

## تأثیر تنش خشکی بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و صفات مرتبط با مرگ سلولی در مرحله پر شدن دانه در ارقام مقاوم و حساس گندم

حجت هاشمی نسب<sup>۱\*</sup>، محمد تقی آساد<sup>۲</sup> و یحیی امام<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۲/۱۶)

### چکیده

خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی در ایران می‌باشد. به منظور بررسی چند معیار بیوشیمیایی مقاومت به خشکی در ارقام گندم، ۲۰ رقم گندم ایرانی شامل ۱۸ رقم گندم نان و ۲ رقم گندم ماکارونی در یک آزمایش مزرعه‌ای در سال زراعی ۱۳۸۸-۸۹ در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در منطقه باجگاه مورد ارزیابی قرار گرفتند. این آزمایش در قالب دو طرح بلوک کامل تصادفی جدا از هم و با دو سطح رطوبتی مطلوب (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه) و تنش خشکی (۴۵ درصد ظرفیت مزرعه) و با سه تکرار اجرا گردید. تنش خشکی باعث افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در مرحله پر شدن دانه شد و سوپراکسید دیسموتاز (SOD) بیشترین افزایش فعالیت را نشان داد. هم‌چنین میزان لیپیداسیون غشا سلولی (MDA)، پراکسید هیدروژن ( $H_2O_2$ )، نشت یونی (LE) و مرگ سلولی (CD) نیز به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و میزان پایداری غشا سلولی کاهش معنی‌داری نشان داد. طی این آزمایش مشخص شد که ارقام مقاوم مانند پیشتاز و چمران دارای بیشترین مقدار فعالیت آنتی‌اکسیدانی و کمترین میزان لیپیداسیون غشا سلولی، تجمع پراکسید هیدروژن، مرگ سلولی و در نتیجه آن بالاترین سطح پایداری غشا سلولی بودند. این روند در ارقام حساس مانند الموت و زرین عکس بود. از میان آنتی‌اکسیدان‌های مورد ارزیابی پراکسیداز (POD) و سوپراکسید دیسموتاز دارای همبستگی معنی‌داری با شاخص پایداری عملکرد بودند. پراکسید هیدروژن و شاخص پایداری غشا سلولی دارای بالاترین همبستگی با شاخص پایداری عملکرد در میان سایر معیارهای مورد ارزیابی بودند. هم‌چنین پیشتاز و الموت به‌ترتیب به‌عنوان مقاوم‌ترین و حساس‌ترین رقم شناخته شدند.

واژه‌های کلیدی: گندم، تنش خشکی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، مرگ سلولی، لیپیداسیون غشا سلولی، پراکسید هیدروژن

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی کرمانشاه

۲. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hojathashemi@gmail.com

## مقدمه

می‌تواند به‌عنوان یک گیرنده الکترون جایگزین NADP شود. این امر منجر به تجمع گونه‌های سمی اکسیژن (ROS) مانند سوپر اکسید ( $O_2^-$ )، پراکسید هیدروژن ( $H_2O_2$ ) و هیدروکسیل ( $HO_2$ ) می‌شود (۶، ۱۲ و ۱۶) که از میان آنها پراکسید هیدروژن دارای طول عمر و خسارت‌زایی بیشتر می‌باشد (۲۷). تجمع گونه‌های فعال اکسیژن که در طی تنش تولید می‌شوند باعث خسارت به بسیاری از ترکیبات سلولی از جمله DNA، پروتئین، چربی، کلروفیل و از همه مهم‌تر غشا سلولی و در نهایت مرگ سلول می‌شوند (۱۴ و ۲۸). گیاهان دارای یک سری سیستم‌های آنزیمی و غیر آنزیمی برای جلوگیری از خسارت رادیکال‌های آزاد اکسیژن و در پی آن سازگاری با تنش خشکی هستند. آنتی اکسیدان‌ها مهم‌ترین سیستم آنزیمی و دفاعی گیاهان در مقابله با تنش خشکی را تشکیل می‌دهند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POD)، سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، اسکوربیک پراکسیداز (APX) و گلوکاتایون ردوکتاز (GR) اشاره کرد (۱۸ و ۲۵). از مهم‌ترین سیستم‌های غیر آنزیمی می‌توان پرولین، بتائین، اسید اسکوربیک و کاروتنوئیدها را نام برد (۱۲ و ۲۴). هدف از این مطالعه بررسی تأثیر تنش خشکی بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و صفات مرتبط با مرگ سلولی و میزان خسارت به غشا سلولی در مرحله پر شدن دانه در ارقام مقاوم، نیمه مقاوم و حساس گندم بود.

## مواد و روش‌ها

هجده رقم اصلاح شده گندم نان (*Triticum aestivum* L.) شامل ۶ رقم مقاوم (آذر ۲، پیش‌تاز، توس، چمران، کویر و کوه‌دشت)، ۶ رقم حد واسط (روشن، الوند، طوسی، نیک نژاد، کراس عدل و داراب ۲) و ۶ رقم حساس (شیراز، شیرودی، فلات، بهار، زرین و الموت) به همراه دو رقم گندم دورم (*Triticum turgidum* L.) شامل یاوروس و سیمره به‌عنوان شاهد، در سال ۱۳۸۹-۱۳۸۸ طی دو آزمایش مزرع‌ای مجزا و در مجاور هم در قالب دو طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار، در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه

خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی در دنیاست و امروزه به‌دلیل تغییرات آب و هوایی و گرم‌تر شدن کره زمین به اهمیت آن افزوده شده و به یکی از مهم‌ترین موضوعات در علوم زیستی تبدیل شده است. گندم غذای اصلی بیش از ۳۵ درصد مردم جهان را تشکیل می‌دهد و خشکی مهم‌ترین عامل کاهش تولید آن می‌باشد (۲۸). کشور ایران در کمربند بیابانی جهان قرار دارد و به‌عنوان مناطق خشک و نیمه خشک جهان محسوب می‌شود و ۱/۲ درصد از خشکی‌های جهان را به خود اختصاص داده است. متوسط میزان بارندگی در کشور حدود ۲۵۰ میلی‌لیتر است که این میزان یک سوم متوسط بارندگی در جهان می‌باشد. گرچه مساحت کشور ایران ۱۶۵ میلیون هکتار است ولی فقط ۱۱ میلیون هکتار آن قابل کشت محصولات زراعی است و نزدیک به دو سوم از این مقدار تحت تنش خشکی قرار دارند. به‌دلیل محدود بودن منابع آبی در کشور ۵/۵ میلیون هکتار از زمین‌های زراعی به‌صورت دیم کشت می‌شوند (۲۲).

بیش از ۶۰ درصد مزارع گندم در ایران زیر کشت دیم می‌باشد و تنش خشکی مهم‌ترین عامل محدودکننده کشت آن در ایران محسوب می‌شود (۱۵). مرحله پر شدن دانه یکی از حساس‌ترین مراحل رشد گندم به تنش خشکی می‌باشد. تنش خشکی در این مرحله سبب کاهش شدید عملکرد دانه می‌گردد و این در حالی است که در اکثر مواقع این مرحله از رشد با تنش خشکی روبرو می‌شود (۱۵ و ۲۸). تنش خشکی باعث بسته شدن روزنه‌ها و کاهش میزان فتوسنتز و رشد گیاه می‌گردد. بسته شدن روزنه‌ها باعث کاهش تمرکز دی اکسیدکربن ( $CO_2$ ) در بافت مزوفیلی برگ و در نتیجه آن افزایش تجمع NADPH می‌شود. تحت چنین شرایطی مقدار محدودی NADP برای پذیرش الکترون وجود خواهد داشت. این در حالی است که واکنش نوری و انتقال الکترون در مقادیر طبیعی خود صورت می‌گیرد. این شرایط در روزهای آفتابی که حداکثر تشعشع وجود دارد شدت می‌یابد. بنابراین اکسیژن

مرحله به هر لوله آزمایش ۴ میلی‌لیتر تولوئن اضافه کرده و نمونه‌ها با هم‌زن به مدت ۲۰-۱۵ ثانیه به هم زده شده تا کاملاً یکنواخت شوند. سپس لوله‌ها برای مدتی در محیط آزمایشگاه قرار داده شدند. در این مدت در داخل لوله آزمایش ۲ فاز رویی و زیرین کاملاً از هم قابل تشخیص شده و از فاز رویی برای تعیین غلظت پرولین با توجه به منحنی استاندارد پرولین در دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر استفاده گردید.

#### اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌ها آنتی‌اکسیدانی

برای استخراج آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، ۰/۵ گرم برگ پرچمی فریز شده را با بافر فسفات که شامل یک میلی‌مولار EDTA، یک میلی‌مولار PMSF و یک درصد PVP-40 بود کاملاً هم‌زنیزه کرده و سپس به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴ درجه با ۱۵۰۰۰g سانتریفیوژ نموده و از محلول رویی برای قرائت فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها استفاده شد.

برای اندازه‌گیری میزان فعالیت کمی سوپر اکسید دیسموتاز (SOD) از روش بیچامپ و فریدوویچ (۹) استفاده شد. اندازه‌گیری براساس توانایی آنزیم SOD در متوقف کردن احیاء فتوشیمیایی نیتروبلوترازولیوم (NBT) توسط رادیکال‌های سوپر اکسید با کمک ریوفلاوین در حضور نور صورت می‌گیرد. براساس این روش ۵۰ میکرولیتر از عصاره استخراج را با یک میلی‌لیتر محلول اندازه‌گیری سوپراکسید دیسموتاز که شامل ۵۰ میلی‌مولار بافر فسفات پتاسیم (pH=۷/۸)، ۷۵ میکرومولار NBT، ۱۳ میلی‌مولار ال-متیونین، ۰/۱ میلی‌مولار EDAT و ۲ میکرومولار ریوفلاوین است مخلوط شد. جهت انجام واکنش این مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه در اتاقک نور قرار گرفت. سپس محلول حاصل را در دستگاه اسپکتروفتومتر قرار داده و میزان جذب نوری آن در طول موج ۵۶۰nm قرائت گردید.

برای اندازه‌گیری میزان غلظت کمی پراکسیداز (POD) از روش چانس و ماهلی (۱۳) استفاده شد. اندازه‌گیری براساس میزان اکسید شدن گوایکول توسط این آنزیم انجام می‌گیرد. در این روش ۳۳ میکرولیتر از عصاره استخراج را با یک میلی‌لیتر از

شیراز واقع در منطقه باجگاه (۱۸۱۰ متر ارتفاع از سطح دریا، طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی) کشت شدند. دو آزمایش فقط از نظر تیمار آبیاری با یک دیگر متفاوت بودند. برای آزمایش اول تیمار آبیاری مطلوب (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه) و برای آزمایش دوم تیمار آبیاری محدود (۴۵ درصد ظرفیت مزرعه) اعمال شد. میزان آب مورد نیاز برای هر بار آبیاری تا رسیدن رطوبت خاک به حد ظرفیت مزرعه از روش مایکل و اوجا (۲۱) محاسبه شد. در هر دو آزمایش از کود شیمیایی سوپر فسفات تریپل (۴۱ درصد فسفر) و کود اوره (۴۶ درصد نیتروژن) به ترتیب به مقدار ۱۵۰ و ۱۱۰ کیلوگرم در هکتار استفاده گردید و اندازه کرت‌ها ۲×۳ متری در نظر گرفته شد. هم‌چنین خاک مزرعه تحقیقاتی دارای pH=۷/۸، هدایت الکتریکی ۰/۳۹۵ دیسی‌زمنس بر متر، ۵۲ درصد رس، ۴۲/۷۲ درصد سیلت و ۵/۲۸ درصد شن بود. نمونه‌برداری جهت اندازه‌گیری معیارهای مورد ارزیابی در مرحله پر شدن دانه و از برگ پرچمی صورت گرفت.

#### اندازه‌گیری پرولین

برای اندازه‌گیری غلظت پرولین از روش بیتز و همکاران (۸) استفاده شد. براساس این روش ۰/۵ گرم برگ از هر نمونه را در ۱۰ میلی‌لیتر محلول آبی اسید سولفوسالیسیلیک ۳ درصد قرار داده و مخلوط حاصل در حاوین چینی به کمک ازت مایع کاملاً هم‌زنیزه گردید. سپس مخلوط هم‌زنیزه شده توسط کاغذ صافی کاملاً صاف شد. در مرحله بعد ۲ میلی‌لیتر از این محلول را با ۲ میلی‌لیتر معرف نین هیدرین (برای تهیه این معرف ۱/۲۵ گرم نین هیدرین را در ۳۰ میلی‌لیتر اسید استیک و ۲۰ میلی‌لیتر اسید فسفریک ۶ مولار حل می‌کنند) مخلوط نموده و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک به هر لوله اضافه شد. سپس نمونه‌ها به مدت یک ساعت در حمام بن ماری در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده، و بلافاصله پس از خارج کردن از حمام به مدت چند دقیقه در حمام یخ قرار داده شدند. بعد از این

هاون چینی حاوی ۵ میلی لیتر تری کلرو استیک اسید (TCA) ۰/۱ درصد سائیده شد. عصاره حاصل به مدت ۵ دقیقه در ۱۰۰۰۰g سانتیفریوژ گردید. در مرحله بعد ۲۵۰ میکرولیتر از محلول رویی حاصل از سانتیفریوژ را با ۱ میلی لیتر محلول مالون دی آلدهید که حاوی تری کلرواستیک اسید (TCA) ۲۰ درصد و تیو باربیتوریک اسید (TBA) ۰/۵ درصد است، مخلوط گردید. مخلوط حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد در حمام بن ماری حرارت داده شد. سپس بلافاصله در یخ سرد شده و دوباره مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰g سانتیفریوژ گردید. شدت جذب این محلول با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۳۲ نانومتر قرائت شد. جذب بقیه رنگیزه‌های غیراختصاصی در ۶۰۰ نانومتر تعیین و از مقدار حاصل کسر گردید.

برای اندازه‌گیری میزان پراکسید هیدروژن ( $H_2O_2$ ) از روش الکسیوا و همکاران (۴) استفاده شد. طبق این روش ۰/۲۵ گرم برگ گندم در هاون چینی حاوی ۵ میلی لیتر تری کلرو استیک اسید (TCA) ۰/۱ درصد سائیده شد. عصاره حاصل به مدت ۵ دقیقه در ۱۰۰۰۰g سانتیفریوژ گردید. در مرحله بعد ۲۵۰ میکرولیتر از محلول رویی حاصل از سانتیفریوژ را با ۲۵۰ میکرولیتر بافر فسفات ۱۰۰ میلی مولار و ۵۰۰ میکرولیتر یدید پتاسیم (KI) یک مولار مخلوط کرده و جذب آن را در ۳۹۰nm قرائت گردید.

برای اندازه‌گیری میزان کمی شاخص پایداری غشا سلولی (MSI) و پارامترهای مرتبط با آن از روش سایرام (۲۶) استفاده شد. براساس این روش ۰/۱ گرم برگ را داخل ۱۰ میلی لیتر آب دو بار تقطیر شده قرار دادیم. بعد از آن نمونه را به مدت ۳۰ دقیقه داخل آب ۴۰ درجه سانتیگراد قرار داده و میزان هدایت الکتریکی (EC) آن با کمک دستگاه EC متر قرائت گردید ( $C_1$ ) سپس نمونه را به مدت ۱۵ دقیقه داخل حمام بن ماری با دمای ۱۰۰ درجه قرار داده و برای بار دوم هدایت الکتریکی آن قرائت گردید ( $C_2$ )، و براساس روابط زیر شاخص‌های مورد نظر محاسبه گردید.

محلول پراکسیداز که شامل ۱۳ میلی مولار گوایکول، ۵ میلی مولار پراکسید هیدروژن ( $H_2O_2$ ) و ۵۰ میلی مولار بافر فسفات پتاسیم (pH=۷) است مخلوط شده و به مدت یک دقیقه با فواصل ۱۰ ثانیه در طول موج ۴۷۰ nm جذب آن قرائت گردید. برای ساختن ۱۰۰ میلی لیتر بافر فسفات پتاسیم، ۳۹ میلی لیتر فسفات پتاسیم مونو بازیک ۵۰ میلی مولار با ۶۱ میلی لیتر فسفات پتاسیم دی بازیک ۵۰ میلی مولار ترکیب شد.

