تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد چهاردهم، شماره سوم، پائیز ۱۴۰۰
۷۸۳-۷۹۱
http://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.3176.1811

مقاله پژوهشی

بررسی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و عملکرد دانه در ارقام جو (*Hordeum vulgare* L.) تحت تنش شوری

جمال رحیمی درآباد[۱]، ورهرام رشیدی[۲*]، حسین شهبازی[۳]، محمد مقدم واحد[۴]، ابراهیم خلیل وند[۵]

۱. دانشجوی دکترای اصلاح نباتات گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز
۲. دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز
۳. استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل
۴. استاد گروه به نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز
۵. استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۱/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۲۲

چکیده

به‌منظور مطالعه میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و عملکرد دانه در بوته در ارقام جو تحت شرایط تنش شوری، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. فاکتور اول شامل ۷ رقم جو (افضل، نصرت، والفجر و کویر به‌عنوان متحمل و نیمه متحمل؛ یوسف، صحرا و ریحان به‌عنوان حساس) و فاکتور دوم سطوح مختلف شوری (صفر، ۸ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر) بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اختلاف بین ژنوتیپ‌ها، سطوح تنش شوری و اثر متقابل ژنوتیپ × شوری در صفات اسکوربات پراکسیداز، کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و عملکرد دانه در بوته معنی‌دار بود. بررسی روند تغییرات فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در سطوح مختلف شوری نشان داد که میزان فعالیت آن‌ها با افزایش سطح شوری از صفر به ۸ و ۱۲ دسی زیمنس افزایش معنی‌داری نشان می‌دهد و این افزایش در ارقام متحمل و نیمه متحمل به تنش شوری بیشتر بود. بررسی روند تغییرات عملکرد در سطوح مختلف شوری نشان داد که میزان عملکرد با افزایش سطح شوری از صفر به ۸ و ۱۲ دسی زیمنس کاهش معنی‌داری نشان می‌دهد و این کاهش در ارقام حساس به تنش شوری بیشتر بود. نتایج نشان داد همبستگی آنزیم اسکوربات پراکسیداز با عملکرد دانه در بوته مثبت و معنی‌دار بود. نتایج نشان داد ارقام نصرت و کویر دارای بالاترین میزان شاخص تحمل به تنش (STI) است و ازلحاظ سایر صفات موردمطالعه در وضعیت بهتری قرار داشتند و می‌توان آن‌ها را در برنامه‌های به نژادی جو مورداستفاده قرار داد.

واژه‌های کلیدی: **اسکوربات پراکسیداز، تنش شوری، سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز**

مقدمه

تنش‌های غیرزنده شامل شوری، خشکی، گرما و سرما به‌طورجدی تولیدات گیاهان را تهدید می‌کند و باعث کاهش معنی‌دار عملکرد در مناطق وسیع می‌شود (Mantri et al., 2012). شوری به‌عنوان عامل مهم کاهش تولیدات و پایداری کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان مطرح شده است که باعث کاهش ارزش خاک و بهره‌وری آن می‌شود (Ashraf, 2010). هم‌اکنون نیمی از اراضی قابل‌کشت ایران (۹/۵ میلیون هکتار) متأثر از شوری است که اثر عمده‌ای در کاهش سطح زیر کشت و عملکرد محصولات زراعی دارند (Nabiollahi et al., 2017). شوری یکی از عوامل تنش‌زای محیطی است که نه‌تنها رشد و نمو گیاهان را تهدید می‌کند بلکه محدوده توزیع و پراکندگی گیاهان را در اکوسیستم‌های مختلف تعیین می‌نماید (Ismail and Horie, 2017).

* نگارنده پاسخگو: ورهرام رشیدی. پست الکترونیک: varahramrashidi@gmail.com

گیاهان سازوکارهای متفاوتی در مقابله با تنش شوری هم در سطح متابولیت‌های اولیه و هم در سطوح پروتئین‌ها نشان می‌دهند (Akula and Ravishankar, 2011). پروتئین‌ها و به‌ویژه آنزیم‌ها به‌طور مشخص در مطالعات مختلف در مراحل متابولیکی گیاه در فتوسنتز، متابولیسم انرژی، جاروب کننده ROS، هموستازی یون‌ها، اسیمیلاسیون نیتروژن، تنش اکسیداتیو و متابولیت‌های ثانویه موردبررسی قرارگرفته‌اند (Zhang et al., 2012).

