

Evaluation of salinity-stress tolerance indices in bread wheat based on grain yield, root dry weight, and biomass traits for the selection of tolerant genotypes

Basel Alabdullahalhasno¹, Hassan Soltanloo^{2*}, Seyedeh Sanaz Ramezanzpour,
Hadi Darzi Ramandi⁴

¹ PhD student in Plant Genetics and Breeding, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,

Email: hasno.b1989a@gmail.com

² Corresponding author, Associate Professor, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: soltanloooh@gau.ac.ir

³ Professor, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: ramezanzpours@gau.ac.ir

⁴ PhD in Molecular Plant Breeding, Department of Systems Biology, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran, Email: hramandi4@gmail.com

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Full Paper

Background and purpose: Salinity stress is a major limiting factor for bread wheat production and poses a significant threat to global food security. The root system, critical for water and nutrient absorption, plays an essential role in determining yield under saline conditions. Root development directly influences grain yield and biomass production in salt-affected soils. Therefore, selecting salinity-tolerant genotypes through the simultaneous evaluation of root dry weight, biomass and grain yield traits and stress tolerance indices is an effective strategy for identifying salt-tolerant genotypes in breeding programs.

Article history:

Received: 2025-04-16

Accepted: 2025-06-09

Materials and methods: This study evaluated 92 bread wheat genotypes, including commercial cultivars and native lines, in a split-plot design within a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The experiment was conducted under both saline (16.9 dS/m) and non-saline (2.3 dS/m) soil conditions in pots at the research greenhouse of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources during the 2022–2023 year. Key traits such as grain yield, biomass, and root dry weight were measured after full plant maturity to assess their relationships under salinity stress.

Keywords:

Bread wheat

Principal component analysis

Root architecture

Stress tolerance indices

Results: Analysis of variance revealed statistically significant differences among genotypes for grain yield, biomass, and root dry weight under both saline and non-saline conditions. Salinity stress significantly reduced these traits, with the greatest decreases observed in grain yield (71%), biomass (65%), and root dry weight (53%) based on the sensitivity index (SI). A positive and significant correlation was found between root dry weight and grain yield (0.57**) and biomass (0.84**) under salt stress, underscoring the critical role of root traits in improving yield under saline environments. Simple linear regression analysis further demonstrated

that root dry weight significantly influenced grain yield and biomass, explaining 51% and 71% of their variation, respectively. Estimates indicated that each unit increase in root dry weight contributed an additional 0.95 grams to grain yield. Additionally, correlation analyses between performance traits and various salt tolerance indices highlighted the pivotal role of root characteristics in enhancing stress tolerance. Principal component analysis (PCA) had effectively showed a crucial role in the more precise discrimination of genotypes based on performance traits and salinity tolerance indices, contributed to the convergence of clustering dendrograms derived from tolerance indices in genotype classification pattern. Finally, the consistency among these findings facilitated the identification of genotypes exhibiting superior grain yield, root dry weight, and enhanced salinity tolerance.

Conclusion: Root architecture plays a fundamental role in improving salt tolerance in bread wheat. Genotypes with higher root dry weight under salt stress not only maintained acceptable grain yields but also exhibited enhanced biomass production. Therefore, prioritizing root traits in breeding programs represents a promising strategy to enhance yield stability and improve wheat productivity under saline conditions.

Cite this article: Alabdullahalhasno, B., Soltanloo, H., Ramezanpour ,S.S., Darzi Ramandi, H. 2025. Evaluation of salinity-stress tolerance indices in bread wheat based on grain yield, root dry weight, and biomass traits for the selection of tolerant genotypes. *Crop Production Journal*, 18 (1), 177-216.



© The Author(s).

DOI: [10.22069/ejcp.2025.23535.2676](https://doi.org/10.22069/ejcp.2025.23535.2676)

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



ارزیابی شاخص‌های تحمل به تنش شوری در گندم نان براساس صفات عملکرد دانه،

وزن خشک ریشه و زیست‌توده برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل

باسل العبداله الحسنو^۱، حسن سلطانلو^{۲*}، سیده ساناز رمضانپور^۳، هادی درزی رامندی^۴

^۱ دانشجوی دکتری ژنتیک و به‌نژادی گیاهی، گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، رایانامه: hasno.b1989a@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، رایانامه: soltanlooh@gau.ac.ir

^۳ استاد گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، رایانامه: ramezanpours@gau.ac.ir

^۴ دکتری تخصصی اصلاح نباتات مولکولی، بخش تحقیقات فیزیولوژی مولکولی، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران، رایانامه: hramandi4@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	سابقه و هدف: تنش شوری به‌عنوان یکی از عوامل اصلی محدودکننده تولید گندم نان شناخته‌شده و تهدیدی جدی برای امنیت غذایی جهانی محسوب می‌شود. سیستم ریشه به‌عنوان بخشی حیاتی در جذب آب و عناصر غذایی از خاک، نقش کلیدی در تعیین عملکرد گندم نان ایفاء می‌کند و رشد و توسعه ریشه تحت شرایط شور به طور مستقیم با عملکرد نهایی مرتبط است. در این راستا، گزینش ژنوتیپ‌های متحمل از طریق ارزیابی همزمان صفات عملکرد دانه، وزن خشک ریشه و زیست‌توده به همراه شاخص‌های کمی تحمل به شوری، رویکردی مؤثر برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل در برنامه‌های اصلاحی محسوب می‌شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱/۲۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۲۰	
واژه‌های کلیدی:	مواد و روش‌ها: در این پژوهش، ۹۲ ژنوتیپ گندم نان مشتمل بر ارقام تجاری و لاین‌های بومی در یک آزمایش کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، در شرایط خاک شور (۱۶/۹ دسی‌زیمنس بر متر) و شرایط زراعی (۲/۳ دسی‌زیمنس بر متر) به‌صورت گلدانی در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ مورد ارزیابی قرار گرفتند. پس از رسیدگی کامل گیاهان، صفات عملکرد دانه، زیست‌توده و وزن خشک ریشه اندازه‌گیری شد تا ارتباط بین صفات بررسی شود.
گندم نان	
تجزیه به مؤلفه‌های اصلی	یافته‌ها: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین ژنوتیپ‌ها در هر دو سطح شور و غیر شور برای صفات عملکرد دانه، زیست‌توده و وزن خشک ریشه اختلاف آماری معنی‌داری وجود دارد.
ساختار ریشه	بررسی‌ها نشان داد که تنش شوری منجر به کاهش قابل‌توجه این صفات شد. بر اساس شاخص حساسیت (SI)، بیشترین کاهش به ترتیب در صفات عملکرد دانه (۰/۷۱)، زیست‌توده (۰/۶۵) و وزن خشک ریشه (۰/۵۳) مشاهده شد. همبستگی مثبت و معنی‌داری بین وزن خشک ریشه با
شاخص‌های تحمل به تنش	

عملکرد دانه ($0/57^{**}$) و زیست توده ($0/84^{**}$) در شرایط تنش شوری مشاهده شد که اهمیت نقش ریشه در بهبود عملکرد در محیط‌های شور را تأیید می‌کند. از سوی دیگر، نتایج تجزیه رگرسیون خطی ساده حاکی از آن بود که وزن خشک ریشه در شرایط تنش شوری تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه و زیست توده دارد که به ترتیب ۵۱ درصد از تغییرات عملکرد دانه و ۷۱ درصد از تغییرات زیست توده را تبیین کرد. برآوردها نشان داد که هر واحد افزایش در وزن خشک ریشه به میزان $0/95$ گرم به عملکرد دانه اضافه می‌کند. علاوه بر این، بررسی ضرایب همبستگی بین صفات عملکردی و شاخص‌های مختلف تحمل به شوری، نقش محوری صفات ریشه‌ای در افزایش تحمل به تنش را تأیید کرد. در مرحله بعد، مطالعه شاخص‌های MP, HM, GMP و STI نشان داد که این شاخص‌ها در هر دو محیط (شور و غیر شور) به عنوان معیارهای مناسبی برای شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا عمل می‌کنند. همچنین، استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) در تفکیک دقیق‌تر ژنوتیپ‌ها بر پایه شاخص‌های عملکردی و تحمل به شوری نقش مهمی ایفاء کرد و منجر به هم‌پوشانی نتایج دندوگرام‌های تجزیه خوشه‌ای مبتنی بر شاخص‌های تحمل در الگوی گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها شد. در نهایت، انطباق این نتایج، شناسایی ژنوتیپ‌هایی را که از نظر عملکرد دانه، وزن خشک ریشه و تحمل به شوری در سطح بالاتری قرار داشتند را تسهیل کرد.

نتیجه‌گیری: ساختار ریشه نقش کلیدی در بهبود تحمل به شوری در گندم نان ایفاء می‌کند. ژنوتیپ‌هایی با وزن خشک ریشه بیشتر در تنش شوری، علاوه بر حفظ سطح قابل‌قبولی از عملکرد دانه، در تولید زیست توده نیز موفق‌تر بودند؛ بنابراین، تمرکز بر ساختار ریشه می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر در افزایش پایداری و بهبود عملکرد گندم تحت شرایط شور مطرح شود.

استناد: العبداله الحسنو، باسل؛ سلطانلو، حسن؛ رمضانپور، سیده‌ساناز؛ درزی رامندی، هادی. (۱۴۰۴). ارزیابی شاخص‌های تحمل به تنش شوری در گندم نان براساس صفات عملکرد دانه، وزن خشک ریشه و زیست توده برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل. *مجله تولید گیاهان زراعی*، ۱۸ (۱)، ۲۱۶-۱۷۷.



© نویسندگان.

DOI: [10.22069/ejcp.2025.23535.2676](https://doi.org/10.22069/ejcp.2025.23535.2676)

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

گندم نان (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی است که سهم قابل توجهی در امنیت غذایی و تغذیه‌ای جهان دارد و به‌طور گسترده در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشت می‌شود (۱). ایران با تولید ۱۴/۵ میلیون تن گندم، یازدهمین تولیدکننده بزرگ گندم در جهان به‌شمار می‌آید (۲). شوری خاک به‌عنوان یک تنش غیرزیستی، رشد و عملکرد محصولات کشاورزی را محدود می‌کند (۳). شوری ناشی از عوامل طبیعی همچون مانند خشکی، بارش کم و تبخیر زیاد و عوامل انسانی همچون سیستم‌های آبیاری نامناسب، زهکشی ضعیف و مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی هست (۴). شوری با ایجاد تنش‌های اسمزی و یونی، تأثیر منفی بر رشد و توسعه گیاهان دارد (۵). تنش اسمزی ناشی از شوری به این معناست که تجمع نمک در ناحیه ریشه، جذب آب توسط گیاه را کاهش داده و منجر به خشکی فیزیولوژیکی می‌شود (۶). از سوی دیگر، تجمع یون‌های سمی مانند سدیم و کلر در بافت‌های گیاهی می‌تواند به تخریب ساختارهای سلولی و کاهش فعالیت‌های متابولیکی منجر شود (۷). در نتیجه، فرایندهای فتوسنتز، تنفس و رشد گیاه مختل شده و منجر به کاهش قابل توجه عملکرد از ۲۰ تا ۵۰ درصد در زمین‌های شور می‌شود (۸ و ۹).

تحمل به شوری یک صفت پیچیده چندژنی بوده که شامل مراحل متعددی از فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی می‌شود (۱۰). مطالعات نشان داده‌اند که گندم نان در مراحل مختلف رشد به‌طور متفاوتی به تنش شوری واکنش نشان می‌دهد. در مرحله جوانه‌زنی، گندم نان معمولاً تحمل مناسبی به شوری دارد (۱۱)، در مرحله اولیه گیاهچه (۲ تا ۳ برگه) بسیار حساس است (۱۲)، در مرحله رشد رویشی میزان تحمل به شوری افزایش می‌یابد (۱۳)، در مراحل گل‌دهی و باروری حساسیت بیشتری نشان

می‌دهد (۱۴) و در نهایت در مرحله رسیدگی از تحمل بیشتری نسبت به شوری برخوردار است (۱۵). برای کاهش خسارت‌های ناشی از شوری در زمین‌های زراعی، از روش‌هایی مانند مدیریت آب (آبیاری مناسب و شستشوی خاک)، اصلاح خاک (اصلاح شیمیایی و افزودن مواد آلی) و استفاده از سیستم زهکشی مناسب استفاده می‌شود؛ اما به دلیل هزینه بالا، این روش‌ها معمولاً توصیه نمی‌شوند. در مقابل، استفاده از گیاهان متحمل به شوری و مدیریت آبیاری از مهم‌ترین روش‌های کارآمد کاهش خسارات تولید کشاورزی در زمین‌های شور محسوب می‌شوند (۱۶).