برای اندازه‌گیری فعالیت کمی آنزیم کاتالاز (CAT) از روش دهنندا و همکاران (۱۴) استفاده شد. براساس این روش ۵۰ میکرولیتر از عصاره استخراج را با یک میلی لیتر محلول اندازه‌گیری کاتالاز که شامل ۵۰ میلی مول بافر فسفات پتاسیم (pH=۷) و ۱۵ میلی مول پراکسید هیدروژن ( $H_2O_2$ ) است مخلوط نموده، سپس جذب آن در طول موج ۲۴۰nm به مدت یک دقیقه با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت گردید. یک واحد آنزیمی کاتالاز برابر با تجزیه یک میلی مولار پراکسید هیدروژن ( $H_2O_2$ ) در یک دقیقه است.

برای اندازه‌گیری میزان غلظت کمی آنزیم اسکوربیک پراکسیداز (POD) از روش ناکانو و آسادا (۲۳) استفاده شد. براساس این روش ۵۰ میکرولیتر از عصاره استخراج را با یک میلی لیتر محلول اندازه‌گیری اسکوربیک پراکسیداز که شامل ۵۰ میلی مول بافر فسفات پتاسیم (pH=۷)، ۰/۱ میلی مول EDTA، ۰/۵ میلی مولار اسید اسکوربیک (ASA) و ۰/۱۵ میلی مولار پراکسید هیدروژن ( $H_2O_2$ ) است مخلوط نموده، سپس جذب آن در طول موج ۲۹۰nm بعد از مدت یک دقیقه با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت گردید. یک واحد آنزیمی اسکوربیک پراکسیداز برابر با تجزیه یک میلی مولار اسید اسکوربیک در یک دقیقه است.

#### لیپیداسیون غشا سلولی و صفات مرتبط با آن

برای اندازه‌گیری تجمع مالون دی آلدهید (MDA) که نشان‌دهنده میزان لیپیداسیون غشا سلولی می‌باشد از روش هیز و پکر (۱۸) استفاده شد. طبق این روش ۰/۲۵ گرم برگ گندم در

افزایش تجمع در همه ارقام مقاوم یکنواخت نبود (۱). پروالتم و همکاران (۲۴) نشان دادند که تنش خشکی باعث افزایش معنی‌دار تجمع پرولین در ارقام مقاوم گندم می‌گردد. آنها این افزایش را دلیل ایجاد مقاومت به خشکی در این ارقام دانستند. از آنجا که پرولین یکی از حساس‌ترین اسمولیت‌های مقاومت به خشکی می‌باشد، تنش خشکی باعث افزایش شدید در تجمع این اسید آمینه می‌گردد. به همین دلیل در بسیاری از پژوهش‌ها از آن به‌عنوان شاخصی برای سایر معیارهای بیوشیمیایی دیگر در جهت تشخیص شدت تنش استفاده می‌شود. پرولین یکی از تنظیم‌کننده‌های اسمزی مؤثر در مقاومت به خشکی می‌باشد. هم‌چنین می‌توان آن را به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان غیرآنزیمی دانست که با حذف رادیکال‌های آزاد اکسیژن از مرگ سلول‌ها در برابر تنش‌های محیطی جلوگیری می‌کند (۱۲ و ۲۷).

تنش خشکی هم‌چنین فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) را به‌طور بسیار معنی‌داری ( $P < 0/01$ ) افزایش داد (جدول ۱). این افزایش در ارقام مقاوم بیشتر از ارقام حساس بود به‌طوری‌که در بسیاری از ارقام حساس از جمله زرین و الموت این افزایش معنی‌دار نبود. از آنجا که کاتالاز با حذف پراکسید هیدروژن نقش مؤثری در مقاومت به خشکی دارد وجود فعالیت بیشتر این آنزیم می‌تواند نشان‌دهنده مقاومت بیشتر گیاه باشد (۲ و ۵). دو رقم کوه‌دشت و الموت به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین فعالیت کاتالاز در بین ارقام گندم نان بودند و این در حالی است که این دو رقم به‌ترتیب جزء مقاوم‌ترین و حساس‌ترین ارقام محسوب می‌شوند. ارقام گندم دورم نیز فعالیت بالایی از این آنزیم را نشان دادند (۳). تنش خشکی هم‌چنین باعث افزایش بسیار معنی‌دار ( $P < 0/01$ ) اسکورییک پراکسیداز (APX) گردید (جدول ۱). این افزایش همانند کاتالاز در ارقام مقاوم بسیار بالاتر از ارقام حساس بود. ارقام پیش‌تاز و طوسی بالاترین میزان فعالیت این آنزیم را دارا بودند و ارقام الموت و زرین نیز کمترین فعالیت را نشان دادند. هم‌چنین ارقام گندم دورم دارای متوسط فعالیت بالاتری نسبت به ارقام گندم نان بودند. از آنجا که اسکورییک پراکسیداز با کمک اسید اسکورییک باعث حذف

$$MSI = (1 - C_1 / C_p) \times 100$$

$$I\% = 1 - (T - D) / (T - C) \times 100$$

$$EL = C_1 / C_p$$

$$CMS = \left( \frac{1 - \left( \frac{T_1}{T_2} \right)}{1 - \left( \frac{C_1}{C_2} \right)} \right) \times 100$$

که در رابطه I% حروف C, D و T به‌ترتیب میزان نشت یونی (EL) در شرایط کنترل، تنش و کل (C + D) را نشان می‌دهند. و در رابطه CMS حروف C و T به‌ترتیب نشان‌دهنده میزان هدایت الکتریکی در شرایط کنترل و تنش می‌باشند.

### اندازه‌گیری عملکرد

اندازه‌گیری عملکرد در زمان رسیدگی فیزیولوژیک و با قرار دادن نمونه‌ها در دمای ۷۰ درجه به‌مدت ۷۲ ساعت صورت گرفت. اندازه‌گیری شاخص پایدار عملکرد (YSI) از روش بوسلاما و اسچاپا (۱۱) و با تقسیم عملکرد در شرایط تنش (Ys) بر عملکرد در شرایط نرمال (Yp) محاسبه شد.

$$YSI = (Ys / Yp)$$

### نتایج و بحث

#### پرولین و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

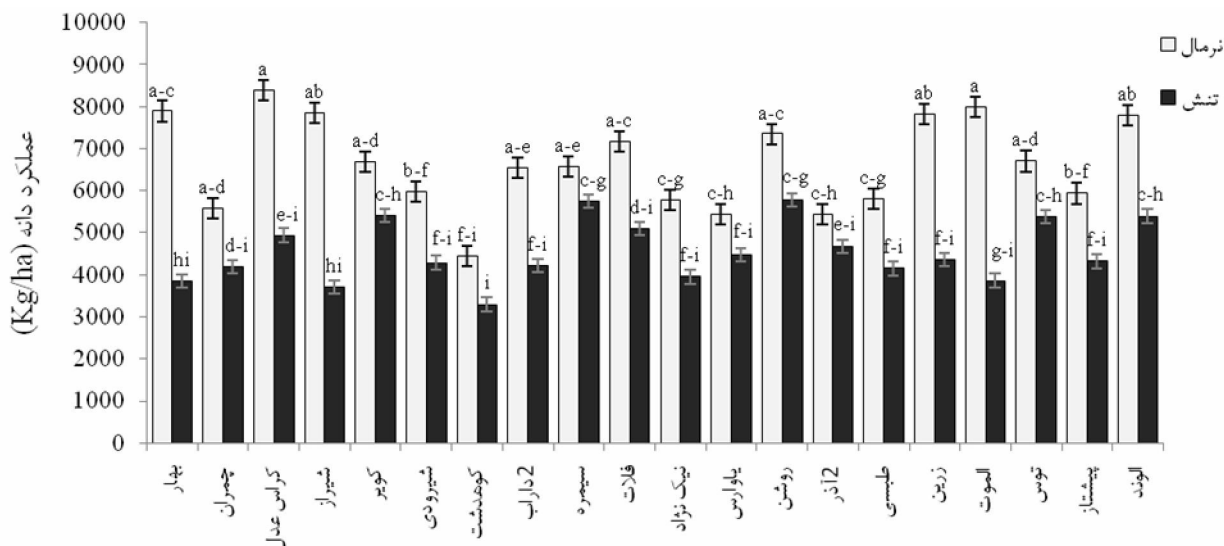
نتایج به‌دست آمده از تجزیه مرکب داده‌ها نشان داد که تنش خشکی باعث افزایش بسیار معنی‌دار ( $P < 0/01$ ) پرولین در ارقام مختلف گردید (جدول ۱). این افزایش در بیشتر ارقام نسبت به شاهد معنی‌دار بود. میزان تجمع پرولین در ارقام مقاوم مانند کوه‌دشت، توس و پیش‌تاز از افزایش بیشتری برخوردار بود. این ارقام در شرایط تنش خشکی از کاهش عملکرد پایین‌تری نیز برخوردار بودند (شکل ۱). ارقام بهار، زرین و نیک‌نژاد که تجمع پرولین پایین‌تری در شرایط تنش خشکی نشان دادند، دارای پایداری عملکرد (YSI) پایین‌تری در این شرایط بودند (شکل ۲). این افزایش بیشتر در ارقام مقاوم می‌تواند تأییدکننده نقش مؤثر پرولین در مقاومت به خشکی باشد اما این روند

