکی، کاهش تثبیت گاز دی‌اکسید کربن موجب احیای شدید زنجیره انتقال الکترون فتوسنتزی و نشت الکترون به مولکول اکسیژن و تشکیل انواع گونه‌های اکسیژن فعال می‌شود (۱۰). گیاهان با استفاده از برخی استراتژی‌هایی مانند تشدید فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، همچون سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز و پلی‌فنل اکسیداز (۵۰) با تنش خشکی مقابله می‌کنند. کارایی

فتوشیمیایی فوتوسیستم II نیز، می‌تواند ارزیابی مناسبی از عملکرد کوانتومی و جریان الکترون در فتوسیستم دو را نشان دهد (۳۲)، ولی محدودیت آبی موجب می‌شود تا مقدار آن کاهش و به کمتر از یک برسد (۴۵).

یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش عملکرد در دیمزارها، نامناسب بودن توزیع بارندگی در طی فصل رشد است. به‌طوری که زمان حداکثر نیاز آبی گیاه، منطبق با حداکثر ریزش نزولات آسمانی نیست. از این‌رو آبیاری تکمیلی به‌عنوان راه حلی برای تأمین رطوبت خاک و بهبود عملکرد به‌ویژه در سال‌ها و یا در شرایطی است که بارندگی از توزیع نامتعادل برخوردار است و به نحوی طراحی شده است تا بتوان در زمانی که آب فراهم است، تعرق طبیعی گیاه را افزایش داد (۳۸). نتایج برخی بررسی‌ها نشان می‌دهد با انجام یک یا دوبار آبیاری در مراحل حساس به کمبود رطوبت، عملکرد دانه گندم دو تا پنج برابر افزایش می‌یابد (۳۶). در بررسی یقینی (۵۱) انجام آبیاری تکمیلی در مرحله آبستنی موجب بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، محتوای پرولین و قندهای محلول و افزایش درصد پروتئین، شاخص کلروفیل، عملکرد کوانتومی برگ و عملکرد دانه گندم شد.

آهن نقش اساسی در متابولیسم اسیدهای نوکلئیک، پروتئین، سنتز کلروفیل، فتوسنتز و تثبیت نیتروژن و فعالیت برخی آنزیم‌ها نظیر کاتالاز و پراکسیداز دارد (۱۱). ضمن آنکه تنظیم سرعت تشکیل سیگما-آمینولولینیک اسید (پیش‌ماده سنتز کلروفیل) از وظایف آهن است. کمبود عناصر ریز مغذی نظیر آهن، کاهش مقدار و توزیع نامناسب بارندگی در بیشتر مزارع تحت کشت گندم دیم، از علل اصلی کاهش رشد و عملکرد غلات دیم محسوب می‌شود. در این راستا به‌دلیل اهمیت آبیاری تکمیلی و ریز مغذی آهن در تعدیل و یا کاهش بخشی از اثرات ناشی از کمبود آب و بررسی‌های محدود انجام شده در خصوص برهم‌کنش توأم این دو عامل موجب شد تا تأثیر این عوامل بر عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گندم مورد ارزیابی قرار گیرد.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

شن	سیلت	رس	pH	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	هدایت الکتریکی	آهک	کربن آلی	نیترژن
(درصد)	(درصد)	(درصد)		(میلی گرم بر کیلوگرم)	(میلی گرم بر کیلوگرم)	(دسی‌زیمنس بر متر)	(درصد)	(درصد)	(درصد)
۳۱	۳۰	۳۹	۷/۷	۱۲/۲	۴۹۵	۱/۵	۵	۰/۸۵	۰/۰۸

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر نانو اکسید آهن و آبیاری تکمیلی بر عملکرد، برخی صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک گندم، آزمایشی در سال ۱۳۹۵ به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اردبیل اجرا شد. محل اجرای آزمایش دارای اقلیم نیمه‌خشک و سرد است. ارتفاع از سطح دریا ۱۳۵۰ متر با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی است. خاک این اراضی جزء خاک‌های لوم رسی است. pH خاک حدود ۷/۷ و عمق آن حدود ۷۰ سانتی‌متر است. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک محل اجرای آزمایش در جدول ۱ آورده شده است

فاکتور اول سطوح آبیاری (آبیاری تکمیلی در مرحله آبستنی، آبیاری تکمیلی در مرحله خوشه‌دهی و عدم آبیاری یا کشت دیم)، فاکتور دوم شامل کاربرد نانو اکسید آهن (عدم کاربرد نانو اکسید آهن به عنوان شاهد و محلول‌پاشی ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ گرم در لیتر نانو اکسید آهن) بود. هر واحد آزمایشی شامل پنج خط کاشت به طول دو متر و با فاصله بین ردیفی ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۴۰۰ بذر در متر مربع بود. در این بررسی از گندم رقم رصد استفاده شد که از ایستگاه تحقیقات جهاد کشاورزی اردبیل تهیه شده بود. محلول‌پاشی با نانو اکسید آهن در دو مرحله از دوره رشدی (مرحله ۴-۶ برگه و مرحله قبل از چکمه‌ای شدن) انجام شد. برای حل شدن بهتر اکسید آهن در آب، ابتدا نانو اکسید در آب دی‌یونیزه به صورت معلق در آمده و با استفاده از لرزش و ارتعاشات دستگاه اولتراسونیک (۱۰۰ وات و ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه) این مواد پخش شده و محلول شد (۴۰).

برای اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ابتدا ۰/۲ گرم نمونه تر برگ در هاون چینی در مجاورت نیترژن مایع پودر شد و با یک میلی‌لیتر بافر تریس-کلریدریک ۰/۰۵ مولار با $pH = 7.5$ هموژن شد. همگنای حاصل را به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه و دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ کرده و محلول شناور رویی برای اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنولاز مورد استفاده قرار گرفت (۴۷)؛ برای استخراج و اندازه‌گیری پروتئین کل از برگ از روش برادفورد (۱۲) استفاده شد. برای تهیه معرف پروتئین برادفورد ۱۰۰ میلی‌گرم کوماسی برلیانت بلوجی را در ۵۰ میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد به مدت حداقل یک ساعت حل کرده، سپس ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید فسفریک ۸۵ درصد را قطره قطره اضافه و حجم محلول با آب مقطر به ۱۰۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس پنج میلی‌لیتر معرف برادفورد را به همراه ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره پروتئینی مخلوط شد و جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۹۵ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد (۱۲).

برای اندازه‌گیری میزان قندهای محلول برگ به روش دابویس و همکاران (۱۶)، مقدار ۰/۲ گرم از نمونه‌های برگ پرچم را با دو میلی‌لیتر بافر سدیم فسفات (pH = 7) ساییده و با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شدند. از محلول رویی ۱۰ میکرولیتر برداشته و به آن ۹۹۰ میکرولیتر آب مقطر اضافه شد. به ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول حاصل، ۰/۵ میلی‌لیتر فنل ۵ درصد (محلول آبی) و ۲/۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک (۹۸ درصد) افزوده شد. پس از تثبیت رنگ به مدت ۱۵-۱۰ دقیقه، در دمای ۳۰-۲۷ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و جذب

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس تاثیر نانو اکسید آهن و آبیاری تکمیلی بر عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک گندم

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		پراکسیداز	پلی فنل اکسیداز	کاتالاز	پروتئین	پرولین	قند محلول
تکرار	۲	۲۱۳۶/۵۳**	۳۳۰۴/۰۶**	۸۶۵/۹۸**	۰/۱۴ ^{ns}	۰/۲۶**	۲/۶۶ ^{ns}
آبیاری تکمیلی	۲	۴۳۸/۱۵**	۴۵۲/۵۵**	۱۴۶۲/۰۷**	۴۹/۹۷**	۶۷/۱۷**	۵۷۸۳/۹۴**
نانو اکسید آهن	۳	۱۰۳/۰۱**	۱۳۸/۶۸**	۱۷۸/۹۵**	۱/۷۵**	۱۳/۰۴**	۱۰۸۷/۵۴**
آهن × آبیاری	۶	۴/۶۷*	۱۰/۷۹**	۳۳/۷۹**	۳/۱۵**	۰/۴۹**	۴۸/۷۵**
خطا	۲۲	۱/۴۷	۱/۶۷	۴/۴۴	۰/۰۵	۰/۰۱	۵/۷۸
ضریب تغییرات	-	۶/۸۱	۸/۵۶	۴/۹۶	۷/۲۲	۹/۰۳	۸/۲۳
							۱۲/۳۱

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

شش برگ پرچم توسعه یافته (در فاصله زمانی ساعت ۱۰-۸ صبح) انتخاب و بعد از ۱۵ دقیقه تاریکی توسط کلیپس‌های مخصوص، شاخص Fv/Fm اندازه‌گیری شدند (۲۹). شاخص کلروفیل با استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر (SPAD-۵۰۲ مینولتای ژاپن)، بعد از ظهور برگ پرچم به فواصل زمانی چهار روز یک‌بار تا مرحله رسیدگی اندازه‌گیری شد. عملکرد دانه از دو خط اصلی هر کرت با رعایت اثر حاشیه‌ای از سطحی معادل ۰/۲ مترمربع برداشت شد. تجزیه داده‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزارهای SAS و Excel و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD انجام شدند.