گزینش گیاهان برای تحمل به شوری یکی از مهم‌ترین راهبردها در بهبود عملکرد محصولات زراعی در شرایط تنش شوری است. این فرایند شامل مجموعه‌ای از روش‌های متنوع است که در محیط‌های کنترل‌شده و یا مزرعه‌ای اجرا می‌شود و به شناسایی گزینش ژنوتیپ‌های متحمل کمک می‌کند که توانایی رشد و تولید در شرایط شوری بالا را دارند (۱۷). روش‌های آماری چندمتغیره، به‌ویژه تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تحلیل خوشه‌ای، نقش مهمی در گزینش گیاهان دارند. این تکنیک‌ها با کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی صفات کلیدی مؤثر بر تحمل شوری، به شناسایی الگوهای تحمل و گروه‌بندی دقیق ژنوتیپ‌ها کمک می‌کنند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از این روش‌ها و ترکیب با شاخص‌های تحمل به تنش مانند STI، دقت و کارایی گزینش ژنوتیپ‌های متحمل را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (۱۸ و ۱۹). در حال حاضر، پایداری عملکرد دانه به‌عنوان مهم‌ترین شاخص برای ارزیابی پاسخ به تنش‌های غیرزیستی (ازجمله تنش شوری) در برنامه‌های اصلاحی گندم نان شناخته می‌شود (۲۰). همچنین زیست‌توده گیاه که در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک اندازه‌گیری می‌شود، یکی از صفات

فنوتیپی مهم و تأثیرگذار برای تفکیک ژنوتیپ‌های گندم از نظر تحمل به تنش شوری به شمار می‌رود (۲۱). این صفت به دلیل انعکاس توانایی گیاه در حفظ رشد و تولید ماده خشک در شرایط تنش، در برنامه‌های به‌نژادی به‌عنوان شاخصی مؤثر برای انتخاب ارقام متحمل به شوری مورد توجه قرار گرفته است.

ریشه‌ها به‌عنوان اولین خط دفاعی گیاه در برابر تنش‌های محیطی زیرزمینی، نقش حیاتی در جذب آب و مواد مغذی ایفا می‌کنند. سیستم ریشه به‌گونه‌ای سازگار است که در مواجهه با تنش‌های غیرزیستی مانند محدودیت آب (۲۲ و ۲۳) و کمبود مواد مغذی در خاک (۲۴)، عملکرد گیاه را به‌طور مؤثری حفظ می‌کند. ازاین‌رو، بررسی و درک دقیق روابط بین صفات ریشه و عملکرد در برنامه‌های اصلاحی (۲۵) اهمیت بسزایی دارد؛ به‌ویژه در شرایطی که گیاه در معرض تنش‌های غیرزیستی مانند شوری، خشکی و کمبود عناصر قرار دارد. تحقیقات نشان داده‌اند که بین پارامترهای کلیدی ریشه مانند طول ریشه، حجم ریشه و وزن کل ریشه با عملکرد دانه در گندم، همبستگی معنی‌داری وجود دارد. این رابطه، نقش حیاتی معماری سیستم ریشه در جذب آب و عناصر غذایی را برجسته می‌کند که به‌طور نهایی بر پتانسیل عملکرد دانه تأثیرگذار است. به‌عنوان مثال، مطالعه‌ای نشان داد که ویژگی‌های ریشه به‌طور جمعی بین ۳۱ تا ۴۵ درصد از واریانس کل در بهبود کارایی مصرف آب و عملکرد دانه را تحت شرایط تنش خشکی تبیین می‌کند (۲۶). همچنین لوپز و رینولدز (۲۰۱۰) گزارش کردند که ژنوتیپ‌های با وزن خشک ریشه بالا دارای عملکرد بیشتری هستند (۲۷).

به‌منظور شناسایی ارقام متحمل به شوری، از شاخص‌هایی مبتنی بر واکنش ژنوتیپ‌های متفاوت به شرایط محیطی متفاوت و بر پایه روابط ریاضی بین

عملکرد گیاه در شرایط عادی (بدون تنش) و شرایط تنش استفاده می‌شود. این شاخص‌ها شامل شاخص حساسیت به تنش، بهره‌وری هندسی متوسط و میانگین هارمونیک (۲۸)، شاخص‌های بهره‌وری متوسط و تحمل (۲۹)، شاخص تحمل به تنش (۳۰)، شاخص پایداری عملکرد (۳۱)، شاخص عملکرد (۳۲) و شاخص کاهش عملکرد (۳۳) هستند.

غربالگری در شرایط مزرعه ممکن است به دلیل برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط و تنوع موجود در مزارع تحت تأثیر شوری خاک، نتایج گمراه‌کننده‌ای به همراه داشته باشد (۳۴، ۳۵ و ۳۶). لذا توصیه می‌شود که غربالگری اولیه در شرایط کنترل‌شده انجام شود تا با کاهش تغییرات محیطی، ارزیابی دقیق‌تری حاصل گردد (۳۷). پس از شناسایی ژنوتیپ‌های امیدبخش، می‌توان عملکرد آن‌ها را در شرایط مزرعه‌ای برای تأیید نتایج در محیط شور واقعی ارزیابی کرد. پژوهش حاضر با هدف بررسی واکنش ژنوتیپ‌های مختلف گندم نان در شرایط کنترل‌شده گلخانه‌ای با استفاده از خاک شور و تأثیر تنش شوری بر وزن خشک ریشه و تحلیل نقش این صفت در تبیین عملکرد دانه و زیست‌توده در گندم نان طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی: در این مطالعه، به منظور بررسی شاخص‌های تحمل به شوری و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل، تعداد ۹۲ ژنوتیپ گندم نان زمستانه و بینابین شامل ۷۰ رقم تجاری (حاصل از آزمایش‌های ملی و برنامه‌های اصلاحی مؤسسات بین‌المللی CIMMYT و ICARDA) و ۲۲ لاین بومی منتخب از کلکسیون بذر بخش غلات مؤسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج مورد استفاده قرار گرفت. اطلاعات این ژنوتیپ‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ژنوتیپ‌های گندم نان مطالعه شده در این پژوهش

Table 1. The studied bread wheat genotypes in this research

شماره Num	نام ژنوتیپ Genotype	شماره Num	نام ژنوتیپ Genotype	شماره Nu.	نام ژنوتیپ Genotype	شماره Num	نام ژنوتیپ Genotype	شماره Num.	نام ژنوتیپ Genotype
1	ابراهیم آباد اراک Ibrahim Abad Arak	20	مشهد ۱ Mashhad 1	39	بهار Bahar	58	شهریار Shahriar	77	هیرمند Hirmand
2	اراک Arak	21	مشهد ۴ Mashhad 4	40	پیش‌تاز Pishtaz	59	شیراز Shiraz	78	ورناک Vernak
3	الرج اراک Alerj Arak	22	ملایر Malayer	41	اسکان اراک Eskan arak	60	شیروودی Shiroodi	79	ارگ Arg
4	الوس جرد ساوه Elus Jared Saveh	23	بم Bam	42	تجن Tajan	61	قدس Ghods	80	پارسی Parsee
5	پرند ساوه Saweh Parand	24	اترک Atrak	43	توس Toos	62	کاوه Cave	81	سیوند Sivand
6	پشت تنگ پریان Posht tang parian	25	اروم Urom	44	چمران ۲ Chamran 2	63	کراس روشن Cross roshan	82	مروارید Morvarid
7	حاجی‌آباد کرمانشاه Hajiabad kermanshah	26	اروند Arvand	45	چناب Chenab	64	کرج ۱ Karaj 1	83	میهن Mihan
8	خرم‌آباد Khorramabad	27	استار Star	46	خزر ۱ Khazar 1	65	کرج ۲ Karaj 2	84	MV-17
9	رباط اراک Robat arak	28	افق Ofogh	47	داراب ۲ Darab 2	66	کرج ۳ Karaj 3	85	باران Baran
10	ساروق Sarouk	29	افلاک Aflak	48	دریا Drya	67	کویر Kavir	86	اوحدی Ohadi
11	مشهد ۲۱ Mashhad 21	30	نیشابور Neishabor	49	دز Dez	68	گاسپارد Gaspard	87	زارع Zare
12	مشهد ۲۰ Mashhad 20	31	البرز Alborz	50	رسول Rasol	69	گاسکوژن Gascogne	88	پیش‌گام Pishgam
13	شرفخانه Sharafkhana	32	الموت Alamout	51	روشن Roshan	70	گلستان Golestan	89	رصد Rasad
14	عزیزآباد فراهان Aziz abad farahan	33	الوند Alvand	52	روشن زمستان Winter roshan	71	مغان ۱ Mughan 1	90	ریژاو Rizav
15	قهته ساروق Qehte sarouk	34	مشهد ۱۶ Mashhad 16	53	زرین Zarin	72	مغان ۲ Mughan 2	91	هما Homa
16	کرخان اردبیل Karkhan ardabil	35	اینیا Enia	54	سایسون Saison	73	مغان ۳ Mughan3	92	گنبد Gonbad
17	کوره ساوه ۱ Kore saveh1	36	آرتا Arta	55	سپاهان Sepahan	74	مهدوی Mahdavi		
18	کوره ساوه ۲ Kore saveh2	37	آزادی Azadi	56	سیستان Sistan	75	نوید Navid		
19	محت علیا اراک Mohet olia arak	38	بزوستایا Bezostaya	57	سیروان Sirvan	76	هامون Hamon		

جغرافیایی ۵۰° ۳۶' عرض شمالی و ۵۴° ۲۵' طول شرقی و ارتفاع ۱۵۵ متر از سطح دریا) انجام شد. گلخانه دارای محور طولی شمال-جنوب و عرض غرب-شرق بود و پنجره‌ها طولی به‌صورت مستمر

طراحی آزمایش، تهیه بستر خاک و شرایط کشت: این پژوهش در طی سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ در قالب آزمایش گلدانی در گلخانه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (با مختصات

جهت تأمین تهویه طبیعی و تعویض هوای محیط آزمایش باز نگه داشته شدند، به گونه‌ای که جریان هوا به‌طور یکنواخت در بخش‌های مختلف گلخانه توزیع می‌شد. همچنین با شروع مرحله گلدهی و افزایش دما، درب‌های ورودی گلخانه نیز برای افزایش تهویه باز شدند. تأمین نور گلخانه به‌طور کامل از طریق نور طبیعی خورشید صورت گرفت. پیش از اجرای آزمایش اصلی، به‌منظور تعیین دقیق سطح شوری بهینه برای مقایسه ژنوتیپ‌های گندم نان، یک پیش‌آزمایش تحت شرایط کنترل‌شده گلخانه‌ای در قالب آزمایش فاکتوریل با چهار سطح مختلف شوری شامل نسبت‌های اختلاط ۱:۱، ۱:۲، ۱:۳ (خاک شور به خاک زراعی) و تیمار کنترل (خاک زراعی)؛ با استفاده از برخی ژنوتیپ‌های متحمل و حساس به شوری (بر اساس مطالعات قبلی) با سه تکرار آزمایشی، طراحی و اجرا گردید. بذره‌های ژنوتیپ‌های گندم با محلول هیپوکلرید سدیم ۵ درصد ضدعفونی شده و پس از چندین نوبت شستشو با آب مقطر، به‌مدت ۲۴ ساعت در پتری‌دیش‌های مرطوب درون ژرمیناتور به‌منظور القای جوانه‌زنی قرار گرفتند. پس از جوانه‌زنی، بذره‌های جوانه‌دار به سینی‌های نشا حاوی بستر کشت انتقال یافته و پس از گذشت یک هفته، گیاهچه‌های سالم و یکنواخت به گلدان‌های با مخلوط‌های خاکی مربوطه منتقل شدند. گیاهچه‌ها به‌مدت دو ماه با آب غیر شور آبیاری شدند. در پایان دوره، صفات ریختی از جمله طول گیاهچه، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه و تعداد پنجه اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها نشان داد که نسبت ۱:۲ (خاک شور به خاک زراعی) با رسانایی الکتریکی ۱۶/۹ دسی‌زیمنس بر متر بیشترین توانایی در تفکیک ژنوتیپ‌های حساس و متحمل را ایجاد کرد؛ بنابراین این سطح شوری به‌عنوان شدت تنش بهینه برای آزمایش اصلی انتخاب شد. به‌منظور

آماده‌سازی بستر کشت گلدانی، ابتدا خاک شور و خاک زراعی به نسبت ۱:۲ چندین بار کاملاً با یکدیگر مخلوط و یکدست شد. نمونه‌برداری از هر دو ترکیب خاک (زراعی و مخلوط‌شده) انجام گردید و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاکی قبل از اجرای آزمایش تعیین گردد (جدول ۲).