شوری زیاد می‌تواند موجب سمیت یونی، تنش اسمزی و تنش اکسیداتیو شود که منجر به پراکسیداسیون تدریجی چربی‌ها، اکسیداسیون پروتئین‌ها و غیر فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌شود (Tanou et al., 2009). گیاهان دارای سیستم دفاعی کارآمدی برای غلبه بر آثار اکسیداتیو القاشده از شوری هستند که می‌توانند رادیکال‌های آزاد را از بین برده و یا خنثی کنند (Mudgal et al., 2010). گیاهان سیستم-های مختلفی را برای تخلیه ROS با استفاده از آنزیم‌های حذف‌کننده مانند سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز، کاتالاز و آنتی‌اکسیدان‌ها مانند آسکوربات طراحی کرده‌اند (Campo et al., 2014). آسکوربات پراکسیداز (APX) دارای چندین نقش اساسی در فرایندهای فیزیولوژیکی گیاه مانند رشد، نمو و متابولیسم است و همچنین به‌عنوان یک احیاکننده برای خیلی از رادیکال‌های آزاد و به‌خصوص پراکسید هیدروژن عمل می‌کند، بنابراین خسارت ناشی از تنش اکسیداتیو را به کمترین مقدار می‌رساند (Kocsy et al., 2005). آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، رادیکال آزاد اکسیژن (O^{2-}) را به پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و اکسیژن (O2) تبدیل می-کند که اولین واکنش در سمیت زدایی گونه‌های مختلف اکسیژن است. در گام بعدی، پراکسید هیدروژن تولیدشده توسط آنزیم کاتالاز و چندین پراکسیداز دیگر حذف می‌شود (DaCosta and Huang, 2007). کاتالاز برای حذف H2O2 و تبدیل آن به آب و اکسیژن در طی تنفس نوری در پراکسی‌زوم عمل می‌کند. در شرایط تنش، افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز برای مقاومت به تنش شوری دارای اهمیت زیادی است (Parida and Das, 2005).

گیاه جو در بین غلات دانه‌ریز، متحمل‌ترین گیاه در برابر شوری با آستانه تحمل ۸ دسی زیمنس بر متر است (Katerji et al., 2006). اثر زیان‌آور شوری بر تمامی مراحل رشد جو گزارش شده است، اما این اثر در مراحل رویشی بیشتر از شروع گلدهی و پر شدن دانه است (Naseer, 2001). بیشتر نتایج نشان می‌دهد که در جو، فعالیت سیستم آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان برای کاهش اثرات تنش اکسیداتیو ناشی از شوری و پایین آوردن درجه آسیب سلولی عمل می‌کند. با افزایش میزان شوری، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در برگ‌ها و ریشه جو افزایش یافت ولی میزان افزایش در ریشه بسیار بیشتر بود، در ضمن میزان افزایش کاتالاز بیشتر از بقیه آنزیم‌ها بود (Kim et al., 2005). گزارش نمودند که یکی از نشانه‌های ناشی از آسیب‌های وارده توسط نمک، کاهش عملکرد دانه در برنج است (Krishnamurthy et al., 2016).

هدف از این مطالعه، ارزیابی ارقام متحمل و حساس به شوری ارقام جو از طریق عملکرد دانه و سنجش فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان بود تا قابلیت آن‌ها در برنامه‌های اصلاحی به‌عنوان ابزار غیرمستقیم گزینش موردبررسی قرار گیرد. بررسی اثرات تنش شوری به کمک آنزیم‌ها، می‌تواند با سرعت بیشتری به شناسایی پایه‌های متحمل یک گیاه منجر شود، چراکه رابطه قوی در تحمل به تنش‌های محیطی و تغییرات فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاهان فتوسنتز کننده وجود دارد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار در سال ۹۷-۱۳۹۶ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردبیل اجرا شد که در آن ۷ رقم جو متحمل و حساس به تنش شوری (ارقام افضل، نصرت، کویر و والفجر به‌عنوان متحمل و نیمه متحمل و ارقام ریحان، صحرا و یوسف به‌عنوان حساس) به‌عنوان فاکتور اول و سطوح تنش شوری (۰، ۸ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر) به‌عنوان فاکتور دوم در نظر گرفته شد. از گلدان‌های ۳۵ ×۳۰ ×۳۰ سانتی‌متر برای کاشت استفاده شد. ترکیب خاک گلدان شامل ماسه، کود دامی و خاک به نسبت مساوی بود. به دلیل احتمال سبز نشدن ژنوتیپ‌های حساس به شوری در تنش ۱۲ دسی زیمنس بر متر، اعمال تنش‌های شوری ۸ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر در مرحله چهار برگی، به‌تدریج و در طول یک ماه به ترتیب با محلول‌های تهیه‌شده ۵۰ و ۱۰۰ میلی مولار انجام گرفت.