نتایج و بحث

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که محلول‌پاشی نانو اکسید آهن و آبیاری تکمیلی بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی فنول اکسیداز) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). انجام آبیاری تکمیلی به‌طور معنی‌داری فعالیت این آنزیم‌ها را نسبت به شرایط دیم کاهش داد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز، کاتالاز و پلی فنل اکسیداز (به ترتیب ۷۸/۵، ۶۷ و ۹۶/۵ تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) در محلول‌پاشی ۰/۹ گرم بر لیتر نانو اکسید آهن در شرایط دیم و

نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۹۰ نانومتر قرائت شد. برای محتوای پرولین برگ پرچم از روش بیتز و همکاران (۸) استفاده شد، به این صورت که مقدار یک گرم بافت برگ در ۱۰ میلی‌لیتر سولفوسالسیلیک اسید سه درصد سائیده و با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس به دو میلی‌لیتر از عصاره حاصل، دو میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین که ۱/۲۵ گرم پودر اسید نین‌هیدرین را در ۳۰ میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال حل کرده و سپس دو میلی‌لیتر اسید فسفریک شش مولار با آن اضافه کرده و سپس دو میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال خالص اضافه شد. لوله‌ها به مدت یک ساعت در حمام آب گرم قرار داده شد و سپس چهار میلی‌لیتر تولوئن به هر یک از لوله‌ها اضافه و به مدت ۱۵ تا ۲۰ ثانیه توسط دستگاه ورتکس خوب به هم زده شد. فاز رنگی بالایی با دقت جدا و جذب آن با دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل یو وی ۲۱۰۰ ساخت یونیکو آمریکا) با طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد. غلظت پرولین بر حسب میکروگرم بر گرم بافت تازه برگ با استفاده از منحنی استاندارد تعیین شد.

برای اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل برگ پرچم در مزرعه از ۱۹۸ روز پس از کاشت، هر چهار روز یک بار توسط دستگاه فلورسانس کلروفیل (OS-۳۰p) از هر تیمار به‌طور تصادفی

معنی دار شد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیشترین و کمترین محتوای پرولین (به ترتیب ۱۰/۹۲ و ۴/۷۵ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ) به ترتیب در محلول پاشی ۰/۹ گرم در لیتر نانو اکسید آهن در شرایط دیم و عدم محلول پاشی در شرایط آبیاری تکمیلی در مرحله آبستنی به دست آمد (جدول ۳). محتوای پرولین در درون و بیرون سلول نقش مهمی در مقاومت اسمزی بافت‌های مختلف نسبت به تنش‌ها ایفا می‌کند. در شرایط کمبود آب اغلب بیوستنر پرولین از گلو تامیک اسید در سیتوزول و کلروپلاست سلول‌های گیاهی اتفاق می‌افتد، بنابراین پرولین در سیتوزول تجمع یافته تا توزیع آب به درون سلول انجام شود. در شرایط نرمال پرولین به اندامک‌ها به ویژه واکوئل و پلازمید انتقال می‌یابد ولی در شرایطی که گیاه تحت شرایط تنش خشکی قرار گیرد پرولین از واکوئل به سیتوزول انتقال می‌یابد (۳۱). از این رو گیاهانی که تحت تنش خشکی قرار می‌گیرند مقدار زیادی از منابع کربن و نیتروژن خود را صرف سنتز تنظیم‌کننده‌های اسمزی از قبیل پرولین می‌کنند تا بتوانند فشار تورژانس سلول‌های خود را حفظ کنند (۳). یقینی (۵۱) گزارش کرد که آبیاری تکمیلی در مرحله آبستنی موجب کاهش محتوای پرولین و قندهای محلول برگ گندم نسبت به شرایط دیم شد.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیشترین و کمترین مقدار قندهای محلول برگ (۱۱۹/۰۹ و ۴۴/۳۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به ترتیب در محلول پاشی ۰/۹ گرم در لیتر نانو اکسید آهن در شرایط دیم، و عدم محلول پاشی و آبیاری تکمیلی در مرحله آبستنی به دست آمد (جدول ۳). قندهای محلول دسته دیگری از محافظت‌کننده‌های اسمزی هستند که تجمع آنها با پاسخ به تنش‌های محیطی به تنظیم اسمزی و یا حفاظت غشاهای سلولی مرتبط است و شدت تجمع آن به سرعت و میزان توسعه تنش، نوع و سن اندام و تنوع ژنتیکی درون و بین گونه‌ای بستگی دارد (۷). نقش فیزیولوژیک این قندها ممانعت از چسبندگی غشاهای مجاور در طول تنش، نگهداری لپیدها، پایداری پروتئین‌ها از طریق ایجاد پیوندهای هیدروژنی با دنباله‌های

کمترین این فعالیت‌ها (به ترتیب ۵۸/۲، ۳۲ و ۷۴ تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) در عدم محلول پاشی و آبیاری تکمیلی در مرحله خوشه‌دهی به دست آمد. گیاهان برای کاهش اثرات مخرب گونه‌های فعال اکسیژن سازوکارهای متفاوتی دارند. از جمله این سازوکارها می‌توان به افزایش سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی اشاره کرد (۱). فعالیت آنزیم پراکسیداز که هم در سیتوسل و هم در کلروپلاست وجود دارد، در شرایط خشکی افزایش می‌یابد (۲۸) و می‌تواند به طور مؤثری H_2O_2 را حذف کند. افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در شرایط محدودیت آبی (زراعت دیم) موجب تحمل بهتر گیاه به تنش‌های محیطی و کاهش اثرات مخرب تنش اکسیداتیو می‌شود (۲). حضور نانو اکسید آهن در شرایط آبیاری تکمیلی در مراحل آبستنی و خوشه‌دهی همانند دیم منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و بهبود مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی شد. یقینی (۵۱) گزارش کرد که بیشترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز) تحت شرایط دیم بود ولی آبیاری تکمیلی در مرحله آبستنی موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برگ گندم شد. غفاری و رزمجو (۲۱) اظهار داشتند که کاربرد نانو اکسید آهن به دلیل القا شدن بیان ژن کاتالاز و پراکسیداز موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود. به طوری که کاربرد نانو اکسید آهن در شرایط دیم در مقایسه با عدم کاربرد آنها تحت همین شرایط، منجر به افزایش به ترتیب ۱۵/۴۵، ۱۶/۲۶ و ۳۹/۵ درصدی فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز، پلی‌فنول اکسیداز و کاتالاز شد (جدول ۳). بابایی (۵) اظهار داشت که محلول پاشی نانو اکسید آهن فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز) برگ گندم را نسبت به شرایط عدم محلول پاشی افزایش داد.