جدول ۱. میانگین فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و پروکسیدان در مرحله پر شدن دانه در ارقام گندم

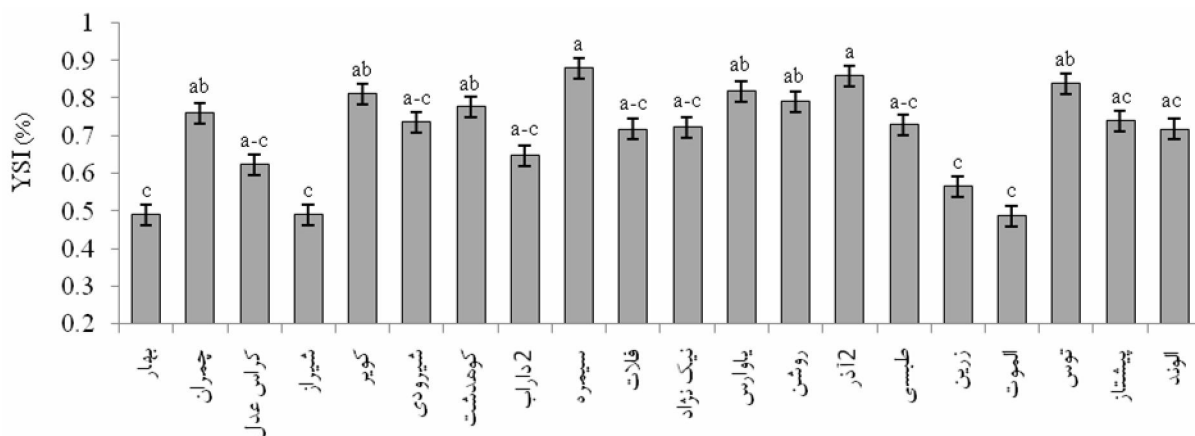
نام رقم	POD (Ug <sup>-1</sup> FW)		SOD (Ug <sup>-1</sup> FW)		APX (Ug <sup>-1</sup> FW)		CAT (Ug <sup>-1</sup> FW)		
	تنش	نرمال	تنش	نرمال	تنش	نرمال	تنش	نرمال	
بهار	۱۲/۵۹ ef	۳/۵۶ i	۶۱ k-p	۵۹ m-q	۲۷۸ d-g	۴۳۹ e-k	۱۶۷ a-e	۱۳۸ l-m	۳۸ n-q
چمران	۷/۰۲ g-i	۲/۲۱ i	۸۶ ab	۵۹ m-q	۶۲۴ a	۴۳۱ e-k	۱۷۰ a-d	۱۴۸ j-l	۳۸ n-q
کراس عدل	۲۹/۳ a	۲/۷۱ i	۶۲ j-o	۴۵ r	۲۹۶ c-e	۳۴۳ l-o	۱۶۰ c-i	۱۲۵ no	۳۴ q
شیراز	۱۹/۶۸ cd	۵/۹۷ hi	۵۴ pq	۵۲ qr	۴۱۱ f-l	۳۸۲ i-n	۱۵۶ f-j	۱۲۸ m-o	۳۹ m-q
کویر	۱۱/۵۳ fh	۴/۰۵ i	۸۵ b	۶۰ l-q	۵۷۷ a-c	۴۱۰ f-l	۱۶۷ a-f	۱۲۴ no	۴۲ g-o
شیرودی	۱۹/۷۸ cd	۴/۱۹ i	۷۰ e-i	۶۷ g-l	۴۵۱ e-j	۳۳۲ l-o	۱۶۵ b-g	۱۳۸ l-m	۳۹ m-q
کوهداشت	۲۹/۰۳ a	۳/۵۱ i	۷۶ c-f	۶۴ i-n	۵۳۳ b-d	۴۰۴ g-l	۱۷۳ ab	۱۴۹ i-l	۴۳ f-m
دازاب ۲	۱۹/۷۸ cd	۳/۲۴ i	۸۲ bc	۶۵ h-n	۴۷۳ d-h	۳۶۵ k-o	۱۸۶ a-c	۱۳۴ m-n	۴۱ j-p
سیمره	۱۲/۵۹ ef	۵/۳۹ i	۷۵ c-f	۶۱ k-p	۴۶۲ d-i	۳۱۴ no	۱۷۲ b-h	۱۳۰ m-o	۳۹ m-q
فلات	۱۷/۳۰ de	۳/۲۶ i	۷۳ e-h	۷۳ d-g	۴۲۹ e-k	۳۷۶ j-o	۱۵۹ d-j	۱۳۹ k-m	۴۰ l-p
نیک نژاد	۱۲/۴۴ f	۳/۹۵ i	۶۸ f-k	۶۴ i-n	۵۳۸ b-d	۴۳۳ e-k	۱۶۳ b-g	۱۳۲ m-n	۳۶ pq
یاوارس	۱۵/۳۳ d-f	۶/۷ g-i	۷۰ e-i	۶۴ i-n	۴۶۲ d-i	۳۷۶ j-o	۱۷۰ a-d	۱۴۰ k-m	۴۰ m-q
روشن	۲۰/۵۷ ab	۱۰/۶ f-h	۷۰ e-j	۵۸ n-q	۵۰۵ c-e	۳۱۵ m-o	۱۶۵ b-f	۱۳۴ m-n	۳۹ o-q
آذر ۲	۱۷/۴۶ d	۴/۷۶ i	۷۵ c-f	۷۵ c-f	۵۰۳ c-e	۳۷۶ j-o	۱۶۳ b-h	۱۳۵ m-n	۴۰ k-p
طیسی	۱۹/۱۰ cd	۶/۳۱ hi	۸۰ b-d	۶۶ g-m	۴۷۴ d-h	۲۹۸ o	۱۷۸ a	۱۴۹ i-l	۴۱ i-o
زرین	۱۵/۳۶ d-f	۳/۳۴ i	۵۸ n-q	۵۵ o-q	۳۸۰ i-n	۳۶۱ k-o	۱۵۲ h-k	۱۳۰ m-o	۳۶ pq
الموت	۱۸/۴۲ cd	۴/۳۷ i	۶۹ e-j	۷۶ c-e	۴۰۵ g-l	۳۹۷ g-l	۱۵۳ g-j	۱۲۵ no	۳۸ o-q
توس	۲۲/۱۷ bc	۵/۷۱ i	۸۹ ab	۷۶ c-f	۶۱۰ a-b	۴۲۸ e-k	۱۵۷ e-j	۱۲۰ o	۳۹ n-q
پیشاز	۲۵/۱۶ ab	۵/۸۶ hi	۹۴ a	۶۸ e-k	۶۴۵ a	۳۹۶ g-m	۱۷۸ a	۱۲۵ no	۴۰ l-p
الوند	۱۱/۹۱ f	۴/۹۶ i	۸۵ b	۶۹ e-j	۴۹۲ d-f	۳۶۹ h-n	۱۵۶ e-j	۱۲۹ m-o	۴۲ g-o
میانگین کل	۱۸/۲۴ b	۴/۷۲ a	۷۴ b	۶۴ a	۴۹۷ b	۴۲۶ a	۱۶۵ b	۱۳۴ a	۳۹ a
اختلاف بین ارقام*	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰
اختلاف بین سطوح آبیاری	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰
اثر متقابل رقم در آبیاری	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰

حروف مشترک در هر ستون و هم‌چنین دو ستون مربوط به یک صفت نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی (HSD) است.

