University of Birjand

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.6543.2226

Original article

Evaluation of the physiological and biochemical responses of wheat to NaCl stress in the seedling stage

M. Jabbari[1*], N. Mahdinezhad [2], Kh. Salimi[3]

1. *Assistant Professor, Department of plant production and genetic engineering, Faculty of Agriculture, Higher Education Complex of Saravan. Saravan, Sistan and Baluchestan, Iran*
2. *Associated Professor, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran*
3. *Assistant Professor, Department of plant production and genetic engineering, Faculty of Agriculture, Higher Education Complex of Saravan. Saravan, Sistan and Baluchestan, Iran*

Received 3 July 2023; Accepted 8 October 2023

نسخه پیش از انتشار

Extended abstract

Introduction

Salinity affects about 1.7 million hectares of agricultural land in Iran, which poses a serious challenge for wheat production, as the most strategic crop in the country. Therefore, identifying wheat genotypes with salinity tolerance and selecting effective traits for accelerating the breeding process are crucial objectives.

Materials and methods

The experiment was aimed at assessing the response of 12 wheat cultivars to different levels of salinity using NaCl concentration as salt stress at early seedling stage under hydroponic conditions. A factorial experiment based on randomized complete block design with three replications was conducted at the research greenhouse of the Agriculture Faculty, University of Zabul, during the 2020 cropping seasons. 12 wheat cultivars (Shiraz, Falat, Durum, Gascogne, Mahdavi, Alvand, Cross Azadi, Roshan, Star, Tous, Hirmand and Cross Bolani) were irrigated with four concentrations of NaCl (0, 100, 200 and mM). The physiological and biochemical traits of wheat cultivars, including seedling fresh mass, ascorbate peroxidase, glutathione peroxidase, catalase, proline, sodium, potassium, and potassium to sodium ratio (K^+/Na^+) were recorded at four weeks after seed germination.

Results and discussion

The results showed that the amount of ascorbate peroxidase, glutathione peroxidase, catalase, proline and sodium in the leaves of wheat seedlings were increased with an increase in salinity level. In contrast, the seedling fresh mass, potassium content and K^+/Na^+ were decreased with an increase in salinity level. The increase of ascorbate peroxidase, glutathione peroxidase, and catalase activities, representing the main enzymatic H_2O_2 scavenging mechanism in wheat cultivars. In NaCl treated seedlings, Falat, Mahdavi and Cross Bolani cultivars showed higher ascorbate peroxidase than other cultivars tested. In contrast, high level of catalase was recorded in Alvand cultivar.

* Corresponding author: Mitra Jabbari; E-Mail: jabbari.mitra2@gmail.com

© 2024, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

In the other hand, maintain the high level of proline and potassium to sodium ratio are the main mechanisms for tolerance to salinity in Shiraz and Roshan cultivars, respectively. Wheat cultivars showed different response to the increase in salinity level, while in Roshan, Mahdavi, Hirmand and Cross-Bolani cultivars, the increase in salinity level had less effect on the seedling fresh mass than other cultivars, but different patterns of changes in physiological and biochemical traits were observed in these cultivars. Salinity resistance in Mahdavi cultivar was directly related to the increase of ascorbate peroxidase and catalase, but on the other hand, in Roshan cultivar, salinity resistance was related to maintaining a high level of potassium to sodium ratio. Potassium uptake is vital for plant growth but in saline soils because of their shared transport system and physicochemical similarities, the sodium in the soil solution competes for uptake with potassium and can lead to potassium deficiency. The induced potassium deficiency inhibits growth because it plays a critical role in maintaining cell turgor, membrane potentials, and enzyme activities. In salt-tolerant cultivars of wheat such as Roshan, under salt-stress conditions, limiting sodium uptake and preventing potassium losses from the cell may help to maintain a potassium to sodium ratio in the cytoplasm that is ideal for plant metabolism. Accumulation of high amounts of proline is often related with the salt tolerance nature of crop cultivar and high proline accumulation in the salt–tolerant cultivar than in their salt–sensitive are reported previously. The regression coefficients indicated that seedling fresh weight (R^2=0.89), potassium (R2=0.86) and the ratio of potassium to sodium (R^2=0.69) were the most reliable predictors of the effects of increasing sodium chloride concentration. These variables accounted for a large proportion of the variance in the response variable and had significant p-values.

Conclusion

According to the results of this experiment, it can be concluded that seedling fresh weight, potassium, and the ratio of potassium to sodium are more suitable criteria for selecting among cultivars under salt stress conditions.

Keywords: Ascorbate Peroxidase, Catalase, Glutathione Peroxidase, Proline

نسخه پیش از انتشار

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.6543.2226

مقاله پژوهشی

ارزیابی پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گندم به تنش کلرید سدیم در مرحله گیاهچه

میترا جباری[1*]، نفیسه مهدی نژاد[2]، خالد سلیمی[3]

۱. استادیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، مجتمع آموزش عالی سراوان. سراوان، سیستان و بلوچستان
۲. دانشیار، گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، سیستان و بلوچستان
۳. استادیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، مجتمع آموزش عالی سراوان. سراوان، سیستان و بلوچستان

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
آسکوربات پراکسیداز
گلوتاتیون پراکسیداز
کاتالاز
پرولین

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۷/۱۶

چکیده

حدود ۱/۷ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی ایران شور است؛ بنابراین گزینش ارقام گندم متحمل به شوری و به‌تبع آن تعیین شاخص‌های کارآمد برای کوتاه کردن مراحل گزینش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به این منظور آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو عامل غلظت NaCl (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌مولار) و ارقام گندم (شیراز، فلات، دوروم، گاسکوژن، مهدوی، الوند، کراس آزادی، روشن، استار، توس، هیرمند و کراس بولانی) در سال ۱۳۹۹ در دانشگاه زابل تحت شرایط کشت هیدروپونیک اجرا شد. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش سطح NaCl میزان آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون پراکسیداز، کاتالاز، پرولین و سدیم در برگ گیاهچه‌های گندم افزایش یافت و صفات وزن تر گیاهچه، پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم کاهش یافت. ارقام گندم واکنش متفاوتی به افزایش سطح NaCl نشان دادند، درحالی‌که در ارقام روشن، مهدوی، هیرمند و کراس بولانی افزایش سطح کلرید سدیم اثر کمتری بر کاهش وزن تر گیاهچه نسبت به سایر ارقام داشت، اما در همین ارقام الگوهای متفاوتی از تغییر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی دیده شد. مقاومت به NaCl در رقم مهدوی ارتباط مستقیمی با افزایش میزان آسکوربات پراکسیداز و کاتالاز داشت، اما در مقابل در رقم روشن مقاومت به NaCl به حفظ سطح بالایی از نسبت پتاسیم به سدیم مرتبط بود. ضرایب رگرسیونی نشان داد که مؤلفه‌های وزن تر گیاهچه (R^2=0.89)، پتاسیم (R^2=0.86) و نسبت پتاسیم به سدیم (R^2=0.69) اثرات افزایش غلظت کلرید سدیم را با سطح اطمینان بیشتری پیش‌بینی می‌کنند. به‌طورکلی با توجه به نتایج این آزمایش می‌توان استنباط کرد که وزن تر گیاهچه، پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم شاخص‌های مؤثرتری برای گزینش بین ارقام در شرایط تنش شوری هستند.