جدول ۱. منشأ و شجره‌نامه ارقام جو موردمطالعه

Table 1. Origin and pedigree of the studied barley cultivars

ارقام		تحمل به شوری		منشأ و شجره‌نامه
Cultivars		**Tolerance**		**Origin/ Pedigree**
Afzal	افضل	Semi-tolerant	متحمل	Chahafzal
Nosrat	نصرت	Tolerant	متحمل	Karoon/Kavir, Iran
Valfajr	والفجر	Semi-tolerant	نیمه متحمل	CI-108985, Egypt
Kavir	کویر	Tolerant	نیمه متحمل	Arivat, USA
Rihane	ریحان	Sensitive	حساس	Atlas 46 /Arivat //Athenais ICB76-2L-1AP-0AP, ICARDA
Sahra	صحرا	Sensitive	حساس	L.B. LRAN/ Una8271// Giorias "s" Com, CIMMYT
Yoosef	یوسف	Sensitive	حساس	Ligne527/chn-01//Gustoe/4/Rhn-08/3/DeirAlla 106//DI71/strain 205

کنترل میزان شوری گلدان‌ها توسط EC سنج در گلخانه، از طریق زه آب گلدان‌ها انجام گردید. گلدان‌های با شرایط بدون تنش (شاهد) هم با آب معمولی و با شوری یک دسی-زیمنس بر متر آبیاری شد. حجم آب آبیاری برای هر سه شرایط یکسان و به میزان ۴۰۰ سی‌سی در نظر گرفته شد. پس از انتقال گلدان‌ها به فضای باز، روی گلدان‌ها هم با نایلون پوشش داده‌شده تا آب باران احتمالی وارد گلدان‌ها نشود. پس از رسیدن گلدان‌ها به سطح شوری ۸ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر، آبیاری با آب‌شور قطع و ادامه آبیاری با آب معمولی انجام گرفت. برای جلوگیری از شستشوی نمک و زه‌آب جمع شده در زیرگلدانی‌ها دوباره به گلدان بازگردانده شد. پس از اعمال تنش، نمونه‌برداری از برگ‌های پرچم در مرحله خوشه‌دهی برای استخراج عصاره آنزیمی انجام شد.

استخراج آنزیمی به روش سایرام و همکاران (Sairam et al., 1998) انجام گردید. فعالیت آنزیم اسکوربات پراکسیداز به روش ناکانو و آسادا (Nakano and Asada, 1981)، فعالیت آنزیم کاتالاز به روش چانس و مهلی (Chance and Maehly, 1995) و فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به روش جیانوپولیتیس و رایز (Giannopolities and Ries, 1977) اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری عملکرد دانه در بوته، در هر گلدان ۳ بوته به‌طور تصادفی مشخص و اندازه‌گیری شد و سپس میانگین سه بوته به‌عنوان عملکرد بوته ثبت شد.

بعد از آزمون نرمال بودن داده‌ها، تجزیه واریانس داده‌ها به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام گردید. مقایسات میانگین به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال ۵٪ انجام شد. برای بررسی روابط بین صفات از ضرایب همبستگی ساده استفاده شد. برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، رسم نمودارها از نرم‌افزارهای SAS, MSTATC، SPSS و Excel استفاده گردید.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس نشان داد که ژنوتیپ‌ها، سطوح تنش شوری و اثر متقابل ژنوتیپ×شوری بر اسکوربات‌پراکسیداز، کاتالاز، سوپراکسیددیسموتاز و عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۲).

تغییرات فعالیت آنزیم اسکوربات پراکسیداز در سطوح مختلف شوری نشان داد که میزان فعالیت این آنزیم با افزایش سطح شوری از صفر به ۸ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۳) و افزایش فعالیت این آنزیم در ژنوتیپ‌های متحمل آن‌ها را قادر می‌سازد تا خودشان را در برابر تنش اکسیداتیو محافظت نمایند. افزایش فعالیت آنزیم اسکوربات پراکسیداز در مطالعات متعددی گزارش شده است (Demiral and Turkan, 2005; Moradi and Abdelbaghi, 2007).

نتایج نشان داد میزان فعالیت آنزیم اسکوربات پراکسیداز در کلیه ارقام موردمطالعه و در سطوح مختلف تنش شوری در مقایسه با شاهد افزایش داشته و این افزایش در ارقام متحمل و نیمه متحمل نسبت به ارقام حساس به‌مراتب بیشتر بود. مقایسه میانگین اثر متقابل ژنوتیپ × شوری بر فعالیت آنزیم اسکوربات پراکسیداز نشان داد در شرایط تنش شوری ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر، به ترتیب ارقام والفجر و نصرت دارای بالاترین میزان فعالیت آنزیم اسکوربات پراکسیداز بود. اختلاف بین ارقام نصرت و کویر تحت تنش شوری ۱۲ دسی-زیمنس بر متر معنی‌دار نبود و کمترین میزان فعالیت آنزیم اسکوربات پراکسیداز را در شرایط بدون تنش شوری رقم صحرا به خود اختصاص داد و اختلاف فعالیت آنزیم اسکوربات پراکسیداز در ارقام یوسف، صحرا و ریحان در شرایط بدون

تنش و تنش شوری ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر معنی‌دار نبود. بالاترین و پایین‌ترین درصد افزایش فعالیت آنزیم اسکوربات پراکسیداز را در تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شاهد به ترتیب ارقام نصرت (۷۸ درصد) و ریحان (۳ درصد) به خود اختصاص دادند (شکل ۱).