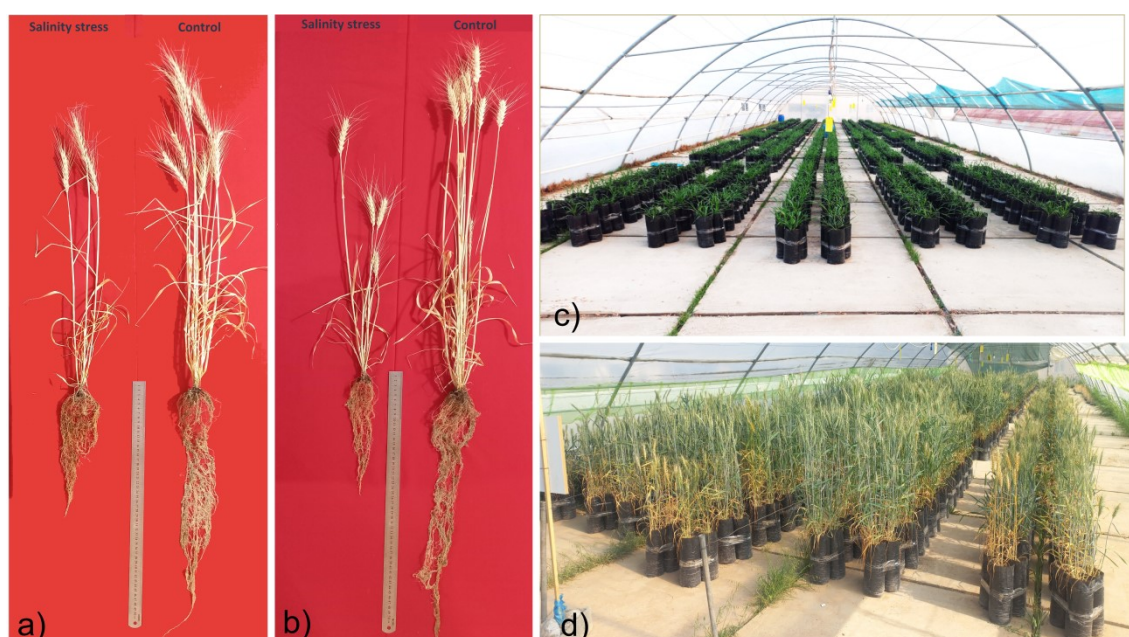
آزمایش اصلی به‌صورت کرت‌های خردشده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در این آزمایش، شوری خاک به‌عنوان عامل اصلی در دو سطح (۲/۳ و ۱۶/۹ دسی‌زیمنس بر متر) و تعداد ۹۲ ژنوتیپ‌های گندم به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. یک هفته پس از جوانه‌زنی بذور در سینی‌های نشاء، گیاهچه‌های سالم و یکنواخت ژنوتیپ‌های گندم به گلدان‌های پلاستیکی با قطر دهانه ۱۵ و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر منتقل شدند. هر گلدان حاوی ۶ کیلوگرم بستر کشت شامل ۸۵ درصد خاک و ۱۵ درصد ماده آلی (شامل ۱۰ درصد کود گاوی پوسیده و ۵ درصد چوب خردشده) جهت بهبود بافت و تخلخل خاک و همچنین تسهیل در جداسازی اندام ریشه در زمان اندازه‌گیری به‌ویژه تحت شرایط تنش شوری بود. کودهای نیتروژن (اوره ۴۶ درصد) به مقدار ۱ گرم و پتاسیم فسفات (KH_2PO_4) به مقدار ۰/۴ گرم در هر گلدان و در سه مرحله رشدی (پس از کاشت، پنجه‌زنی و ساقه‌رفتن) به خاک اضافه شدند. آبیاری گلدان‌ها تا مرحله رسیدگی در هر دو شرایط آزمایشی با آب غیر شور ($\text{EC } 0.717 \text{ dS/m}$)، به‌صورت تدریجی و مطابق با نیاز رشدی گیاهچه‌ها انجام شد و به‌گونه‌ای تنظیم گردید که از خروج آب از کف گلدان جلوگیری شود تا از سسته‌شدن نمک‌ها و کاهش اثر تنش شوری ممانعت به عمل آید. این روش آبیاری کنترل‌شده موجب حفظ یکنواختی و پایداری غلظت شوری در ناحیه ریشه شد تا تأثیر پیوسته تنش شوری بر رشد و عملکرد

ژنوتیپ‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. هر واحد آزمایشی ارزیابی قرار گرفت (شکل ۱). شامل چهار گلدان بود و در هر گلدان یک بوته مورد

جدول ۲- نتایج آزمون خاک در شرایط غیر شور (خاک زراعی) و خاک شور (مخلوط ۱:۲)

Table 2. Soil test results under non-saline and saline conditions

نوع خاک Soil type	نیتروژن کل N (%)	پتاسیم K (ppm)	فسفر P (ppm)	اسیدیته pH	رسانایی الکتریکی EC (dS/m)	کربن آلی C (%)	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)
خاک غیر شور None saline	0.15	350	21.1	7.72	2.3	1.6	23	45	33
خاک شور Soil mixture	0.09	312	20	7.93	16.9	1.1	25	47	28



شکل ۱- فنوتیپ صفات ریشه و اندام هوایی در گندم نان تحت شرایط غیر شور و شوری. (a و b) تنوع فنوتیپی در معماری سیستم ریشه و عملکرد اندام هوایی در دو ژنوتیپ گندم نان در مرحله رسیدگی، نشان‌دهنده تفاوت ساختار ریشه تحت تیمارهای مختلف شوری. (c) نمای گلخانه در مرحله رشد رویشی پس از استقرار گیاهچه‌ها و (d) نمای گلخانه در مرحله رسیدگی

Figure 1- Phenotype of root and shoot traits in bread wheat under non-saline and saline conditions. (a and b) Phenotypic variation in root system architecture and shoot performance in two bread wheat genotypes at the maturity stage, illustrating differences in root architecture under salinity treatments. (c) View of the greenhouse during the vegetative growth stage after seedling establishment. (d) View of the greenhouse at the physiological maturity stage

اندازه‌گیری شدند. گلدان‌ها یک شب قبل از برداشت آبیاری شدند تا ریشه‌ها به آرامی و بدون آسیب از خاک جدا شوند. پس از شستشوی ریشه‌ها با آب، نمونه‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت تا رسیدن به وزن ثابت، خشک شدند و

صفات مورد ارزیابی: در انتهای مرحله رسیدگی، بوته‌ها به صورت کامل برداشت شدند و برای ارزیابی زیست‌توده (شامل اندام هوایی و سنبه‌ها) و عملکرد دانه (کل دانه‌های تولیدشده) در شرایط بدون تنش و تنش شوری با استفاده از ترازوی دیجیتالی دقیق

وزن خشک ریشه با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد. میانگین داده‌ها برای هر ژنوتیپ در هر واحد آزمایشی براساس چهار نمونه برای شرایط بدون تنش و تنش شوری محاسبه شد و برای تحلیل‌های آماری بعدی استفاده گردید.

محاسبه شاخص‌های تحمل به شوری: شاخص‌های تحمل به تنش به عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی و مقایسه تحمل و حساسیت گیاهان به شرایط نامطلوب

جدول ۳- شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش و روابط آن‌ها

محیطی مانند شوری، خشکی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش، شاخص‌های تحمل به شوری نظیر TOL، STI، SSI، MP، GMP، YSI، HM و RSI بر اساس داده‌های صفات مورد ارزیابی در شرایط بدون تنش یا Y_p و تنش شوری یا Y_s با استفاده از پایگاه آنلین iPASTIC محاسبه شدند (۳۸). روابط ریاضی مورد استفاده برای محاسبه شاخص‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

Table 3. Mathematical formulas of tolerance and susceptibility indices

شاخص Index	معادله Formula	الگوی انتخاب Pattern selection	منبع Reference
میانگین هندسی بهره‌وری Geometric Mean Productivity	$GMP = \sqrt{(Y_s)(Y_p)}$	حداکثر مقدار Maximum value	Fischer and Maurer (1978) (۲۸)
شاخص حساسیت به تنش Stress Susceptibility Index	$SSI = [1 - (Y_s/Y_p)] / (1 - SI)$	حداقل مقدار Minimum value	Fischer and Maurer (1978) (۲۸)
شدت تنش Stress Intensity	$SI = 1 - (\bar{Y}_s / \bar{Y}_p)$	حداکثر مقدار Maximum value	Fischer and Maurer (1978) (۲۸)
میانگین همساز Harmonic Mean	$HM = 2(Y_p \times Y_s) / (\bar{Y}_s + \bar{Y}_p)$	حداکثر مقدار Maximum value	Fischer and Maurer (1978) (۲۸)
شاخص تحمل Tolerance Index	$TOL = Y_p - Y_s$	حداقل مقدار Minimum value	Rosielle and Hamblin (1981) (۲۹)
بهره‌وری متوسط Mean Productivity	$MP = (Y_p + Y_s) / 2$	حداکثر مقدار Maximum value	Rosielle and Hamblin (1981) (۲۹)
شاخص تحمل به تنش Stress Tolerance Index	$STI = [(Y_p) \times (Y_s)] / (\bar{Y}_p)^2$	حداکثر مقدار Maximum value	Fernandez (1992) (۳۰)
شاخص عملکرد Yield Index	$YI = Y_s / \bar{Y}_p$	حداکثر مقدار Maximum value	Gavazzi et al. (1997) (۳۲)
درصد کاهش عملکرد Yield Reduction Ratio	$YR = 1 - (Y_s/Y_p)$	حداکثر مقدار Maximum value	Golestani Araghi and Assad (1998) (۳۳)
شاخص تنش نسبی Relative Stress Index	$RSI = (Y_s/Y_p) / (\bar{Y}_s/\bar{Y}_p)$	حداکثر مقدار Maximum value	Fischer and Wood (1979) (۳۹)
شاخص پایداری عملکرد Yield Stability Index	$YSI = Y_s / Y_p$	حداکثر مقدار Maximum value	Bousslama and Schapaugh Jr (1984) (۴۰)

Y_s و Y_p عملکرد دانه هر ژنوتیپ و $\bar{Y}_s$ و $\bar{Y}_p$ میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها، به ترتیب در شرایط بدون تنش و تنش هستند
 Y_p and Y_s represent the grain yield of each genotype, while $\bar{Y}_p$ and $\bar{Y}_s$ denote the mean grain yield of all genotypes under non-stress and stress conditions, respectively

توزیع خطاها بررسی شد. تجزیه واریانس برای آزمایش کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی و همچنین مقایسه میانگین صفات در

تجزیه و تحلیل آماری

با استفاده از آزمون بارتلت یکنواختی واریانس‌ها و با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلکس نرمال بودن