\*: اعداد پایین جدول نشان‌دهنده سطوح معنی‌داری (P) صفات مورد بررسی می‌باشد.



شکل ۱. میانگین عملکرد دانه ارقام مختلف گندم در شرایط نرمال و تنش خشکی



شکل ۲. میانگین شاخص پایداری عملکرد ارقام مختلف گندم

جلوگیری کرده و سبب کاهش خسارت به غشا سلولی می‌گردد (۲۷). نتایج به‌دست آمده نشان داد که تنش خشکی باعث افزایش بسیار معنی‌دار ( $P < 0/01$ ) فعالیت این آنتی‌اکسیدان می‌گردد (جدول ۱). این افزایش در ارقام مقاوم بالاتر از ارقام حساس بود.

هم‌چنین افزایش فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز در بسیاری از ارقام حساس معنی‌دار نبود. دو رقم سیمره و الموت به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین فعالیت این آنزیم در شرایط تنش خشکی بودند و این در حالی است که این دو رقم به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت به خشکی را نیز دارا بودند که این

رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌شود. بالاتر بودن فعالیت این آنزیم به معنی حذف بیشتر رادیکال‌های اکسیژن و در نتیجه آن کاهش مرگ سلولی و افزایش مقاومت به خشکی است. (۲۵). سوپر اکسید دیسموتاز (SOD) یکی دیگر از آنتی‌اکسیدان‌های مورد ارزیابی بود. سوپر اکسید دیسموتاز در یک واکنش پیچیده دو مولکول سوپر اکسید را به کمک دو مولکول هیدروژن با یک دیگر ترکیب کرده و تبدیل به دو مولکول پراکسید هیدروژن می‌کند. که در مرحله بعد پراکسید هیدروژن توسط دیگر آنتی‌اکسیدان‌ها حذف می‌شود. هم‌چنین این آنزیم با پایین نگه‌داشتن غلظت سوپر اکسید ( $O_2^-$ ) از تشکیل رادیکال هیدروکسیل ( $HO_2$ )

بسیار معنی‌دار ( $P < 0/01$ ) لیپیداسیون غشا سلولی (LPO) در ارقام مورد ارزیابی گردید (جدول ۲). این افزایش در ارقام مقاوم کمتر از ارقام حساس بود. هم‌چنین افزایش آن در بسیاری از این ارقام مقاوم روند معنی‌دار نشان نداد. از آنجا که لیپیداسیون غشا سلولی با سنجش ماده حد واسطی به نام مالون دی آلدئید (MDA) که در اثر حمله رادیکال‌های آزاد اکسیژن به غشا سلولی به وجود می‌آید، تخمین زده می‌شود، ارقام مقاوم که دارای فعالیت آنتی اکسیدانی بیشتر بودند، مالون دی آلدئید کمتری در مقایسه با ارقام حساس نشان دادند (۱۰). ارقام الموت و پیشتاز به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مالون دی آلدئید در بین ارقام مورد بررسی بودند. تنش خشکی هم‌چنین باعث افزایش بسیار معنی‌دار ( $P < 0/01$ ) تجمع رادیکال آزاد پراکسید هیدروژن ( $H_2O_2$ ) در ارقام گندم گردید (جدول ۲). میزان تجمع این رادیکال آزاد اکسیژن که مخرب‌ترین رادیکال آزاد شناخته شده نیز می‌باشد در ارقام مقاوم افزایش معنی‌داری از خود نشان نداد.

اما این افزایش در ارقام حساس معنی‌دار بود. این امر می‌تواند به دلیل بالاتر بودن فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی در ارقام مقاوم نسبت به حساس باشد که این آنزیم‌ها با حذف رادیکال‌های آزاد اکسیژن از تجمع آنها در گیاه جلوگیری می‌کنند (۲۷). ارقام شیراز و الموت دارای بیشترین و ارقام پیشتاز و آذر ۲ دارای کمترین میزان تجمع پراکسید هیدروژن در بین ارقام مورد ارزیابی بودند. همان‌طور که قبلاً نشان داده شد این ارقام به ترتیب دارای حداقل و حداکثر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی نیز بودند. نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری نشت یونی (EL) نشان داد که میزان آن در اثر تنش خشکی افزایش بسیار معنی‌داری ( $P < 0/01$ ) می‌یابد (جدول ۲). اما این افزایش در ارقام حساس بیشتر از ارقام مقاوم بود. از آنجا که افزایش میزان نشت یونی نشان‌دهنده افزایش مرگ سلولی می‌باشد، پس میزان مرگ سلولی در ارقام مقاوم پایین‌تر بود (۶). ارقام پیشتاز و توس دارای پایین‌ترین و ارقام زرین و الموت دارای بالاترین میزان نشت یونی در بین ارقام مورد

نشان‌دهنده توانایی بالای این آنزیم در شناسایی ارقام مقاوم از حساس است (۳ و ۷). شاهو و همکاران (۲۸) گزارش نمودند که تنش خشکی در ارقام مختلف گندم سبب افزایش بیشتر فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز نسبت به دو آنتی اکسیدان کاتالاز و پراکسیداز می‌شود. آنها نقش مهم‌تر این آنزیم در حذف رادیکال‌های آزاد اکسیژن را دلیل این افزایش بیشتر دانستند. تنش خشکی هم‌چنین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD) را به‌طور بسیار معنی‌داری ( $P < 0/01$ ) افزایش داد (جدول ۱). فعالیت پراکسیداز همانند سایر آنتی اکسیدان‌های مورد مطالعه در ارقام مقاوم از افزایش بالاتری برخوردار بود (۲۵ و ۲۰). دو رقم پیشتاز و توس بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز و دو رقم شیراز و زرین کمترین میزان فعالیت را در بین ارقام مورد بررسی نشان دادند. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که به ترتیب سوپر اکسید دیسموتاز، اسکوربیک پراکسیداز، پراکسیداز و کاتالاز دارای بالاترین فعالیت می‌باشند. و این در حالی است که سوپر اکسید دیسموتاز و اسکوربیک پراکسیداز دارای بالاترین توانایی در حذف رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌باشند و این توانایی بالاتر به دلیل فعالیت بیشتر این آنزیم‌ها می‌باشد که در مطالعه انجام شده این موضوع به‌طور آشکار مشخص گردید. سوپر اکسید دیسموتاز و کاتالاز به ترتیب بیشترین و کمترین تغییرات را در اثر تنش خشکی نشان دادند. در بین آنتی اکسیدان‌های مورد ارزیابی، سوپر اکسید دیسموتاز بهترین آنتی اکسیدان برای شناسایی ارقام مقاوم از حساس می‌باشد. نتایج به دست آمده با یافته‌های رنو و دوارشی (۲۵) و امجد و همکاران (۵) که نشان دادند تنش خشکی سبب افزایش معنی‌دار فعالیت آنتی اکسیدان‌های کاتالاز، پراکسیداز، سوپر اکسید دیسموتاز و اسکوربیک پراکسیداز در ارقام گندم و در مرحله پر شدن دانه می‌گردد و این افزایش در ارقام مقاوم بیشتر از ارقام حساس است مطابقت داشت.