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) نقش محوری در تضمین امنیت غذایی و تغذیه‌ای مردم جهان ایفا می‌کند. بااین‌حال، افزایش سریع شوری آب و خاک یک تهدید جدی برای تولید آن در سطح جهانی است (Sabagh et al., 2021). شوری خاک نتیجه تجمع یون‌های اضافی مانند کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^{+})، سولفات‌ها (SO_4^{2-}) و کلریدها (Cl^{-}) در خاک است و تأثیر منفی بر رشد و عملکرد محصولات زراعی دارد (Ries, 2020). شوری خاک در جذب بیولوژیکی عناصر غذایی و آب تداخل ایجاد کرده و به‌تبع آن باعث اختلال در کارکرد فیزیولوژیکی لازم برای رشد و نمو گیاهان می‌شود (Munns, 2002). ازاین‌رو شوری عامل مهمی در تخریب زمین و درنتیجه یک تهدید بزرگ برای سلامت خاک است. در سطح جهانی، تقریباً ۸۳۱ میلیون هکتار از زمین‌ها تحت تأثیر شوری خاک قرار دارند (Martinez-Beltran, 2005) و پیش‌بینی می‌شود که شوری ۵۰ درصد از کل زمین‌های قابل‌کشت را تا سال ۲۰۵۰ تحت تأثیر قرار دهد (Wang et al., 2003). حدود ۱/۷ میلیون هکتار از زمین‌های تحت کشاورزی فاریاب ایران تحت تأثیر شوری ثانویه

* نگارنده پاسخگو: میترا جباری. پست الکترونیک: jabbari.mitra2@gmail.com

قرار گرفته که بالغبر ۲۹ درصد کل زمین‌های فاریاب کشور را شامل می‌شود (Shahid et al., 2018).

به‌منظور بهبود شیوه‌های مدیریتی، برنامه‌های اصلاحی و شبیه‌سازی رشد محصول، درک بهتر از اثرات تنش شوری و کمبود آب ناشی از آن بر روی بیوشیمی گیاهان از اهمیت بسزایی برخوردار است. سازگاری گیاهان به شوری اغلب با افزایش سطوح گونه‌های فعال اکسیژن، مانند آنیون سوپر اکسید (O^{2-})، پراکسید هیدروژن (H_2O_2)، رادیکال هیدروکسیل ($HO^{\cdot}$) و اکسیژن منفرد (O_2) همراه است (Grover et al., 2012). محتوای گونه‌های اکسیژن فعال در سیستم‌های بیولوژیک توسط دو نوع دفاع آنتی‌اکسیدانی شامل روش‌های آنزیمی و غیر آنزیمی کنترل می‌شود. سیستم آنزیمی مانند آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز، پراکسیداز و گلوتاتیون پراکسیداز است (Ahmadi and Pour-Aboughadareh, 2018; Sofo et al., 2015). در این راستا، یک سیستم اصلی سم‌زدایی پراکسید هیدروژن در سلول‌های گیاهی تحت تنش‌های غیرزنده، چرخه آسکوربات-گلوتاتیون است که در آن ایزوآنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز نقش کلیدی در کاتالیز کردن تبدیل H_2O_2 به H_2O دارند (Sofo et al., 2015). افزایش فعالیت آسکوربات پراکسیداز تحت تنش شوری در ارقام گندم به‌خصوص ارقام مقاوم به شوری پیش‌تر گزارش شده است (Arzani and Salehi, 2013; Zinati and Alemzadeh, 2019).

بسیاری از محققین با توجه به نقش کلیدی کاتالاز در تنفس نوری، بر روی نقش مسیر تجزیه کاتالاز تحت تنش خشکی و شوری تمرکز کرده‌اند (Mushtaq et al., 2020; Anjum et al., 2016). درواقع، وقتی گیاهان در معرض کمبود آب ناشی از تنش اسمزی قرار می‌گیرند، حفظ فعالیت کاتالاز در برگ‌های آن‌ها امکان حذف H_2O_2 تنفسی نوری را فراهم می‌کند. در این شرایط، تنفس نوری به‌عنوان یک مخزن برای انرژی عمل می‌کند و از کاهش بیش‌ازحد زنجیره انتقال الکترون فتوسنتزی و بازدارندگی نوری جلوگیری می‌کند (Bauwe et al., 2012). تعداد زیادی از تحقیقات نشان می‌دهند که وقتی گیاهان با تنش‌های غیرزنده مختلف مواجه می‌شوند، تجمع پرولین به‌عنوان یک پاسخ فیزیولوژیکی در آن‌ها رایج است و بنابراین پرولین به‌عنوان شاخص مقاومت در برابر تنش پیشنهاد شده است (Mansour, 2000; Ashraf and Foolad, 2007; Sofo et al., 2015; Alhasnawi, 2019). تجمع پرولین در پاسخ به تنش شوری عمدتاً به تنظیم اسمزی ارتباط داده شده است، زیرا هموستازی اسمزی با تحمل تنش شوری ارتباط دارد (Mansour and Ali, 2017). تجمع پرولین در گونه‌های گیاهی مقاوم به شوری بیشتر از گونه‌های حساس است (Mansour, 2000; Dar et al., 2016) که بیانگر نقش مهم پرولین در تحمل به تنش است. به‌طور مشابه، سطح پرولین در ارقام مقاوم به شوری آفتابگردان (Heidari et al., 2011) و برنج (RoyChoudhury et al., 2007) بیشتر از ارقام حساس گزارش شده است.

عموماً، اثرات مخرب تنش شوری به سمیت Na^+ ربط داده می‌شود و این عامل باعث تمرکز بسیاری از تحقیقات بر مطالعه تغییرات Na^+ پس از اعمال تنش شوری شده است. بااین‌حال، در گیاهان در معرض تنش شوری (NaCl) افزایش محتوای Na^+ همیشه با از دست دادن K^+ همراه است. K^+ یک درشت مغذی ضروری در گیاهان است که به‌طورکلی ۴ تا ۶ درصد ماده خشک آن را تشکیل می‌دهد و به‌عنوان یک عامل محدودکننده برای عملکرد و کیفیت محصول شناخته می‌شود (Zörb et al., 2014). K^+ نقش مهمی در پاسخ گیاه به تنش‌های زنده (بیماری و آفات) و غیرزنده مانند خشکی، شوری، سرما و غرقابی دارد (Shabala and Pottosin, 2014).

بررسی عملکرد گیاهان در شرایط تنش شوری یکی از روش‌های سنتی برای گزینش ارقام و لاین‌های مقاوم به شوری است. البته این روش فرآیندی زمان‌بر است؛ بنابراین امروزه تلاش می‌شود از شاخص‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیک به‌خصوص در مرحله گیاهچه استفاده شود. به این منظور، آزمایش حاضر جهت انتخاب یک یا چند شاخص بیوشیمیایی و فیزیولوژیک برای گزینش ارقام مقاوم به شوری در مرحله گیاهچه‌ای در شرایط هیدروپونیک انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌منظور بررسی پاسخ فیزیولوژیک واکنش ۱۲ رقم گندم شیراز، فلات، دوروم (رقم یاواروس)، گاسکوژن، مهدوی، الوند، کراس آزادی، روشن، استار، توس، هیرمند و کراس بولانی تحت تأثیر تنش کلرید سدیم در مرحله رشد گیاهچه طی سال ۱۳۹۹ در دانشگاه زابل اجرا شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و در سطوح شوری صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی مولار کلرید سدیم انجام شد. قبل از کشت، بذور در محلول