پرولین و قندهای محلول برگ

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر نانو اکسید آهن و آبیاری تکمیلی بر محتوای پرولین در سطح احتمال یک درصد

جدول ۳. نتایج مقایسه میانگین اثر نانو اکسید آهن و آبیاری تکمیلی بر عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک گندم

عملکرد (گرم در متر مربع)	قند محلول (میلی گرم بر گرم وزن تر برگ)	پرولین (میکروگرم بر گرم وزن تر برگ)	پروتئین (درصد)	پراکسیداز			ترکیب تیماری
				کاتالاز	پلی فنل اکسیداز	(تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه)	
۳۲۶/۵۰ ^d	۸۵/۶۷ ^d	۷/۲۸ ^e	۷/۳۰ ^j	۴۸ ^c	۸۳ ^d	۶۸ ^d	I ₁ ×Fe ₁
۴۱۲/۵۰ ^b	۴۴/۳۱ ^j	۴/۷۵ ^j	۱۱/۱۵ ^d	۳۴/۵۰ ^{fg}	۷۸ ^f	۶۱/۵۰ ^g	I ₁ ×Fe ₂
۳۵۳ ^c	۶۰/۶۱ ^h	۵/۰۳ ⁱ	۱۲/۱۹ ^b	۳۲ ^g	۷۴ ^g	۵۸/۲۰ ^h	I ₁ ×Fe ₃
۳۴۲/۵۰ ^c	۸۹/۸۸ ^c	۹/۲۰ ^c	۷/۷۷ ⁱ	۵۲ ^b	۸۷ ^c	۷۱ ^c	I ₁ ×Fe ₄
۴۲۱/۵۷ ^b	۵۰/۰۱ ⁱ	۴/۲۸ ^k	۱۱/۷۱ ^c	۳۷ ^{def}	۸۱/۵ ^e	۶۵ ^{ef}	I ₁ ×Fe ₅
۳۲۶/۵۰ ^c	۶۶/۴۶ ^g	۵/۶۴ ^h	۹/۰۸ ^g	۳۳/۵۰ ^{fg}	۷۶/۲۰ ^f	۶۱ ^g	I ₁ ×Fe ₆
۳۴۸/۷۰ ^c	۹۸/۴۹ ^b	۹/۸۸ ^b	۸/۰۵ ⁱ	۵۳/۵۰ ^b	۹۲ ^b	۷۵/۶۰ ^b	I ₁ ×Fe ₇
۴۴۰/۲۰ ^a	۵۷/۲۶ ^h	۴/۶۳ ^j	۱۲/۱۹ ^b	۳۸/۲۰ ^{de}	۸۳/۵۰ ^{de}	۶۷ ^{ed}	I ₁ ×Fe ₈
۳۴۸/۷۰ ^c	۷۳/۳۸ ^f	۶/۴۳ ^f	۹/۴۶ ^f	۳۵ ^{efg}	۷۷/۹۰ ^f	۶۲ ^g	I ₁ ×Fe ₉
۳۷۵ ^c	۱۱۹/۰۹ ^a	۱۰/۹۲ ^a	۸/۵۲ ^h	۶۷ ^a	۹۶/۵۰ ^a	۷۸/۵۰ ^a	I ₁ ×Fe ₁₀
۴۵۲ ^a	۶۸/۸۶ ^g	۶/۰۵ ^g	۱۲/۸۴ ^a	۴۰/۳۰ ^d	۸۴ ^d	۶۸/۵۰ ^d	I ₁ ×Fe ₁₁
۳۷۵ ^c	۷۳/۶۱ ^e	۷/۷۳ ^d	۱۰/۳۱ ^e	۳۸/۷۰ ^d	۸۲ ^{de}	۶۴/۳۰ ^f	I ₁ ×Fe ₁₂
۱۴/۷۰	۴/۰۷	۶/۲۳	۵/۳۷	۳/۵۶	۲/۱۹	۲/۰۵	LSD

I₁، I₂ و I₃ به ترتیب عدم آبیاری (دیم)، آبیاری در مرحله آبستنی و آبیاری در مرحله خوشه دهی است. Fe₁، Fe₂، Fe₃ و Fe₄ به ترتیب عدم مصرف نانو اکسید آهن و مصرف ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ گرم در لیتر نانو اکسید آهن است. میانگین های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی داری بر اساس آزمون LSD هم ندارند.

مجاور در طول دوره تنش، نگهداری لیپیدها، پایداری پروتئین ها از طریق ایجاد پیوندهای هیدروژنی با دنباله های خطی پروتئین ها و تنظیم بیان ژن است (۲۶). علت تجمع قندهای محلول در طی تنش این است که قندهای نامحلول نشاسته تجزیه شده و قندهای محلول را ایجاد می کند تا پتانسیل اسمزی را حفظ کرده و خطر دهیدراتاسیون را کاهش دهد (۳۹).

در بررسی بابایی (۵) محلول پاشی نانو اکسید آهن موجب افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول برگ گندم شد. به بیانی دیگر در شرایط تنش، یکی از تهدیدهای واقعی برای کلروپلاست، تولید رادیکال های هیدروکسیلی است که برای مهار آن در تیلاکوئید، آهن کاتالیز می شود و موجب کاهش فعالیت H₂O₂ می شود (۱۴). بیان شده است که در پاسخ به کمبود آهن، آبسزیک اسید در ریشه ساخته می شود (۴۲).

خطی پروتئین ها و تنظیم بیان ژن است (۲۵). افزایش قند محلول تحت تنش، نشان دهنده این است که میزان تنظیم اسمزی در اندام های در حال رشد به تأمین متابولیت ها بستگی کامل دارد، زیرا این عمل با صرف انرژی همراه است و ترکیبات کربن دار برای تولید متابولیت ها به تداوم فتوسنتز وابسته اند (۱۳). در مجموع افزایش قندهای محلول طی تنش خشکی را می توان به تخریب کربوهیدرات های نامحلول، سنتز این ترکیبات از مسیرهای غیر فتوسنتزی و متوقف شدن رشد نسبت داد (۲۲). آهن علاوه بر نقش اساسی در فرایند فتوسنتز و تولید کربوهیدرات ها، با سنتز اسمولیت هایی مانند قندهای محلول در شرایط تنش رطوبتی، در تنظیم اسمزی و حفظ فشار تورژسانس نقش ویژه ای دارد (۶). به بیانی دیگر نقش فیزیولوژیک قندهای محلول به عنوان یکی از محافظت کننده های اسمزی، ممانعت از چسبندگی غشاهای

شرایط دیم و آبیاری تکمیلی از الگوی نسبتاً یکسانی برای تمامی تیمارها تبعیت کرد (شکل ۱). به نظر می‌رسد استفاده از نانو اکسید آهن در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی موجب بهبود فعالیت‌های فتوسنتزی گیاه شده است. در واقع این تیمارها توانسته‌اند حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II را ثابت نگه دارند. ولی تفاوت بین آبیاری در مرحله آبستنی و بدون آبیاری (دیم) بسیار محسوس‌تر بود. کارایی فتوسنتزی (Fv/Fm) در شرایط دیم به شدت روند کاهشی داشت، به طوری که در تمامی تیمارهای مورد آزمایش در ۲۲۲ روز پس از کاشت، حداکثر میزان Fv/Fm برگ پرچم (۰/۶۳) در محلول پاشی ۰/۹ گرم در لیتر نانو اکسید آهن و آبیاری در مرحله آبستنی و حداقل آن (۰/۲۰) در عدم محلول پاشی تحت شرایط دیم به دست آمد (جدول ۵).