### صفات مرتبط با مرگ سلولی

نتایج به دست آمده نشان داد که تنش خشکی باعث افزایش



جدول ۲. میانگین صفات مرتبط با مرگ سلولی در مرحله پر شدن دانه در ارقام گندم

/I	CMS %	LE %		MSI %		H2O2 (umol/g FW)		MDA (umol/g FW)		نام رقم
		تنش	نرمال	تنش	نرمال	تنش	نرمال	تنش	نرمال	
۰/۵۷ a-e	۰/۵۹ c-e	۰/۵۴ a	۰/۲۳ c	۰/۴۶ c	۰/۷۷ a	۵/۳۳ ab	۲۶/۳ gh	۱۲/۵۱ a-d	۶/۴۲ kl	بهار
۰/۵۸ a-e	۰/۶۸ a-d	۰/۴۴ ab	۰/۱۸ c	۰/۵۶ bc	۰/۸۲ a	۴/۱۴ c-h	۳/۲۰ gh	۸/۷۱ e-k	۶/۸۹ j-l	چمران
۰/۶۴ a-d	۰/۶۲ b-e	۰/۴۸ ab	۰/۱۷ c	۰/۵۲ bc	۰/۸۲ a	۷/۴۳ a-g	۳/۴۴ gh	۹/۱۷ e-k	۶/۵۵ l	کراس عدل
۰/۶۴ a-d	۰/۵۷ d-e	۰/۵۴ a	۰/۱۹ c	۰/۴۶ c	۰/۸۱ a	۵/۴۱ a	۳/۸۳ f-h	۱۳/۲۸ a-c	۸/۰۸ h-l	شیراز
۰/۵۲ c-d	۰/۷۴ ab	۰/۴۱ b	۰/۱۹ c	۰/۵۹ b	۰/۸۱ a	۴/۰۳ d-h	۳/۱۳ h	۸/۶۵ h-l	۷/۰۸ i-l	کویر
۰/۶۶ ab	۰/۶۰ c-e	۰/۵۰ ab	۰/۱۶ c	۰/۵۰ bc	۰/۸۴ a	۴/۷۵ a-f	۴/۰۴ d-h	۱۰/۱۰ d-i	۷/۳۳ i-l	شیرودی
۰/۵۶ b-e	۰/۷۲ ab	۰/۴۰ b	۰/۱۷ c	۰/۶۰ b	۰/۸۳ a	۳/۸۸ e-h	۳/۴۰ gh	۸/۱۶ h-l	۷/۳۳ i-l	کوه‌دشت
۰/۶۸ ab	۰/۶۵ a-e	۰/۴۳ ab	۰/۱۴ c	۰/۵۶ bc	۰/۸۶ a	۴/۱۳ c-h	۳/۸۷ e-h	۸/۸۹ e-k	۸/۳۳ g-l	داراب ۲
۰/۶۱ a-e	۰/۶۵ a-e	۰/۴۷ ab	۰/۱۸ c	۰/۵۳ bc	۰/۸۱ a	۴/۲۵ b-h	۳/۶۷ f-h	۹/۳۵ e-k	۷/۴۱ h-l	سیمره
۰/۷۳ a	۰/۵۴ e	۰/۵۴ a	۰/۱۵ c	۰/۴۶ c	۰/۸۵ a	۴/۹۳ a-e	۳/۶۰ f-h	۱۴/۱۱ ab	۸/۴۴ f-l	فلات
۰/۵۹ a-e	۰/۶۵ a-e	۰/۴۷ ab	۰/۱۹ c	۰/۵۳ bc	۰/۸۱ a	۴/۱۱ d-h	۳/۷۰ f-h	۱۲/۴۷ a-d	۷/۷۵ h-l	نیک نژاد
۰/۶۹ ab	۰/۶۳ a-e	۰/۴۵ ab	۰/۱۴ c	۰/۵۵ bc	۰/۸۶ a	۴/۱۸ b-h	۴/۲۱ b-h	۹/۷۲ d-j	۸/۰۰ h-l	یاوارس
۰/۶۳ a-d	۰/۶۳ a-e	۰/۴۷ ab	۰/۱۷ c	۰/۵۲ bc	۰/۸۲ a	۴/۱۸ b-h	۳/۵۱ gh	۱۰/۴۵ c-h	۸/۰۱ h-l	روشن
۰/۴۸ e	۰/۷۴ ab	۰/۴۲ ab	۰/۲۱ c	۰/۵۸ bc	۰/۷۸ a	۳/۸۷ e-h	۳/۵۸ gh	۱۱/۵۰ b-f	۸/۱۶ h-l	آذر ۲
۰/۵۱ d-e	۰/۷۰ a-c	۰/۴۶ ab	۰/۲۳ c	۰/۵۴ bc	۰/۷۷ a	۴/۰۵ d-h	۳/۷۱ f-h	۱۱/۶۳ b-e	۸/۰۸ h-l	طبسی
۰/۶۲ a-e	۰/۵۷ d-e	۰/۵۴ a	۰/۲۱ c	۰/۴۵ c	۰/۷۹ a	۵/۱۰ a-d	۳/۴۲ gh	۱۳/۷۶ ab	۶/۴۷ kl	زرین
۰/۶۵ a-d	۰/۵۶ e	۰/۵۵ a	۰/۱۹ c	۰/۴۵ c	۰/۸۱ a	۵/۲۸ a-c	۴/۰۲ d-h	۱۴/۸۰ a	۸/۱۳ h-l	الموت
۰/۵۱ d-e	۰/۷۵ a	۰/۳۹ b	۰/۲۱ c	۰/۶۰ b	۰/۸۱ a	۴/۱۶ c-h	۳/۳۸ gh	۸/۷۱ e-k	۷/۴۱ h-l	توس
۰/۶۰ a-e	۰/۷۲ ab	۰/۳۹ b	۰/۱۶ c	۰/۶۱ b	۰/۸۴ a	۳/۸۱ e-h	۳/۵۲ gh	۷/۹۷ h-l	۶/۴۲ kl	پیشناز
۰/۶۳ a-e	۰/۶۰ a-e	۰/۴۹ ab	۰/۱۸ c	۰/۵۳ bc	۰/۸۲ a	۴/۴۰ a-g	۳/۶۵ f-h	۱۱/۳۶ b-g	۶/۸۸ j-l	الوند
۰/۶۱	۰/۶۵	۰/۴۷ b	۰/۱۸ a	۰/۵۳ b	۰/۸۲ a	۴/۴۲ b	۳/۶۲ a	۱۰/۷۵ b	۷/۴۱ a	میانگین کل
۰/۰۱۴	۰۰۰	۰۰	۰/۰۴۷	۰۰۰	۰/۰۹	۰۰۰	۰/۰۴	۰۰۰	۰۰۰	اختلاف بین ارقام*
		۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	اختلاف بین سطوح آبیاری
		۰۰۰	۰۰۰	۰/۰۰۱	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	اثر متقابل رقم در آبیاری

حروف مشترک در هر ستون دو هم‌چنین در هر ستون مربوط به یک صفت نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی (HSD) است.  
 \* اعداد پایین جدول نشان‌دهنده سطوح معنی‌داری (P) صفات مورد بررسی می‌باشد.

جدول ۳. همبستگی بین صفات مورد ارزیابی و شاخص پایداری عملکرد

	Proline	POD	SOD	APX	CAT	MDA	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	MSI	LE	I%	MSC	YSI
Proline	۱											
POD	-۰/۰۶۹	۱										
SOD	۰/۰۴۹	۰/۷۴۵**	۱									
APX	۰/۱۳۳	۰/۴۸۵*	۰/۵۰۷*	۱								
CAT	۰/۰۹۵	۰/۴۰۶	۰/۲۹۷	۰/۸۱۳**	۱							
MDA	-۰/۲۴۳	-۰/۶۱۵**	-۰/۷۲۹**	-۰/۵۹۶**	-۰/۵۱۶*	۱						
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-۰/۱۶۲	-۰/۷۱۶**	-۰/۷۰۳**	-۰/۶۲۸**	-۰/۵۵۶*	۰/۷۵۲**	۱					
MSI	۰/۱۹۲	۰/۷۸۰**	۰/۸۱۴**	۰/۵۸۸**	۰/۵۱۵*	-۰/۸۴۶**	-۰/۹۱۸**	۱				
LE	-۰/۱۹۲	-۰/۷۸۰**	-۰/۸۱۴**	-۰/۵۸۸**	-۰/۵۱۵*	۰/۸۴۶**	۰/۹۱۸**	-۱/۰۰**	۱			
I%	۰/۰۴۵	-۰/۳۵۳	-۰/۵۰۷*	-۰/۲۲۸	-۰/۱۸۹	۰/۲۷۸	۰/۴۴۶*	-۰/۵۳۷*	۰/۵۳۷*	۱		
MSC	۰/۱۲۱	۰/۷۱۶**	۰/۷۹۲**	۰/۵۳۸*	۰/۴۶۵*	-۰/۷۳۶**	-۰/۸۶۲**	۰/۹۴۸**	-۰/۹۴۸**	-۰/۷۷۵**	۱	
YSI	۰/۰۱۸	۰/۶۰۷**	۰/۵۲۱*	۰/۴۴۲	۰/۳۵۲	-۰/۶۲۰**	-۰/۸۱۹**	۰/۷۳۸**	-۰/۷۳۸**	-۰/۳۳۵	۰/۶۸۳**	۱