نسخه پیش از انتشار

هیپوکلریت سدیم تجاری ده درصد به مدت ۵ دقیقه ضدعفونی گردید و سپس با آب مقطر استریل شستشو داده شدند. برای کشت گیاهان در شرایط هیدروپونیک ابتدا بذور ضدعفونی شده که ۱۲ ساعت قبل از کشت در داخل آب مقطر قرارگرفته و دوره آماس را طی کرده بودند در داخل پتری‌دیش جوانه‌دار شده و پس از ۷ روز جوانه‌ها به محیط هیدروپونیک حاوی محلول غذایی هوگلند (Hoagland and Arnon, 1950; Bugbee, 2004; Anagholi and Ranjbar, 2018) منتقل شدند. در هر تکرار و برای هر رقم در هر تیمار تعداد ۱۰ عدد گیاهچه کشت شد. جهت رشد گیاهچه‌ها دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی، شدت نوری ۱۵ ولت بر مترمربع، دمای ۲۲/۲۸ (روز/شب) درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۸۰ درصد در نظر گرفته شد. به مدت پنج روز گیاهچه‌ها با محلول هوگلند آبیاری شدند. در ابتدا به‌منظور عادت دادن گیاهان به محیط هیدروپونیک، گیاهچه‌ها در محیط هوگلند با نیمی از غلظت کشت شده و پس از یک روز، نیم دیگر مواد غذایی به آن اضافه شد. پس‌ازآن تکرارها با محلول هوگلند حاوی تیمارهای مختلف کلرید سدیم (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی مولار) تغذیه شدند. در تیمارهای شوری نیز به‌تدریج هر روز ۵۰ میلی مولار NaCl به محیط‌های کشت اضافه شد تا به غلظت نهایی برای هر تیمار رسید. به هر تیمار مقدار مناسبی $CaCl_2$ (شرکت مرک آلمان) اضافه گردید تا نسبت Na^+/Ca^{2+} در حدود ۱۵ باقی بماند. این امر برای ثابت ماندن (SAR= Sodium Adsorption Ratio) در گیاهان ضروری است (Schatchman et al., 1991; Weimberg, 1987). محیط کشت به‌منظور رشد ریشه‌ها توسط پمپ‌های هوا به‌طور مرتب هوادهی شد. همچنین به‌منظور ثابت نگه‌داشتن شرایط رشد، حجم محلول و pH آن هر روز بازبینی گردید. برای تجدید مواد غذایی استفاده‌شده توسط گیاه، هفته‌ای یک‌بار محیط غذایی مورداستفاده تعویض شد. پس‌ازاینکه گیاهان به مرحله چهار برگی رسیدند (حدوداً ۴ هفته پس از کشت بذور) و پس از رشد کامل برگ چهارم جهت اندازه‌گیری وزن تر گیاهچه (SFW) از هر تکرار سه گیاه به‌طور تصادفی انتخاب شد. نمونه‌های برگی در نیتروژن مایع غوطه‌ور شده و تا زمان اندازه‌گیری صفات در دمای ۷۰°C- نگهداری شدند. غلظت سدیم و پتاسیم توسط دستگاه فلیم‌فتومتر (Flame photometer) مدل (JENWAY، ساخت کشور انگلستان) اندازه‌گیری شد (Azizpour et al., 2010). میزان اسیدآمینه پرولین با استفاده از روش بیتز و همکاران (Bates et al., 1973) انجام شد. اندازه‌گیری آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی طبق منابع موردبررسی انجام گردید.

سنجش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX)

تغییرات جذب نوری مخلوط واکنش در دستگاه اسپکتروفتومتری در طول‌موج ۲۹۰ نانومتر در مدت ۱ دقیقه، در برابر بلانک (ترکیب مذکور بدون عصاره آنزیمی) محاسبه شد. ضریب خاموشی برابر ۲/۶ میکرومول بر سانتیمتر برای اکسیداسیون آسکوربات است (Nakano and Asada, 1987).

سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)

تغییرات جذب نوری در دستگاه اسپکتروفتومتری در طول‌موج ۲۴۰ نانومتر در مدت ۱ دقیقه محاسبه شد. میزان فعالیت کاتالاز بر اساس میزان تجزیه پراکسید هیدروژن و با ضریب خاموشی ۰/۰۳۹ میکرومول بر سانتی‌متر محاسبه شد (Aebi, 1984).

سنجش فعالیت آنزیم گلوتاتیون پراکسیداز (GPX)

شدت جذب نمونه در طول‌موج ۴۷۰ نانومتر در دستگاه اسپکتروفتومتر در زمان صفر و ۷۰ ثانیه اندازه‌گیری شد و طبق فرمول ارائه‌شده محاسبه گردید (Nickel and Cunningham, 1969). برای انجام تحلیل‌های آماری، تجزیه واریانس و مقایسات میانگین اثرات ساده و اثرات متقابل (آزمون چند دامنه‌ای دانکن)، ضریب همبستگی پیرسون بین وزن تر گیاهچه و صفات موردبررسی و نیز رگرسیون خطی ساده برای تک‌تک صفات در سطوح مختلف شوری از برنامه SAS 9.4 استفاده شد و به‌منظور پردازش داده‌ها و رسم نمودارها نیز از برنامه Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

وزن تر گیاهچه

اثر رقم، کلرید سدیم و نیز برهمکنش رقم و کلرید سدیم بر وزن تر گیاهچه معنی‌دار بود (جدول ۱). به‌طورکلی با افزایش سطح کلرید سدیم، وزن تر گیاهچه کاهش یافت (جدول ۲) اما میزان و شیب کاهش تحت تأثیر رقم قرار گرفت (جدول ۳).

نسخه پیش از انتشار

جدول ۱. تجزیه واریانس بر مبنای میانگین مربعات (MS) برای وزن تر گیاهچه (SFW)، آسکوربات پراکسیداز (APX)، گلوتاتیون پراکسیداز (GPX)، کاتالاز (CAT)، پرولین، سدیم، پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم (K^+/Na^+)

Table 1. Analysis of variance based on mean square (MS) for seedling fresh weight (SFW), ascorbate peroxidase (APX), glutathione peroxidase (GPX), catalase (CAT), proline, sodium, potassium, and potassium to sodium ratio (K^+/Na^+)

منابع تغییرات S.O.V	df	SFW	APX	CAT	GPX	Proline	Sodium	Potassium	K^+/Na^+
تکرار Rep	2	0.00061^{ns}	0.148^{ns}	0.003^{ns}	0.042^{ns}	0.010^{ns}	22.04^{ns}	3.03^{ns}	0.00034^{ns}
رقم Cultivar (C)	11	0.0047**	16.92**	0.079**	0.169**	0.187**	1124.69**	12.66**	0.035**
کلرید سدیم Salinity (S)	3	0.516**	31.70**	0.730**	1.942**	1.761**	8373.71**	2065.41**	1.101**
رقم×کلرید سدیم C × S	33	0.0016**	1.190**	0.004**	0.033**	0.013^{ns}	104.32**	4.55**	0.0197**
خطا Error	94	0.00020	0.041	0.002	0.012	0.010	13.55	1.24	0.0013
ضریب‌تغییرات CV%		*8.31*	*8.96*	*7.78*	*9.12*	*9.34*	*5.11*	*10.35*	*19.65*

^{ns} و **، غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

^{ns} and **, not significant and significant at 1% probability level

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف کلرید سدیم بر صفات موردمطالعه

Table 2. Mean comparison of different NaCl levels on studied traits*

Salt levels	SFW	APX	CAT	GPX	Proline	Sodium	Potassium	K^+/Na^+
	gr	mol min^{-1} mg^{-1} protein			---------- mg g^{-1} dry weight ----------			
Control (0 mM NaCl)	0.327^a	1.13^d	0.44^d	0.93^d	0.81^d	52.97^d	20.56^a	0.42^a
100 mM NaCl	0.204^b	1.94^c	0.56^c	1.13^c	0.99^c	67.78^c	12.71^b	0.19^b
200 mM NaCl	0.101^c	2.77^b	0.66^b	1.32^b	1.16^b	79.23^b	6.34^c	0.08^c
300 mM NaCl	0.058^d	3.26^a	0.78^a	1.47^a	1.32^a	88.13^a	3.50^d	0.03^d

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر صفت، در سطح ۵٪، آزمون دانکن دارای تفاوت معنی‌داری نیستند.