جدول ۲. تجزیه واریانس تأثیر تنش شوری بر صفات موردمطالعه

Table 2. Analysis of variance for effect of salinity stress on studied traits

S.O.V	منبع تغییر	درجه آزادی df	اسکوربات پراکسیداز APX	کاتالاز CAT	سوپر اکسید دیسموتاز SOD	عملکرد دانه Grain yield
Genotype (G)	ژنوتیپ	6	1323.2**	8.88**	3.804**	2.327**
Salinity (S)	شوری	2	1336.7**	28.99**	12.058**	20.78**
G × S	ژنوتیپ × شوری	12	197.6**	0.592 **	0.813 **	0.156**
Erorr	خطا	42	48.98	0.181	0.091	0.047
C.V (%)	ضریب تغییرات		9.83	11.52	13.64	7.07

ns، * و **: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns, * and **: Non-significant, significant at 0.05 and 0.01 proability levels, respectively

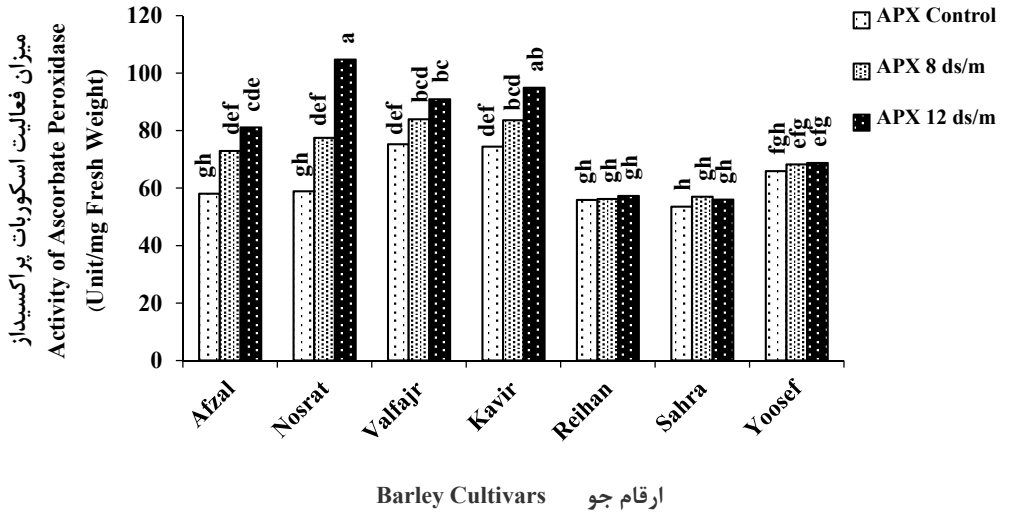
جدول ۳. مقایسه میانگین صفات موردمطالعه در سطوح مختلف شوری

Table 3. Mean Comparison of studied traits in different levels of salinity

تنش شوری salinity	اسکوربات پراکسیداز APX	کاتالاز CAT	سوپراکسید دیسموتاز SOD	عملکرد دانه در بوته Grain Yield per plant
ds/m	---------- Unit/mg Fresh Weight ----------			gr
0	63.1 c	2.5 c	1.4 c	4.002 a
8	71.3 b	3.8 b	2.3 b	3.175 b
12	79.1 a	4.8 a	2.9 a	2.021 c

میانگین های دارای حروف غیرمشترک در هر ستون برای هر صفت، بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی داری دارند.