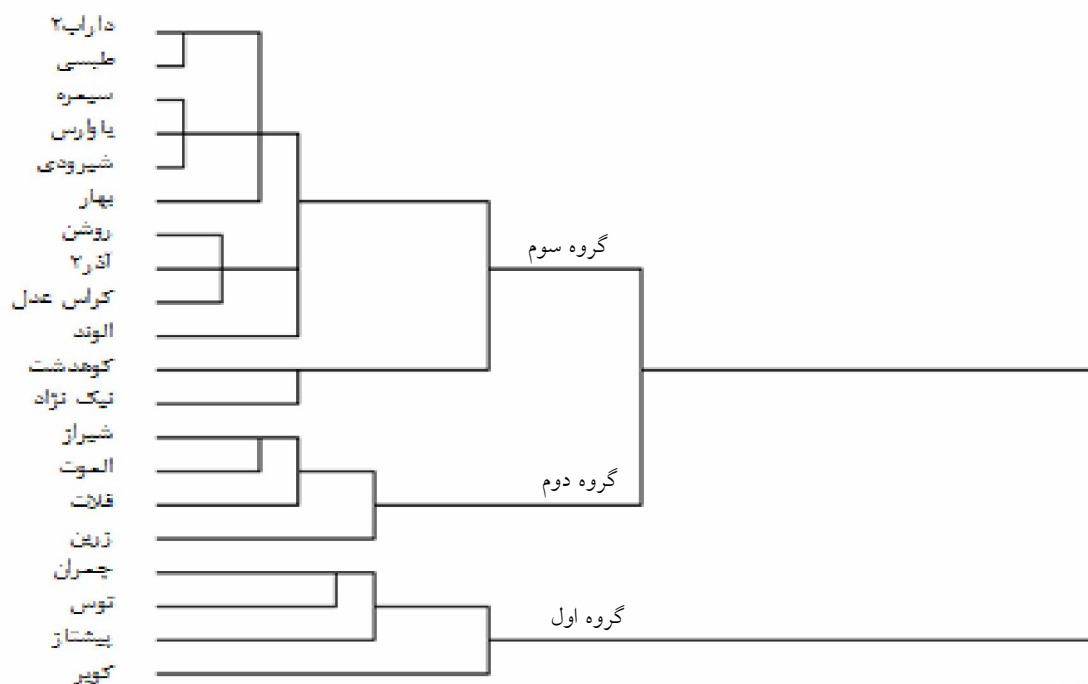
\* و \*\*: به ترتیب نشان دهنده همبستگی معنی دار در سطح ۰/۰۵ و ۰/۱۰ درصد است.

شاخص پایداری عملکرد (YSI) و هیچ یک از صفات بیوشیمیایی مورد ارزیابی همبستگی معنی داری نداشت (جدول ۳). از آنجا که ارقام مورد ارزیابی دارای پتانسیل عملکرد متفاوتی بودند، به عنوان بهترین شاخص تحمل تنش شناخته شد (شکل ۲). وجود همبستگی پایین ( $r=0/018$ ) پرولین با YSI نشان دهنده ضریب اطمینان پایین آن به عنوان معیار مناسب انتخاب می باشد. از میان آنتی اکسیدان های مورد ارزیابی پراکسیداز (POD) و سوپراکسید دیسموتاز (SOD) دارای همبستگی معنی داری با YSI بودند. باودی و همکاران (۷) با مطالعه روی بیست رقم گندم در شرایط تنش خشکی اظهار داشتند که پراکسیداز و سوپر اکسید دیسموتاز شاخص های مناسبی برای انتخاب می باشند. کاتالاز (CAT) دارای پایین ترین همبستگی ( $r=0/352$ ) با شاخص پایداری عملکرد بود، هم چنین همبستگی پایینی با سوپر اکسید دیسموتاز و پراکسیداز نشان داد اما میان کاتالاز و اسکوربیک پراکسیداز (APX) همبستگی بسیار معنی داری ( $r=0/813$ ) وجود داشت. از آنجا که کاتالاز آنتی اکسیدانی است که به شدت تحت تأثیر سن گیاه قرار می گیرد و با افزایش سن گیاه فعالیت آن افزایش می یابد در نتیجه تأثیر

بررسی بودند. این نتایج با نتایج به دست آمده از اندازه گیری مالون دی آلدئید مطابقت داشت و این می تواند نشان دهنده مؤثر بودن لیپیداسیون غشا سلولی در تخمین میزان مرگ سلولی باشد. هم چنین تنش خشکی باعث کاهش بسیار معنی دار ( $P<0/01$ ) میزان پایداری غشا سلولی (MSI) در ارقام گندم گردید اما این کاهش در بیشتر ارقام مقاوم معنی دار نبود. بیشترین و کمترین پایداری غشا سلولی به ترتیب مربوط به ارقام پیشتاز و الموت بود. نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که ارقام مقاوم دارای فعالیت آنتی اکسیدان بیشتری و به دنبال آن میزان تجمع رادیکال آزاد اکسیژن کمتر، لیپیداسیون غشا سلولی کمتر، نشت یونی کمتر، شاخص پایداری غشا سلولی بیشتر، درصد خسارت (I%) کمتر و در پایان درصد مرگ سلولی کمتر هستند. این روند در ارقام حساس کاملاً عکس بود. رنو و دوارشی (۲۵) این روند را پیوستگی بیوشیمیایی مقاومت به تنش های محیطی دانستند که با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت داشت.

#### همبستگی بین صفات بیوشیمیایی و پایداری عملکرد

نتایج به دست آمده از همبستگی بین صفات نشان داد که پرولین با



شکل ۳. دندوگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای براساس صفات بیوشیمیایی مورد اندازه‌گیری

از میان آنتی‌اکسیدان‌های مورد ارزیابی سوپراکسید دیسموتاز (SOD) دارای بالاترین همبستگی مثبت ( $r=0/814$ ) با شاخص پایداری غشا سلولی (MSI) و بالاترین همبستگی منفی ( $r=0/729$ ) با لیپیداسیون غشا سلولی (MDA) بود که این می‌تواند به دلیل فعالیت بالاتر آن و در نتیجه مؤثرتر بودن این آنتی‌اکسیدان در مقاومت به خشکی باشد (۲۵). هم‌چنین پراکسید هیدروژن دارای بالاترین همبستگی مثبت ( $r=0/752$ ) با لیپیداسیون غشا سلولی و بالاترین همبستگی مثبت ( $r=0/948$ ) با شاخص پایداری سلول بود که این نشان‌دهنده نقش مؤثر این رادیکال آزاد اکسیژن در خسارت به سلول و در نهایت مرگ سلولی است (۲۷).