هر یک از محیط‌های آزمایشی با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از رویه GLM در نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. به منظور کاهش ابعاد داده‌ها، بررسی هم‌زمان روابط متقابل میان صفات عملکردی و شاخص‌های تحمل به تنش، و مقایسه دقیق‌تر ژنوتیپ‌ها، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) بر پایه ماتریس ضرایب همبستگی انجام شد. این تحلیل با بهره‌گیری از بسته‌های آماری FactoMineR و factoextra در محیط نرم‌افزار RStudio صورت گرفت. به علاوه، ماتریس ضرایب همبستگی پیرسون با استفاده از بسته GGally و تابع ایجاد شده در محیط RStudio ترسیم شد. برای طبقه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر مبنای خصوصیات اندازه‌گیری شده، تجزیه خوشه‌ای به همراه heatmap با استفاده از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی Ward.D2 و مجذور فاصله اقلیدسی با کمک بسته آماری pheatmap در محیط نرم‌افزار RStudio انجام شد. برای حذف اثر واحد اندازه‌گیری و غیریکسان بودن وزن صفات مختلف قبل از تجزیه خوشه‌ای مقادیر کلیه ژنوتیپ‌ها برای هر صفات به صورت جداگانه با استفاده از تابع scale تبدیل به نمره استاندارد شده Z شدند. همچنین، صحت گروه‌بندی خوشه‌ای با استفاده از تابع تشخیص مورد ارزیابی قرار گرفت. کلیه نمودارها نیز به کمک بسته گرافیکی ggplot2 در محیط نرم‌افزار RStudio ترسیم و تنظیم شدند.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه در شرایط بدون تنش و تنش شوری: تحلیل واریانس نشان داد که بین محیط‌های تحت تنش شوری و شرایط بدون تنش، تفاوت‌های معنی‌داری برای صفات عملکرد دانه، زیست‌توده و وزن خشک ریشه در ژنوتیپ‌های گندم

نان وجود دارد (جدول ۴). اثر بلوک برای هیچ یک از صفات معنی‌دار نبود. از سوی دیگر، اثر اصلی ژنوتیپ و همچنین برهمکنش شوری $\times$ ژنوتیپ برای تمامی صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. این یافته‌ها حاکی از تنوع ژنتیکی بالا در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه است و نشان می‌دهد که پاسخ ژنوتیپ‌ها به تنش شوری متفاوت بوده و واکنش آن‌ها به شرایط تنش یکسان نیست. در این راستا، کاهش مقادیر صفات تحت تنش شوری در برخی ژنوتیپ‌ها بیشتر از سایر ژنوتیپ‌ها بود که با مطالعات قبلی همخوانی دارد (۴۱)، (۴۲، ۴۳). خان و همکاران (۲۰۲۴) نیز با ارزیابی تعداد ۱۰۰ ژنوتیپ گندم در شرایط هیدروپونیک با شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر، تفاوت معنی‌داری بین سطوح شوری، ژنوتیپ‌ها و اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ شوری را برای صفات مرتبط با مرحله گیاهچه‌ای گزارش کردند (۴۴).

بررسی تنوع ژنتیکی و شاخص حساسیت به تنش

در ژنوتیپ‌های گندم نان: برای ارزیابی تنوع ژنتیکی و واکنش ژنوتیپ‌ها به شرایط تنش شوری، آماره‌های توصیفی شامل میانگین، حداقل، حداکثر، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی برای صفات اندازه‌گیری شده در شرایط بدون تنش و تنش شوری در جدول ۵ ارائه شده است. در شرایط بدون تنش، بیشترین میزان ضریب تغییرات به ترتیب مربوط به وزن خشک ریشه (۴۱/۱ درصد)، زیست‌توده (۱۹/۸ درصد) و عملکرد دانه (۱۲/۸ درصد) بود. در شرایط تنش شوری نیز ضریب تغییرات برای وزن خشک ریشه (۴۳/۹ درصد)، زیست‌توده (۳۰/۱ درصد) و عملکرد دانه (۲۴/۴ درصد) به‌طوری قابل توجهی افزایش یافت. شاخص حساسیت به تنش (SI) نیز نشان داد که تنش شوری منجر به کاهش معنی‌دار مقدار صفات مورد مطالعه شده است (جدول ۵).

جدول ۴- تجزیه واریانس طرح کرت‌های خردشده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های گندم در شرایط بدون تنش و تنش شوری

Table 4- Analysis of variance of split-plot design based on a randomized complete block design for the evaluated traits in wheat genotypes under non-stressed and salinity conditions

منابع تغییرات Source of variation	df	میانگین مربعات Mean squares		
		وزن خشک ریشه Root dry weight	زیست‌توده Biomass	عملکرد دانه Grain yield
بلوک Block	2	0.33 ^{ns}	391.4 ^{ns}	86.31 ^{ns}
شوری Salinity (S)	1	722.3 ^{***}	5960.8 ^{**}	13440.1 ^{**}
خطای کرت اصلی Error (a)	2	0.31	227.65	58.7
ژنوتیپ Genotype (G)	91	8.85 ^{***}	136.16 ^{***}	9.61 ^{***}
ژنوتیپ × شوری S × G	91	2.23 ^{***}	21.89 ^{***}	2.6 ^{***}
خطای کرت فرعی Error (b)	364	0.09	5.41	1.39
CV(%) ضریب تغییرات	-	9.44	11.8	14.69

ns، *، ** و ***: به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱

*, ** and ***: significant at 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively, and ns: non- significant

اندام خاص نیست، بلکه برآیندی از تعاملات مجموعه‌ای از صفات مختلف در گیاه است. لذا برای افزایش دقت در فرایند گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به شوری، توصیه می‌شود عملکرد دانه به صورت تلفیقی با سایر صفات مرتبط مانند زیست‌توده گیاه و ویژگی‌های ریشه‌ای (به‌ویژه وزن خشک ریشه) مورد ارزیابی قرار گیرد. این رویکرد چندصفحتی می‌تواند به شناسایی دقیق‌تر ژنوتیپ‌های برتر کمک کرده و پایداری عملکرد را در شرایط تنش محیطی افزایش دهد (۴۹). مقایسه میانگین صفات در شرایط بدون تنش و تنش شوری با استفاده از آزمون t جفت‌شده نشان داد که تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد بین دو محیط وجود دارد (جدول ۵ و شکل ۲). این تفاوت‌ها نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه تنش شوری بر عملکرد و ویژگی‌های رشدی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه است و می‌تواند به عنوان معیاری مؤثر برای شناسایی ارقام متحمل به تنش شوری مورد استفاده قرار گیرد.

بیشترین میزان شاخص حساسیت به تنش مربوط به عملکرد دانه (۰/۷۱۴) بود که این یافته با نتایج گزارش‌شده توسط مانهو و همکاران (۲۰۲۴) (۴۵) و افضل و همکاران (۲۰۱۳) (۴۶) مطابقت داشت. عواملی مانند مسمومیت ناشی از سدیم، عقیمی دانه گرده، کاهش تولید مواد فتوسنتزی و محدودیت در انتقال این مواد به دانه‌ها، از دلایل اصلی کاهش عملکرد دانه تحت تنش شوری ذکر شده‌اند (۴۷). علاوه بر عملکرد دانه، شاخص حساسیت به تنش برای زیست‌توده (۰/۶۴۵) و وزن خشک ریشه (۰/۵۲۹) نیز قابل‌توجه بود. مقایسه این مقادیر نشان داد که عملکرد دانه بیشترین حساسیت را نسبت به تنش شوری نشان می‌دهد؛ بنابراین می‌توان این صفت را به‌عنوان یک شاخص کلیدی و کاربردی جهت ارزیابی تحمل ژنوتیپ‌های گندم به شوری پیشنهاد نمود. با این حال، همان‌طور که اکبری‌قوژدی و همکاران (۱۳۸۹) اشاره کرده‌اند (۴۸)، تحمل گیاهان به تنش شوری صرفاً حاصل فعالیت یک صفت یا

بررسی توزیع فنوتیپی صفات در شرایط بدون تنش و تنش شوری: نتایج مقایسه میانگین صفات در هر یک از محیط‌های آزمایشی با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد (جدول‌های ۶ و ۷) نشان داد که میان ژنوتیپ‌های بررسی‌شده از نظر اغلب صفات عملکردی، تفاوت‌های آماری معنی‌داری وجود دارد. این اختلافات بیانگر واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها به شرایط محیطی و توان تفکیک بالای صفات ارزیابی‌شده در شناسایی ژنوتیپ‌های برتر و حساس در شرایط بدون تنش و تنش شوری است. به‌طوری‌که میانگین عملکرد دانه از ۱۳/۸۱ گرم در هر بوته در شرایط بدون تنش به ۳/۹۴ گرم تحت تنش شوری کاهش یافت. همچنین میانگین زیست‌توده در شرایط تنش شوری (۱۱/۴۳ گرم در بوته) نسبت به شرایط بدون تنش (۳۲/۲۱ گرم در بوته) به‌طور معنی‌داری کاهش نشان داد. وزن خشک ریشه نیز تحت تأثیر شوری از ۴/۳ گرم در بوته در شرایط بدون تنش به ۲/۰۲ گرم در بوته در شرایط تنش کاهش پیدا کرد (جدول ۵). این نتایج گویای اثرات نامطلوب شوری بر رشد و توسعه گندم است (۴۴). در هر دو شرایط بدون تنش و تنش شوری، پراکندگی فنوتیپی ارقام بومی و اصلاح‌شده قابل تشخیص بود؛ با این حال، دامنه تغییرات صفات در هر گروه به‌طور نسبی متفاوت به نظر می‌رسد. تجزیه آماری نشان داد که تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بین ژنوتیپ‌ها برای صفت عملکرد دانه در هر دو شرایط وجود داشت (شکل ۲). در شرایط بدون تنش، دامنه تغییرات عملکرد دانه بین ۱۰/۴ تا ۱۸/۱ گرم در بوته متغیر بود (جدول ۵). بالاترین مقادیر عملکرد دانه مربوط به ژنوتیپ‌های کاسگوژن، الرج اراک، ابراهیم‌آباد اراک، حاجی‌آباد کرمانشاه و اراک بود، در حالی که ژنوتیپ‌های دز، داراب ۲، کراس روشن ساده، ورناک، سیروان و استار کمترین عملکرد را داشتند (جدول ۶). در شرایط تنش

شوری، دامنه عملکرد دانه بین ۱/۹ تا ۶/۱ گرم در بوته بود (جدول ۵) و ژنوتیپ‌های ابراهیم‌آباد اراک، هُما، روشن زمستان، ملایر، حاجی‌آباد کرمانشاه و اراک بالاترین عملکرد را نسبت به ژنوتیپ‌های ورناک، تجن، چمران ۲، سیروان، دز و البرز که کمترین مقادیر عملکرد دانه را دارا بودند، نشان دادند (جدول ۷). دامنه تغییرات زیست‌توده نیز در شرایط بدون تنش بین ۲۱/۸ تا ۴۸/۱ گرم در بوته و در شرایط شوری بین ۶/۳۵ تا ۲۰/۳۵ گرم در بوته متغیر بود که نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی مناسب برای این صفت است (جدول ۵). در شرایط بدون تنش، ژنوتیپ‌های اراک، محت علیا اراک، حاجی‌آباد کرمانشاه، کرخان اردبیل، مشهد ۱، الرج اراک، ابراهیم‌آباد اراک و کاسگوژن بیشترین زیست‌توده و ژنوتیپ‌های البرز، اترک، استار، دز، سیروان و ورناک کمترین زیست‌توده را داشتند (جدول ۶). در شرایط تنش شوری، ژنوتیپ‌های کرخان اردبیل، مشهد ۲۰، ابراهیم‌آباد اراک، الرج اراک و اراک بیشترین زیست‌توده و ژنوتیپ‌های سیروان، جناب، ورناک، هیرمند، دز و البرز کمترین مقدار زیست‌توده را نشان دادند (جدول ۷). وزن خشک ریشه در شرایط بدون تنش بین ۱/۹ تا ۱۰/۴ گرم در هر بوته متغیر بود. ژنوتیپ‌های ملایر، اراک، قهته ساروق، کوره ساوه ۱، مشهد ۴ و کرخان اردبیل بیشترین مقادیر وزن خشک ریشه (به ترتیب ۱۰/۴، ۹/۲، ۸/۴، ۸/۰۴، ۷/۹ و ۷/۳ گرم در بوته) و ژنوتیپ‌های ورناک، خزر ۱، بهار، چناب، مغان ۳ و استار کمترین مقادیر (به ترتیب ۲/۶، ۲/۵، ۲/۴، ۲/۴، ۲/۳ و ۱/۹ گرم در بوته) را داشتند (جدول ۶). در شرایط تنش شوری، وزن خشک ریشه بین ۰/۷ تا ۴/۹ گرم در هر بوته متغیر بود و میانگین آن ۲/۰۲ گرم در بوته به دست آمد. ژنوتیپ‌های اراک، کرخان اردبیل، کوره ساوه ۱، مشهد ۲۰، الرج اراک، مشهد ۴ و ملایر بالاترین مقادیر (به ترتیب ۴/۹، ۴/۹، ۴/۰۳، ۴/۸، ۳/۳، ۳/۲ و ۳/۲ گرم در بوته) و ژنوتیپ‌های ورناک، استار،