* SFW، وزن تر گیاهچه؛ APX، آسکوربات پراکسیداز؛ GPX، گلوتاتیون پراکسیداز؛ CAT، کاتالاز

Means that have common alphabetic in each trait do not significant difference at level%5 base on Duncan test.

* SFW, seedling fresh weight; APX, ascorbate peroxidase; GPX, glutathione peroxidase; CAT, catalase.

در تیمار شاهد، ارقام الوند، دوروم و هیرمند به ترتیب با وزن ۰/۳۶۲، ۰/۳۵۱ و ۰/۳۵۰ میلی‌گرم بر بوته دارای بیشترین وزن تر گیاهچه بودند و کمترین مقدار آن در رقم کراس بولانی با وزن ۰/۲۴۹ میلی‌گرم بر بوته ثبت شد؛ اما بیشترین وزن تر گیاهچه در شرایط اعمال تنش کلرید سدیم در ارقام روشن، مهدوی و هیرمند به ثبت رسید، البته در همین ارقام نیز اختلاف معنی‌داری بین تیمار شاهد و تیمارهای تنش کلرید سدیم وجود داشت (جدول ۳). به‌صورت میانگین وزن تر گیاهچه در شرایط اعمال تنش کلرید سدیم در سطوح ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌مولار NaCl به ترتیب حدود ۳۸، ۶۹ و ۸۲ درصد کاهش یافت. اکثر گونه‌های گیاهی در مراحل اولیه رشد، ازجمله مراحل جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه، به تنش کلرید سدیم حساس هستند (Uçarlı, 2020).

در طول جوانه‌زنی و سبز شدن، بقای گیاه احتمالاً حیاتی‌ترین شاخص تحمل به شوری است، درحالی‌که پس‌ازآن عملکرد و کاهش رشد ممکن است به‌عنوان معیار نهایی تحمل در نظر گرفته شوند (Saadat and Homaee, 2015).

شدت تنش شوری اغلب با اندازه‌گیری رشد گیاهچه به بهترین وجه تعیین می‌شود، زیرا سبز شدن سریع و یکنواخت گیاهچه یک پیش‌نیاز حیاتی برای دستیابی به پتانسیل عملکرد و درنهایت حداکثر سودآوری محصولات یک‌ساله است (Feghhenabi et al., 2020).

نسخه پیش از انتشار

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح کلرید سدیم و رقم بر صفات موردمطالعه

Table 3. Comparison of interaction effect between different NaCl levels and cultivars on studied traits*

ارقام Cultivars	NaCl levels	SFW	APX	CAT	GPX	Proline	Sodium	Potassium	K^+/Na^+
	mM	gr	mol min^{-1} mg^{-1} protein			----------mg g^{-1} dry weight----------			
شیراز Shiraz	0	0.344	0.86	0.516	0.74	0.952	34.9	21.60	0.660
	100	0.197	1.22	0.670	0.89	1.368	63.1	12.10	0.191
	200	0.089	1.75	0.743	0.99	1.547	74.5	5.33	0.071
	300	0.059	1.85	0.856	1.25	1.758	86.5	3.66	0.042
فلات Falat	0	0.341	1.84	0.626	0.84	0.910	56.7	20.03	0.353
	100	0.219	5.38	0.716	0.94	1.047	72.1	12.20	0.172
	200	0.103	6.20	0.770	1.20	1.240	92.1	4.80	0.051
	300	0.051	6.24	0.833	1.55	1.538	94.4	3.70	0.039
دوروم Durum	0	0.351	0.94	0.513	0.89	0.758	34.0	20.96	0.616
	100	0.180	1.40	0.580	0.97	0.939	48.9	14.83	0.302
	200	0.073	1.94	0.676	1.32	1.068	60.5	5.33	0.088
	300	0.033	2.55	0.786	1.50	1.334	79.7	3.00	0.037
گاسکوژن Gascogne	0	0.323	0.92	0.386	0.91	0.861	64.5	20.86	0.323
	100	0.171	1.52	0.530	1.13	0.988	80.2	11.73	0.146
	200	0.095	2.00	0.633	1.49	1.166	92.9	6.00	0.064
	300	0.052	2.32	0.686	1.66	1.273	98.4	3.66	0.037
مهدوی Mahdavi	0	0.332	1.46	0.543	0.74	0.711	60.6	25.76	0.425
	100	0.252	2.91	0.643	1.17	0.989	73.9	18.43	0.249
	200	0.156	4.27	0.733	1.24	1.169	84.5	11.66	0.137
	300	0.087	6.27	0.896	1.41	1.432	91.5	9.00	0.098
الوند Alvand	0	0.362	0.95	0.550	0.87	0.895	49.4	20.43	0.413
	100	0.224	1.36	0.603	1.45	1.015	59.8	14.50	0.242
	200	0.105	1.74	0.693	1.64	1.215	75.2	7.00	0.093
	300	0.067	1.97	0.730	1.76	1.288	92.4	3.66	0.039
کراس آزادی Cross Azadi	0	0.339	0.76	0.310	1.07	0.840	50.4	20.80	0.412
	100	0.168	0.90	0.486	1.23	0.947	68.1	12.36	0.181
	200	0.067	1.37	0.563	1.30	1.114	76.0	5.66	0.074
	300	0.047	1.96	0.686	1.35	1.271	81.1	4.00	0.049
روشن Roshan	0	0.313	0.76	0.293	0.93	0.852	65.8	24.26	0.370
	100	0.238	0.90	0.433	1.13	1.013	73.9	15.46	0.211
	200	0.153	1.87	0.570	1.39	1.190	83.4	11.66	0.140
	300	0.081	2.86	0.683	1.50	1.246	93.3	8.33	0.089
استار Star	0	0.291	1.11	0.393	1.20	0.756	35.5	21.60	0.633
	100	0.168	1.90	0.500	1.30	0.849	63.4	15.46	0.300
	200	0.094	2.58	0.630	1.43	0.977	73.0	6.66	0.106
	300	0.059	2.60	0.736	1.51	1.141	73.3	3.00	0.040
توس Toos	0	0.332	0.86	0.283	1.02	0.817	65.5	19.36	0.295
	100	0.199	1.55	0.440	1.14	0.966	75.6	10.56	0.139
	200	0.101	2.64	0.610	1.25	1.108	81.7	6.00	0.073
	300	0.066	2.59	0.793	1.34	1.239	91.8	2.66	0.029
هیرمند Hirmand	0	0.350	0.67	0.466	1.09	0.649	60.5	23.26	0.384
	100	0.240	0.87	0.600	1.23	0.913	71.7	16.10	0.224
	200	0.130	2.60	0.676	1.28	1.108	85.5	8.33	0.097
	300	0.067	2.73	0.796	1.41	1.248	88.4	4.00	0.045
کراس بولانی Cross Bolani	0	0.249	2.43	0.490	0.91	0.743	34.9	22.80	0.348
	100	0.192	3.41	0.633	1.06	0.885	63.1	11.86	0.157
	200	0.105	4.28	0.736	1.29	1.036	74.5	7.66	0.093
	300	0.051	5.22	0.856	1.41	1.152	86.5	3.33	0.038
LSD**	-	*0.0281*	*0.340*	*0.0831*	*0.185*	*0.2221*	*6.00*	*1.910*	*0.0611*

میانگین‌های موجود در هر ستون که تفاوت آن‌ها کمتر از مقدار LSD است، ازنظر آماری تفاوت معنی‌داری ندارند ($P<0.05$).

* SFW، وزن تر گیاهچه؛ APX، آسکوربات پراکسیداز؛ GPX، گلوتاتیون پراکسیداز؛ CAT، کاتالاز

The mean values presented in each column, which exhibit a difference less than the LSD value, are not statistically significantly different ($P<0.05$).