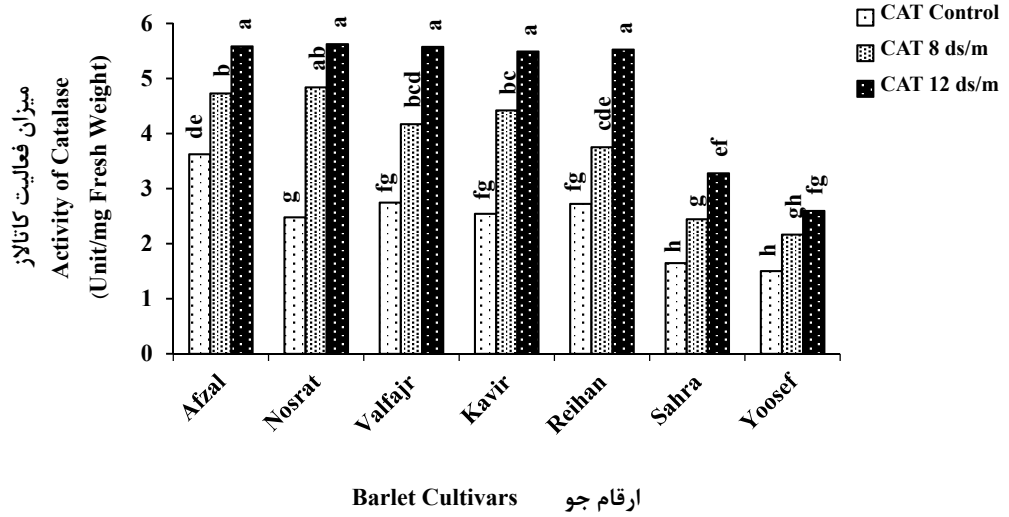
Means in each column and trait followed by non-similar letters are significantly different at 5% probability level using Duncan test



شکل ۱. اثر متقابل ژنوتیپ × شوری بر فعالیت آنزیم اسکوربات پراکسیداز

Fig. 1. Interaction effect of genotype × salinity on activity of ascorbate peroxidase

تغییرات فعالیت آنزیم کاتالاز در سطوح مختلف شوری نشان داد که میزان فعالیت این آنزیم با افزایش سطح شوری از صفر به ۸ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). نتایج دیگری مبنی بر افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط تنش شوری گزارش شده است (Bor et al., 2003; Demiral and Turkan, 2005). همچنین کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهچه‌های جو تلقیح شده با باکتری آزوسپیریلوم نیز گزارش شده است (Omar et al., 2009). نتایج نشان داد میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در کلیه ارقام موردمطالعه و در سطوح مختلف تنش شوری در مقایسه با شاهد افزایش داشته و این افزایش در ارقام متحمل و نیمه متحمل نسبت به ارقام حساس بیشتر بود. مقایسه میانگین اثر متقابل ژنوتیپ × شوری بر فعالیت آنزیم کاتالاز نشان داد در شرایط تنش شوری ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر، رقم نصرت دارای بالاترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز بود و اختلاف آن‌ها معنی‌دار نبود. اختلاف بین ارقام افضل، نصرت، والفجر و کویر تحت تنش شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر معنی‌دار نبود. پایین‌ترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز را رقم یوسف در شرایط بدون تنش به خود اختصاص داد. بالاترین درصد افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز را در تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شاهد رقم نصرت (۱۲۷ درصد) به خود اختصاص داد (شکل ۲).

