

تأثیر تنش خشکی بر عملکرد و صفات آگروفیزیولوژیکی ژنوتیپ‌های گندم نان (*Triticum aestivum* L.) در شرایط آبی و دیم

حمید خوش‌خبر^۱، عباس ملکی^{۲*}، محمد میرزایی حیدری^۲ و فرزاد بابایی^۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۶/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۲۵

چکیده

اثر تنش خشکی بر عملکرد دانه و برخی صفات فیزیولوژیکی بیست ژنوتیپ گندم نان، طی آزمایشی به مدت دو سال زراعی (۹۶-۱۳۹۵ و ۹۷-۱۳۹۶) در ایستگاه تحقیقات کشاورزی سرابله استان ایلام، به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بررسی گردید. عامل‌های کشت آبی و دیم در کرت اصلی و ژنوتیپ‌های گندم در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. عملکرد دانه و اجزای آن و صفات فیزیولوژیکی شامل فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، پرولین و محتوای آب نسبی برگ مورد مطالعه قرار گرفتند. محتوای آب نسبی برگ نسبت به شرایط آبیاری مطلوب در سال اول و دوم آزمایش به ترتیب ۳۳ و ۲۱ درصد کاهش نشان داد. محتوای پرولین در شرایط دیم به‌طور متوسط ۸۱ درصد افزایش یافت. همچنین، در شرایط دیم فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپر اکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز افزایش یافت. تنوع زیادی از نظر صفات مورد بررسی بین ژنوتیپ‌ها مشاهده شد و میزان تغییرات صفات در شرایط دیم در ژنوتیپ‌های مختلف مشابه نبود. کشت در شرایط دیم سبب کاهش تعداد دانه در سنبله (۲۴ درصد) و وزن دانه در سنبله (۱۶ درصد) شد. میانگین‌های عملکرد دانه در کشت آبی و دیم به ترتیب ۲۶۰۴ و ۱۶۷۶ کیلوگرم در هکتار برآورد شدند. کشت در شرایط دیم سبب کاهش تا ۲۹ و ۴۱ درصدی عملکرد دانه، به ترتیب در سال اول و دوم آزمایش شد. اما درصد کاهش عملکرد در دو سال آزمایش برای ژنوتیپ‌های مختلف یکسان نبود. به‌طور کلی، کشت در شرایط دیم کلیه صفات مورد مطالعه را تحت تاثیر قرار داد و میانگین‌های ژنوتیپ‌های مورد مطالعه تحت شرایط آبیاری مطلوب و دیم تفاوت معنی‌داری با هم داشتند. در مجموع در شرایط آبی ژنوتیپ‌های ۱۵، ۱۳، ۱۷ و ۱۸ و در شرایط دیم ژنوتیپ‌های ۳، ۱۷، ۱۵، ۸ و ۹ از نظر عملکرد و صفات فیزیولوژیکی بر دیگر ژنوتیپ‌ها برتری داشتند.

واژگان کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، پرولین، تنش خشکی، عملکرد دانه.

۱- دانشجوی دکتری زراعت، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی، ایلام، ایران.

۲- استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی، ایلام، ایران.

* نگارنده‌ی مسئول

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) اولین غله و مهم‌ترین گیاه زراعی دنیاست که به دلیل دارا بودن خاصیت نانوائی نقش بسیار مهمی در جیره غذایی مردم سراسر دنیا ایفا می‌کند (Yordanov *et al.*, 2003). به گزارش فائو گندم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غذاهای اصلی، حدود ۲۰ درصد از کالری و پروتئین مورد نیاز بشر را در سراسر جهان تأمین می‌کند و از نظر اهمیت بعد از ذرت و برنج در رتبه سوم قرار دارد. در حالی که در دهه‌های گذشته، محور اصلی برنامه‌های تحقیقات به‌نژادی غلات در ایران معرفی ارقام پر محصول در شرایط بهینه آبی بوده است (Ghazvineh *et al.*, 2020)، محدودیت آبیاری اراضی گندم آبی بخصوص در آخر فصل (به دلیل رقابت زراعت‌های بهاره با آخرین آبیاری گندم در مرحله بحرانی دانه‌بندی گیاه) و به دنبال آن نقصان شدید عملکرد ارقام گندم (Safari *et al.*, 2021) در شرایط تنش خشکی انتهای فصل، باعث شده تا شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی آخر فصل که بتوان آنها را به‌صورت دیم کشت کرد نیز در برنامه‌های به‌نژادی مورد توجه قرار گیرد (Saeidi and Abdoli, 2018). بخش زیادی از تولید گندم در مناطق دیم (Bagheripour *et al.*, 2021) صورت می‌گیرد و وقوع تنش‌های محیطی طی فصل رشد از عوامل مهم کاهش تولید و نوسانات عملکرد در شرایط دیم می‌باشد (Foladvand *et al.*, 2017). همچنین، پیش‌بینی شده که تغییر در الگوی اقلیمی (Dawoudian *et al.*, 2021) و کاهش منابع آب در دسترس در سراسر دنیا به احتمال زیاد منجر به این خواهد شد که مزارع آبی نیز با آب کمتری آبیاری شوند (Rebetzke *et al.*, 2006).

تنش خشکی یکی از محدود کننده‌ترین تنش‌های غیرزنده در جهان و مانع جدی برای تولید محصولات کشاورزی است (Aslam *et al.*, 2014; Naveed *et al.*, 2013). آمارها نشان داده که مساحت اراضی متأثر از خشکی جهان از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۰ دو برابر شده است (Isendahl and Schmidt, 2006) و میانگین کاهش عملکرد محصول ناشی از تنش خشکی در نقاط مختلف دنیا بیش از ۵۰ درصد گزارش شده است (Zlatev and Yordanov, 2004). تنش خشکی سبب ایجاد واکنش‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی متفاوتی در گیاهان می‌شود (Zabet *et al.*, 2015; Shamsibeiranvand *et al.*, 2017). تنش خشکی از طریق کاهش محتوای آب خاک منجر به کاهش پتانسیل آب برگ و کاهش آماس سلولی و در نهایت بسته شدن روزنه‌ها و کاهش سرعت رشد و نمو سلول‌ها می‌گردد (Anjum *et al.*, 2011). تنش کم‌آبی باعث کاهش معنی‌دار عملکرد زیست‌توده، عملکرد دانه، شاخص برداشت و کارایی مصرف آب گندم می‌شود (Majer *et al.*, 2008). تحمل تنش خشکی یک پدیده پیچیده است، که شماری از فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در دو سطح یاخته و کل موجود زنده در مراحل متفاوتی از نمو گیاه در آن نقش دارند. سازوکارهایی مانند کاهش از دست دادن آب با افزایش مقاومت روزنه‌ای، افزایش جذب آب با توسعه دادن سیستم ریشه‌ای و انباشته‌کردن اسمولیت‌ها، برخی از این فرایندها هستند (Rampino *et al.*, 2006). روشی ساده و مؤثر که برای تعیین وضعیت آب گیاه استفاده می‌شود، اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (RWC) است. در این روش محتوای نسبی حجمی آب برگ را با محتوای آب برگ در حالت تورژسانس

غیرآنزیمی شامل پرولین، اسکوربات، توکوفرول، کاروتنوئیدها و ترکیبات متفرقه (از جمله فلاونوئیدها، مانیتولها و پلیفنلها) می‌باشند (Gill and Tutja, 2010). تحقیقات مختلف نشان داده است که ارتباط قوی بین تحمل به تنش‌های اکسیداسیونی که به دلیل تنش‌های محیطی ایجاد می‌شود و افزایش در غلظت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاهان فتوسنتز کننده وجود دارد (Gill and Tutja, 2010). محققین نشان داده‌اند که غلظت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط تنش دو برابر شده و لذا باعث افزایش مقاومت به تنش‌های اکسیداتیو می‌شوند و از طرفی تنش خشکی نیز میزان فعالیت آنزیم گلوکاتایون ردوکتاز و سوپر اکسید دیسموتاز را افزایش می‌دهد (Lascano, 2005). اسید آمینه پرولین علاوه بر تنظیم اسمزی به‌عنوان محافظ در برابر تنش نیز عمل می‌کند. بدین ترتیب که به طور مستقیم و یا غیرمستقیم با ماکرومولکولها اثر متقابل داشته و از این طریق به حفظ شکل و ساختار طبیعی آنها در شرایط تنش کمک می‌کند (Koc et al., 2010).

شناخت بهتر صفات فیزیولوژیکی مؤثر در پایداری عملکرد از جمله سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی از روش‌های مفید و مهمی است که می‌تواند به به‌نژادگران در شناسایی و معرفی ژنوتیپ‌های پرمحصول کمک کند. لذا این تحقیق با هدف مطالعه برخی صفات فیزیولوژیکی در ژنوتیپ‌های گندم نان انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در دو سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ و ۹۷-۱۳۹۶ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی سرابله استان ایلام، به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به‌اجرا

می‌سنجند (Blum, 2011). ارقامی که محتوای نسبی آب برگ بالاتری دارند تحمل بیشتری نسبت به تنش خشکی نیز دارند (Nouri et al., 2011). لذا، این صفت می‌تواند به‌عنوان شاخصی مهم برای انتخاب ارقام برتر در برنامه‌های اصلاحی به کار رود (Bayoumi et al., 2008).