* SFW, seedling fresh weight; APX, ascorbate peroxidase; GPX, glutathione peroxidase; CAT, catalase.

عوامل مختلفی عملکرد محصول را تحت تنش شوری مختل می‌کنند، اما تنش اسمزی، عدم تعادل یونی و تنش اکسیداتیو از مهم‌ترین آن‌ها هستند (Sabagh et al., 2021). تنش اسمزی منجر به تجمع بیشتر نمک‌ها در شیره سلولی و بافت‌ها می‌شود که به‌صورت سوختگی و پژمردگی برگ قابل‌مشاهده است. گزارش شده است که این علائم به‌طور مستقیم با تجمع Na^+ و Cl^- مرتبط هستند؛ بنابراین، این عدم تعادل یونی باعث عدم تعادل در عناصر غذایی شده که جوانه‌زنی را کاهش می‌دهد و بر فرآیندهای متابولیک بعدی تأثیر منفی می‌گذارد (Hussain et al., 2019). علاوه بر این، تنش اکسیداتیو اعمال‌شده از طریق تولید سریع گونه‌های فعال اکسیژن، پراکسیداسیون لیپیدی را تحریک کرده و اسیدهای نوکلئیک را مختل می‌کند که درنهایت بنیه و عملکرد کلی بذر آسیب‌دیده را کاهش می‌دهد (Rajabi Dehnavi et al., 2020; Kumari and Kaur, 2018).

فعالیت آسکوربات پراکسیداز

برهمکنش کلرید سدیم و رقم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود که نشان‌دهنده وجود روندهای متفاوت تغییرات میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز در ارقام موردبررسی در هر سطح کلرید سدیم است (جدول ۳). نتایج حاصل از مقایسه میانگین برهمکنش کلرید سدیم و رقم نتایج نشان داد که با افزایش کلرید سدیم میزان آسکوربات پراکسیداز افزایش یافت و به‌صورت میانگین میزان آسکوربات پراکسیداز در شرایط اعمال تنش کلرید سدیم در سطوح ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی-مولار NaCl به ترتیب حدود ۷۲، ۱۴۵ و ۱۸۸ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود (جدول ۲). البته این میزان افزایش وابسته به رقم بود، میزان آسکوربات پراکسیداز در ارقامی مانند فلات، مهدوی و کراس بولانی با ثبت مقدار ۴/۹۱، ۳/۷۳ و ۳/۸۳ میکرومول بر دقیقه بیشتر از سایر ارقام بود. در رقم مهدوی و کراس بولانی رابطه مستقیمی بین افزایش سطح کلرید سدیم و آسکوربات پراکسیداز مشاهده شد اما این افزایش در رقم فلات تا سطح ۲۰۰ میلی مولار کلرید سدیم ادامه داشت و بعدازآن اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. افزایش آسکوربات پراکسیداز به‌عنوان یک عامل در کاهش گونه‌های فعال اکسیژن تحت شرایط تنش کلرید سدیم در ارقام مقاوم گندم توسط سایر نویسندگان نیز گزارش شده است (Abdel Latef et al., 2019; Ahmadi et al., 2020; Zeeshan et al., 2020). همچنین تعادل بین فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون پراکسیداز و کاتالاز که جزو مکانیسم‌های اصلی مهار آنزیمی H_2O_2 در گیاهان محسوب می‌شوند، برای فرونشاندن سطوح سمی H_2O_2 در سلول گیاهی حیاتی هستند (Sofo et al., 2015).

فعالیت گلوتاتیون پراکسیداز

فعالیت گلوتاتیون پراکسیداز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر رقم، سطح کلرید سدیم و برهمکنش این دو قرار گرفت (جدول ۱). در ارقام الوند، استار و کاسکوژن به ترتیب با میزان ۱/۴۳، ۱/۳۶ و ۱/۳۰ میکرومول بیشترین مقدار فعالیت گلوتاتیون پراکسیداز ثبت شد (جدول ۳). با افزایش سطح کلرید سدیم میزان فعالیت گلوتاتیون پراکسیداز افزایش یافت، اما شیب افزایش آن ملایم‌تر از آسکوربات پراکسیداز بود (جدول ۲). به صورتی که در بعضی از ارقام مانند کراس آزادی، استار و توس تفاوت معنی‌داری بین سطح ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم مشاهده نشد (جدول ۳). این یافته با نتایج سایر محققین انطباق دارد (Talaat and Todorova, 2022). گزارش شده است که فعالیت پایین آنزیم‌های پراکسیداز موجب تجمع پراکسید هیدروژن و حساسیت به تنش کلرید سدیم می‌گردد (Shokrpour and Esfandiari, 2014). در مقابل، افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز مانع افزایش میزان پراکسید هیدروژن در سلول‌های گیاهی می‌شود.

فعالیت کاتالاز

نتایج حاکی از معنی‌داری اثر مستقل رقم و همچنین اثر مستقل کلرید سدیم در سطح احتمال یک درصد و نیز معنی-داری برهمکنش رقم و کلرید سدیم بر فعالیت آنزیم کاتالاز بود (جدول ۱). صرف‌نظر از رقم، با افزایش شدت تنش کلرید سدیم میزان کاتالاز در گیاهچه‌ها افزایش یافت (جدول ۲) و از مقدار ۰/۴۴ میلی‌مول در تیمار شاهد به ۰/۷۸ میلی-مول در تیمار ۳۰۰ میلی‌مولار NaCl رسید (جدول ۲)؛ اما آنچه باعث معنی‌دار شدن اثر متقابل رقم و کلرید سدیم شد، صرفاً تفاوت در شیب پاسخ ارقام مختلف به افزایش سطح کلرید سدیم بود (جدول ۳). به‌عنوان‌مثال در رقم مهدوی و توس رابطه مستقیمی بین افزایش کاتالاز و افزایش سطح کلرید سدیم مشاهده شد اما در ارقامی مانند کاسکوژن و الوند رابطه به‌صورت منحنی بود و میزان افزایش کاتالاز بعد از غلظت ۲۰۰ میلی‌مولار کاهش یافت. در برخی از گیاهان مقاوم به

نسخه پیش از انتشار

شوری، افزایش فعالیت کاتالاز پس از تیمار NaCl ثبت‌شده است (Acosta-Motos et al., 2017; Mushtaq et al., 2020; Zhang et al., 2016) که نشان‌دهنده افزایش فعالیت تنفسی نوری است (Acosta-Motos et al., 2015). کاتالاز عمدتاً در پراکسی‌زوم برگ‌ها به‌منظور حذف H_2O_2 حاصل از تنفس نوری یا بتااکسیداسیون اسیدهای چرب در گلی‌اکسی‌زوم حضور دارد (Dat et al., 2000). افزایش فعالیت کاتالاز در گیاهان مقاوم به شوری ممکن است نشان‌دهنده دخالت تنفس نوری در پاسخ به تنش شوری باشد. ارتباط بین فعالیت کاتالاز و فتوسنتز گزارش داده شده است، زیرا افزایش کاتالاز باعث کاهش تلفات CO_2 از طرق تنفس نوری می‌شود (Brisson et al., 1998).