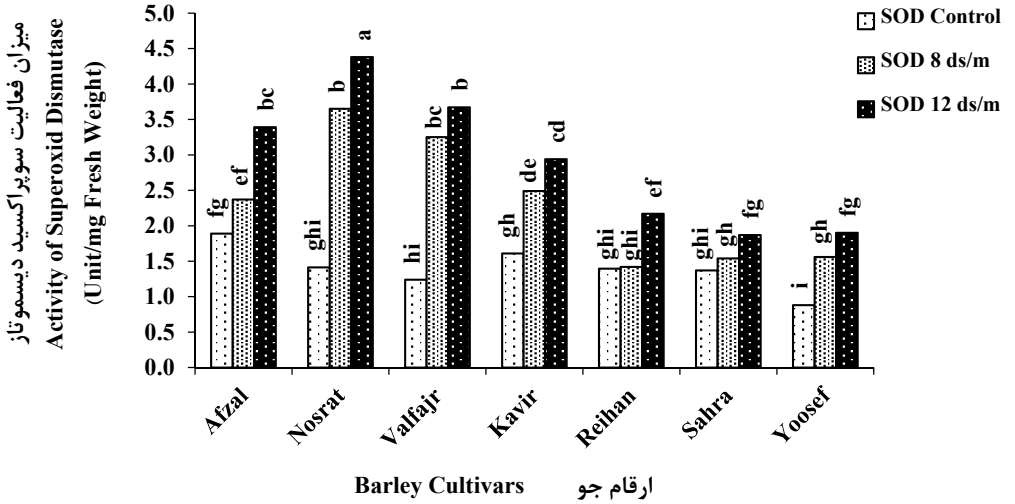


شکل ۲. اثر متقابل ژنوتیپ × شوری بر فعالیت آنزیم کاتالاز

Fig. 2. Interaction effect of genotype × salinity on activity of catalase

تغییرات فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در سطوح مختلف شوری نشان داد که میزان فعالیت این آنزیم با افزایش سطح شوری از صفر به ۸ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). سایرام و همکاران (Sairam et al., 2002) بامطالعه تنش شوری بر تغییرات آنتی‌اکسیدان‌های برگ دو ژنوتیپ متحمل و نیمه متحمل گندم گزارش کردند که شوری در تمام سطوح باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز شده است. فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در شرایط تنش شوری نسبت به عدم اعمال تنش بیشتر می‌شود که دلیل آن عدم توانایی استفاده از آب به دلیل تنش شوری است (Borzouei et al., 2012). با اعمال تنش شوری در گندم بر میزان فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز افزوده شد (Chamaani et al., 2012). نتایج نشان داد میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در کلیه ارقام موردمطالعه و در سطوح مختلف تنش شوری در مقایسه با شاهد افزایش داشته و این افزایش در ارقام متحمل و نیمه متحمل نسبت به ارقام حساس به‌مراتب بیشتر بود. مقایسه میانگین اثر متقابل ژنوتیپ × شوری بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نشان داد در شرایط تنش شوری ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر، رقم نصرت دارای بالاترین میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز بود. بالاترین و پایین‌ترین درصد افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را در تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شاهد به ترتیب ارقام نصرت (۲۱۰ درصد) و صحرا (۳۷ درصد) به

خود اختصاص دادند و پایین‌ترین میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را رقم یوسف در شرایط بدون تنش به خود اختصاص داد (شکل ۳).



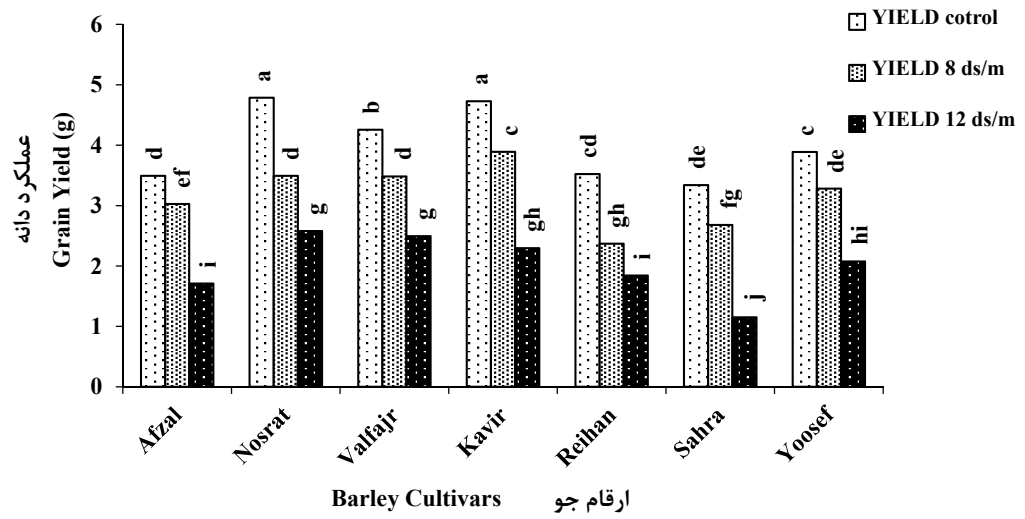
شکل ۳. اثر متقابل ژنوتیپ × شوری بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز

Fig. 3. Interaction effect of genotype × salinity on activity of superoxide dismutase

تغییرات عملکرد دانه در بوته در سطوح مختلف شوری نشان داد که میزان عملکرد دانه در بوته با افزایش سطح شوری از صفر به ۸ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). محققان گزارش کردند که عملکرد دانه گیاه جو تحت تنش شوری کاهش می‌یابد (Demiral et al., 2005). نتایج نشان داد میزان عملکرد دانه در بوته در کلیه ارقام موردمطالعه و در سطوح مختلف تنش شوری در مقایسه با شاهد کاهش داشته و این کاهش در ارقام حساس نسبت به ارقام متحمل و نیمه متحمل بیشتر بود. مقایسه میانگین اثر متقابل ژنوتیپ × شوری بر عملکرد دانه در بوته نشان داد در شرایط تنش شوری ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر، به ترتیب ارقام کویر و نصرت دارای بالاترین میزان عملکرد دانه در بوته بود. بالاترین و پایین‌ترین درصد کاهش عملکرد دانه در بوته را در تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شاهد به ترتیب ارقام صحرا (۶۶ درصد) و والفجر (۴۱ درصد) به خود اختصاص دادند و پایین‌ترین میزان عملکرد دانه در بوته را رقم حساس صحرا تحت تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به خود اختصاص داد و اختلاف آن با سایر ارقام معنی‌دار بود (شکل ۴).