از مهم‌ترین تغییرات بیوشیمیایی در گیاهان در معرض تنش خشکی می‌توان به تولید مولکول‌های اکسید کننده‌ای اشاره کرد که عامل اصلی خسارت در درون سلول بوده و به آنها گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) می‌گویند که باعث خسارت به ماکرومولکولها و اندامک‌های سلولی می‌شوند. ROSها فعالیت‌های تنفسی در میتوکندری و توانایی تثبیت دی‌اکسیدکربن در کلروپلاست را کاهش و نشت الکترولیت‌ها از سلول را افزایش می‌دهند. ROSها همچنین با اکسیداسیون آمینواسیدها در پروتئین‌ها و اکسیداسیون کوفاکتور متصل به آنها موجب غیرفعال شدن بعضی از آنزیم‌های خاص می‌شوند؛ به قندها و بازهای سازنده مولکول DNA خسارت وارد کرده و باعث حذف شدن بازها، ایجاد موتاسیون و اثرات مختلف ژنتیکی می‌شوند و نهایتاً با تخریب رنگدانه‌ها و دیگر ماکرو مولکول‌های حیاتی گیاه و همچنین خسارت در سیستم فتوسنتزی و تنفس گیاه باعث کاهش عملکرد می‌شوند (Gill and Tuteja, 2010; Huang et al., 2012). گیاهان برای مقابله با تنش اکسیداسیونی ایجاد شده، دارای سیستم دفاعی با کارایی بالایی هستند که می‌تواند رادیکال‌های آزاد را از بین برده و یا خنثی کنند. این سیستم دفاعی شامل آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT)، اسکوربات پراکسیداز (APX) و گلوکاتایون ردوکتاز (GR) است و سیستم

روی یخ انجام شد. نمونه‌ها در هاون چینی، به کمک نیتروژن مایع ساییده و پودر شدند. ۲/۵ میلی‌لیتر بافر استخراج را به ۰/۲۵ گرم از پودر اضافه کرده و ورتکس شدند. نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت $13000 \times g$ و در دمای ۴ درجه سلسیوس سانتریفیوژ شدند. سپس، مایع رویی، عصاره آنزیمی، برای سنجش کمی آنزیم‌ها استفاده شد. اندازه‌گیری فعالیت سوپراکسید دیسموتاز طبق روش بیر و فریدویچ (Beyer and Fridovich, 1987) انجام شد. فعالیت این آنزیم به صورت فتومتریک بررسی شد. بافر اصلی واکنش شامل بافر فسفات (pH=7/8) ۱۰۰ میلی‌مولار، متیونین ۱۲ میلی‌مولار، نیتروبلو تترازولیوم ۷۵ میکرومولار، EDTA ۱۰۰ میکرومولار و تریپتون ایکس - ۱۰۰ (۰/۰۲۵ درصد) بود. از بافر اصلی به هر چاهک به میزان ۲۹۰ میکرولیتر اضافه شد. سپس از بافر ریپوفلاوین ۲ میکرومولار به میزان ۵ میکرولیتر به مخلوط واکنش اضافه شد و دستگاه روی طول موج ۵۶۰ نانومتر کالیبره شد. برای سنجش هر نمونه ۱۰ میکرولیتر از عصاره پروتئینی استفاده شد. این واکنش بر اساس میزان احیای نوری نیتروبلو تترازولیوم و توانایی آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در ممانعت از این واکنش بررسی شد. فعالیت آنزیم کاتالاز در دمای ۲۵ درجه سلسیوس با دستگاه اسپکتروفتومتر (Shimadzu uv-160) به روش اسکبا و همکاران (Scebba et al., 1998) اندازه‌گیری شد. مواد استفاده شده شامل ۳۰۰۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم (pH=7) ۵۰ میلی‌مولار، ۵ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۳/۴۱ مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیم بوده و فعالیت آنزیم بر اساس میکرومول پراکسید هیدروژن تجزیه شده در دقیقه در میلی‌گرم پروتئین محاسبه شد. فعالیت آنزیم

درآمد. عامل‌های آبیاری و عدم انجام آبیاری (کشت به صورت دیم که در آن تنها به نزولات جوی اکتفا شد) در کرت اصلی و ۲۰ ژنوتیپ گندم در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. پس از عملیات آماده‌سازی زمین بذور با قارچ‌کش (تبوکونازول) ضد عفونی شده و عملیات کاشت با تراکم ۴۰۰ بذر در متر مربع به صورت دستی انجام شد. اسامی ژنوتیپ‌های گندم مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. هر کرت آزمایش شامل ۶ خط کاشت به طول ۴ متر با فاصله خطوط ۲۰ سانتی‌متر بود. فاصله بین کرت‌ها یک متر و بین تکرارها دو متر در نظر گرفته شد. اولین آبیاری پس از کاشت بذرها صورت گرفت. متوسط بارندگی در سال اول آزمایش ۶۵۰ میلی‌متر و در سال دوم آزمایش ۶۷۸ میلی‌متر بود و دفعات آبیاری بر اساس عرف منطقه و وضعیت مزرعه انجام شد. جهت سهولت آبیاری، لوله‌کشی و به منظور کنترل دقیق آب ورودی به هر کرت از کنتورهای حجمی قابل تنظیم و اتوماتیک استفاده شد. نتایج آنالیز خصوصیات شیمیایی عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک قبل از شروع آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. بافت خاک نیز لومی-رسی بود. بر اساس نتیجه آزمایش خاک، کود آمونیوم فسفات بر مبنای ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار قبل از کاشت و همچنین کود اوره بر مبنای ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار در مراحل پنجه‌زنی و ساقه رفتن به صورت سرک به زمین داده شد.

نمونه‌برداری برای سنجش صفات فیزیولوژیکی، از کرت‌های مختلف در مرحله گلدهی و از برگ پرچم صورت گرفت. نمونه‌های برگ در داخل فویل پیچیده شده و بلافاصله در نیتروژن مایع به فریزر ۸۰- درجه سلسیوس منتقل شدند. کلیه مراحل استخراج در نمونه‌ها بر

شده‌اند انجام شد. به طوری که، بعد از توزین وزن تر، دیسک‌های برگ‌ی در پتری آب مقطر به مدت ۱۲ ساعت، اشباع و سپس توزین شدند. نمونه‌های توزین شده بعداً در آن ۸۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفته و وزن خشک آنها تعیین گردید. محتوی رطوبت نسبی برگ با استفاده از معادله (۱) به دست آمد:

$$\text{RWC} = \frac{(F_w - D_w)}{(T_w - D_w)} \times 100 \quad (1) \text{ معادله}$$

که در آن، F_w : وزن تر، D_w : وزن خشک و T_w : وزن تر اشباع می‌باشد.

در مرحله رسیدگی، تعداد ۱۰ بوته به صورت تصادفی از خطوط دوم و پنجم هر کرت آزمایشی و با رعایت حاشیه برداشت و صفات ارتفاع بوته، تعداد دانه در سنبله و وزن دانه در سنبله برای هر کرت آزمایشی اندازه‌گیری شد. به منظور اندازه‌گیری عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک در واحد سطح، گیاهان واقع در دو ردیف وسط هر کرت با حذف ۵۰ سانتی‌متر از ابتدا و انتهای هر کرت به عنوان اثر حاشیه‌ای برداشت و عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک به صورت کیلوگرم در هکتار محاسبه شد. همچنین، از محصول دانه هر واحد آزمایشی چهار نمونه ۱۰۰ تایی انتخاب و پس از توزین و وزن هزاردانه آنها محاسبه شد.