پرولین

اثر سطح کلرید سدیم و رقم بر میزان پرولین معنی‌دار بود (جدول ۱). کمترین میزان پرولین برگ در تیمار شاهد و بیشترین میزان پرولین در تیمار ۳۰۰ میلی‌مولار ثبت شد (جدول ۱). در ارقام نیز تفاوت معنی‌داری به لحاظ میزان پرولین وجود داشت به‌طوری‌که بیشترین میزان پرولین در ارقام شیراز و فلات و کمترین میزان پرولین در ارقام، استار، هیرمند و کراس بولانی ثبت شد (جدول ۳). یکی از پاسخ‌های عمومی گیاهان برای تعدیل اثر تنش شوری و خشکی سنتز و انباشت محلول‌های حفاظت‌کننده اسمزی مانند پرولین است (Alhasnawi, 2019). علاوه بر اینکه پرولین به‌عنوان یک محافظ اسمزی عمل می‌کند، خواص آنتی‌اکسیدانی نیز برای آن گزارش شده است و می‌تواند به‌عنوان یک جانشین مولکولی برای محافظت از ساختار ماکرومولکول‌های بیولوژیکی در طول تنش عمل کند، بنابراین تحمل گیاه به تنش‌های محیطی را بهبود می‌بخشد (Ashraf and Foolad, 2007). البته، هرچند نقش پرولین در تنش شوری و خشکی کاملاً مستند شده است، اما در مقابل بیشتر گزارش‌های موجود در رابطه با تغییرات غلظت سدیم، پرولین، فعالیت آنزیم‌های سوپر اکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون پراکسیداز متناقض هستند و هیچ مدرک مستندی مبنی بر اینکه میزان تجمع پرولین، سدیم و فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز در ارقام حساس لزوماً کمتر از ارقام مقاوم است، وجود ندارد (Mansour and Ali, 2017).

غلظت سدیم، پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم

غلظت سدیم، پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم به‌صورت معنی‌داری تحت تأثیر رقم، سطح کلرید سدیم و برهمکنش این دو قرار گرفت (جدول ۱). با افزایش میزان کلرید سدیم مقدار سدیم افزایش و میزان پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم کاهش یافت (جدول ۱). بیشترین میزان تجمع سدیم در ارقام کاسکوژن، الوند، روشن و توس مشاهده شد (جدول ۳). طبق نتایج ماتیوس (Maathuis, 2014) در شوری کم، اکوتیپ حساس دارای محتوای Na^+ کمتری است اما در سطوح متوسط تا زیاد NaCl، گونه یا اکوتیپ حساس کنترل خود را روی جذب Na^+ از دست می‌دهد و مقادیر زیادی Na^+ را به اندام‌های هوایی منتقل می‌کند که به مرگ گیاه منتهی می‌شود. در ارقام هیرمند، کراس بولانی و فلات تفاوت معنی‌داری در محتوای سدیم گیاهچه بین تیمارهای ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم مشاهده نشد، اما برای سایر ارقام تفاوت معنی‌دار بود. میزان پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم در ارقام کاسکوژن، الوند، روشن و توس به‌شدت کاهش یافت (جدول ۳). مثل اکثر صفات ارقام مختلف واکنش دوگانه‌ای نسبت به این صفات نشان ندادند، میزان این صفات در تیمار شاهد تفاوت معنی‌داری در بین ارقام داشت و با اعمال تیمار کلرید سدیم شیب افزایش سدیم و شیب کاهش پتاسیم در بین ارقام متفاوت بود. درحالی‌که توانایی گیاهان برای مقابله با تنش شوری به‌شدت به فراهمی K^+ بستگی دارد، تنش شوری باعث کمبود مزمن K^+ در گیاهان می‌شود (Johnson et al, 2022). تحت تنش شوری، تلفات K^+ از گیاهان به خاطر حضور کلرید سدیم یک پدیده رایج است و این رویداد در گونه‌های حساس به شوری نسبت به گونه‌های گیاهی مقاوم بارزتر است (Chen et al., 2007). در سال‌های اخیر، توانایی بافت‌های مختلف گیاهی برای حفظ پتاسیم تحت تنش شوری (که احتباس سیتوزولی K^+ نامیده می‌شود) به‌عنوان یک ویژگی مهم برای تحمل به شوری نشان داده شده است. پس از کاربرد NaCl، خروج K^+ از ناحیه بالغ ریشه گندم همبستگی بالا و منفی با عملکرد گیاه در زمان برداشت دارد (Wu et al. 2018). ارقام جو مقاوم به شوری سه برابر بیشتر از ژنوتیپ‌های حساس توانایی حفظ K^+ را در ریشه نشان دادند (Chen et al., 2007). در گندم، خروج القاشده K^+ توسط NaCl در مزوفیل برگ در ارقام حساس به شوری به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از ارقام مقاوم به شوری بود (Wu et al, 2018). همچنین، ارقام مقاوم به شوری گندم نان،

نسخه پیش از انتشار

توانایی نگهداری مزوفیلی K^+ بیشتری را نسبت به ارقام حساس گندم دوروم نشان دادند (Wu et al, 2014).

تجزیه همبستگی و رگرسیونی

نتایج نشان داد که ضریب همبستگی بین سطوح مختلف کلرید سدیم با صفات موردراندازه‌گیری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). همچنین نتایج نشان داد که صفات وزن تر گیاهچه (R^2=0.89)، پتاسیم (R^2=0.86) و نسبت پتاسیم به سدیم (R^2=0.69) به‌طور قابل‌توجهی واکنش منفی به افزایش شوری را نشان می‌دهند؛ اما واکنش سایر صفات به افزایش شوری به میزان بیشتری تحت تأثیر رقم بود (جدول ۳) که باعث کاهش ضریب اطمینان آن‌ها برای گزینش در شرایط شوری می‌شود. نتایج تجزیه همبستگی نشان داد که رابطه مثبت و معنی‌داری بین میزان پتاسیم (۰/۹۴) و نسبت پتاسیم به سدیم (۰/۸۵) با وزن تر گیاهچه وجود داشت (جدول ۴). گلوتاتیون پراکسیداز (۰/۷۳)، کاتالاز (۰/۷۱)، پرولین (۰/۷۱) و سدیم (۰/۷۳) با اختلاف کمی نسبت به یکدیگر رابطه منفی و معنی‌داری با وزن تر گیاهچه داشتند. هرچند ضریب رگرسیونی و همبستگی برای آسکوربات پراکسیداز معنی‌دار بود، اما این آنزیم نسبت به سایر صفات همبستگی کمتری با وزن تر گیاهچه داشت و افزایش کلرید سدیم به میزان کمتری قادر به پیش‌بینی غلظت این آنزیم بود.

نتیجه‌گیری نهایی

در میان تنش‌های غیرزنده، تنش شوری به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدها برای پایداری تولید گندم مطرح شده است. تنش شوری با ایجاد اختلال در بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی حیاتی منجر به کاهش شدید عملکرد و کیفیت محصول می‌شود. اگرچه ارقام مقاوم به شوری چندین مکانیسم فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را برای سازگاری تحت تنش شوری به کار می‌گیرند، اما در سطح جهانی کمبود ارقام گندم مقاوم به شوری وجود دارد؛ بنابراین، متخصصین علوم فیزیولوژی، اصلاح نباتات و زراعت باید یک استراتژی یکپارچه و پایدار برای افزایش تحمل به شوری در گندم ایجاد کنند. در این تحقیق چندین صفت فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در ارتباط با مقاومت به شوری بررسی شد. نتایج نشان داد که از میان این صفت‌ها غلظت آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز و نسبت پتاسیم به سدیم ارتباط خوبی با وزن تر گیاهچه و به‌تبع آن تحمل به کلرید سدیم داشتند. درحالی‌که با افزایش سطح شوری روند افزایشی در میزان آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون پراکسیداز، کاتالاز، پرولین و سدیم در برگ گیاهچه‌های گندم مشاهده شد و در مقابل میزان وزن تر گیاهچه، پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم کاهش یافت. مقایسه بین ارقام به نتایج گوناگونی منجر شد. به‌عنوان‌مثال درحالی‌که با افزایش سطح کلرید سدیم میزان آسکوربات پراکسیداز و کاتالاز در رقم فلات نسبت به اکثر ارقام بیشتر بود اما در میزان گلوتاتیون پراکسیداز و نسبت پتاسیم به سدیم در این رقم برتری نسبت به ارقام دیگر مشاهده نشد. به‌طورکلی با توجه به نتایج این آزمایش می‌توان استنباط کرد که وزن تر گیاهچه، پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم شاخص‌های مؤثرتری برای گزینش بین ارقام در شرایط تنش شوری هستند.