ملکوتی و همکاران (۳۳) گزارش کردند که با بسته شدن روزنه‌ها به علت تنش خشکی یا دمای زیاد، دی اکسید کربن قابل دسترس کاهش می‌یابد و به دنبال کاهش تولید و ذخیره فرآورده‌های انتقال الکترون یعنی ATP و NADPH در واکنش‌های نوری فتوسنتز، عملکرد کوانتومی فتوسیستم II کاهش پیدا می‌کند. در واقع آنچه دستگاه فلورومتر نشان می‌دهد، نسبت Fv/Fm و منحنی مربوط به آن است که Fv/Fm نشان‌دهنده بیشینه کارایی کوانتومی فتوسیستم II و معیاری از نحوه عملکرد فتوسنتز گیاهی است، به طوری که، مقدار این پارامتر برای بیشتر گونه‌های گیاهی در شرایط محیطی عادی ۰/۸۳ است. زمانی که گیاه با تنش مواجه می‌شود، این مقدار کاهش پیدا می‌کند (۲۰). به بیانی دیگر هر گونه تنشی که موجب شود انتقال الکترون در خلال واکنش‌های مرحله نوری فتوسنتز مختل شود موجب هدررفت الکترون شده و به تبع از آن کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (φPsII) گیاه کاهش می‌یابد (۳۰). گزارش‌ها در مورد اثر محدودیت آبی بر عملکرد PSII متناقض هستند و مکان دقیق و مکانیسم‌هایی برای تخریب PSII هنوز روشن نشده است (۴۶). به نظر می‌رسد در تیمارهایی که Fv/Fm کمتر است، دستگاه فتوسنتزی در آنها به

حال، با توجه به مطالب بالا، می‌توان نتیجه گرفت که در صورت کمبود آهن، آبسزیک اسید و H_2O_2 در گیاه ساخته می‌شوند و موجب تولید سینگال‌های تجمع پرولین می‌شوند.

پروتئین برگ

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر نانو اکسید آهن و آبیاری تکمیلی بر میزان پروتئین برگ در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیشترین مقدار پروتئین برگ (۱۲/۸۴ درصد) به محلول پاشی ۰/۹ گرم بر لیتر نانو اکسید آهن و آبیاری تکمیلی در مرحله آبستنی و کمترین مقدار آن (۷/۳۰ درصد) مربوط به عدم محلول پاشی در شرایط دیم بود. واکنش پروتئین با رادیکال‌های آزاد و در نتیجه تغییر اسید آمینه، افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین، کاهش سنتز پروتئین و نیز تجمع اسید آمینه آزاد از جمله پرولین، می‌تواند موجب کاهش محتوای پروتئین تحت تنش خشکی شود (۴۱). در بررسی یقینی (۵۱) درصد پروتئین برگ تحت شرایط دیم کاهش یافت که با انجام آبیاری تکمیلی در مرحله آبستنی با بهبود شرایط فتوسنتزی، موجب افزایش درصد پروتئین برگ گندم شد. بابایی (۵) اظهار داشت که محلول پاشی نانو اکسید آهن ضمن افزایش محتوای کلروفیل و بهبود عملکرد کوانتومی موجب افزایش درصد پروتئین برگ گندم شد. گزارش شده است که آهن در سنتز پروتئین و کلروفیل (۱۵)، متابولیسم نیتروژن و افزایش سطح برگ گیاه (۴۸) دخیل است، از این رو کاربرد آهن در گیاهانی که علائم کمبود این عنصر را نشان می‌دهند منجر به افزایش پروتئین‌سازی می‌شود (۳۷).

عملکرد کوانتومی (Fv/Fm)

کاربرد نانو اکسید آهن، سطوح آبیاری و اثر ترکیب تیماری این دو عامل بر عملکرد کوانتومی در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۴). روند تغییرات کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (Fv/Fm) در پاسخ به کاربرد نانو اکسید آهن در

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس تاثیر نانو اکسید آهن و آبیاری تکمیلی بر نسبت Fv/Fm و شاخص کلروفیل (SPAD) برگ پرچم گندم

منابع تغییر		درجه آزادی		میانگین مربعیات	
مراحل نمونه برداری Fv/Fm (روز بعد از کاشت)					
منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعیات	درجه آزادی	میانگین مربعیات	منابع تغییر
تکرار	۲	۰/۰۰۰۱۳ ^{ns}	۰/۰۰۰۱۳ ^{ns}	۲۰۲	۱۹۸
آبیاری تکمیلی	۲	۰/۰۲۸ ^{**}	۰/۰۸۷ ^{**}	۲۰۶	۲۱۰
نانو اکسید آهن	۳	۰/۰۶۹ ^{**}	۰/۰۵۸ ^{**}	۲۰۶	۲۱۴
آهن×آبیاری	۶	۰/۰۰۵۹ ^{**}	۰/۰۰۷۱ ^{**}	۰/۰۰۰۳۳ ^{**}	۰/۰۰۰۱۵ ^{**}
خطا	۲۲	۰/۰۰۰۰۷۱	۰/۰۰۰۰۳۱	۰/۰۰۰۰۲۱	۰/۰۰۰۰۲۸
ضریب تغییرات	-	۱/۹۴	۳/۱۱	۲/۰۹	۰/۶۵

ادامه جدول ۴.

منابع تغییر		درجه آزادی		میانگین مربعیات	
مراحل نمونه برداری شاخص کلروفیل (SPAD) (روز بعد از کاشت)					
منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعیات	درجه آزادی	میانگین مربعیات	منابع تغییر
تکرار	۲	۰/۰۰۸ ^{ns}	۰/۰۵۵ ^{ns}	۱۹۸	۱۹۴
آبیاری تکمیلی	۲	۶۷۰/۹۶ ^{**}	۴۲۰/۸۷ ^{**}	۸۰۳ ^{ns}	۳۱۰ [*]
نانو اکسید آهن	۳	۱۲۷/۵۶ ^{**}	۱۶۴/۰۷ ^{**}	۱۳۷/۶۶ ^{**}	۸۰۳ ^{ns}
آهن×آبیاری	۶	۳۳/۰۹ ^{**}	۲۵/۸۶ ^{**}	۳۲/۸۵ ^{**}	۹/۸۹ ^{**}
خطا	۲۲	۱/۰۰۵	۱/۳۸	۰/۶۱	۰/۲۷
ضریب تغییرات	-	۲/۴۶	۲/۷۰	۱/۶۸	۱/۶۱

ns و * به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

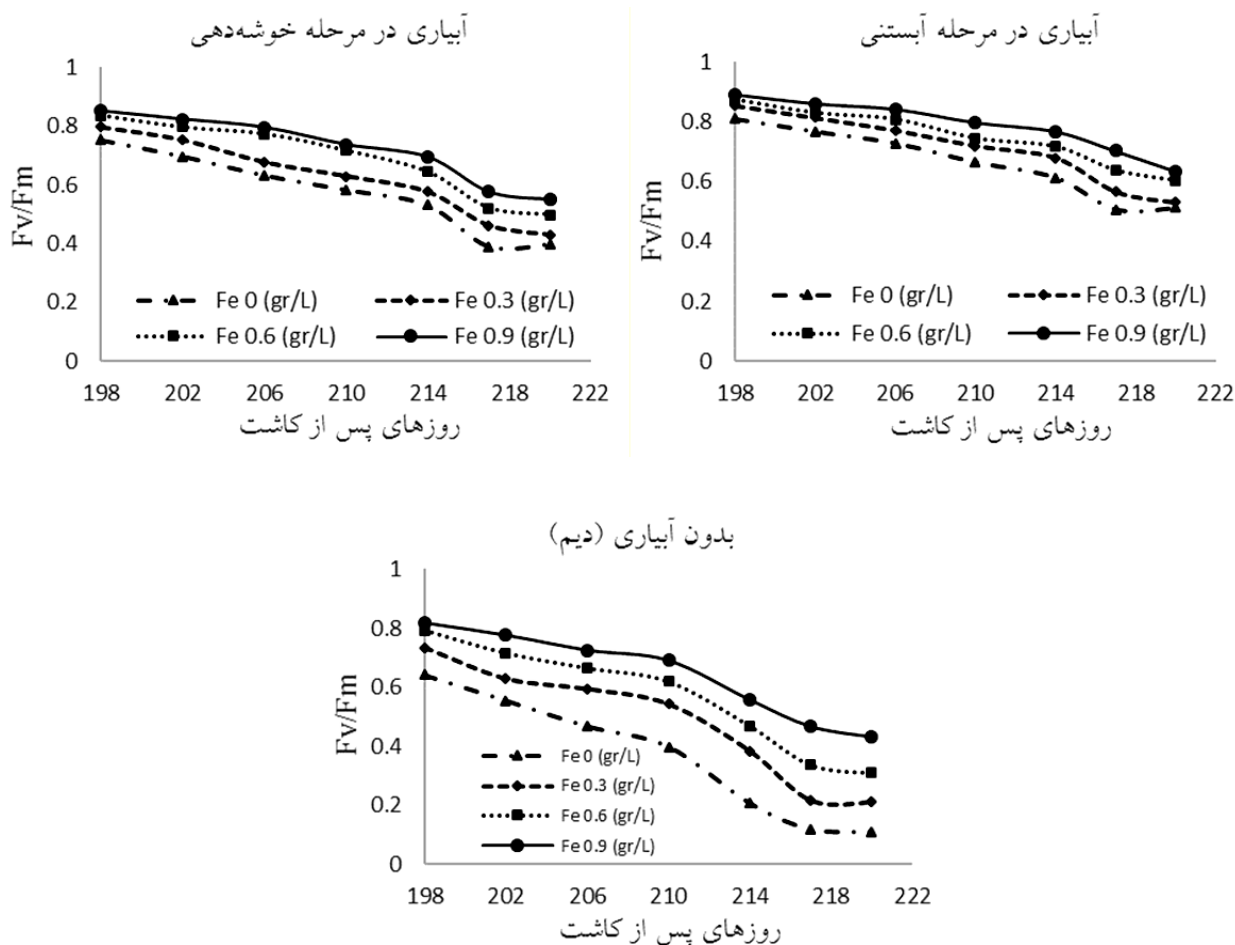
جدول ۵. نتایج مقایسه میانگین اثر نانو اکسید آهن و آبیاری تکمیلی بر نسبت Fv/Fm و شاخص کلروفیل (SPAD) برگ پرچم گندم