#### گروه‌بندی ارقام

نتایج به دست آمده از تجزیه خوشه ارقام براساس معیارهای مورد اندازه‌گیری نشان‌دهنده آن است که ارقام مورد مطالعه را می‌توان در سه گروه اصلی تقسیم‌بندی کرد (شکل ۳). با توجه به معیارهای مورد اندازه‌گیری ارقام کویر، پیشتاز، توس و

عوامل دیگر بر افزایش فعالیت این آنزیم می‌تواند دلیلی بر همبستگی پایین این آنتی‌اکسیدان با شاخص پایداری عملکرد باشد (۲۷). مطالعه جباری و همکاران (۱۹) روی ارقام مختلف گندم نشان داد که پراکسیداز (POD) دارای همبستگی معنی‌داری با عملکرد می‌باشد اما همبستگی کاتالاز (CAT) با عملکرد معنی‌دار نبود. پراکسید هیدروژن ( $H_2O_2$ ) و شاخص پایداری غشا سلولی (MSI) از میان صفات مورد ارزیابی دارای بالاترین همبستگی با شاخص پایداری عملکرد بود. پراکسید هیدروژن، مالون دی‌آلدئید و نشت یونی دارای همبستگی منفی بسیار معنی‌داری با شاخص پایداری عملکرد بودند. دو شاخص پایداری غشا سلولی و شاخص پایداری سلولی نیز دارای همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری با شاخص پایداری عملکرد (YSI) بودند. وجود همبستگی منفی و معنی‌دار میان آنتی‌اکسیدان‌ها و میزان تجمع رادیکال‌های آزاد اکسیژن و شاخص‌های مرتبط با میزان خسارت غشا سلولی نشان‌دهنده نقش مؤثر آنها در حذف رادیکال‌های آزاد اکسیژن و مقاومت به خشکی می‌باشد (۲۸).

اول بودند. ارقام سیمره و یاورس که جزء ارقام دورم محسوب می‌شوند در یک زیر گروه قرار گرفتند. همچنین ارقام روشن، کراس عدل و الوند که جزء ارقام پر عملکرد و با مقاومت به خشکی متوسط محسوب می‌شوند نیز در یک زیر گروه دسته‌بندی شدند. این نتایج نشان می‌دهد که صفات بیوشیمیایی مورد مطالعه برای گروه‌بندی و غربال‌گری ارقام مختلف گندم بسیار کارآمد هستند احمد زاده و همکاران (۳) با مطالعه روی ۳۷ ژنوتیپ گندم دروم آنها با در سه گروه اصلی دسته‌بندی کردند.

چمران در یک گروه قرار گرفتند. همان‌طور که در قبل نشان داده شد این ارقام از فعالیت آنتی اکسیدانی بالا و میزان پراکسید هیدروژن و لیپیداسیون غشا سلولی پایینی برخوردار بودند و در نتیجه از پایداری عملکرد بالایی در شرایط تنش برخوردار بودند. این روند در گروه دوم که شامل ارقام زرین، الموت، شیراز و فلات بود کاملاً عکس بود و این ارقام جزء گروه ارقام حساس محسوب می‌شوند. ارقامی که در گروه سوم قرار گرفتند دارای متوسطی از فعالیت آنتی اکسیدانی، تجمع رادیکال آزاد پراکسید هیدروژن و لیپیداسیون غشا سلولی نسبت به دو گروه

### منابع مورد استفاده

1. Aghaee-Sarbarzeh, M., R. Rajabi. R. Haghparast and R. Mohammadi. 2010. Evaluation of proline content, cell membrane damage, and drought tolerance in durum wheat (*Triticum turgidum* var. *durum*) genotypes under controlled conditions. *Iranian Journal of Seed and Plant Improvement* 25(2): 345-352. (In Farsi).
2. Ahmadi, A., Y. Emam and M. Pessarakli. 2010. Biochemical changes in maize seedling exposed to drought stress conditions at different nitrogen levels. *Journal of Plant Nutrition* 33: 541-556.
3. Ahmadizadeh, M., M. Valizadeh, M. Zaefizadeh and H. Shahbazi. 2011. Antioxidative protection and electrolyte leakage in durum wheat under drought stress condition. *Journal of Applied Sciences Research*. 7(3): 236-246.
4. Alexieva, V., I. Sergiev, S. Mapelli and E. Karanov. 2001. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant Cell Environment* 24: 1337-1344.
5. Amjad, H., B. Noreen, A. Javed and I. Nayyer. 2011. Differential changes in antioxidants, proteases, and lipid peroxidation in flag leaves of wheat genotypes under different levels of water deficit conditions. *Plant Physiology and Biochemistry* 49: 178-185.
6. Asada, K. 1999. The waterwater cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons. Annual Review. *Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 50: 601-639.
7. Baodi, D., M. Liu, H. Shao, Q. Li, L. Shi, F. Du and Z. Zhang. 2008. Investigation on the relationship between leaf water use efficiency and physio-biochemical traits of winter wheat under rained condition. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 62: 280-287.
8. Bates, L. S., R. P. Waldern and I. D. Teave. 1973. Rapid determination of free proline for water stress standies. *Plant and Soil* 39: 205-107.
9. Beauchamp, C. and I. Fridovich. 1971. Superoxide dismutases: improved assays and an assay predictable to acrylamide gels. *Annals of Clinical Biochemistry* 44: 276-287.
10. Behnamnia, M., Kh. M. Kalantari and F. Rezanejad. 2009. Exogenous application of brassinosteroid alleviates drought-induced oxidativestress in *Lycopersicon esculentum* L. *General and Application Plant Physiology* 35: 22-34.
11. Bouslama, M. and W. T. Schapaugh. 1984. Stress tolerance in soybean. Part 1: evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Science* 24: 933-937.
12. Cadenas, S. E. 1989. Biochemistry of oxygen toxicity. Annual Review. *Biochemistry* 58: 79-110.
13. Chance, B. and A. C. Maehly. 1995. Assay of Catalase and Peroxidase. Academic Press., New York.
14. Dhindsa, R. S., P. Plumb-Dhindsa and T. A. Thorpe. 1981. Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany* 32: 93-101.
15. Emam, Y. 2007. Cereal Production. Shiraz Press., Shiraz.
16. Foyer, C. H., P. Descourvieres and K. J. Kunert. 1994. Protection against oxygen radicals: an important defense mechanism studied in transgenic plants. *Plant Cell Environment* 17: 507-523.
17. Golestani, S. and M. T. Assad. 1998. Evaluation of four screening techniques for drought resistance and their relationship to yield reduction ratio in wheat. *Euphytica* 103: 293-299.

18. Heath, R. L. and L. Packer, 1969. Photoperoxidation in isolated chloroplast. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 125: 189-198.
19. Jabbari, F., A. Ahmadi, K. Poostini and H. Alizadeh. 2006. Study of relationship of activities of some antioxidant enzymes with cell membrane stability and chlorophyll of drought-resistant and drought-sensitive bread wheat cultivars. *Iranian Journal of Agricultural Sciences* 37(1): 316-307. (In Farsi).
20. Kafi, M., A. Borzoe, M. Salehi, A. Kamandi, A. Masoumi and J. Nabati. 2010. *Physiology of Environmental Stress in Plants*. Mashhad University Press., Mashhad.
21. Micheal, A. M. and T. P. Oija. 1987. *Principles of Agricultural Engineering*. New Delhi Jain Brothers Pub., Delhi.
22. Mohammadi, R., R. Haghparast, M. Aghae-Sarbarze and A. V. Abdollahi. 2006. An evaluation of drought tolerance in advanced durum wheat genotypes based on physiologic characteristics and other related indices. *Iranian Journal of Agricultural Sciences* 37: 561-567. (In Farsi)
23. Nakano, Y. and K. Asada. 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant Cell Physiology* 22: 867-880.
24. Pireivatloun, J., N. Qasimov and H. Maralian. 2010. Effect of soil water stress on yield and proline content of four wheat lines. *African Journal of Biotechnology* 9: 036-040.
25. Renu, K. C. And S. Devarshi. 2007. Acclimation to drought stress generates oxidative stress tolerance in drought-resistant than susceptible wheat cultivar under field conditions. *Environmental and Experimental Botany* 60: 276-283.
26. Sairam, R. K. 1994. Effect of moisture stress on physiological activities of two contrasting wheat genotypes. *Indian Journal of Experimental Biology* 32: 584-593.
27. Sarvajeet, S. G. and T. Narendra. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in a biotic stress tolerance in crop plants. Annual Review. *Plant Physiology and Biochemistry* 3: 1-22.
28. Shao, H. B., Z. S. Liang and M. A. Shao. 2005. Changes of some anti-oxidative enzymes under soil water deficits among 10 wheat genotypes at maturation stage. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 45: 7-13.