تجزیه واریانس داده‌ها توسط نرم‌افزار SAS 9.4 انجام شد و شکل‌ها به وسیله Excel رسم گردید. قبل از انجام تجزیه واریانس مرکب آزمون همگنی واریانس خطاهای آزمایشی با آزمون بارتلت انجام شد. آزمون معنی‌داری با استفاده از امید ریاضی میانگین مربعات با فرض ثابت بودن اثر تیمارهای آزمایشی و تصادفی بودن اثر سال صورت گرفت. مقایسات میانگین با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت

آسکوربات پراکسیداز در دمای ۲۵ درجه سلسیوس با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر به روش رانیری و همکاران (Ranieri *et al.*, 2003) اندازه‌گیری شد. مخلوط واکنش حاوی بافر فسفات پتاسیم (pH=7/8) ۵۰ میلی‌مولار، آسکوربات ۵ میلی‌مولار، پراکسید هیدروژن یک میلی‌مولار و عصاره پروتئینی به میزان ۱۰ میکرولیتر بود. از آنجا که حداکثر جذب آسکوربات در طول موج ۲۹۰ nm صورت می‌گیرد، دستگاه روی این طول موج تنظیم شد. میزان فعالیت آنزیم براساس میکرومول آسکوربات اکسید شده در دقیقه در میلی‌گرم پروتئین محاسبه شد. برای تعیین مقدار پرولین برگ‌ها، از روش بیتز و همکاران (Bates *et al.*, 1973) استفاده شد. ابتدا مقدار ۰/۲ گرم از نمونه برگ‌ی تر در ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالیسیلیک سه درصد به وسیله هاون ساییده شد و عصاره حاصل در دستگاه سانتریفیوژ با دور ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه در دمای چهار درجه سلسیوس به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس دو میلی‌لیتر از عصاره‌های صاف شده را به لوله‌های درب‌دار منتقل نموده و به همه لوله‌ها مقدار دو میلی‌لیتر معرف نین‌یدرین و دو میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال اضافه گردید. پس از بستن درب لوله‌ها، آنها به مدت یک ساعت در حمام بن‌ماری و در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند و بعد از سرد شدن، به هر یک از لوله‌ها مقدار چهار میلی‌لیتر تولوئن اضافه شد. غلظت پرولین با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر و با توجه به منحنی استاندارد بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر، تعیین شد. محاسبه محتوی رطوبت نسبی برگ (RWC)، از طریق ۱۵ دیسک برگ‌ی که توسط پانچ از برگ‌های گیاه در ساعت ۱۰ صبح انتخاب

تنش مقدار محتوای نسبی آب برگ یک ژنوتیپ کمتر از ۲۵ درصد باشد به‌عنوان ژنوتیپ حساس در نظر گرفته می‌شود.

محتوای پرولین: طبق نتایج حاصل از

تجزیه واریانس مرکب داده‌ها اثرات ساده ژنوتیپ و رژیم آبیاری و نیز اثر متقابل آنها بر محتوای پرولین در سطح احتمال یک‌درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر متقابل ژنوتیپ × رژیم آبیاری نشان داد که محتوای پرولین در شرایط دیم به طور متوسط ۸۱ درصد افزایش نشان داد (شکل ۱). میزان افزایش پرولین در پاسخ به تنش خشکی (کشت دیم) در ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت بود. در ژنوتیپ‌های ۲، ۴ و ۱۰ میزان افزایش پرولین در شرایط دیم بیشتر و در ژنوتیپ‌های ۷ و ۱۳ کمترین افزایش محتوای پرولین مشاهده شد. به‌طور کلی، ژنوتیپ ۲۰ و ۳ به‌ترتیب بالاترین و کمترین محتوای پرولین در شرایط دیم را دارا بودند (شکل ۱).

افزایش تجمع پرولین تحت شرایط تنش بستگی به گونه گیاهی و شدت تنش دارد. تنش‌های محیطی به‌ویژه تنش خشکی باعث تغییر ماهیت و معمولاً تغییر ساختار پروتئین‌ها می‌شود. حفظ ساختار پروتئین و جلوگیری از تجمع پروتئین‌های غیرمؤثر در شرایط تنش، برای بقای سلول لازم است (Ashraf and Foolad, 2007). در شرایط تنش خشکی ملایم یا شدید، غلظت اسید آمینه پرولین نسبت به سایر اسیدهای آمینه افزایش یافته و این هورمون نه تنها به‌عنوان مخزن ذخیره‌ای نیتروژن و یا ماده محلول کاهش دهنده پتانسیل اسمزی سیتوپلاسم، عمل می‌نماید، بلکه تحمل گیاه را نسبت به تنش از طریق تنظیم فشار اسمزی افزایش می‌دهد (Bahamin et al, 2021; Ashraf and Foolad, 2007). افزایش میزان

گرفت و در مواردی که اثر متقابل معنی‌دار بود برای مقایسه میانگین برهم‌کنش‌ها از برش‌دهی استفاده شد.

نتایج و بحث

محتوای آب نسبی برگ: نتایج تجزیه

واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده سال و رژیم آبیاری و همچنین اثرات متقابل دوگانه سال در رژیم آبیاری و سال در ژنوتیپ و اثر متقابل سه‌گانه سال، رژیم آبیاری و ژنوتیپ بر محتوای آب نسبی معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه نشان داد به‌طور کلی در شرایط دیم میانگین محتوای آب نسبی برگ نسبت به شرایط آبیاری مطلوب در سال اول و دوم آزمایش به‌ترتیب ۳۳ و ۲۱ درصد کاهش نشان داد (جدول ۵). اما پاسخ ژنوتیپ‌های مختلف به کشت در شرایط دیم مشابه نبود. برخی از ژنوتیپ‌ها مانند ژنوتیپ شماره ۵ و ۱۵ در شرایط دیم کاهش کمتری نسبت به شرایط آبیاری مطلوب نشان دادند. در مقابل ژنوتیپ‌هایی مانند ۱۶ و ۲۰ بیشتر تحت تأثیر تنش خشکی که در کشت دیم اتفاق افتاد قرار گرفته و کاهش زیادی در تنش نشان دادند. علاوه بر این، واکنش اغلب ژنوتیپ‌ها در دو سال زراعی آزمایش نیز مشابه نبود (جدول ۵) که بیانگر تأثیرپذیری بالای این صفت از شرایط محیطی است. در مجموع ژنوتیپ‌های ۱۳، ۱۰ و ۱۵ بالاترین و ژنوتیپ‌های ۴ و ۱۷ کمترین محتوای رطوبت نسبی را در شرایط دیم دارا بودند. محتوای نسبی آب برگ یکی از سازوکارهای تحمل به تنش خشکی است و در این آزمایش تنوع زیادی برای آن مشاهده شد. به‌همین دلیل، از این صفت برای تشخیص ارقام مقاوم و حساس به تنش خشکی استفاده شده است. به‌طوری‌که، اگر در شرایط

(جدول ۴). طبق نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل ژنوتیپ × رژیم آبیاری، کشت ژنوتیپ‌های گندم در شرایط دیم سبب افزایش معنی‌داری در فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در تمامی ژنوتیپ‌ها شد (شکل ۳). بالاترین فعالیت آنزیم از ژنوتیپ‌های ۳، ۴ و ۱۲ در شرایط دیم به‌دست آمد و کمترین میزان فعالیت در تیمار آبیاری مطلوب و در ژنوتیپ ۱۰ مشاهده شد (شکل ۳). میزان افزایش فعالیت آنزیم در شرایط دیم در همه ژنوتیپ‌ها مشابه نبود. ژنوتیپ‌های ۱۲، ۱ و ۴ بیشترین افزایش و ژنوتیپ‌های ۶ و ۱۳ کمترین افزایش را در فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در شرایط دیم نشان دادند (شکل ۳).

محققان دیگر (Lascano *et al.*, 2005; Jin *et al.*, 2019) نیز گزارش کردند که با افزایش شدت تنش خشکی و در شرایط نامناسب محیطی آنزیم سوپراکسید دیسموتاز افزایش می‌یابد. تحت شرایط تنش خشکی، آنزیم سوپراکسید دیسموتاز رادیکال‌های سوپراکسید را به H_2O_2 تبدیل می‌کند. در نتیجه افزایش فعالیت این آنزیم باعث تولید پراکسید هیدروژن (H_2O_2) بیشتری می‌شود که برای سلول سمی بوده و منجر به خسارت به غشاهای سلولی می‌شود. افزایش غلظت پراکسید هیدروژن توسط فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز سبب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز برای تجزیه پراکسید هیدروژن می‌گردد (Jin *et al.*, 2006; Maleki *et al.*, 2020).

آنزیم آسکوربات پراکسیداز: نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده سال، ژنوتیپ و همچنین اثرات متقابل دوگانه سال در ژنوتیپ و سال در رژیم آبیاری و اثر متقابل سه‌گانه سال، رژیم آبیاری و ژنوتیپ بر میزان

پرولین در ژنوتیپ‌های مقاوم، می‌تواند تاییدکننده نقش مؤثر پرولین در مقاومت به خشکی باشد. نتایج تحقیقات نشان داده است که پس از اعمال تنش خشکی، میزان پرولین در گندم افزایش ۱۰ تا ۱۰۰ برابری داشته است (Rao and Ryan, 2004).

آنزیم کاتالاز: تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده ژنوتیپ، آبیاری و نیز اثرات متقابل دوگانه رژیم آبیاری و ژنوتیپ در سطح احتمال یک‌درصد بر میزان آنزیم کاتالاز معنی‌دار بوده است (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر متقابل ژنوتیپ × رژیم آبیاری نشان داد که در شرایط دیم میزان آنزیم کاتالاز به‌طور متوسط ۱۴ درصد افزایش یافت (شکل ۲). بالاترین و پایین‌ترین میزان آنزیم کاتالاز در شرایط دیم به ترتیب در ژنوتیپ‌های ۲۰ و ۱۶ و در شرایط آبی در ژنوتیپ‌های ۱۳ و ۳ مشاهده شد (شکل ۲). ژنوتیپ‌های مختلف در پاسخ به رژیم آبیاری نیز از نظر تغییر میزان آنزیم کاتالاز واکنش یکسانی نشان ندادند. برخی ژنوتیپ‌ها مانند ۳ و ۱۰ افزایش زیادی در میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط دیم نشان دادند. اما ژنوتیپ‌هایی مانند ۷ و ۱۹ نیز وجود داشتند که در آنها حتی کاهش میزان فعالیت آنزیم در شرایط دیم مشاهده شد (شکل ۲). افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط تنش خشکی در تحقیقات دیگر بر گیاهان دیگر نیز گزارش شده است (Movludi *et al.*, 2014; Khoshkhabar *et al.*, 2015).

آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز: نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرات ساده رژیم آبیاری و ژنوتیپ و نیز اثر متقابل آنها بر میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در سطح احتمال یک‌درصد معنی‌دار بوده است

وزن هزار دانه: طبق نتایج جدول تجزیه واریانس مرکب، وزن هزار دانه تحت تأثیر اثرات ساده سال و نیز اثر متقابل سال در رژیم آبیاری در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۴). بین ژنوتیپ‌های مختلف از نظر وزن هزار دانه تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد.

مقایسه میانگین اثر متقابل سال و رژیم آبیاری نشان داد کاهش وزن هزار دانه در شرایط دیم نسبت به آبیاری مطلوب در سال اول ۱۱ درصد و در سال دوم ۲۱ درصد بود (شکل ۴). در کشت دیم عموماً گیاهان با تنش‌های خشکی پس از گرده‌افشانی مواجه می‌شوند و مهم‌ترین مؤلفه‌ای که در تنش آخر فصل تحت تأثیر کمبود رطوبت قرار می‌گیرد، وزن هزار دانه است. کاهش وزن دانه‌ها در اثر تنش خشکی می‌تواند ناشی از تأثیر کاهش تولید شیره پرورده و کاهش طول دوره پر شدن دانه باشد. بهامین و همکاران (Bahamin *et al.*, 2019) نیز دلیل کاهش وزن هزار دانه در تنش خشکی را کوتاه‌تر شدن طول دوره پر شدن دانه و مواجهه با دمای بالاتر طی روزهای پایانی دوره‌ی رشد عنوان کردند که متعاقباً سبب ریزتر شدن دانه‌ها می‌گردد.

تعداد دانه در سنبله: نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده رژیم آبیاری و ژنوتیپ و نیز اثر متقابل آنها در سطح احتمال یک درصد بر تعداد دانه در سنبله معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر متقابل ژنوتیپ \times رژیم آبیاری نشان داد که در شرایط دیم تعداد دانه در سنبله تا ۲۴ درصد کاهش یافت (شکل ۵). معنی‌دار شدن اثرات متقابل بدین معنی است که پاسخ ژنوتیپ‌های مختلف به رژیم آبیاری یکسان نبوده است. تعداد دانه در سنبله ژنوتیپ‌های ۱۰، ۶ و ۱۲ در شرایط

آنزیم آسکوربات پراکسیداز در سطح احتمال یک‌درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه سال \times رژیم آبیاری و ژنوتیپ بر میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز در جدول ۵ ارایه شده است. در شرایط دیم میزان این آنزیم در سال اول و دوم آزمایش به‌ترتیب ۲۰/۵ و ۴۷ درصد افزایش نشان داد (جدول ۵). اما پاسخ ژنوتیپ‌های مختلف در شرایط دیم یکسان نبود. به‌طوری‌که برخی از ژنوتیپ‌ها مانند ژنوتیپ شماره ۲ و ۱۰ در سال اول و ژنوتیپ شماره ۵ و ۱۴ در سال دوم در شرایط دیم افزایش بیشتری نسبت به شرایط آبیاری مطلوب نشان دادند. در مقابل ژنوتیپ‌هایی مانند ۱۳ و ۱۵ در سال اول و ۲ و ۸ در سال دوم حتی کاهش اندکی در شرایط دیم نشان دادند (جدول ۵).

به‌طور متوسط در دو سال بالاترین میزان فعالیت آنزیم از ژنوتیپ‌های ۱۶ و ۱۸ در شرایط دیم و کمترین میزان آنزیم از ژنوتیپ ۱۰ به دست آمد. اووه و همکاران (Ohe *et al.*, 2005) نیز نشان دادند که در شرایط تنش خشکی فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز و کاتالاز در برگ‌های اسفناج و تنباکو افزایش می‌یابد. آسکوربات پراکسیداز نقش‌های مختلفی در فرآیندهای فیزیولوژیکی ایفا می‌کنند. همچنین، آسکوربات، آلفا-توکوفرول را سنتز می‌کند که از گیاه در مقابل مرگ برنامه‌ریزی شده‌ی سلول که ناشی از ROSها است، محافظت می‌کند (Movludi *et al.*, 2014). گیل و توتجا (Gill and Tutja, 2010) گزارش کردند که افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان تحت شرایط تنش رطوبتی در ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی گندم، موجب حفظ مقادیر بالاتر کاروتنوئید و کلروفیل در این ارقام می‌گردد.

در ژنوتیپ‌های ۳ و ۷ مشاهده شد (شکل ۶). همچنین، بیشترین میزان کاهش عملکرد تک‌سنبله (وزن دانه در سنبله) در شرایط دیم در ژنوتیپ‌های ۱۷ و ۱۹ و کمترین کاهش عملکرد در ژنوتیپ‌های ۱، ۹ و ۱۲ مشاهده شد. وزن دانه با سرعت و مدت پرشدن دانه در ارتباط است. تنش خشکی طی پرشدن دانه معمولاً وزن دانه را کاهش می‌دهد. این امر احتمالاً به دلیل کاهش مواد پرورده برای رشد دانه‌ها است. کاهش تولید مواد پرورده نیز به کاهش فرایند فتوسنتزی مربوط می‌شود که با بسته شدن روزنه‌ها مرتبط است (Seraj and Sinclair, 2004).

عملکرد دانه: نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده سال و رژیم آبیاری و همچنین اثرات متقابل دوگانه سال در رژیم آبیاری و سال در ژنوتیپ و اثر متقابل سه‌گانه سال، رژیم آبیاری و ژنوتیپ بر عملکرد دانه گندم معنی‌دار بود (جدول ۳). میانگین عملکرد دانه در کشت آبی و دیم به ترتیب ۲۶۰۴ و ۱۶۷۶ کیلوگرم در هکتار بود. مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه نشان داد که کشت در شرایط دیم سبب کاهش عملکرد دانه تا ۲۹ و ۴۱ درصد به ترتیب در سال اول و دوم آزمایش شد (جدول ۴). علت این امر مواجهه گیاهان در شرایط دیم با تنش خشکی بود. تنش خشکی در مرحله پرشدن دانه به‌ویژه در مراحل اولیه پرشدن دانه، با کاهش وزن دانه سبب کاهش عملکرد دانه می‌شود (Zhao *et al.*, 2009). علت این کاهش، تسریع پیری برگ‌ها، کاهش تعداد گلچه‌های بارور و کاهش طول دوره پرشدن دانه است (Yang and Zhang, 2006). به گزارش بارناباس و همکاران (Barnabás *et al.*, 2008) کاهش عملکرد در تنش خشکی به‌علت کاهش محتوای نشاسته

دیم کاهش نسبتاً زیادی (به‌طور متوسط ۳۵ درصد) یافت در حالی‌که برخی ژنوتیپ‌ها مانند ژنوتیپ‌های ۱۶ و ۸ در شرایط دیم با کاهش کمتری (به‌طور متوسط ۱۲ درصد) مواجه شدند (شکل ۵). به‌طور کلی، در شرایط آبیاری مطلوب ژنوتیپ‌های ۱۰ و ۹ به‌ترتیب بالاترین و پایین‌ترین تعداد دانه در سنبله را دارا بودند و در شرایط دیم بالاترین و پایین‌ترین تعداد دانه در سنبله در ژنوتیپ‌های ۸ و ۵ به دست آمد (شکل ۵).

طبق گزارش محققین وقوع تنش خشکی به ویژه در مرحله گرده‌افشانی به دلیل حساسیت دانه‌های گرده به کمبود رطوبت موجب عقیم شدن دانه‌های گرده (Rezaei *et al.*, 2015)، عقیم شدن گل‌های انتهایی سنبله، اختلال در فتوسنتز جاری و انتقال مواد ذخیره شده به دانه‌ها می‌گردد (Seraj and Sinclair, 2004) و همه این عوامل می‌توانند دلیلی بر کاهش تعداد دانه در ارقام تحت شرایط تنش خشکی باشند. اثر منفی تنش خشکی بر تعداد دانه در سنبله می‌تواند به دلیل نقش خشکی در کند کردن تشکیل آغازهای سنبلچه یا تقسیم میوز در گامت‌ها و باروری تخمک‌ها و نمو زودتر دانه‌ها باشد (Rezaei *et al.*, 2015; Fathi and Bahamin, 2018).