		مراحل نمونه برداری براساس نسبت Fv/Fm (روز بعد از کاشت)				ترکیب تیماری	
		۲۱۰	۲۰۶	۲۰۲	۱۹۸		
۲۲۲	۲۱۸	۲۱۴	۲۱۰	۲۰۶	۱۹۸	ترکیب تیماری	
۰/۲۰	۰/۱۱	۰/۲۰	۰/۳۹ ^h	۰/۴۶ ^h	۰/۵۵ ⁱ	I _۱ × Fe _۰	
۰/۵۱ ^۰	۰/۵۰ ^۰	۰/۶۱ ^۰	۰/۶۶ ^۰	۰/۷۴ ^۰	۰/۸۰ ^۰	I _۱ × Fe _۱	
۰/۳۹ ^g	۰/۳۸ ^g	۰/۵۳ ^g	۰/۵۸ ^f	۰/۶۳ ^f	۰/۷۵ ^g	I _۱ × Fe _۲	
۰/۲۱ ⁱ	۰/۲۱ ⁱ	۰/۳۸ ⁱ	۰/۵۴ ^g	۰/۶۲ ⁱ	۰/۷۳ ^h	I _۱ × Fe _۳	
۰/۵۲ ^d	۰/۵۶ ^c	۰/۶۷ ^c	۰/۸۱ ^{bc}	۰/۸۷ ^c	۰/۸۵ ^c	I _۱ × Fe _۴	
۰/۴۲ ^f	۰/۴۶ ^f	۰/۵۷ ^f	۰/۶۳ ^e	۰/۷۴ ^f	۰/۷۹ ^f	I _۱ × Fe _۵	
۰/۳۱ ^h	۰/۳۸ ^h	۰/۴۶ ^h	۰/۶۱ ^e	۰/۶۶ ^e	۰/۷۱ ^g	I _۱ × Fe _۶	
۰/۶۰ ^b	۰/۶۳ ^b	۰/۸۱ ^b	۰/۷۴ ^h	۰/۸۰ ^b	۰/۸۷ ^b	I _۱ × Fe _۷	
۰/۴۹ ^c	۰/۵۲ ^d	۰/۶۴ ^d	۰/۸۱ ^{bc}	۰/۸۷ ^c	۰/۸۳ ^d	I _۱ × Fe _۸	
۰/۴۳ ^f	۰/۴۶ ^f	۰/۵۵ ^{fg}	۰/۶۹ ^{cd}	۰/۷۷ ^e	۰/۸۱ ^e	I _۱ × Fe _۹	
۰/۶۳ ^a	۰/۷۰ ^a	۰/۷۶ ^a	۰/۸۴ ^a	۰/۹۶ ^a	۰/۸۹ ^a	I _۱ × Fe _{۱۰}	
۰/۵۴ ^c	۰/۵۷ ^c	۰/۶۹ ^{bc}	۰/۷۳ ^b	۰/۸۹ ^{bc}	۰/۸۵ ^c	I _۱ × Fe _{۱۱}	

ادامه جدول ۵.

		مراحل نمونه برداری شاخص کلروفیل (SPAD) (روز بعد از کاشت)				ترکیب تیماری	
		۲۱۰	۲۰۶	۲۰۲	۱۹۸		
۲۱۸	۲۱۴	۲۱۰	۲۰۶	۲۰۲	۱۹۸	ترکیب تیماری	
۲۲/۱۳ ^e	۲۶/۱۳ ⁱ	۲۶/۹ ^{gi}	۴۲/۲ ^f	۴۵/۲ ^{gi}	۴۵/۰۶ ^g	I _۱ × Fe _۰	
۴۴/۵۶ ^c	۴۴/۷۶ ^{de}	۴۷/۵۰ ^{cd}	۵۱/۰۶ ^{cd}	۵۰/۳۳ ^c	۵۰ ^c	I _۱ × Fe _۱	
۳۹/۳۶ ^e	۴۲/۰۰ ^{ef}	۴۵/۶ ^{ef}	۴۶/۹۰ ^e	۴۷/۴۰ ^{de}	۴۷/۴۳ ^{ef}	I _۱ × Fe _۲	
۳۴/۹۴ ^f	۳۸/۷۰ ^h	۴۱/۷ ^{gh}	۴۵/۲ ^f	۴۵/۸ ^{gi}	۴۶/۲۶ ^{fg}	I _۱ × Fe _۳	
۴۶/۷۰ ^b	۴۷/۹۶ ^{bc}	۴۸/۶ ^{bc}	۵۲/۳ ^{bc}	۵۱/۲۳ ^c	۵۰/۴۰ ^c	I _۱ × Fe _۴	
۴۱/۳۳ ^d	۴۵/۰۳ ^d	۴۶/۴۳ ^{ef}	۴۷/۸۰ ^e	۴۸ ^{cd}	۴۸/۲۶ ^{de}	I _۱ × Fe _۵	
۳۶/۳۶ ^f	۴۰/۱۳ ^{gh}	۴۳/۶۶ ^g	۴۶/۷۰ ^e	۴۶/۶۳ ^{ef}	۴۶/۷۳ ^{ef}	I _۱ × Fe _۶	
۴۸/۱۰ ^b	۴۸/۸۰ ^b	۴۹/۱۰ ^b	۵۲/۴ ^{bc}	۵۲/۰۳ ^b	۵۰/۳ ^b	I _۱ × Fe _۷	
۴۱/۵۶ ^d	۴۶/۴۰ ^{cd}	۴۶/۶۰ ^{def}	۵۰ ^d	۴۸/۲۳ ^{de}	۴۷/۲۳ ^e	I _۱ × Fe _۸	
۳۸/۱۶ ^e	۴۲/۹ ^{ef}	۴۴/۲۶ ^g	۴۷/۹ ^{de}	۴۷/۶ ^{de}	۴۷/۲۳ ^e	I _۱ × Fe _۹	
۵۱/۹۳ ^a	۵۳/۰۳ ^a	۵۳/۵ ^a	۵۴/۹ ^a	۵۷/۵ ^a	۵۳/۴ ^a	I _۱ × Fe _{۱۰}	
۴۲/۴۶ ^d	۴۷/۱۳ ^{bc}	۴۷/۸۰ ^{cd}	۵۲/۱۳ ^b	۵۰/۹ ^{bc}	۴۹/۱۶ ^{cd}	I _۱ × Fe _{۱۱}	

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD هم ندارند. I_۱ و I_۲ به ترتیب عدم آبیاری (دیم)، آبیاری در مرحله آبتندی و آبیاری در مرحله خوشه‌دهی. Fe_۰، Fe_۱، Fe_۲ و Fe_۳ به ترتیب عدم مصرف نانو اکسید آهن و مصرف ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹ و ۰/۱۸ گرم در لیتر نانو اکسید آهن.