نتایج نشان داد همبستگی آنزیم اسکوربات پراکسیداز با سوپراکسید دیسموتاز ($P \leq 0.05$) و عملکرد دانه در بوته ($P \leq 0.01$) مثبت و معنی‌دار و با آنزیم کاتالاز منفی و غیر معنی‌دار بود. ارتباط مثبت و معنی‌دار فعالیت آنزیم اسکوربات پراکسیداز با سوپر اکسید دیسموتاز نشانگر این است که افزایش فعالیت اسکوربات پراکسیداز باعث افزایش فعالیت این آنزیم شده و این دو آنزیم باهم بیان می‌شوند. همبستگی آنزیم کاتالاز با سوپراکسید دیسموتاز نیز مثبت و معنی‌دار ($P \leq 0.05$) و نیز همبستگی آنزیم‌های کاتالاز و سوپر اکسید دیسموتاز با عملکرد مثبت و غیر معنی‌دار بود (جدول ۴).

شاخص STI (Fernandez, 1992) که تحت عنوان شاخص تحمل به تنش ارائه شد، جهت شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در هر دو محیط تنش و بدون تنش به کار گرفته می‌شود. بیشتر بودن مقدار عددی این شاخص، نشانه تحمل بیشتر به تنش و پتانسیل عملکرد بالا در ژنوتیپ است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، ارقام نصرت و کویر در سطوح شوری ۸ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر دارای شاخص STI بالاتری بوده و نشان‌دهنده تحمل بیشتر این ارقام به تنش شوری است. پایین‌ترین شاخص تحمل به تنش را رقم حساس صحرا در شرایط تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به خود اختصاص داد (جدول ۵).



شکل ۴. اثر متقابل ژنوتیپ × شوری بر عملکرد دانه

Fig. 4. Interaction effect of genotype × salinity on grain yield

جدول ۴. همبستگی بین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و عملکرد دانه

Table 4. Correlation coefficients between antioxidant enzymes activity and grain yield

		اسکوربات پراکسیداز APX	کاتالاز CAT	سوپراکسید دیسموتاز SOD	عملکرد دانه Grain Yield
APX	اسکوربات پراکسیداز	1			
CAT	کاتالاز	0.52 ns	1		
SOD	سوپراکسید دیسموتاز	0.78*	0.78 *	1	
Grain Yield	عملکرد دانه	0.94**	0.37 ns	0.68 ns	1

ns، * و **: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns, * and **: Non-significant, significant at 0.05 and 0.01 proability levels, respectively

جدول ۵. شاخص تحمل به تنش

Table 5.Stress tolerance index (STI)

ارقام Cultivars	افضل Afzal	نصرت Nosrat	والفجر Valfajr	کویر Kavir	ریحان Reihan	صحرا Sahra	یوسف Yoosef
STI (8 ds/m)	0.66	1.04	0.93	1.15	0.52	0.56	0.80
STI (12 ds/m)	0.37	0.77	0.66	0.68	0.41	0.24	0.50

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج تحقیق حاضر نشان داد ارقام متحمل و نیمه متحمل به تنش شوری ازنظر صفات موردمطالعه بر سایر ارقام برتری داشتند. همچنین میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، شاخص تحمل به تنش و عملکرد دانه در ارقام نصرت و کویر در شرایط تنش شوری بیشتر بود و نشان‌دهنده نقش آنزیم-های آنتی‌اکسیدان در تحمل به تنش شوری است و این ارقام می‌تواند در برنامه‌های به‌نژادی جو برای تحمل به تنش شوری موردتوجه قرار گیرد.

منابع

Akula, R., Ravishankar, G.A., 2011. Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. Plant Signaling and Behavior. 6, 1720-1731.

Ashraf, M., 2010. Registration of 'S-24'spring wheat with improved salt tolerance. Journal of Plant Registrations. 4, 34–37.

Bor, M., Özdemir, F., Türkan, I., 2003. The effect of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in leaves of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) and wild beet (*Beta maritime* L.). Plant Science. 164, 77–84.

Borzouei, A., Kafi, M., Khazaei, H., Khorasani, A., Majdabadi, A., 2012. The study of physiological characteristics and enzyme superoxide dismutas activity in two wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars at different growth stages under irrigation water salinity. Iranian Journal of Field Crops Research. 9, 190-201. [In Persian with English summary].

Campo, S., Baldrich, P., Messeguer, J., Lalanne, E., Coca, M., San Segundo, B., 2014. Overexpression of a calcium-dependent protein kinase confers salt and drought tolerance in rice by preventing membrane lipid peroxidation. Plant Physiology. 165, 688–704.

Chamaani, F., Habibi, D., Khodabandeh, N., Davoodifard, M., Asgharzadeh, A., 2012. Effects of salinity stress on growth and antioxidant enzyme activity of wheat inoculated with plant growth promoting bacteria (*Azotobacter chroocccum*, *Azospirillum lipoferum*, *Pseudomonase putida*) and humic acid. Journal of Agronomy and Plant Breeding. 8, 39-55. [In Persian with English summary].