دریا، سیروان، البرز و رسول کمترین مقادیر (به ترتیب ۱/۰۷، ۱/۰۳، ۱/۰۳، ۰/۸۲، ۰/۷۳ و ۰/۶۹ گرم در بوته) مؤلفه‌های رشد گیاه دارد. که شوری تأثیر نامطلوب قابل توجهی بر عملکرد و را نشان دادند (جدول ۷). این یافته‌ها نشان می‌دهند

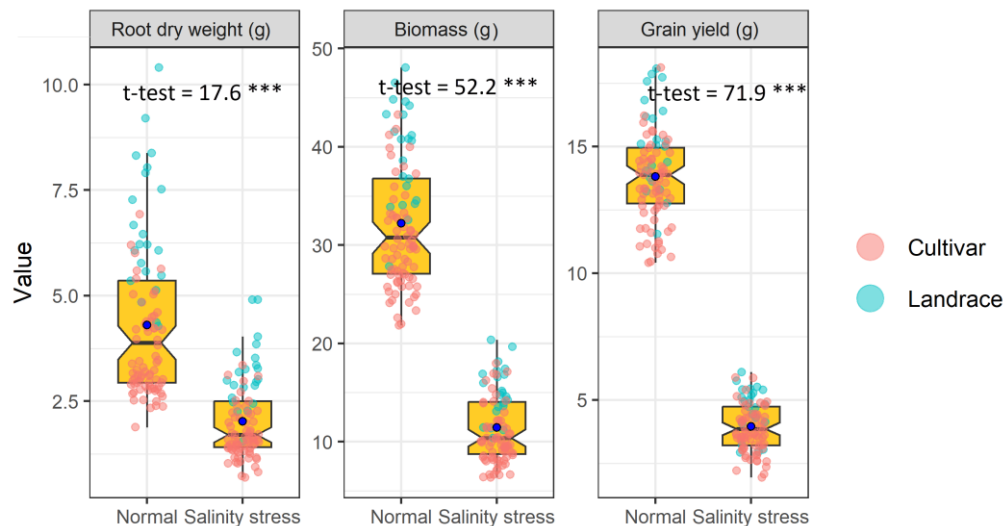
جدول ۵- آماره‌های توصیفی و ضریب تغییرات صفات مورد بررسی در شرایط بدون تنش و تنش شوری

Table 5- Descriptive statistics and coefficient of variation for investigated under non-stressed and salinity conditions

صفات مورد مطالعه Studied traits						شاخص Index	
عملکرد دانه Grain yield		زیست توده Biomass		وزن خشک ریشه Root dry weight			
شوری Salinity	نرمال Normal	شوری Salinity	نرمال Normal	شوری Salinity	نرمال Normal		
3.94	13.81	11.43	32.21	2.02	4.30		
1.93	10.4	6.35	21.82	0.69	1.88	Mean (g)	میانگین (گرم)
6.1	18.1	20.35	48.05	4.90	10.40	Min (g)	حداقل (گرم)
0.96	1.77	3.44	6.39	0.89	1.77	Max (g)	حداکثر (گرم)
24.37	12.84	30.13	19.84	43.93	41.05	Standard deviation	انحراف معیار
0.16	0.26	0.63	0.59	1.09	1.19	Coeff of variation (%)	ضریب تغییرات (درصد)
-0.68	-0.014	-0.52	-0.57	1.03	1.07	Skewness	چولگی
0.714		0.645		0.529		Kurtosis	کشیدگی
t = 71.9 ***		t = 52.2 ***		t = 17.6 ***		Susceptibility index	شاخص حساسیت
***		***		***		(Paired t-test)	آزمون t جفت شده

***: significant at 0.001 probability level

*** معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۰۱



شکل ۲- مقایسه میانگین صفات وزن خشک ریشه (گرم در بوته)، زیست توده (گرم در بوته) و عملکرد دانه (گرم در بوته) و پراکنش ۹۲ ژنوتیپ گندم نان در شرایط بدون تنش و تنش شوری. نقطه آبی پررنگ میانگین هر صفت در هر تیمار محیطی را نشان می‌دهد.

اختلاف میانگین صفات بین دو شرایط محیطی با استفاده از آزمون t جفت شده ارزیابی شد. *** معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۰۱

Figure 2 - Comparison of the means traits, root dry weight (g plant⁻¹), biomass (g plant⁻¹), and grain yield (g plant⁻¹) and distribution of 92 bread wheat genotypes under non-stressed and salinity conditions. Dark blue dot indicates the mean value for each trait under each condition. Differences in trait means between the two environments were assessed using paired t-tests. *** significance at probability level 0.001

جدول ۶- مقایسه میانگین ژنوتیپ‌های گندم نان برای صفات وزن خشک ریشه (گرم در بوته)، زیست‌توده (گرم در بوته) و عملکرد دانه (گرم در بوته) در شرایط بدون تنش با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد

Table 6- Mean comparison of bread wheat genotypes for root dry weight (g plant⁻¹), biomass (g plant⁻¹), and grain yield (g plant⁻¹) under non-stressed conditions using the LSD test at the 5% probability level

Genotype	RDW	BM	GY	Genotype	RDW	BM	GY	Genotype	RDW	BM	GY
1	5.6	41.54	17.85	32	2.95	27.37	13.49	63	4.24	25.24	10.77
2	9.2	48.05	17.56	33	3.68	30.50	14.21	64	5.41	35.06	13.72
3	4.84	43.27	18.06	34	6.94	41.20	13.94	65	2.74	35.94	15.46
4	8.19	34.53	14.99	35	2.47	26.96	12.58	66	4.33	39.16	15.62
5	5.09	33.87	14.03	36	3.19	25.00	11.60	67	2.69	25.76	11.76
6	5.55	34.22	14.38	37	2.74	26.58	13.16	68	5.42	37.99	15.08
7	6.1	44.82	17.73	38	2.65	31.09	13.90	69	6.01	41.81	18.10
8	6.29	36.97	11.53	39	2.44	24.95	11.79	70	4.38	29.62	12.47
9	5.13	32.54	15.1	40	4.05	28.58	13.57	71	2.88	27.53	13.13
10	6.56	34.06	13.76	41	4.47	43.28	14.47	72	2.68	26.19	12.89
11	4.25	27.84	12.77	42	2.99	26.99	13.13	73	2.28	28.33	14.78
12	5.96	40.77	14.24	43	3.92	29.91	13.37	74	3.38	30.65	14.23
13	5.35	40.79	16.1	44	5.42	25.73	11.16	75	6.07	37.46	15.06
14	7.53	36.75	15.05	45	2.37	23.36	11.06	76	4.24	26.38	12.37
15	8.16	41.17	16.4	46	2.48	27.81	12.64	77	2.83	25.76	12.10
16	7.28	44.6	13.23	47	3.04	27.02	10.92	78	2.58	21.82	10.64
17	7.74	43.32	15.26	48	2.91	25.85	11.76	79	3.53	32.76	14.13
18	6.21	40.61	16.82	49	3.04	22.61	11.24	80	2.72	27.14	12.67
19	6.07	46.51	13.63	50	2.56	24.70	11.15	81	5.04	26.29	13.25
20	4.27	44.21	13.29	51	5.04	34.66	15.47	82	2.90	28.59	13.87
21	7.61	36.03	16.16	52	3.98	32.48	13.90	83	2.85	29.58	14.75
22	9.91	38.6	15.19	53	3.50	28.65	13.34	84	3.38	31.51	13.03
23	3.2	29.86	13.98	54	3.05	33.20	14.75	85	4.34	30.11	13.97
24	2.57	24.16	13.33	55	2.78	29.86	12.84	86	2.83	39.87	16.20
25	2.97	29.85	13.98	56	3.03	29.71	13.66	87	5.18	31.46	14.50
26	3.15	33.03	13.88	57	2.87	21.97	10.45	88	3.23	31.41	15.94
27	1.88	24.1	10.4	58	4.33	27.46	13.32	89	4.84	39.98	11.00
28	3.39	32.76	15.26	59	4.52	33.29	15.58	90	4.09	27.75	12.95
29	3.22	29.67	14.39	60	2.70	32.73	14.94	91	4.53	37.27	14.50
30	2.95	26.74	12.69	61	4.14	30.88	14.07	92	3.16	28.97	14.43
31	3.1	24.37	11.64	62	3.02	31.85	13.20				
LSD 5%	0.58	4.82	2.49	LSD 5%	0.58	4.82	2.49	LSD 5%	0.58	4.82	2.49

RDW: وزن خشک ریشه، GY: عملکرد دانه، BM: زیست‌توده و LSD: حداقل اختلاف معنی‌دار

بر کاهش این صفات است؛ به عبارت دیگر، ژنوتیپ‌هایی که مقادیر کمتری از شاخص SSI دارند، تمایل بیشتری به حفظ عملکرد بالاتر در شرایط مواجهه با تنش شوری نشان می‌دهند. با این حال، مشاهده همبستگی مثبت و ضعیف SSI با وزن خشک ریشه در شرایط بدون تنش، نشان‌دهنده پیچیدگی پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاهان به تنش شوری است. از سوی دیگر، شاخص تحمل (TOL) به عنوان یک معیار قابل‌اعتماد در هر دو شرایط بدون تنش و تنش شوری، همبستگی مثبت و معنی‌داری با اغلب صفات عملکردی نشان داد. هرچند، همبستگی این شاخص با

بررسی همبستگی بین شاخص‌های تحمل به تنش شوری با صفات مورد مطالعه: در این پژوهش، به‌منظور شناسایی ژنوتیپ‌های برتر، مناسب‌ترین شاخص، شاخصی در نظر گرفته شد که دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش شوری باشد (۵۰). نتایج نشان داد که شاخص حساسیت به تنش (SSI) به طور کلی بیانگر میزان تحمل ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش است و با اکثر صفات عملکردی، به‌ویژه در محیط‌های تنش‌زا، همبستگی منفی معنی‌داری دارد (۵۱) (شکل ۳). این یافته نشان‌دهنده تأثیر نامطلوب تنش شوری

عملکرد دانه مثبت اما غیر معنی دار بود. علاوه بر این، شاخص‌های عملکرد (YI)، بهره‌وری متوسط (MP)، بهره‌وری متوسط هندسی (GMP)، شاخص میانگین هارمونیک (HM) و شاخص تحمل تنش (STI) در هر دو شرایط بدون تنش (Yp) و تنش شوری (Ys) با صفات عملکردی همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری نشان دادند (شکل ۳ - الف، ب و ج).