وزن دانه در سنبله: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات ساده رژیم آبیاری و ژنوتیپ در سطح احتمال یک درصد و نیز اثر متقابل رژیم آبیاری و ژنوتیپ در سطح احتمال پنج درصد بر وزن دانه در سنبله معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین نشان داد که کشت در شرایط دیم سبب کاهش وزن دانه در سنبله تا ۱۶ درصد شد (شکل ۶). بیشترین و کمترین وزن دانه در سنبله در شرایط آبیاری مطلوب به ترتیب در ژنوتیپ‌های ۱۷ و ۱۲ و در شرایط دیم به ترتیب

به‌طوری‌که میانگین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه تحت شرایط آبیاری مطلوب و دیم تفاوت معنی‌داری با هم داشتند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (کاتالاز، سوپر اکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز)، محتوای رطوبت نسبی برگ و پرولین در شرایط دیم در مقایسه با آبیاری مطلوب افزایش معنی‌داری نشان داد. هرچند ژنوتیپ‌های مختلف پاسخ مشابهی نداشتند. لذا پیشنهاد می‌شود که افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌تواند یکی از عوامل در بالا بردن میزان مقاومت گیاهان به تنش رطوبتی در شرایط دیم باشد. اگرچه در این آزمایش الزاماً ژنوتیپ‌هایی با سیستم آنتی‌اکسیدانی قوی و محتوای پرولین و RWC بالا، عملکرد دانه بالایی در کشت دیم نداشتند، اما میزان کاهش عملکرد آنها در کشت دیم، در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها پایین بود. در مجموع در شرایط آبی ژنوتیپ‌های ۱۵، ۱۳، ۱۷ و ۱۸ و در شرایط دیم ژنوتیپ‌های ۳، ۱۷، ۱۵، ۸، ۹ از نظر عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیکی بر دیگر ژنوتیپ‌ها برتری داشتند.

است، چرا که بیش از ۶۵ درصد دانه غلات از نشاسته تشکیل شده است. همچنین، مقایسه میانگین نشان داد که میزان کاهش عملکرد در دو سال برای ژنوتیپ‌های مختلف یکسان نبوده است. به‌طوری‌که در سال اول ژنوتیپ‌های ۲ و ۱۳ به طور متوسط ۵۲ درصد کاهش عملکرد و در سال دوم ژنوتیپ‌های ۲۰ و ۱۹ کاهش عملکرد ۵۶ درصدی را تجربه کردند (جدول ۴)، این امر نشان‌دهنده حساسیت یا مقاومت متفاوت ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی و نیز تأثیرپذیری متفاوت پتانسیل عملکرد ژنوتیپ‌ها از شرایط محیطی می‌باشد، زیرا شرایط اقلیمی (میانگین دما و بارندگی) دو سال آزمایش کاملاً مشابه نبوده است. در مجموع بیشترین و کمترین عملکرد دانه در شرایط دیم به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های ۳ (۱۹۷۳) کیلوگرم در هکتار) و ۱۲ (۱۳۸۸ کیلوگرم در هکتار) و در شرایط آبی به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های ۱۵ (۳۰۲۱ کیلوگرم در هکتار) و ۱۱ (۲۰۵۴ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد (جدول ۴).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق نشان داد که شرایط دیم تمامی صفات مورد مطالعه را تحت تاثیر قرار داد،

جدول ۱- شماره و شجره ژنوتیپ‌های گندم مورد مطالعه در آزمایش

Table 1- Numbers and pedigrees of wheat genotypes studied in the experiment

شماره ژنوتیپ Genotype number	شجره Pedigree
1	Morvarid
2	Gonbad
3	REEDLING#1
4	CHIBIA//PRLINCM65531/3//SKAUZ/BAV92/4//MUNAL1
5	PBW343*2//KUKUNA/3//PASTOR/CHIL/PRL/4//GRACK
6	QUAIU*2//KINDE
7	FRNCL*2//TECUE#1
8	FRNCOLIN#1//AKURI#1//FRNCLN
9	KACHU#1//WBLI*2//KUKUNA
10	CHIBIA//PRLII/CM65531/I//SKAUZ/BAV92*2/4//QUAIU
11	SITTE//PASTOR/3//TILHI/4//MUNAL#1/5//MUNAL
12	SAAR//INQALAB91*2//KUKUNA/3//KIRITATI/2*TRCH
13	MILAN//KAUZ//BABAX/3//BAV92/4//WHEAR//2*PRL/2*PASROR
14	PAURAQ//ND643/2*WBLI/3//PAURAUQUE#1
15	WHEAR/VIVITSI//WHEAR*2/3//KACHU
16	SOKOLL3//PASTOR//HXL7573/2*BAU/4//SOKOLL/WBLI
17	SUP152*2//TINKIO#1
18	ND643/2*WBLI/4//CHIBIA//PRLII/CM65531/3//SKAUZ/BAV92/5//BECARO
19	MILAN/SHA7/3//THB*S*//TON*S*//VEE*S*//6//LUAN/4//V763.23/3//V879CB//PVNPICUS/S//OPATA
20	GASPARD//MILAN/SHA7/3//MILAN/SHA7

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 2- Physical and chemical criteria of soil

نیترژن کل Total N (ppm)	pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	نیترژن کل Total N (ppm)	کربن آلی Organic carbon (%)	فسفر Available P (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم Available K (mg.kg ⁻¹)
0.2	7.0	0.9	2.23	0.3	8.1	332

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب صفات مورد مطالعه ژنوتیپ‌های گندم نان در شرایط آبی و دیدم

Table 3- Combined analysis of variance of studied traits of wheat genotypes under irrigated and rainfed conditions

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	محتوای آب نسبی برگ Relative water content of leaf	فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز APX activity	عملکرد دانه Seed yield
سال Year (Y)	1	14464.23**	2.028**	1663335**
R (Y) خطا	4	50.12	0.008	59800.4
Irrigation (S) رژیم آبیاری	1	193530.41*	2.028 ^{ns}	50365346.4*
Y×S سال × رژیم آبیاری	1	274.51*	0.454**	312588.8*
Error (R×S(Y)) خطا	4	32.93	0.005	33106.5
Genotype (G) ژنوتیپ	19	256.92 ^{ns}	0.715**	306204.6 ^{ns}
(Y×G) سال × ژنوتیپ	19	161.15**	0.043**	326853.5*
(G×S) ژنوتیپ × رژیم آبیاری	19	342.54 ^{ns}	0.043 ^{ns}	34465307 ^{ns}
سال × ژنوتیپ × رژیم آبیاری (Y×G×S)	19	346.78**	0.102**	33663507*
Residual error خطا باقیمانده	152	21.99	0.003	190638.2
C.V. (%) ضریب تغییرات		13.54	8.44	20.51

**، * و ns: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال یک و پنج درصد و عدم معنی‌دار می‌باشند.

**، * and ns: are significant at 1 and 5% probability levels and non significant, respectively.

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب صفات مورد مطالعه ژنوتیپ‌های گندم نان در شرایط آبی و دیدم

Table 4- Combined analysis of variance of studied traits of wheat genotypes under irrigated and rainfed conditions

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	میزان پرولین Proline content	فعالیت آنزیم کاتالاز CAT activity	فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز SOD activity	وزن هزار دانه 1000-seed weight	تعداد دانه در سنبله Number of seeds per ear	وزن دانه در سنبله Seed weight per ear
سال Year (Y)	1	0.20 ^{ns}	0.043 ^{ns}	0.067 ^{ns}	3278.20**	105.26 ^{ns}	0.037 ^{ns}
R (Y) خطا	4	10.79	0.029	0.213	19.58	47.40	0.072
Irrigation (S) رژیم آبیاری	1	8955.06**	0.297*	674.55**	2607.00 ^{ns}	8992.20**	2.925**
Y×S سال × رژیم آبیاری	1	0.31 ^{ns}	0.075 ^{ns}	0.049 ^{ns}	507.50**	8.71 ^{ns}	0.00004 ^{ns}
Error (R×S(Y)) خطا	4	3.57	0.013	0.197	17.55	60.34	0.052
Genotype (G) ژنوتیپ	19	1300.51**	1.019**	6.158**	15.38 ^{ns}	73.63**	0.186**
(Y×G) سال × ژنوتیپ	19	0.04 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.007 ^{ns}	12.13 ^{ns}	22.42 ^{ns}	0.051 ^{ns}
(G×S) ژنوتیپ × رژیم آبیاری	19	285.29**	0.200**	5.75**	9.21 ^{ns}	76.48**	0.086*
سال × ژنوتیپ × رژیم آبیاری (Y×G×S)	19	0.05 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.008 ^{ns}	13.3 ^{ns}	22.23 ^{ns}	0.042 ^{ns}
Residual error خطا باقیمانده	171	7.30	0.005	0.221	14.52	20.01	0.043
C.V. (%) ضریب تغییرات		13.29	14.14	21.35	10.73	9.96	16.51