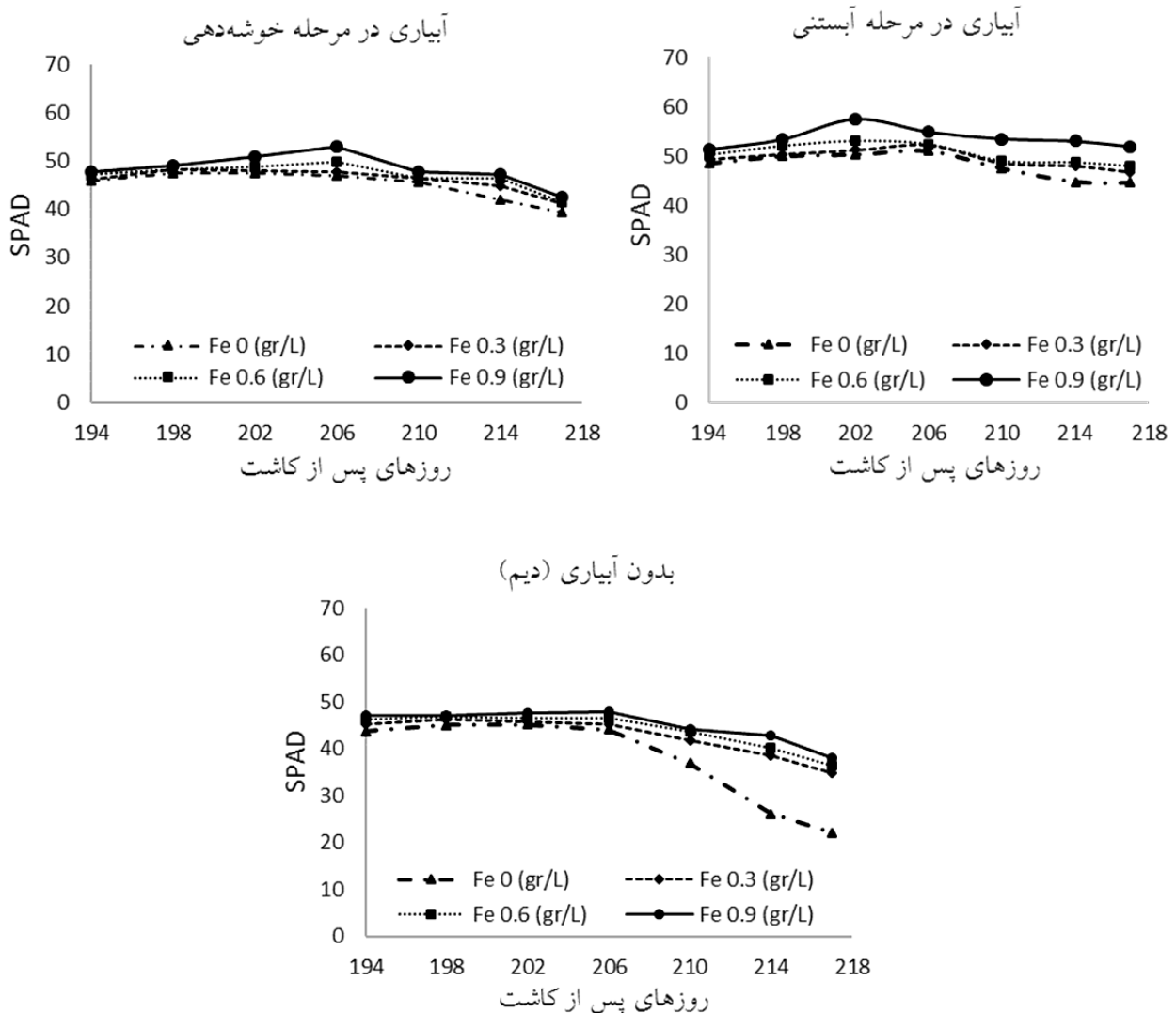
شکل ۱. روند تغییرات کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (Fv/Fm) برگ پرچم در شرایط ثابت آبیاری و سطوح مختلف نانوآکسید آهن

محتوای پرولین و قند محلول (جدول ۳) موجب بهبود شاخص کلروفیل و عملکرد کوانتومی (جدول ۵) شده است.

شاخص کلروفیل

بررسی روند تغییرات محتوای کلروفیل برگ پرچم در شرایط محدودیت آبی نشان می‌دهد که این تغییرات در تمامی تیمارها روند نزولی نسبتاً مشابهی داشت، به طوری که محتوای کلروفیل در مراحل اول نمونه برداری بالا بود ولی با نزدیک شدن به مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی و همچنین پیر شدن برگ‌ها روند نزولی داشت (شکل ۲). البته در اثر محلول پاشی نانوآکسید آهن و آبیاری تکمیلی، روند تغییرات شاخص کلروفیل نوسان کمتری نشان داد. به طوری که در تمامی تیمارهای مورد آزمایش

خشکی حساس تر است، ضمن آنکه محدودیت آبی با اختلال در انتقال الکترون در واکنش مربوط به تجزیه آب به بروز این پدیده کمک کرده و کارایی کوانتومی فتوستنتز خالص، کاهش می‌یابد (۴۴). در بررسی یقینی (۵۱)، آبیاری تکمیلی در مرحله آبستنی موجب افزایش عملکرد کوانتومی برگ گندم شد. آهن برای کارکرد مناسب متابولیسم‌ها و فرایندهای آنزیمی مانند انتقال الکترون، بیوستنتز کلروفیل و فتوستنتز ضروری است (۲۷). بابائی (۵) بخشی از افزایش عملکرد کوانتومی در شرایط تنش شوری در گندم به واسطه کاربرد نانوآکسید آهن را، به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوای پرولین و قند محلول نسبت داد. در این بررسی نیز به نظر می‌رسد کاربرد نانوآکسید آهن با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (جدول ۳) و



شکل ۲. روند تغییرات شاخص کلروفیل (SPAD) برگ پرچم در شرایط ثابت آبیاری و سطوح مختلف نانو اکسید آهن

علاوه بر این، تنش خشکی به دلیل اختلال در جذب برخی عناصر ضروری نظیر آهن که در ستر کلروفیل و رنگدانه های آن ضروری هستند موجب کاهش محتوای کلروفیل می شود (۲۳). در این مطالعه با محلول پاشی آهن اثرات سوء تنش کاهش یافت و بیشترین مقدار کلروفیل با مقادیر بالای آهن به دست آمد (شکل ۲). نتایج تحقیقات اردال و همکاران (۱۸) نشان داد مقدار آهن کل و شاخص کلروفیل برگ به طور معنی داری با افزایش میزان آهن کاربردی افزایش یافت. افزایش شاخص کلروفیل برگ در نتیجه مصرف آهن به دلیل نقش این عنصر در ساخت کلروفیل است. ماده مشترک برای ساخت کلروفیل و

حداکثر شاخص کلروفیل برگ پرچم (۵۱/۹۳) در محلول پاشی ۰/۹ گرم بر لیتر نانو اکسید آهن و آبیاری تکمیلی در مرحله آبستنی و حداقل آن در عدم محلول پاشی تحت شرایط دیم به دست آمد (شکل ۲). ال تیب (۱۷) کاهش کلروفیل در شرایط تنش خشکی را به فتواکسیداسیون کلروفیل ها، واکنش آنها با اکسیژن منفرد، تخریب پیش ماده های ستر کلروفیل و ممانعت از بیوسنتز کلروفیل های جدید و فعال شدن آنزیم های تجزیه کننده کلروفیل از جمله کلروفیلاز نسبت دادند. یقینی (۵۱) اظهار داشت که انجام آبیاری تکمیلی در مرحله آبستنی موجب افزایش شاخص کلروفیل برگ گندم نسبت به شرایط دیم شد.