جدول ۷- مقایسه میانگین ژنوتیپ‌های گندم نان برای صفات وزن خشک ریشه (گرم در بوته)، زیست‌توده (گرم در بوته) و عملکرد دانه (گرم در بوته) در شرایط تنش شوری با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد

Table 7- Mean comparison of bread wheat genotypes for root dry weight (g plant⁻¹), biomass (g plant⁻¹), and grain yield (g plant⁻¹) under salinity conditions using the LSD test at the 5% probability level

Genotype	RDW	BM	GY	Genotype	RDW	BM	GY	Genotype	RDW	BM	GY
1	2.70	18.13	6.10	32	1.36	9.44	3.20	63	1.52	10.81	3.89
2	4.90	16.89	5.18	33	2.06	10.29	4.17	64	2.30	14.03	4.43
3	3.12	17.39	4.95	34	2.87	15.41	3.49	65	1.53	12.14	4.87
4	2.26	13.60	5.41	35	1.25	8.20	3.04	66	2.38	14.18	4.27
5	2.31	13.95	4.42	36	1.28	8.00	2.81	67	1.73	9.37	3.65
6	3.01	14.57	4.99	37	1.52	11.51	4.06	68	2.84	13.90	4.92
7	3.22	14.97	5.50	38	1.49	10.39	4.44	69	2.11	9.67	4.17
8	2.07	13.54	4.13	39	1.31	8.95	3.45	70	1.05	8.43	2.79
9	2.82	11.18	4.73	40	1.89	8.96	3.34	71	1.39	9.67	3.61
10	2.44	11.45	4.82	41	3.14	17.97	4.78	72	1.35	8.41	3.01
11	1.55	10.39	2.95	42	1.51	7.59	2.57	73	1.34	8.15	3.91
12	3.84	19.65	2.92	43	1.69	11.34	3.83	74	1.58	10.43	4.57
13	2.71	15.98	5.10	44	1.15	8.08	2.35	75	2.11	16.91	4.92
14	2.52	14.24	5.26	45	1.16	6.63	2.70	76	1.18	9.53	3.44
15	2.87	14.75	5.43	46	1.23	10.07	3.50	77	1.37	6.63	2.83
16	4.71	20.35	3.03	47	1.99	10.79	3.51	78	1.06	6.63	2.58
17	3.86	17.21	4.30	48	1.03	7.73	2.59	79	1.98	12.16	4.83
18	3.46	13.10	5.39	49	0.94	6.40	2.06	80	1.12	8.81	3.08
19	3.46	16.83	4.07	50	0.80	8.17	2.63	81	1.29	9.11	3.11
20	2.95	16.56	3.20	51	1.96	10.05	4.35	82	1.11	9.27	3.71
21	3.18	11.38	4.69	52	3.12	14.81	5.86	83	1.42	8.36	3.66
22	3.05	15.15	5.74	53	1.62	9.57	4.09	84	1.73	14.09	4.29
23	2.33	8.57	3.53	54	1.65	11.56	4.77	85	1.44	10.38	4.20
24	1.79	8.64	2.91	55	1.40	9.58	3.18	86	2.03	16.23	5.39
25	1.43	10.20	3.76	56	1.45	12.97	4.32	87	1.39	9.92	3.51
26	1.28	8.98	3.53	57	0.80	6.64	2.20	88	1.46	8.47	4.24
27	1.02	8.00	3.26	58	1.64	11.36	4.08	89	2.57	17.13	5.13
28	1.69	11.55	4.88	59	1.71	9.94	3.34	90	1.65	7.22	3.21
29	1.60	11.48	3.59	60	1.71	7.75	3.61	91	2.45	16.82	5.88
30	1.47	9.54	3.67	61	2.11	10.37	3.59	92	1.50	7.05	3.07
31	0.84	6.35	1.93	62	1.92	12.13	4.42				
LSD 5%	0.32	2.21	0.99	LSD 5%	0.32	2.21	0.99	LSD 5%	0.32	2.21	0.99

RDW: وزن خشک ریشه، GY: عملکرد دانه، BM: زیست‌توده و LSD: حداقل اختلاف معنی‌دار

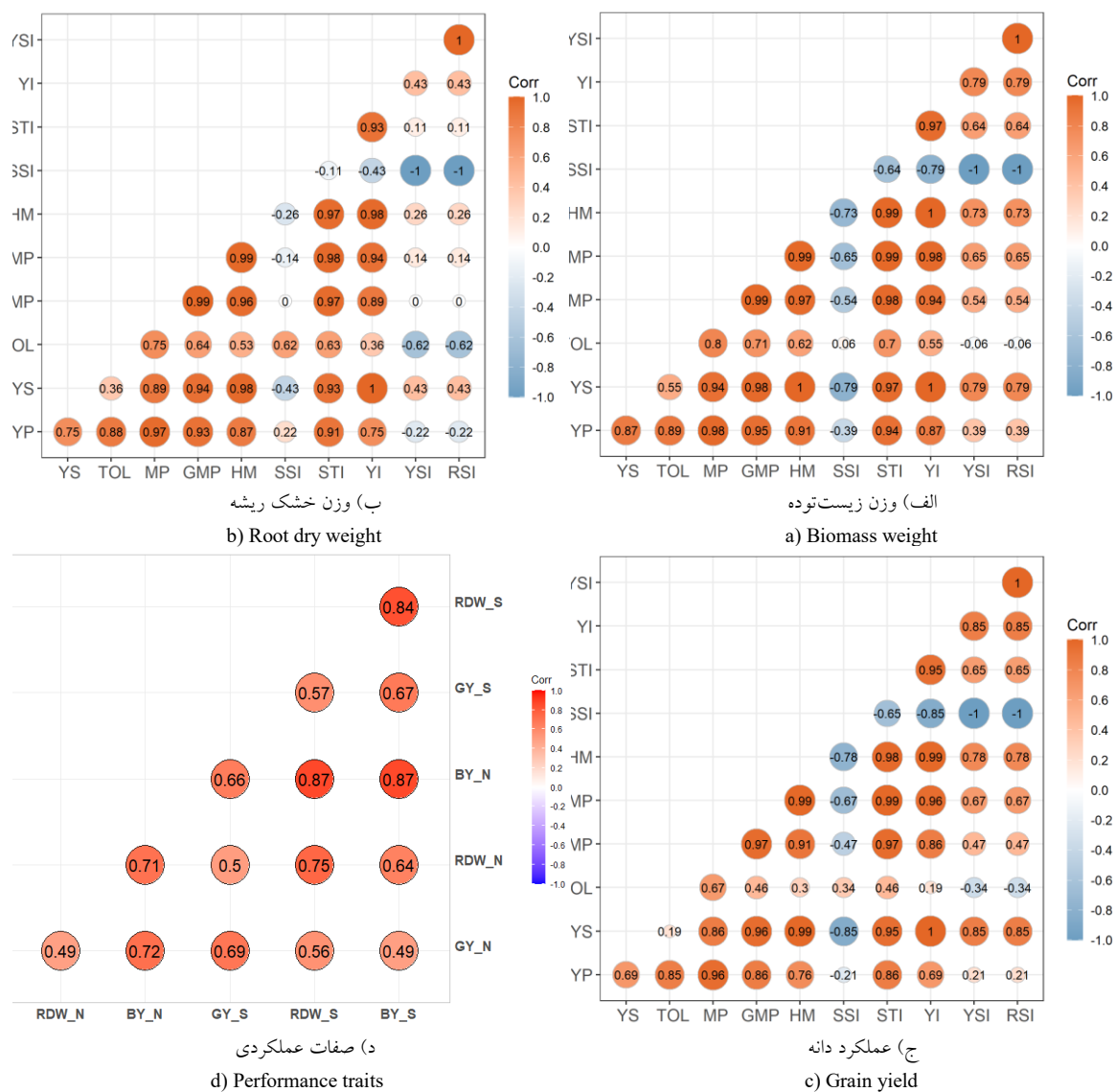
ژنوتیپ‌های متحمل به شوری معرفی شوند (۵۲). به‌ویژه آن‌که مقادیر بالای این شاخص‌ها بیانگر عملکرد مطلوب در هر دو شرایط بدون تنش و تنش شوری است.

همچنین، ضرایب همبستگی ساده بین صفات عملکردی در هر دو شرایط بدون تنش و تنش شوری

این نتایج بیانگر این است که هرچه مقادیر این شاخص‌ها بیشتر باشد، احتمال پایداری و عملکرد برتر ژنوتیپ‌ها در هر دو محیط افزایش می‌یابد. بر این اساس، این شاخص‌ها از قابلیت اطمینان بالایی برای ارزیابی عملکرد در محیط‌های مختلف برخوردارند و می‌توانند به عنوان مناسب‌ترین معیارهای غربال‌گری

این، بررسی همبستگی ساده بین وزن خشک ریشه با عملکرد دانه و زیست‌توده در شرایط تنش شوری به‌ترتیب ۰/۵۷ و ۰/۸۴ و در شرایط بدون تنش به‌ترتیب ۰/۴۹ و ۰/۷۱ برآورد شد (شکل ۳ - د).

به‌ترتیب ۰/۶۹، ۰/۷۵ و ۰/۸۷ برای عملکرد دانه، وزن خشک ریشه و زیست‌توده گزارش شد (شکل ۳ - د). این مقادیر نشان‌دهنده ماهیت پیچیده، چندرئی و کمی این صفات در مواجهه با تنش شوری است. افزون بر



شکل ۳- ماتریس ضرایب همبستگی ساده بین صفات عملکردی در شرایط بدون تنش و تنش شوری با شاخص‌های تحمل: YP: عملکرد در شرایط عادی، YS: عملکرد در شرایط شوری، STI: شاخص تحمل به تنش، GMP: میانگین هندسی عملکرد، MP: شاخص میانگین بهره‌وری، TOL: شاخص تحمل، HM: شاخص میانگین هارمونیک، SSI: شاخص حساسیت به تنش، YSI: شاخص پایداری عملکرد، YI: شاخص عملکرد، RDW: وزن خشک ریشه، BY: زیست‌توده و GY: عملکرد دانه. ضرایب همبستگی با قدر مطلق بیشتر از ۰/۲۰۵ در سطح احتمال پنج درصد و بیشتر از ۰/۲۶ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشد.

Figure 3. Matrix of simple correlation coefficients between performance traits under non-stressed and salinity conditions with tolerance indices (YP, YS, STI, GMP, MP, TOL, HM, SSI, YSI, YI), RDW, BY and GY: Productivity Traits. Correlation coefficients with absolute values greater than 0.205 are significant at the 5% level, and those greater than 0.26 are significant at the 1% level

این همبستگی‌های مثبت و معنادار نشان‌دهنده نقش مهم وزن خشک ریشه در بهبود جذب آب و عناصر غذایی از خاک است که به افزایش عملکرد دانه و کل زیست‌توده منجر می‌شود؛ بنابراین، گزینش ژنوتیپ‌هایی که قادر به حفظ یا افزایش وزن خشک ریشه در شرایط تنش شوری هستند، می‌تواند به عنوان یک استراتژی مؤثر و کاربردی در برنامه‌های اصلاحی برای ارتقای تحمل به شوری و بهبود عملکرد نهایی گندم مورد توجه قرار گیرد. در مجموع، یافته‌های حاضر بر ضرورت استفاده از رویکرد چندشاخصی در شناسایی دقیق ژنوتیپ‌های پایدار و پرمولکرد در شرایط تنش شوری تأکید می‌کند.

رابطه بین وزن خشک ریشه با زیست‌توده و عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش شوری:

در این مطالعه، برای بررسی اهمیت و اعتبار رابطه خطی میان وزن خشک ریشه با عملکرد دانه و زیست‌توده در ژنوتیپ‌های گندم نان تحت شرایط بدون تنش و تنش شوری، از تحلیل رگرسیون خطی استفاده شد. با توجه به ماهیت داده‌ها که حاصل میانگین‌گیری از سه تکرار (هر تکرار شامل نمونه‌برداری دقیق و حذف نقاط پرت) برای هر ژنوتیپ بود، هیچ داده‌ای به عنوان داده پرت شناسایی یا حذف نگردید، زیرا هر داده معرف پاسخ واقعی هر ژنوتیپ به شرایط محیطی بود. با این حال، در مدل دوم سه مشاهده با اثر نفوذ بالا، ژنوتیپ‌های داری وزن ریشه و زیست‌توده بالا ولی عملکرد دانه پایین به عنوان نقاط پرت آماری حذف شدند.