**، * و ns: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال یک و پنج درصد و عدم معنی‌دار می‌باشند.

**، * and ns: are significant at 1 and 5% probability levels and non significant, respectively.

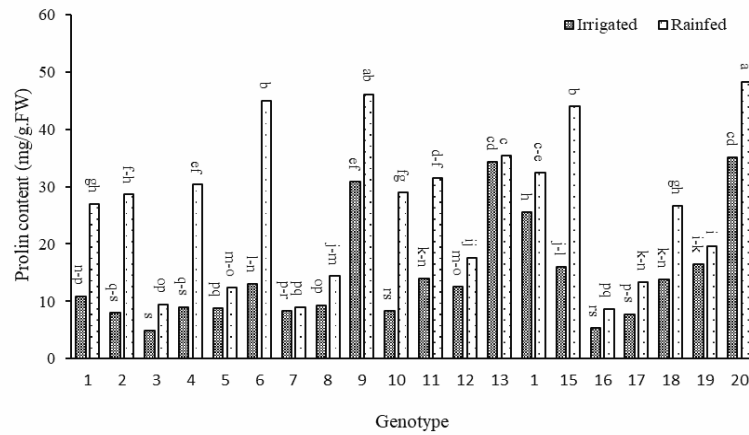
جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری و ژنوتیپ و سال بر برخی صفات گندم

Table 5- Mean comparisons for the effects of irrigation, genotype and year on some traits of wheat

ژنوتیپ Genotype	محتوای آب نسبی برگ (درصد) Relative water content of leaf (%)				فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز APX activity(U/mol.min)				عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار) Seed yield (kg.ha ⁻¹)			
	سال ۱۳۹۶-۹۵ 2015-2016		سال ۱۳۹۷-۹۶ 2016-2017		سال ۱۳۹۶-۹۵ 2015-2016		سال ۱۳۹۷-۹۶ 2016-2017		سال ۱۳۹۶-۹۵ 2015-2016		سال ۱۳۹۷-۹۶ 2016-2017	
	آبیاری Irrigated	دیم Rainfed	آبیاری Irrigated	دیم Rainfed	آبیاری Irrigated	دیم Rainfed	آبیاری Irrigated	دیم Rainfed	آبیاری Irrigated	دیم Rainfed	آبیاری Irrigated	دیم Rainfed
1	61.0 ^{e-h}	54.0 ^{g-k}	86.0 ^{ab}	54.0 ^{g-k}	0.872 ^{d-f}	0.899 ^{b-d}	0.859 ^{ef}	0.92 ^{b-d}	2815 ^{b-e}	1567 ^{r-w}	2527 ^{c-l}	1793 ^{m-v}
2	53.7 ^{g-k}	30.4 ^p	70.2 ^{bc}	46.2 ^{k-n}	0.32 ^p	0.803 ^{f-h}	0.763 ^{g-k}	0.673 ^{ij}	2895 ^{a-d}	1327 ^{u-w}	2450 ^{c-n}	1967 ^{t-u}
3	57.2 ^{d-j}	32.5 ^{op}	52.3 ^{g-k}	30.4 ^p	0.46 ^{mn}	0.556 ^{lm}	0.516 ^{mn}	0.88 ^{c-e}	2773 ^{b-e}	2143 ^{e-s}	2610 ^{b-j}	1803 ^{mv}
4	65.0 ^{b-f}	39.5 ^{l-p}	75.6 ^b	61.3 ^{b-g}	0.154 ^{tu}	0.204 ^{r-t}	0.164 ^{tu}	0.213 ^{rs}	2655 ^{b-i}	1733 ^{o-v}	2033 ^{f-q}	1680 ^{qw}
5	45.3 ^{k-n}	32.5 ^{op}	63.4 ^{b-g}	32.5 ^{op}	0.148 ^{tu}	0.198 st	0.158 ^{tu}	0.724 ^{ij}	2725 ^{b-f}	1407 ^{t-w}	2538 ^{c-k}	1783 ^{o-v}
6	50.1 ^{l-i}	34.1 ^{op}	61.4 ^{b-g}	66.3 ^{b-d}	0.72 ^{ij}	0.773 ^{g-i}	0.733 ^{ij}	0.79 ^{g-i}	2732 ^{b-f}	1740 ^{o-v}	2640 ^{b-i}	1850 ^{k-v}
7	38.8 ^{m-p}	41.5 ^{l-o}	75.2 ^b	39.5 ^{l-p}	0.424 ^{no}	0.813 ^{e-h}	0.773 ^{g-i}	0.793 ^{f-i}	2690 ^{b-h}	1427 ^{t-w}	1860 ^{k-v}	1833 ^{l-v}
8	69.3 ^{bc}	41.3 ^{l-o}	82.0 ^{ab}	46.9 ^{k-n}	0.975 ^{bc}	0.955 ^{bc}	0.915 ^{b-d}	0.840 ^{ef}	2663 ^{b-i}	1573 ^{r-w}	2223 ^{d-q}	2020 ^{h-u}
9	59.7 ^{c-i}	37.7 ^{n-p}	89.5 ^a	32.5 ^{op}	0.098 ^{uv}	0.248 ^{q-s}	0.208 ^{r-t}	0.531 ⁿ	2337 ^{d-q}	1590 ^{r-w}	2707 ^{b-g}	1993 ^{h-u}
10	62.3 ^{b-g}	54.6 ^{f-k}	71.1 ^{bd}	73.0 ^{bc}	0.055 ^v	0.205 ^{r-t}	0.165 ^{tu}	0.163 ^{tu}	3044 ^{a-c}	1563 ^{r-w}	2610 ^{b-j}	1540 ^w
11	60.6 ^{c-i}	36.6 ^{n-p}	62.0 ^{b-g}	63.3 ^{b-g}	0.63 ^{k-m}	0.782 ^{g-i}	0.742 ^{b-j}	0.77 ^{g-i}	1699 ^{a-v}	1677 ^{qw}	2410 ^{c-p}	1563 ^{r-w}
12	63.1 ^{b-g}	36.0 ^{n-p}	79.7 ^{abc}	53.2 ^{f-k}	0.674 ^{ij}	0.668 ^{jk}	0.63 ^{k-m}	0.78 ^{g-i}	2767 ^{b-e}	1550 ^{r-w}	1717 ^{p-v}	1227 ^w
13	58.7 ^{c-j}	52.8 ^{g-k}	82.0 ^{ab}	49.2 ^{l-i}	0.304 ^{pq}	0.264 ^{p-r}	0.224 ^{rs}	0.730 ^{ij}	3571 ^a	1640 ^{qw}	2450 ^{c-n}	1510 ^{s-w}
14	72.1 ^b	39.7 ^{l-p}	66.5 ^{b-d}	56.4 ^{e-k}	0.255 ^{qs}	0.215 ^{rs}	0.175 ^{tu}	0.965 ^{bc}	2517 ^{c-l}	1367 ^{t-w}	1860 ^{k-v}	1677 ^{qw}
15	66.0 ^{b-e}	52.7 ^{g-k}	81.2 ^{ab}	56.3 ^{e-k}	0.465 ^{mn}	0.425 ^{no}	0.385 ^{op}	1.191 ^a	3550 ^a	1727 ^{o-u}	2493 ^{c-m}	1990 ^{h-u}
16	55.3 ^{e-k}	48.6 ^{j-m}	82.0 ^{ab}	67.9 ^{b-d}	0.847 ^{ef}	0.907 ^{b-d}	0.867 ^{d-f}	1.150 ^{ab}	2427 ^{c-o}	1563 ^{r-w}	2907 ^{a-d}	1673 ^{qw}
17	90.5 ^a	32.3 ^{op}	82.3 ^{ab}	60.1 ^{b-g}	0.45 ^{mo}	0.509 ^{lm}	0.469 ^{mn}	0.88 ^{c-e}	3252 ^{ab}	1833 ^{l-v}	2447 ^{c-n}	1930 ^{l-v}
18	50.0 ^{l-i}	37.3 ^{n-p}	51.3 ^{g-l}	60.6 ^{b-g}	0.781 ^{g-i}	0.841 ^{ef}	0.801 ^{f-h}	1.290 ^a	3106 ^{a-c}	1790 ^{mv}	2683 ^{b-h}	1570 ^{r-w}
19	68.0 ^{b-d}	38.3 ^{n-p}	68.3 ^{b-d}	62.7 ^{b-g}	0.393 ^o	0.493 ^m	0.45 ^{m-o}	1.008 ^b	2808 ^{b-e}	1843 ^{l-v}	2709 ^{b-g}	1530 ^{r-w}
20	61.7 ^{b-g}	33.9 ^{op}	94.0 ^a	58.0 ^{c-j}	0.43 ^{no}	0.641 ^{kl}	0.60 ^{k-m}	0.701 ^{jk}	2642 ^{b-i}	1717 ^{p-v}	2630 ^{b-h}	1345 ^{t-w}

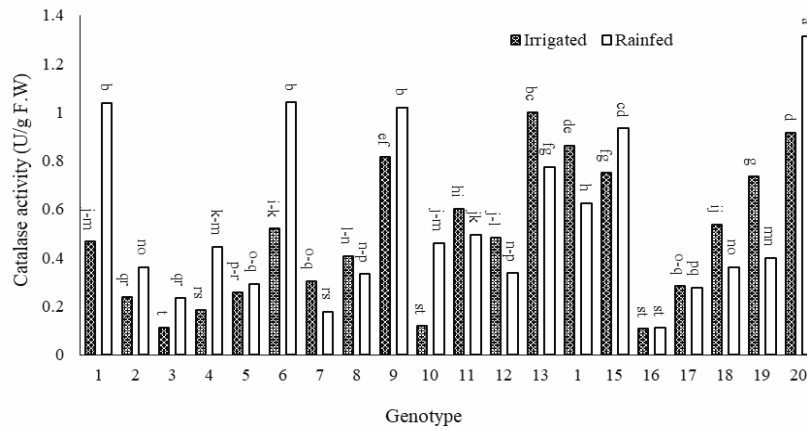
میانگین‌های دارای حروف مشترک برای هر جزء براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means with same letter(s) for each component have not significantly different based on Duncan test at 5% probability level.