قدردانی

از معاونت محترم پژوهشی مجتمع آموزش عالی سراوان برای حمایت مالی در انجام این پروژه با شماره ۱۶/۲۸۵۳ تشکر و قدردانی می‌گردد.

جدول ۴. ضرایب همبستگی و رگرسیونی بین صفات اندازه‌گیری شده و سطح کلرید سدیم و ضرایب همبستگی بین صفات اندازه‌گیری شده و وزن تر گیاهچه

Table 4. Correlation (r) and Regression coefficients (R^2) between measured traits and sodium chloride levels and correlation coefficients (r) between measured traits and seedling fresh weight

صفات اندازه‌گیری شده Measured traits	r	R^2	Sig.
آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase	-0.50	0.28	<.0001
گلوتاتیون پراکسیداز Glutathione peroxidase	-0.73	0.57	<.0001
کاتالاز Catalase	-0.71	0.62	<.0001
پرولین Proline	-0.71	0.54	<.0001
سدیم Sodium	-0.73	0.6	<.0001
پتاسیم Potassium	0.94	0.86	<.0001
نسبت پتاسیم به سدیم K^+/Na^+	0.85	0.69	<.0001
وزن تر گیاهچه Seedling fresh weight	1	0.89	<.0001

نسخه پیش از انتشار

منابع

Abdel Latef, A.A.H., Kordrostami, M., Zakir, A., Zaki, H., Saleh, O.M., 2019. Eustress with H2O2 facilitates plant growth by improving tolerance to salt stress in two wheat cultivars. Plants. 8, p.303. https://doi.org/10.3390/plants8090303

Acosta-Motos, J.R., Diaz-Vivancos, P., Alvarez, S., Fernández-García, N., Sanchez-Blanco, M.J., Hernández, J.A., 2015. Physiological and biochemical mechanisms of the ornamental Eugenia myrtifolia L. plants for coping with NaCl stress and recovery. Planta. 242, 829-846. https://doi.org/10.1007/s00425-015-2315-3

Acosta-Motos, J.R., Ortuño, M.F., Bernal-Vicente, A., Diaz-Vivancos, P., Sanchez-Blanco, M.J., Hernandez, J.A., 2017. Plant responses to salt stress: adaptive mechanisms. Agronomy. 7, 18. https://doi.org/10.3390/agronomy7010018

Aebi, H., 1984. Catalase in vitro. Methods in Enzimology. 105, 121 -126.

Ahmadi, J., Pour-Aboughadareh, A., Fabriki Ourang, S., Khalili, P., Poczai, P., 2020. Unraveling salinity stress responses in ancestral and neglected wheat species at early growth stage: A baseline for utilization in future wheat improvement programs. Physiology and Molecular Biology of Plants. 537-549. https://doi.org/10.1007/s12298-020-00768-4

Ahmadi, J., Pour-Aboughadareh, A., 2018. Expression pattern of anti-oxidant genes in wheat wild relatives under water deficit stress. Modern Genetics Journal. 13, (3), 353-361. [In Persian with English Summary]

Anagholi, Amin., Ranjbar, Gholamhossein., 2018. Technical Journal of Principles and Methods of Salinity Stress Experiments in Agricultural Research. Ministry of Jihad Agriculture. Agricultural Research, Education and Promotion Organization. Library registration number 55810.

Anjum, N.A., Sharma, P., Gill, S.S., Hasanuzzaman, M., Khan, E.A., Kachhap, K., Mohamed, A.A., Thangavel, P., Devi, G.D., Vasudhevan, P. and Sofo, A., 2016. Catalase and ascorbate peroxidase—representative H2O2-detoxifying heme enzymes in plants. Environmental science and pollution research. 23, 19002-19029. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7309-6

Alhasnawi, A.N., 2019. Role of proline in plant stress tolerance: A mini review. Research on Crops. 20(1), 223-229. https://doi.org/10.31830/2348-7542.2019.032

Arzani, A, Salehi, M., 2013 Antioxidant activity and oxidative stress due to salinity in triticale and wheat lines in field condition. Journal of Plant Process and Function. 1, 38-49. [In Persian with English Summary].

Ashraf, M.F.M.R., Foolad, M.R., 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. Environmental and Experimental Botany. 59, 206-216. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006

Azizpour, K., Shakiba, M., Khosh Kholgh Sima, N., Alyari, H., Moghaddam, M., Esfandiari, E., Pessarakli, M., 2010. Physiological response of spring durum wheat genotypes to salinity. Journal of Plant Nutrition. 33, 859-873. https://doi.org/10.1080/01904161003654097

Bates, I. S., Waldem, R. P., Teare, I. D., 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant and Soil. 39, 205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Bauwe, H., Hagemann, M., Kern, R., Timm, S., 2012. Photorespiration has a dual origin and manifold links to central metabolism. Current Opinion in Plant Biology. 15, 269-275. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2012.01.008

Brisson, L.F., Zelitch, I., Havir, E.A., 1998. Manipulation of catalase levels produces altered photosynthesis in transgenic tobacco plants. Plant Physiology. 116, 259-269. https://doi.org/10.1104/pp.116.1.259

Bugbee, B., 2004. Nutrient management in recirculating hydroponic culture. Acta Horticulture. 648, 99-112. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.12

Chen, Z., Pottosin, I.I., Cuin, T.A., Fuglsang, A.T., Tester, M., Jha, D., Zepeda-Jazo, I., Zhou, M., Palmgren, M.G., Newman, I.A., Shabala, S., 2007. Root plasma membrane transporters controlling K+/Na+ homeostasis in salt-stressed barley. Plant Physiology. 145, 1714-1725. https://doi.org/10.1104/pp.107.110262

Dar, M.I., Naikoo, M.I., Rehman, F., Naushin, F., Khan, F.A., 2016. Proline accumulation in plants: roles in stress tolerance and plant

development. In: Iqbal, N., Nazar, R., A. Khan, N. (eds) Osmolytes and plants acclimation to changing environment. emerging omics technologies. Springer, New Delhi. pp.155-166. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2616-1_9

Dat, J., Vandenabeele, S., Vranova, E.V.M.M., Van Montagu, M., Inzé, D., Van Breusegem, F., 2000. Dual action of the active oxygen species during plant stress responses. Cellular and Molecular Life Sciences CMLS. 57, 779-795. https://doi.org/10.1007/s000180050041

Grover, A., Singh, A., Blumwald, E., 2012. Transgenic strategies toward the development of salt-tolerant plants. In Agricultural Salinity Assessment and Management. pp. 235-274. https://doi.org/10.1061/9780784411698.ch08

Feghhenabi, F., Hadi, H., Khodaverdiloo, H., Van Genuchten, M.T., 2020. Seed priming alleviated salinity stress during germination and emergence of wheat (Triticum aestivum L.). Agricultural Water Management. 231, 106022. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106022

Heidari, A., Toorchi, M., Bandehagh, A., Shakiba, M.R., 2011. Effect of NaCl stress on growth, water relations, organic and inorganic osmolytes accumulation in sunflower (*Helianthus annuus* L.) lines. Universal Journal of Environmental Research and Technology. 1, 351-362.

Hoagland, D.R., Arnon, D.I., 1950. The water-culture method for growing plants without soil. Circular. California Agricultural Experiment Station. 347 (2nd ed.).