نتایج حاصل از بررسی مفروضات آماری در مدل‌های رگرسیونی نشان داد که هر دو فرض اساسی، یعنی استقلال و نرمال بودن باقی‌مانده‌ها، به طور کامل برقرار بودند. به طوری که نتایج آزمون دوربین-واتسون ($DW > 1/65$) و $p\text{-value} > 0/05$ حاکی از نبود همبستگی خودبه‌خودی در باقی‌مانده‌ها و رعایت

کامل فرض استقلال آن‌ها در هر چهار مدل بود. همچنین، نتایج آزمون شاپیرو-ویلکس جهت بررسی فرض نرمال بودن باقی‌مانده‌ها نشان داد که مقدار آماره‌ی SW در تمامی مدل‌ها بیش از $0/98$ و مقادیر $p\text{-value}$ بزرگ‌تر از $0/05$ بودند که این امر تأییدکننده نرمال بودن باقی‌مانده‌ها است. از سوی دیگر، شیب مثبت و معنی‌دار خطوط رگرسیونی در هر دو شرایط محیطی (با سطح معنی‌داری کمتر از $0/001$ برای هر دو پارامتر عرض از مبدأ و شیب) نقش بارز وزن خشک ریشه را در تبیین تغییرات زیست‌توده و عملکرد دانه نشان داد (شکل ۴). به بیان دیگر، نتایج حاضر به روشنی تأکید می‌کنند که توسعه‌ی سیستم ریشه، به عنوان یک صفت کلیدی، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش بهره‌وری و سازگاری گیاه گندم، به ویژه در شرایط تنش شوری ایفا می‌کند.

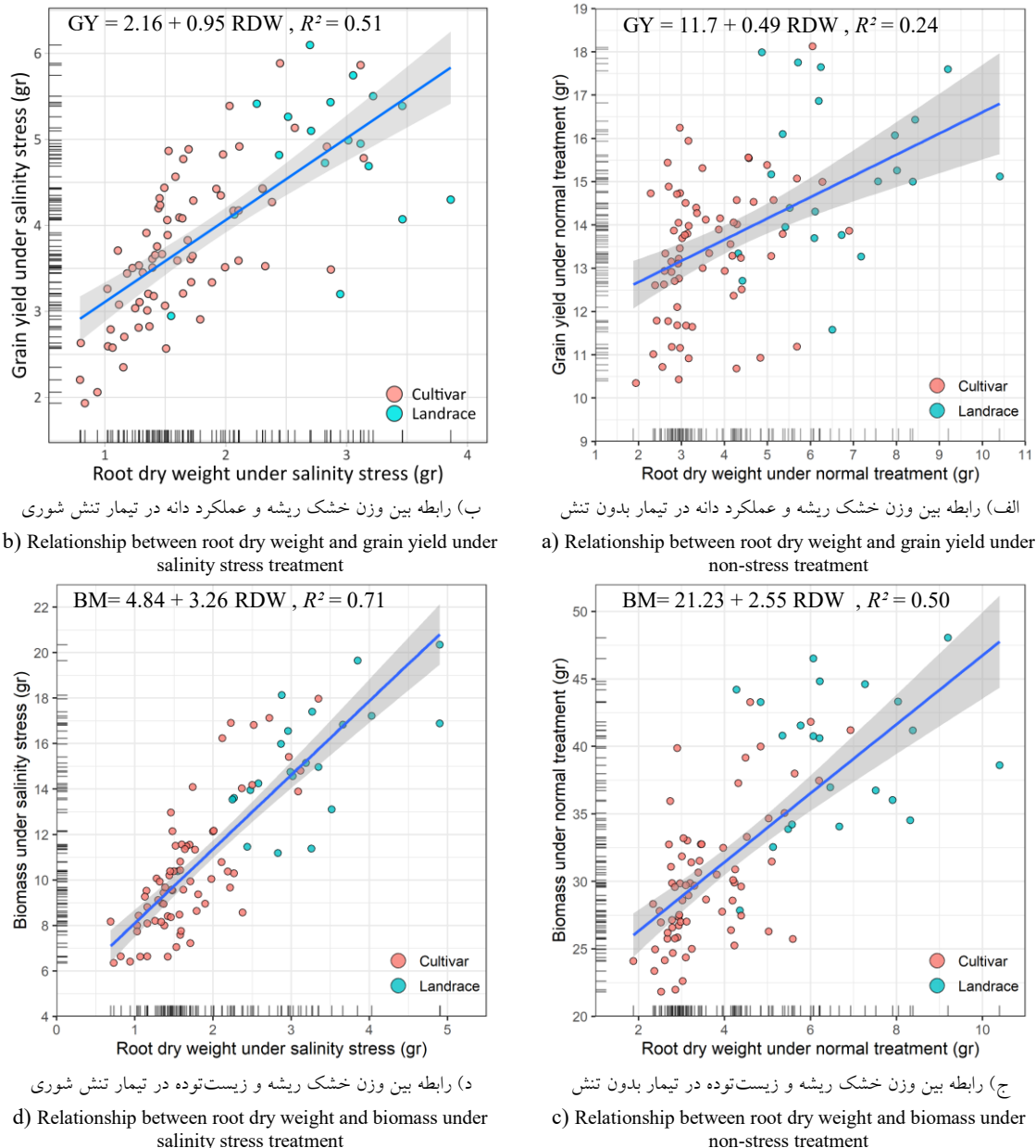
نتایج تحلیل رگرسیون خطی نشان داد که ارتباط معنی‌داری بین وزن خشک ریشه و عملکرد دانه در هر دو شرایط وجود دارد (شکل ۴ - الف و ب). ضریب تبیین (R^2) در شرایط بدون تنش $0/24$ و در شرایط تنش شوری $0/51$ به دست آمد. مقایسه این دو مدل نشان داد که با وجود کاهش کلی عملکرد دانه در شرایط تنش شوری، نقش وزن خشک ریشه در حفظ عملکرد نسبی افزایش یافته و همبستگی قوی‌تری با عملکرد دانه نشان داده است (شکل ۳). شیب خط رگرسیون در شرایط شوری ($0/95$) نسبت به شرایط نرمال ($0/49$) افزایش یافت. این امر نشان‌دهنده آن است که با افزایش هر واحد در وزن خشک ریشه، عملکرد دانه در شرایط تنش شوری به میزان $0/95$ واحد افزایش می‌یابد، در حالی که این مقدار در شرایط بدون تنش تنها $0/49$ واحد است. از منظر زیست‌شناختی، افزایش شیب و ضریب تبیین در محیط‌های تنش‌زا نشان‌دهنده وابستگی بیشتر گیاهان به سیستم ریشه‌ای برای تأمین منابع حیاتی و حفظ

بقای خود است. در شرایط شوری که دسترسی به آب و مواد مغذی محدود شده و تنش‌های فیزیولوژیکی بر گیاه تأثیر می‌گذارند، توسعه و بهبود سیستم ریشه‌ای این امکان را می‌دهد که جذب آب و یون‌های مفید را افزایش داده و از تجمع یون‌های مضر جلوگیری کنند. این سازوکار، بهبود عملکرد دانه در شرایط تنش را تسهیل می‌کند. در مقابل، در محیط‌های بهینه که منابع غذایی و آب در دسترس هستند، حتی گیاهانی با سیستم ریشه‌ای کوچک‌تر نیز قادر به جذب کافی آب و مواد غذایی بوده و تفاوت‌های وزن ریشه تأثیر کمتری بر عملکرد نهایی دارند.

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که در شرایط تنش، مانند شوری و خشکی، صفات ریشه‌ای نقش تعیین‌کننده‌تری در بقای گیاه و حفظ عملکرد دارند (۵۳). شافی و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که بهبود سیستم ریشه‌ای، به دلیل وراثت‌پذیری بالا و همبستگی قوی آن با صفات مرتبط با اندام هوایی مؤثر در کارایی فیزیولوژیکی و تجمع زیست‌توده، می‌تواند راهکاری کارآمد برای افزایش عملکرد برنج در شرایط تنش کم‌آبی باشد (۵۴). همچنین، مشخص شده است که رشد ریشه تحت تنش شوری کاهش می‌یابد و این کاهش یکی از عوامل اصلی افت عملکرد محسوب می‌شود. در مقابل، گیاهان متحمل‌تر معمولاً دارای سیستم ریشه‌ای قوی‌تر و کارآمدتری هستند که شامل افزایش زیست‌توده ریشه، عمق بیشتر و کارایی بالاتر در جذب آب و مواد مغذی است. این ویژگی‌ها به گیاهان کمک می‌کند تا اثرات منفی شوری را تعدیل کرده و عملکرد بهتری را حفظ کنند (۵۵). بر این اساس، وزن خشک ریشه می‌تواند به‌عنوان یک شاخص مهم در انتخاب ژنوتیپ‌های مقاوم به شوری به کار رود.

در بررسی رابطه رگرسیونی بین وزن خشک ریشه

و زیست‌توده در هر دو شرایط بدون تنش و تنش شوری، الگوهای متفاوتی از تخصیص ماده خشک به ریشه مشاهده شد (شکل ۴ - ج و د). در شرایط بدون تنش، گیاهان دارای سطح پایه ریشه‌ای بالاتری بودند (عرض از مبدأ ۲۱/۲۳)، که نشان‌دهنده آن است که حتی در مقادیر اندک ریشه نیز گیاه از سطح نسبتاً بالایی از زیست‌توده برخوردار است. با این حال، افزایش زیست‌توده با سرعت کمتری به تخصیص ماده خشک به ریشه همراه بود (شیب خط ۲/۵۵). مقدار ضریب تبیین ($R^2 = 0/5$) نشان‌دهنده آن است که حدود نیمی از تغییرات مشاهده‌شده در زیست‌توده در شرایط بدون تنش را می‌توان به تغییرات وزن خشک ریشه نسبت داد. در مقابل، در شرایط تنش شوری، گیاهان تمایل بیشتری به تخصیص ماده خشک به ریشه نشان دادند که بیانگر یک پاسخ سازگارانه در مقابله با تنش‌های محیطی است. در این شرایط، شیب خط رگرسیون معادل ۳/۲۶ به‌دست آمد؛ به این معنا که با افزایش هر واحد در وزن خشک ریشه، زیست‌توده گیاه حدود ۳/۲۶ واحد افزایش می‌یابد. این شیب بزرگ‌تر، ضرورت تقویت سیستم ریشه‌ای را در شرایط نامساعد برای جذب بهتر آب و عناصر غذایی نشان می‌دهد (۵۶). افزون بر این، ضریب تبیین بالاتر در شرایط شوری ($R^2 = 0/71$) حاکی از آن است که حدود ۷۱ درصد از تغییرات زیست‌توده به تغییرات وزن خشک ریشه وابسته است که بر نقش کلیدی سیستم ریشه‌ای در سازگاری با تنش‌های محیطی تأکید می‌کند. در مجموع، یافته‌های فوق اهمیت ویژه سیستم ریشه‌ای را در واکنش سازگارانه گیاهان به تنش‌های محیطی برجسته می‌سازد و می‌تواند به‌عنوان معیاری مؤثر در برنامه‌های اصلاح نباتات و مدیریت زراعی برای بهبود عملکرد و پایداری تولید غلات در شرایط نامطلوب محیطی مورد توجه قرار گیرد (۵۷).