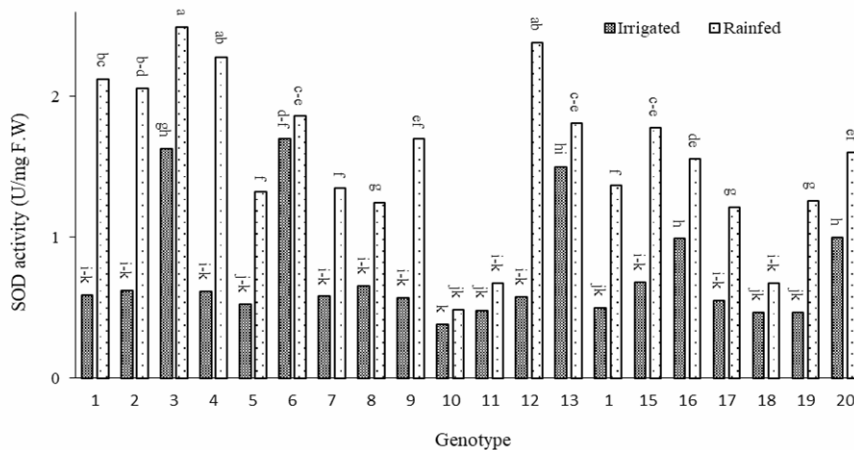
شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری و ژنوتیپ بر محتوای پرولین گندم

Figure 1- Mean comparisons for the interaction effects of irrigation and Genotype on prolin content of wheat



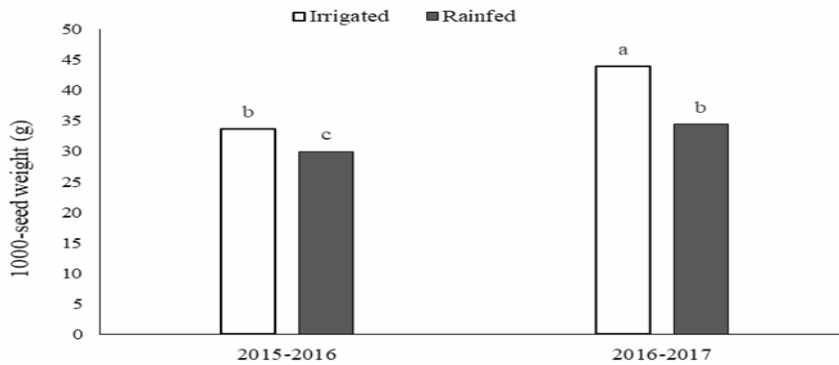
شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری و ژنوتیپ بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز

Figure 2- Mean comparisons for the interaction effects of irrigation and genotype on catalase activity



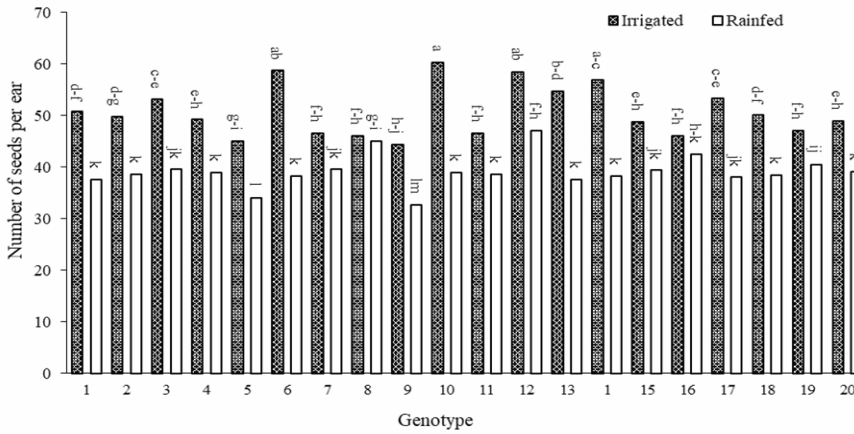
شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری و ژنوتیپ بر میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز

Figure 3- Mean comparisons for the interaction effects of irrigation and genotype on SOD activity



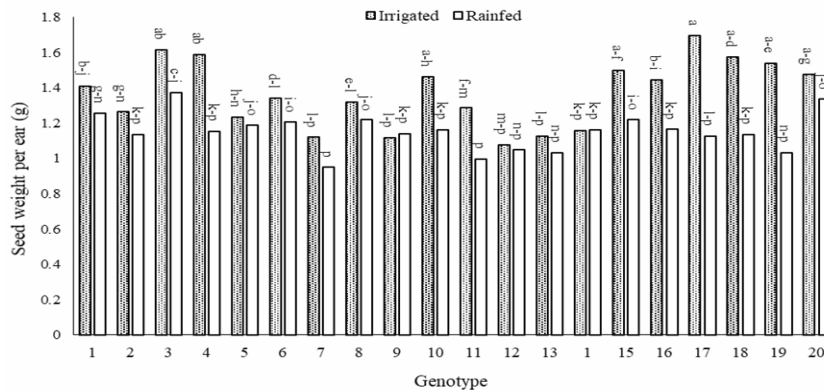
شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری و سال بر وزن هزاردانه گندم

Figure 4- Mean comparisons for the intraction effects of irrigation and year on 1000-seed weight of wheat



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری و ژنوتیپ بر تعداد دانه در سنبله گندم

Figure 5- Mean comparisons for the intraction effects of irrigation and genotype on number of seeds per ear of wheat



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری و ژنوتیپ بر وزن دانه در سنبله گندم

Figure 6- Mean comparisons for the intraction effects of irrigation and genotype on weight of seeds per ear of wheat

References

منابع مورد استفاده

- Anjum, S.A., X.Y. Xie, L.C. Wang, M.F. Saleem, C. Man, and W. Lei. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*. 6(9): 2026-2032.
- Ashraf, M., and M.R. Foolad. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*. 59: 206-216.
- Aslam, M., M.S.I. Zamir, I. Afzal, M. Yaseen, M. Mubeen, and A. Shoaib. 2013. Drought stress, its effect on maize production and development of drought tolerance through potassium application. *Cercetări Agronomice în Moldova*. 46(2): 99-114.
- Bagheripour, M., H. Heydari sharif abad, A. Mehraban, and H. Ganjali. 2021. Investigation of the limiting factors of wheat seed yield in the Eastern region of Kerman. *Journal of Crop Ecophysiology*. 15(59): 435-450. (In Persian).
- Bahamin, S., A. Koocheki, M. Nassiri Mahallati, and S. Behashti. 2019. Effect of biological and chemical fertilizers of nitrogen and phosphorus on quantitative and qualitative productivity of maize under drought stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 12(1): 123-139. (In Persian).
- Bahamin, S., A. Koocheki, M. Nassiri Mahallati, and S. Behashti. 2021. Effect of nitrogen and phosphorus fertilizers on yield and nutrient efficiency indices in maize under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 14(3): 675-690. (In Persian).
- Barnabás, B., K. Jäger, and A. Fehér. 2008. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell and Environment*. 31(1): 11-38.
- Bates, L.S., R.P. Waldern, and I.D. Teave. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*. 39: 205-207.
- Bayoumi, T.Y., M.H. Eid, and E.M. Metwali. 2008. Application of physiological and biochemical indices as a screening technique for drought tolerance in wheat varieties. *African Journal of Biotechnology*. 7: 2341-2352.
- Beyer, W.F., and I. Fridovich. 1987. Assaying for superoxide dismutase activity: some large consequences of minor changes in conditions. *Annals of Biochemistry*. 161: 559-566.
- Blum, A. 2011. Plant breeding for water-limited environments. Springer Verlag.
- Dawoudian, J., S. Bahamin, and H.B. Tantoh. 2021. Environmental impact assessment of cement industries using mathematical matrix method: case of Ghayen cement, South Khorasan, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 28(18): 22348-22358.
- Fathi, A., and S. Bahamin. 2018. The effect of irrigation levels and foliar application (zinc, humic acid and salicylic acid) on growth characteristics, yield and yield components of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 11(3): 661-674. (In Persian).
- Foladvand, F., H. Khoshkhabar, N. Naghdi, M. Hosseinabadi, S. Bahamin, and A. Fathi. 2017. The effect of sowing date and nitrogen on yield, and essential oil of German chamomile. *Scientia Agriculturae*. 19(3): 85-92.
- Ghazvineh, S., A. Valadabadi, A. Abdolahi, S. Seyfzadeh, and H. Zakerin. 2020. Response of durum wheat genotypes to different planting dates and plant densities under dryland conditions. *Journal of Crop Ecophysiology*. 14(55): 401-422. (In Persian).