Hussain, S., Shaukat, M., Ashraf, M., Zhu, C., Jin, Q., Zhang, J., 2019. Salinity stress in arid and semi-arid climates: Effects and management in field crops. Climate Change And Agriculture, pp: 13. https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.87982

Johnson, R., Vishwakarma, K., Hossen, M.S., Kumar, V., Shackira, A.M., Puthur, J.T., Abdi, G., Sarraf, M., Hasanuzzaman, M., 2022. Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. Plant Physiology and Biochemistry. 172, pp. 56-69. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.01.001

Kumari, A., Kaur, R., 2018. Evaluation of benzyl-butyl phthalate induced germination and early growth vulnerability to barley seedlings (Hordeum vulgare L.). Indian Journal of Ecology. 45, 174-177.

Maathuis, F.J., 2014. Sodium in plants: perception, signalling, and regulation of sodium fluxes. Journal of Experimental Botany. 65, 849-858. https://doi.org/10.1093/jxb/ert326

Mansour, M.M.F., 2000. Nitrogen containing compounds and adaptation of plants to salinity stress. Biologia Plantarum. 43, 491-500. https://doi.org/10.1023/A:1002873531707

Mansour, M.M.F., Ali, E.F., 2017. Evaluation of proline functions in saline conditions. Phytochemistry. 140, 52-68. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2017.04.016

Martinez-Beltran, J., 2005. Overview of salinity problems in the world and FAO strategies to address the problem. In Managing saline soils and water: science, technology and social issues. Proceedings of the international salinity forum, Riverside, California, 2005.

Munns, R., 2002. Comparative physiology of salt and water stress. Plant, Cell and Environment. 25, 239-250. https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x

Mushtaq, Z., Faizan, S., Gulzar, B., 2020. Salt stress, its impacts on plants and the strategies plants are employing against it: A review. Journal of Applied Biology and Biotechnology. 8, 81-91. https://doi.org/10.7324/JABB.2020.80315

Nakano, Y., Asada, K., 1987. Purification of ascorbate peroxidase in spinach chloroplast: in inactivation in ascorbate-depleted medium and reactivation by monodehydroascorbate radical. Plant and Cell Physiology. 28, 131-140. https://doi.org/10.1093/OXFORDJOURNALS.PCP.A077268

Nickel, R.S., Cunningham, B.A., 1969. Improved peroxidase assay method using Ieuco 2,3,6-trichloroindophenol and application to comparative measurements of peroxidase catalysis. Analytical Biochemistry. 27, 292-299. https://doi.org/10.1016/0003-2697(69)90035-9

Rajabi Dehnavi, A., Zahedi, M., Ludwiczak, A., Cardenas Perez, S.,Piernik, A., 2020. Effect of salinity on seed germination and seedling development of sorghum (Sorghum bicolor L. Moench) genotypes. Agronomy. 10, 859. https://doi.org/10.3390/agronomy10060859

Ries, M.L., 2020. The Effect of Salinity on Soil Microbial Community Structure. Doctoral dissertation, North Dakota State University. https://hdl.handle.net/10365/31807

RoyChoudhury, A., Roy, C., Sengupta, D.N., 2007. Transgenic tobacco plants overexpressing the heterologous lea gene Rab16A from rice during high salt and water deficit display enhanced tolerance to salinity stress. Plant Cell Reports. 26, 1839-1859. https://doi.org/10.1007/s00299-007-0371-2

Saadat, S., Homaee, M., 2015. Modeling sorghum response to irrigation water salinity at early growth stage. Agricultural Water Management. 152, 119-124. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.008

Sabagh, E.L., Islam, A., Skalicky, M.S., Ali Raza, M., Singh, K., Anwar Hossain, M., Hossain, A., Mahboob, W., Iqbal, M.A., Ratnasekera, D., Singhal, R.K., 2021. Salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) in the changing climate: Adaptation and management strategies. Frontiers in Agronomy. 3, 661932. https://doi.org/10.3389/fagro.2021.661932

Shahid, S.A., Zaman, M., Heng, L., 2018. Soil salinity: Historical perspectives and a world overview of the problem. In: Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques. Springer, Cham. pp: 43-53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_2

Schatchman, D.P., Munns, R., Whitecross, M.I., 1991. Variation in sodium exclusion and salt tolerance in *Triticum tauschii*. Crop Science. 31, 992-997. https://doi.org/10.2135/cropsci1991.0011183X003100040030x

Shabala, S., Pottosin, I., 2014. Regulation of potassium transport in plants under hostile conditions: implications for abiotic and biotic stress tolerance. Physiologia Plantarum. 151, 257-279. https://doi.org/10.1111/ppl.12165

Shokrpour, M., Esfandiari, E., 2014. Grouping different wheat varieties for salt tolerance using some biochemical and physiological indices. Journal of Crop Breeding. 6(14), 54-66. [In Persian].

Sofo, A., Scopa, A., Nuzzaci, M., Vitti, A., 2015. Ascorbate peroxidase and catalase activities and their genetic regulation in plants subjected to drought and salinity stresses. International Journal of Molecular Sciences. 16, 13561-13578. https://doi.org/10.3390/ijms160613561

Talaat, N.B., Todorova, D., 2022. Antioxidant machinery and glyoxalase system regulation confers salt stress tolerance to wheat (*Triticum aestivum* L.) plants treated with melatonin and salicylic Acid. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 22, 3527-3540. https://doi.org/10.1007/s42729-022-00907-8

Uçarlı, C., 2020. Effects of salinity on seed germination and early seedling stage. Abiotic Stress in Plants; Intechopen: London, UK; pp. 211–232. https://doi.org/10.5772/intechopen.93647

Wang, W., Vinocur, B., Altman, A., 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. Planta. 218, 1-14. https://doi.org/10.1007/s00425-003-1105-5

Weimberg, R., 1987., Solute adjustments in leaves of two specious of wheat at two different stages of growth in response to salinity. Physiologia Plantarum. 70, 381-388. https://doi.org/10.1111/J.1399-3054.1987.TB02832.X

Wu, H., Shabala, L., Zhou, M., Shabala, S., 2014. Durum and bread wheat differ in their ability to retain potassium in leaf mesophyll: implications for salinity stress tolerance. Plant and Cell Physiology. 55, 1749-1762. https://doi.org/10.1093/pcp/pcu105

Wu, H., Shabala, L., Azzarello, E., Huang, Y., Pandolfi, C., Su, N., Wu, Q., Cai, S., Bazihizina, N., Wang, L., Zhou, M., 2018. Na+ extrusion from the cytosol and tissue-specific Na+ sequestration in roots confer differential salt stress tolerance between durum and bread wheat. Journal of Experimental Botany. 69, 3987-4001. https://doi.org/10.1093/jxb/ery194

Zeeshan, M., Lu, M., Sehar, S., Holford, P., Wu, F., 2020. Comparison of biochemical, anatomical, morphological, and physiological responses to salinity stress in wheat and barley genotypes deferring in salinity tolerance. Agronomy. 10, (1), 127. https://doi.org/10.3390/agronomy10010127

Zhang, S., Gan, Y., Xu, B., 2016. Application of plant-growth-promoting fungi Trichoderma longibrachiatum T6 enhances tolerance of wheat to salt stress through improvement of antioxidative defense system and gene expression. Frontiers in Plant Science. 7, 1405. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01405

Zinati, Z., Alemzadeh, A., 2019. Identification of superior biochemical markers linked to salinity

tolerance in wheat using data mining. Agricultural Biotechnology Journal. 10, 55-74. [In Persian]. https://doi.org/10.22103/jab.2019.2249

Zörb, C., Senbayram, M., Peiter, E., 2014. Potassium in agriculture–status and perspectives. Journal of Plant Physiology. 171, 656-669. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008

نسخه پیش از انتشار