گزارش کرد که انجام آبیاری تکمیلی در مرحله آبستنی با بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای پرولین و قندهای محلول موجب افزایش شاخص کلروفیل، عملکرد کواتومی و عملکرد دانه گندم شد. به نظر می‌رسد بخشی از افزایش عملکرد دانه در شرایط دیم در کاربرد نانوآکسید آهن را می‌توان به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز) و افزایش فعالیت برخی اسمولیت‌های سازگار (مانند پرولین و قندهای محلول) و بهبود عملکرد کواتومی و شاخص کلروفیل نسبت داد (جدول ۳ و ۵).

نتیجه‌گیری

محلول‌پاشی نانوآکسید آهن در شرایط دیم موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوای پرولین و قندهای محلول شد. افزایش فعالیت این آنزیم‌ها گیاه را قادر می‌سازد تا از تولید فرم‌های فعال اکسیژن پیشگیری کند و یا آثار مضر آنها را کاهش دهد. از طرفی افزایش اسمولیت‌ها سازگار (پرولین و قندهای محلول) ضمن حفظ تورژسانس سلول‌ها به بهبود جذب آب حتی در پتانسیل‌های پایین آب در خاک در شرایط محدودیت آبی کمک می‌کند. آبیاری تکمیلی نیز با افزایش عملکرد کواتومی یا کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II منجر به بهبود فتوسیستم و عملکرد دانه می‌شود. از این رو به نظر می‌رسد محلول‌پاشی نانوآکسید آهن و آبیاری تکمیلی می‌تواند به‌عنوان راه حل مناسبی برای تعدیل اثرات ناشی از محدودیت آبی در شرایط دیم توصیه شود.

هم، اسید دلتا-آمینولولینیک است که میزان تشکیل آن به‌وسیله آهن مهار می‌شود. کاربرد آهن و یا منیزیم، به‌عنوان اتم مرکزی در درون تتراپیرول، به‌ترتیب به تشکیل کوآنزیم‌های هم و منیزیم-پروتوپورفیرین منجر می‌شود. ثابت شده است که آهن برای تشکیل پروتوکلروفیلید از منیزیم-پروتو پورفیرین لازم است. همچنین آنزیم کپروپورفیرینوژن اکسیداز که یک پروتئین آهن‌دار است. اکسید شدن منیزیم-پروتوپورفیرین را به پروتوکلروفیلید کاتالیز می‌کند (۳۵) افزایش شاخص کلروفیل برگ در نتیجه افزایش میزان آهن مصرفی با تحقیقات انجام شده توسط هیرایی و همکاران (۲۴) در جو مطابقت دارد. آهن خود جزئی از مولکول کلروفیل نیست ولی، نیاز به آهن احتمالاً مربوط به نیاز عمومی به این عنصر برای سنتز اجزای کلروپلاست، به‌ویژه پروتئین‌های انتقال الکترون است. از این رو به نظر می‌رسد کمبود آهن به دلیل از بین رفتن همزمان کلروفیل و تخریب ساختمان کلروپلاست، موجب کاهش شاخص کلروفیل شده است.

عملکرد دانه

در این بررسی بیشترین عملکرد دانه (۴۵۲ گرم در مترمربع) مربوط به محلول پاشی ۰/۹ گرم بر لیتر نانوآکسید آهن و آبیاری تکمیلی در مرحله آبستنی و کمترین آن (۳۲۶/۵) گرم در مترمربع) در حالت عدم محلول‌پاشی و تحت کشت دیم به‌دست آمد (جدول ۳). بابایی (۵) اظهار داشت که کاربرد نانوآکسید آهن با بهبود محتوای کلروفیل، عملکرد کواتومی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، پرولین و قندهای محلول موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد. همچنین یقینی (۵۱)

منابع مورد استفاده

1. Agarwal, S. and V. Pandey. 2004. Antioxidant enzyme responses to NaCl stress in *Cassia angustifolia*. *Plant Biology* 48: 555-560.
2. Ahmad, P. and M. N. V. Prasad. 2012. *Abiotic Stress Responses in Plants: Metabolism, Productivity and Sustainability*. Springer, New York Dordrecht Heidelberg London.
3. Aranjuelo, I., G. Molero, G. Erice, J. Christophe Avice and S. Nogues. 2011. Plant physiology and proteomics reveals the leaf response to drought in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *The Journal of Experimental Botany* 62: 111-123.
4. Ashraf, M. Y., A. R. Azmi, A. H. Khan and S. A. Ala. 1994. Effect of water stress on total phenols, peroxidase

- activity and chlorophyll content in wheat. *Acta Physiology Plantarum* 16(3): 185-191. (In Farsi).
5. Babaei, Kh. 2017. Influence of seed inoculation with plant growth promoting Rhizobacteria (PGPR), Nano-iron oxide and zinc foliar application on yield and some morpho-physiological traits of wheat under salinity and water limitation. PhD. Thesis, University of Mohaghegh Ardabili. Ardabil, Iran.
 6. Babaeian, M., M. Heidari and A. Ghanbari. 2010. Effect of water stress and foliar micronutrient application on physiological charactersitics and nutrient uptake in sunflower (*Helianthus annus L.*). *Iranian Journal of Crop Sciences* 12(4): 377-391. (In Farsi).
 7. Baiji, M., S. Lutts and J. M. Kinet. 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.
 8. Bates, L. S., R. D. Walderen and I. D. Taere. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil* 39: 205-207.
 9. Beltrano, J. and G. R. Marta. 2008. Improved tolerance of wheat plants to drought stress and rewatering by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus claroideum*: Effect on growth and cell membrane stability. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 20: 112-116.
 10. Bhattacharjee, S. 2005. Reactive oxygen species and oxidative burst: Roles in stress, senescence and signal transduction in plants. *Current Science* 98(7): 1113-1121.
 11. Blakrishman, K. 2000. Peroxidase activity as an indicator of the iron deficiency banana. *Indian Journal Plant Physiology* 5: 389-391.
 12. Bradford, M. M. 1976. A rapid and sensitive for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry* 72: 248.
 13. Cui, Y. Y., D. M. Pandey, E. U. Hahn and K. Y. Pack. 2004. EReci of drought on phymiological aspects of Crowsulacean acid metabolism in *Doritaenopsis*. *Plant Science* 167: 1219-1226.
 14. Dat, J., S. Vandenabeele, E. Vranova, M. Van Montagu, D. Inze and F. Van Breusegem. 2000. Dual action of the active oxygen species during plant stress responses. *Cellular and Molecular Life Sciences* 57: 779-795.
 15. Davrynejad, Gh., M. Azizi and M. Akheratee. 2010. Effect of foliar nutrition on quality, quantity alternate bearing of Pistachio (*Pistacia vera L.*). *Journal of Horticultural Sciences* 23(2): 1-10. (In Farsi).
 16. Dubios, M., K. A. Gilles, J. K. Hamilton, P. A. Roberts and F. Smith. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Annals of Chemistry* 28: 350-356.
 17. EL-Tayeb, M. A. 2005. Response of barley grains to the interactive effect of salinity and salicylic acid. *Plant Growth Regulation* 45: 215-222.
 18. Erdal, I., M. Atilla Askin, Z. Kucukyumuk, F. Yildirim and A. Yildirim. 2008. Rootstock has an important role on iron nutrition of apple trees. *World Journal Agricultural Sciences* 4: 173-177.
 19. Flexas, J., U. Niinemets, A. Galle, M. M. Barbour and M. Centritto. 2013. Diffusional conductances to CO as a target for increasing photosynthesis and photosynthetic water-use efficiency. *Photosynthesis Research* 117: 1-3.
 20. Fracheboud, Y. 2006. Using Chlorophyll Fluorescence to Study Photosynthesis. Institute of Plant Sciences ETH, Universitat strass, CH-8092 Zurich.
 21. Ghaffari, H. and J. Razmjoo. 2015. Response of durum wheat to foliar application of varied sources and rates of iron fertilizers. *Journal of Agricultural Science and Technology* 17: 321-331.
 22. Ghorbanli, M. and M. Niakan. 2006. Effects of drought stress on soluble sugar, total protein, proline, phenolic compound, chlorophyll content and activity of reductase enzyme in Soybean (*Glycine max L. cv. Gorgan3*). *Materials & Energy* 18(56): 537-550. (In Farsi).
 23. Hadi, H., R. Seyed Sharifi and A. Namvar. 2017. Phytoprotectants and Abiotic Stresses. Urmia University Press, Iran. (In Farsi).
 24. Hirai, M., K. Higuchi, K. Sasaki, H. Suzuki, T. Maruyama, T. Yoshiba and T. Tadano. 2007. Contribution of iron associated with high molecular weight substances to the maintenance of the SPAD value of young leaves of barley under iron deficient conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 53: 612-620.
 25. Ho, S., Y. Chao, W. E. Tong and S. Yu. 2001. Sugar coordinately and differentially regulates growth and stress-related gene expression via a complex signal transduction network and multiple control mechanisms. *Plant Physiology* 46: 281-285.
 26. Ho, S., Y. Chao, W. Tong and S. Yu. 2001. Sugar coordinately and differentially regulates growth and stress-related gene expression via complex signal transduction network and multiple control mechanisms. *Plant Physiology* 15: 877-890.
 27. Jeong, J. and E. L. Connolly. 2009. Iron uptakemechanisms inplants: functions of the FRO family of ferric reductases. *Plant Sciences* 176:709-714.
 28. Jiang, Y. and N. Huang. 2001. Drought and heat stress injury to two cool-season turfgrasses in relation to antioxidant metabolism and lipid peroxidation. *Crop Science* 41: 436-442.