Chance, B., Maehly, A.C., 1955. Assay of catalases and peroxidases. Methods in Enzymology. 2, 764-775.

DaCosta, M., Huang, B., 2007. Changes in antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation for bent grass species in response to drought stress. Journal of the American Society for Horticultural Science. 132, 319-326.

Demiral, T., Turkan, I., 2005. Comparative lipid peroxidation, antioxidant defense systems and proline content in roots of two rice cultivars differing in salt tolerance. Environmental and Experimental Botany. 53, 247-257.

Demiral, M.A., Aydin, M., Yorulmaz, A., 2005. Effect of salinity on growth, chemical composition and antioxidative enzyme activity of two malting barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars. Turkish Journal of Biology. 29, 117-123.

Fernandez, G.C., 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: Proceeding of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress. Taiwan. 13-16 Aug. PP: 257-270.

Giannopolities, C.N., Ries, S.K., 1977. Superoxide dismutase. I. Occurrence in higher plants. Plant Physiology. 59, 309–314.

Ismail, A.M., Horie, T., 2017. Genomics, physiology, and molecular breeding approaches for improving salt tolerance. Annual Review of Plant Biology. 68, 405-434.

Katerji, N., Van Hoorn, J.W., Hamdy, A., Mastrorilli, M., Fares, C., 2006. Classification and salt tolerance analysis of barley varieties. Agricultural Water Management. 85,184-192.

Kim, S.Y., Lim, J-H., Park, M.R., Kim, Y.J., Park, T.I., Seo, Y.W., Choi, K.G., Yun, S.J., 2005. Enhanced antioxidant enzymes are associated with reduced hydrogen peroxide in barley roots under saline stress. Journal of Biochemistry and Molecular Biology. 38, 218-225.

Kocsy, G., Laurie, R., Szalai, G., Szilagyi, V., Simon – Ssarkadi, L., Galiba, G., Deronde, J.A., 2005. Genetic manipulation of prolin levels affects antioxidant in soybean subjected to simultaneous drought and heat stresses. Physiologia Plantarum. 124, 227-235.

Krishnamurthy, S.L., Gautam, R.K., Sharma, P.C., Sharma, D.K., 2016. Effect of different salt stresses on agro-morphological traits and utilisation of salt stress indices for reproductive stage salt tolerance in rice. Field Crops Research. 190, 26-33.

Mantri, N., Patade, V., Penna, S., Ford, R., Pang, E., 2012. Abiotic stress responses in plants - Present and future. In: Ahmad, P., M.N.V. Prasad (ed.) Abiotic Stress Responses in Plants: Metabolism to Productivity, Springer, New York, USA, pp. 1–20.

Moradi, F., Abdelbaghi, M.I., 2007. Responses of photosynthesis, chlorophyll fluorescence and ROS-scavenging systems to salt stress during seedling and reproductive stages in rice. Annals of Botany. 99, 1161-1173.

Mudgal, V., Madaan, N., Mudgal, A., 2010. Biochemical mechanisms of salt tolerance in plants, a review. International Journal of Botany. 6, 136-143.

Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., Moradian, S., 2017. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. Ecological Indicators. 83, 482-494.

Nakano, Y., Asada, K., 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant Cell Physiology. 22, 867-880.

Naseer, S.H., 2001. Response of barley (*Hordeum vulgare* L.) at various growth stages to salt stress. Journal of Biological Science. 1, 326-329.

Omar, M.N.A., Osman, M.E.H., Kasim, W.A., Abd El-Daim, L.A., 2009. Improvement of salt tolerance mechanisms of barley cultivated under salt stress using Azospirillum brasilense. Salinity and Water Stress. pp: 133-147.

Parida, A.K., Das, A.B., 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants. A Review. Ecotoxicology and Environmental Safety. 60, 324-349.

Sairam, R.K., Deshmukh, P.S., Saxena, D.C., 1998. Role of antioxidant systems in wheat genotypes tolerance to water stress. Biologia Plantarum. 41, 387-394.

Sairam, R.K., Rao, K.V., Srivastava, G.C., 2002. Differential response of wheat genotypes to longterm salinity stress in relationto axidative stress. Antioxidant active and osmolyte consentration. Plant Science. 163, 1037-1046.

Tanou, G., Molassiotis, A., Diamantidis, G., 2009. Induction of reactive oxygen species and necrotic death-like destruction in strawberry leaves by salinity. Environmental and Experimental Botany. 65, 270-281.

Zhang, N., Wen, Q., Feng, H., Cao, R., Zhou, X., Tagn, J., Wu, N., 2012. Effects of water stress and nitrogen nutrition on regulation of *Catharanthus roseus* alkaloids metabolism. Zhongguo China Journal of Chinese Materia Medica. 37, 1346-1352.