- Gill, S.S., and N. Tuteja. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*. 48(12): 909-930.
- Huang, J., S. Sun, D. Xu, H. Lan, H. Sun, Z. Wang, Y. Bao, J. Wang, H. Tang, and H. Zhang. 2012. A TFIIIA-type zinc finger protein confers multiple abiotic stress tolerances in transgenic rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Molecular Biology*. 80(3): 337-350.
- Isendahl, N., and G. Schmidt. 2006. Drought in the Mediterranean-WWF policy proposals. WWF Report, Madrid.
- Jin, J., N. Shan, N. Ma, J. Bai, and J. Gao. 2006. Regulation of ascorbate peroxidase at the transcript level is involved in tolerance to postharvest water deficit stress in the cut rose (*Rosa hybrida* L.) cv. Samantha. *Postharvest Biology and Technology*. 40(3): 236-243.
- Kardoni, F., S. Bahamin, B. Khalil Tahmasebi, S. Ghavim-Sadati, and S. Vahdani. 2019. Yield comparisons of mung-bean as affected by its different nutritions (chemical, biological and integration) under tillage systems. *Journal of Crop Ecophysiology*. 13(49): 87-102. (In Persian).
- Khoshkhabar, H., M. Jafari, A. Feilinezhad, and S. Bahamin. 2015. Effect of Sodium Silicate on the Yield and Yield Components of Pea under Salinity Stress. *Biological Forum – An International Journal*. 7(1):1045-1049.
- Koc, E., C. İlek, and A.S. Üstun. 2010. Effect of cold on protein, proline, phenolic compounds and chlorophyll content of two pepper (*Capsicum annum* L.) varieties. *Gazi University Journal of Science*. 23: 1-6.
- Lascano, H.R., G.E. Antoniceln, C.M. Luna, M.N. Melchlone, L.D. Gomez and M. Caseno. 2005. Antioxidant system response of different wheat cultivars under drought: field and in vitro studies. *Australian Journal of Plant Physiology*. 28: 1095-1102
- Majer P., L. Sass, T. Lelley, L. Cseuz, I. Vass, D. Dudits, and J. Pauk. 2008. Testing drought tolerance of wheat by a complex stress diagnostic system installed in greenhouse. *Acta Biologica Szegediensis*. 52: 97-100.
- Maleki, A., A. Fathi, and S. Bahamin. 2020. The effect of gibberellin hormone on yield, growth indices, and biochemical traits of corn (*Zea Mays* L.) under drought stress. *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research*. 15(59):1-16. (In Persian with English Summary).
- Movludi, A., A. Ebadi, S. Jahanbakhsh, M. Davari, and G.H. Parmoon. 2014. The effect of water deficit and nitrogen on the antioxidant enzymes activity and quantum yield of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 42: 398-404.
- Naveed, M., M. Prabhakaran, and C.A. Gunter. 2014. Dynamic searchable encryption via blind storage. In Security and Privacy (SP), 2014 IEEE Symposium (pp. 639-654). IEEE.
- Nouri, A., A. Etminan, J.A.T.D. Silva, and R. Mohammadi. 2011. Assessment of yield, yield-related traits and drought tolerance of durum wheat varieties (*Triticum turjidum* var. durum Desf.). *Australian Journal of Crop Science*. 5: 8-16.
- Ohe, M., M. Rapolu, T. Mieda, Y. Miyagawa, Y. Yabuta, K. Yoshimura, and S. Shigeoka. 2005. Decline in leaf photooxidative-stress tolerance with age in tobacco. *Plant Science*. 168(6): 1487-1493.

- Rampino, P., S. Pataleo, C. Gerardi, G. Mita, and C. Perrotta. 2006. Drought stress response in wheat: physiological and molecular analysis of resistant and sensitive genotypes. *Plant, Cell and Environment*. 29: 2143-2152.
- Ranieri, A., A. Castagna, J. Pacini, B. Baldan, A. Mensuali Sodi, and G.F. Soldatini. 2003. Early production and scavenging of hydrogen peroxide in the apoplast of sunflower plants exposed to ozone. *Journal of Experimental Botany*. 54: 2529-2540.
- Rao, S.C., and J. Ryan. 2004. Challenges and strategies of dryland agriculture. CSSA Spec. Publication 32. CSSA and ASA, Madison, WI.
- Rebetzke, G.J., R.A. Richards, A.G. Condon, and G.D. Farquhar. 2006. Inheritance of carbon isotope discrimination in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*. 150: 97-106
- Rezaei, A., B. Lotfi, M. Jafari, and S. Bahamin. 2015. Survey of effects of PGPR and salinity on the characteristics of *Nigella* leaves. In *Biological Forum-An International Journal*. 7: 1085-1092.
- Saeidi, M., and M. Abdoli. 2018. Effect of drought stress during grain filling on yield and its components, gas exchange variables, and some physiological traits of wheat cultivars. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 17(4):885-898.
- Safari, K., Y. Sohrabi, A. Siosemardeh, and S. Sasani. 2021. Effect of seed priming on some morphophysiological characteristics, yield and seed protein content in three dryland wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Journal of Crop Ecophysiology*. 15(59): 341-362. (In Persian).
- Scebba, F., L. Sebastiani, and C. Vitagliano. 1998. Changes in activity of antioxidative enzymes in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings under cold acclimation. *Physiologia Plantarum*. 104: 747-752
- Seraj, R., and T.R. Sinclair. 2004. Inhibition of nitrogenase activity and nodule oxygen permeability by water deficit. *Journal of Experimental Botany*. 47: 1067-1073.
- Shamsibeiranvand, Z., Z. Sadeghi, H. Khoshkhabar, M. Hosseinabadi, and S. Bahamin. 2017. Survey some physiological characteristics of medicinal plant *Scrophularia striata* Boiss in Ilam province. *Scientia Agriculturae*. 19(3): 62-68.
- Yang, J., and J. Zhang. 2006. Grain filling of cereals under soil drying. *New Phytologist*. 169(2): 223-236.
- Yordanov, I., V. Velikova, and T. Tsonev. 2003. Plant responses to drought and stress tolerance. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*. (Special Issue), 187-206.
- Zabet, M., S. Bahamin, S. Ghoreishi, H. Sadeghi, and S. Moosavi. 2015. Effect of deficit irrigation and nitrogen fertilizer on quantitative yield of aboveground part of forage pear millet (*Pennisetum glaucum*) in Birjand. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 7(2): 187-194. (In Persian).
- Zhao, C.X., M.R. He, Z.L. Wang, Y.F. Wang, and Q. Lin. 2009. Effects of different water availability at post-anthesis stage on grain nutrition and quality in strong-gluten winter wheat. *Comptes Rendus Biologies*. 332(8): 759-764.
- Zlatev, Z.S., and I.T. Yordanov. 2004. Effects of soil drought on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in bean plants. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*. 30(3-4): 3-18.

Research Article

DOI: 10.30495/JCEP.2022.1885605.1642

The Effect of Drought Stress on Yield and Agrophysiological Characteristics of Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes under Irrigated and Rainfed Conditions

Hamid Khoshkhabar¹, Abbas Maleki^{2*}, Mohammad Mirzaeiheydari² and Farzad Babaii²

Received: December 2019, Revised: 22 September 2020, Accepted: 4 November 2020

Abstract

This study was carried out in a split plot experiment based on randomized complete block design with three replications at Sarableh Agriculture Research Station in Ilam. Irrigation and non-irrigation (rainfed cultivation) were assigned to the main plots and 20 wheat genotypes to the sub plots. The amount of total SOD, CAT, and APX activities, RWC, prolin and yield were measured. Irrigated condition showed a significant difference effect on grain yield, yield, 1000 grain weight, grain number per spike, relative leaf water content, prolin content and anti-oxidant enzymes activities. Relative water content of leaves decreased by 33% and 21% compared to optimal irrigation conditions in the first and second years of experiment, respectively. Prolin content increased by 81% in rainfed conditions. Catalase, Superoxide Dismutase and Ascorbate peroxidase activities were also increased under rainfed condition. Significant variation was observed among genotypes for traits under study and the rate of variation of traits under dryland conditions was not similar for different genotypes. Cultivation under rainfed conditions decreased grain number per spike (24%) and grain weight per spike (16%). Cultivation under rainfed conditions reduced grain yield by 29 and 41% in the first and second year, respectively. But, the percentage of yield losses in both two years of experiment were not similar for different genotypes. The results showed that the rainfed condition affected the crop yield, and all of traits under experiment. Thus, the means of traits of genotypes under irrigated and rainfed conditions were significantly different. The activity of antioxidant enzymes (catalase and superoxide dismutase and ascorbate peroxidase), relative water content of leaf and proline percentages in rainfed conditions were significantly increased as compared to irrigated condition.

Key words: Anti-oxidant enzymes, Drought stress, Prolin, Seed Yield.

1- Ph.D. Student of Agronomy, Department of Agriculture, College of Agriculture, Islamic Azad University, Ilam Branch, Ilam, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture, Islamic Azad University, Ilam Branch, Ilam, Iran.

*Corresponding Author: malekiabbas97@gmail.com