29. Kheirizadeh Arough, Y., R. Seyed Sharifi, M. Sedghi and M. Barmaki. 2016. Effect of Zinc and Bio Fertilizers on Antioxidant Enzymes Activity, Chlorophyll Content, Soluble Sugars and Proline in *Triticale* under Salinity Condition. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 44(1): 116-124.
30. Kiani, S. 2012. Effects of iron on efficiency and map of photosystem II photochemical yield of rose flower using chlorophyll fluorescence imaging. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture Soilless Culture Research Center* 2(4): 25-35.
31. Lehmann, S., D. Funck, L. Szabados and D. Rentsch. 2010. Proline metabolism and transport in plant development. *Amino Acids* 39: 949-962.
32. Liang, X., L. Zhang, S. K. Natarajan and D. F. Becker. 2013. Proline Mechanisms of Stress Survival. *Antioxidants and Redox Signaling* 19: 998-1011.
33. Malakouti, M., J. F. Moshiri and M. N. Ghaibi. 2005. Optimum levels of nutrients in soil and some agronomic and horticultural crops. Soil and Water Research Institute Technical Bulletin No. 405.
34. Manivannan, P., C. Abdul Jaleel, R. Somasundaram and R. Panneerselvam. 2008. Osmoregulation and antioxidant metabolism in drought-stressed *Helianthus annuus* under triadimefon drenching. *Comptes Rendus Biologies* 331: 418-425.
35. Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd Ed., Academic Press, New York, USA.
36. Najafian, G., A. Ghandi and H. Abadi. 2004. Screening for last season drought tolerance in wheat genotypes grown in Iran. *African Agricultural Journal* 10(2): 370-381.
37. Nozari Rad, D., M. Baradaran Firouzabadi, H. Makarian, N. Farrokhi, and A. Gholami. 2016. Effect of foliar application of nano and micro iron oxide particles with D.G ADJUVANT and RCP-5 additive material on some physiological traits of green bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Iranian Journal of Pulses Research* 7(1): 161-173. (In Farsi).
38. Oweis, T. and A. Hachum. 2004. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity for dry farming systems in West Asia and North Africa. ICARDA. Aleppo, Syria for Presentation at the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia.
39. Parvaiz, A. and S. Satyawati. 2008. Salt stress and phyto-biochemical responses of plants. *Plant Soil and Environment* 54: 89-99.
40. Prasad, T. N., P. Sudhakar, Y. Sreenivasulu, P. Latha, V. Munaswamy, K. Raja Reddy, T. S. Sreepasad and P. R. Sajanlal. 2012. Effect of nanoscale zinc-oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition* 35: 905-927.
41. Ranjan, R., S. P. Bohra and A. M. Jeet. 2001. Book of Plant Senescence. Jodhpur Agrobios, New York.
42. Romera, F. J. and E. Alcantara. 1994. Iron-deficiency stress responses in cucumber (*Cucumis sativus* L.) roots: A possible role for ethylene? *Journal of Plant Physiology* 105: 1133-1138.
43. Sadiqov, S. T., M. Akbulut and V. Ehmedov. 2002. Role of Ca²⁺ in drought stress signaling in wheat seedlings. *Biochemistry* 67: 491-497.
44. Scotnica, J., M. Matouskova, J. Naus, D. Lazar and L. Dvorak. 2000. Thermo luminescence of fluorescence study of changes in photosystem II: a 100- to 200 ns component between 4.2 and 300 K. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 77: 5889-5893.
45. Shir-Mard Kermanshahi, M. 2003. Effects of reduced irrigation stress on some morphological and physiological traits on Safflower cultivars. MSc. Thesis, Islamic Azad University, Karaj Branch. (In Farsi).
46. Sverdouli, L. and M. Moustakas. 2012. Spatio-temporal heterogeneity in *Arabidopsis thaliana* leaves under drought stress. *Plant Biology* 14: 118-128.
47. Sudhakar, C., A. Lakshmi and S. Giridara Kumar. 2001. Changes in the antioxidant enzyme efficacy in two high yielding genotypes of mulberry (*Morus alba* L.) under NaCl salinity. *Plant Science* 167: 613-619.
48. Tewari, R. K., P. Kumar and P. N. Sharma. 2005. Sign of oxidative stress in the chlorotic leaves of iron starved plants. *Plant Science* 169: 1037-1045.
49. Vinocur, B. and A. Altman. 2005. Recent advances in engineering plant tolerance to abiotic stress: achievements and limitations. *Current Opinion in Biotechnology* 16: 123-132.
50. Xu Y. C., J. B. Zhang, Q. A. Jiang, L. Y. Zhou and H. B. Miao. 2006. Effects of water stress on the growth of *Lonicera japonica* and quality of honeysuckle. *Zhong Yao Cai* 29(5): 420-423.
51. Yaghini, F. 2018. Effects of supplementary irrigation and bio fertilizers on growth and yield of wheat under rainfed condition. MSc. Thesis. University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Effects of Nano Iron Oxide on the Yield and Some Physiological and Biochemical Traits of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Rainfed and Supplementary Irrigation Conditions

H. Narimani¹, R. Seyed Sharifi^{2*} and N. Ebadi¹

(Received: May 14-2018; Accepted: July 14-2019)

Abstract

In order to study the effects of supplementary irrigation and nano iron oxide on the grain yield, and some physiological and biochemical traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) under rain fed conditions, a factorial experiment was conducted based on a randomized complete block design with three replications in Agricultural Research Station of Ardabil, Northwest of Iran, in 2016. Factors included irrigation levels (no irrigation as the rainfed, supplementary irrigation at heading and booting stages), nano iron oxide application at four levels (without nano iron oxide as the control, application of 0.3, 0.6 and 0.9 g L⁻¹). Application of 0.9 g L⁻¹ nano iron oxide under rainfed condition increased soluble sugars and proline content and antioxidant enzymes activity (catalase, peroxidase and polyphenol oxidase) by 129.89, 168.76, 27.64, 94.2, and 31.71%, respectively, in comparison with no application of nano iron oxide and supplementary irrigation at the booting stage. Also, there were 75.89 and 38.43 increases, respectively, in the leaf protein and grain yield with the application of 0.9 g L⁻¹ nano iron oxide and the supplementary irrigation at the booting stage, in comparison with no application of nano iron oxide under rainfed conditions. It seems that the application of nano iron oxide and supplementary irrigation can increase the grain yield of wheat under rainfed conditions due to improving the physiological and biochemical traits.

Keywords: Antioxidant enzymes, Bio fertilizers, Water limitation, Efficiency of PSII photochemistry

1, 2. MSc. Students and Professor, Respectively, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

*: Corresponding Author, Email: raouf_ssharifi@yahoo.com