شکل ۴- رگرسیون خطی بین وزن خشک ریشه با عملکرد دانه و زیست توده تحت شرایط بدون تنش و تنش شوری. رنگ‌بندی دایره‌ها بر اساس لاین‌های بومی و ارقام تجاری گندم نان مشخص شده است. خط برازش داده شده براساس رگرسیون خطی با استفاده از تابع geom_smooth در محیط نرم‌افزار R ترسیم شده است

Figure 4. Linear regression between root dry weight with grain yield and biomass under non-stressed and salinity conditions. The color of the circles represents the landrace lines and cultivars of bread wheat. The fitted line is based on linear regression using the geom_smooth function in the R software

ضرایب همبستگی برای شناسایی و گروه‌بندی ژنوتیپ‌های برتر در شرایط مختلف محیطی محسوب می‌شود (۵۸). بر اساس سه صفت کلیدی عملکرد دانه، زیست توده و وزن خشک ریشه، نتایج تحلیل

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر صفات عملکردی گندم نان تحت شرایط بدون تنش و تنش شوری: تجزیه مؤلفه‌های اصلی با کاهش ابعاد داده و تبیین بیشترین واریانس، ابزار دقیق‌تری نسبت به

کمتری برخوردار باشند؛ اما در شرایط شور، همبستگی مثبت بالا با عملکرد دانه و منفی متوسط تا کم با وزن خشک ریشه و زیست‌توده نشان داد. این موضوع حاکی از آن است که برخی ژنوتیپ‌ها تحت تنش شوری، حفظ عملکرد دانه الزاماً به زیست‌توده یا وزن ریشه بالا متکی نیست و احتمالاً سازوکارهای فیزیولوژیکی نظیر تنظیم اسمزی، تعادل یونی و کارایی فتوسنتز نقش کلیدی‌تری ایفا می‌کنند. ژنوتیپ‌های مشهد ۲۰ و کرخان اردبیل در شرایط بدون تنش با دارا بودن زیست‌توده کل و وزن ریشه بالا و عملکرد دانه در سطح متوسط، الگوی رشدی متعادل‌تری از نظر تولید ماده خشک نشان دادند. با این حال، برخی ژنوتیپ‌های گندم در شرایط شور، علی‌رغم حفظ سطح بالای زیست‌توده و ریشه، دچار کاهش محسوس در عملکرد دانه شدند؛ موضوعی که نشان‌دهنده کارایی پایین‌تر در تخصیص منابع به اندام‌های زایشی در شرایط تنش شوری است و این ژنوتیپ‌ها می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های مناسب برای تولید علوفه در اراضی شور موردتوجه قرار گیرند.

PCA نشان داد که در هر دو شرایط بدون تنش و تنش شوری، مؤلفه اول بیشترین سهم را در تبیین واریانس کل داده‌ها داشت؛ به‌گونه‌ای که این مؤلفه در شرایط بدون تنش و تنش شوری به‌ترتیب ۷۵/۹۵ درصد و ۷۹/۸۹ درصد از واریانس را توضیح داد، همچنین این مؤلفه در هر دو شرایط محیطی، به‌طور معنی‌داری با سه صفت عملکردی همبستگی مثبت دارد (جدول ۸)؛ که تأکید می‌کند که مؤلفه اول به‌خوبی توان زیستی و عملکردی ژنوتیپ‌ها را در هر دو محیط تبیین می‌کند و می‌توان آن را به‌عنوان شاخصی از پتانسیل تولید کلی ژنوتیپ‌ها در نظر گرفت. درحالی که مؤلفه دوم، در شرایط تنش شوری حدود ۱۵/۱۸ درصد و در شرایط بدون تنش حدود ۱۷/۰۵ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کند (جدول ۸). این مؤلفه در شرایط بدون تنش، همبستگی منفی بالا با عملکرد دانه و مثبت متوسطی با وزن خشک ریشه دارد؛ در حالی که زیست‌توده تقریباً نقشی در این محور نداشت. این الگو بیانگر به‌گونه‌ای که برخی ژنوتیپ‌ها با تخصیص بیشتر به ریشه ممکن است از کارایی تبدیل زیست‌توده به دانه

جدول ۸- نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر اساس وزن خشک ریشه، زیست‌توده و عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش شوری
Table 8. Results of principal component analysis based on root dry weight, biomass and grain yield under non-stressed and salinity conditions

صفات مورد مطالعه Studied traits	در شرایط بدون تنش None stressed condition		در شرایط تنش شوری Salinity stress condition	
	مؤلفه اول PC1	مؤلفه دوم PC2	مؤلفه اول PC1	مؤلفه دوم PC2
RDW	0.55	0.42	0.59	-0.51
BY	0.62	-0.01	0.61	-0.24
GY	0.56	-0.70	0.53	0.83
مقدار ویژه Eigenvalue	2.28	0.51	2.40	0.46
درصد واریانس Percentage of variance	75.95	17.05	79.89	15.18
درصد واریانس تجمعی Cumulative percentage of variance	75.95	93.00	79.89	95.07

RDW، BY و GY به ترتیب وزن خشک ریشه، زیست‌توده و عملکرد دانه

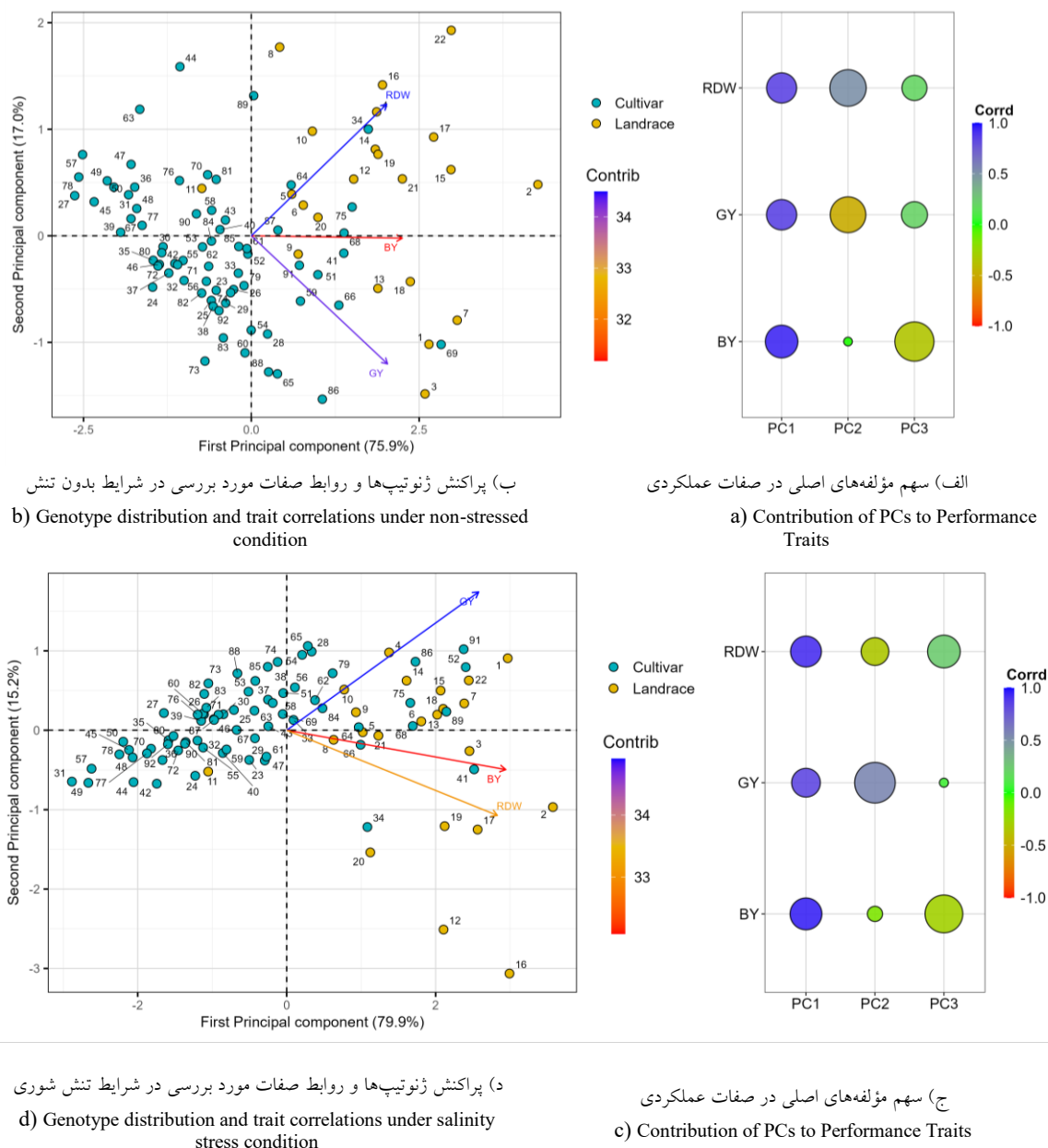
RDW, BY, and GY represent root dry weight, biomass and grain yield, respectively

نمودار دوبعدی PCA نشان داد که در شرایط بدون تنش ژنوتیپ‌ها پراکنشی فاقد ساختار مشخص داشتند (شکل ۵ - ب)، اما تحت تنش شوری، الگوی گروه‌بندی مشخصی میان ژنوتیپ‌ها دیده شد که تبیین‌کننده واکنش متفاوت آن‌ها به تنش شوری است (شکل ۵ - د). ژنوتیپ‌های حساس مانند البرز، دز و سیروان که در سمت منفی PC1 قرار گرفتند، مشهود بود. در مقابل، ژنوتیپ‌های ابراهیم‌آباد اراک، اراک، الرج اراک، ملایر، حاجی‌آباد کرمانشاه، گاسپارد و شرفخانه در شرایط تنش و بدون تنش، موقعیت ثابتی را در سمت مثبت PC1 حفظ کردند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های دارای تحمل پایدار شناسایی شدند. در این راستا، حسین و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از تحلیل PCA و داده‌های صفات گیاهچه‌ای مانند زیست‌توده و وزن ریشه در ۴۰ رقم گندم تحت تنش شوری (۱۵۰ میلی‌مولار NaCl)، سه رقم را به دلیل کاهش کمتر وزن تر و خشک به‌عنوان متحمل و چهار رقم را با کاهش شدید این صفات به‌عنوان حساس معرفی کردند. شکل دوبعدی PCA تفکیک مشخصی بین ژنوتیپ‌های متحمل و حساس نشان داد و نتایج مطالعه بر نقش مؤثر شاخص‌های رشدی (ریشه و زیست‌توده) در کنار صفات فیزیولوژیکی برای غربالگری تحمل به شوری تأکید دارد (۵۹).

تحلیل خوشه‌ای ژنوتیپ‌های گندم نان مبتنی بر صفات عملکردی گندم در شرایط بدون تنش و تنش شوری: تجزیه خوشه‌ای جهت گروه‌بندی ارقام، از روش مکمل کارایی تجزیه به مؤلفه‌های اصلی را تأیید می‌کند؛ در این پژوهش، تحلیل خوشه‌ای مبتنی بر نقشه حرارتی با استفاده از مقادیر استانداردشده

صفات انجام شد و منجر به شناسایی دو خوشه اصلی در هر دو شرایط بدون تنش و تنش شوری گردید (شکل ۶). نتایج تابع تشخیص خطی نشان‌دهنده دقت و قابلیت اعتماد بالای گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس سه صفت عملکردی در هر دو شرایط بدون تنش و تنش شوری بود؛ به‌طوری که دقت کلی در شرایط بدون تنش و تنش شوری به‌ترتیب ۰/۹۷ و ۰/۹۹ و ضریب کاپا به‌ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۹۸ به‌دست آمد که اعتبار گروه‌بندی انجام‌شده را تأیید می‌کند.

در شرایط بدون تنش، خوشه اول شامل ۲۱ لاین بومی و ۱۱ رقم تجاری است که بیشتر آن‌ها در دو یا هر سه صفت بررسی‌شده دارای مقادیر بالاتری هستند (شکل ۶ - الف). با این حال، ژنوتیپ‌های مشهد ۲۰، کرخان اردبیل و محت علیا اراک در این گروه علی‌رغم برخورداری از زیست‌توده و ریشه مطلوب، عملکرد دانه متوسط تا پایینی را نشان دادند. همچنین لاین بومی خرم‌آباد و رقم تجاری رصد نیز با وجود حضور در این خوشه، عملکرد دانه پایین‌تری داشتند. در مقابل، خوشه دوم عمدتاً متشکل از ارقام تجاری بوده و فقط یک لاین بومی را شامل می‌شود. ژنوتیپ‌های این خوشه در دو یا سه صفت مورد بررسی (به‌ویژه ژنوتیپ استار در هر سه صفت)، مقادیر کمتری در مقایسه با خوشه اول داشتند و بنابراین به‌عنوان گروهی با پتانسیل عملکردی متوسط تا پایین در شرایط مطلوب شناخته می‌شوند. به‌طور کلی، خوشه اول از نظر صفات عملکردی وضعیت مطلوب‌تری داشته و می‌تواند به‌عنوان پایه ژنتیکی مناسب در برنامه‌های اصلاحی برای محیط‌های بدون تنش مدنظر قرار گیرد.



شکل ۵- نمایش دوبعدی و سهم مؤلفه‌های اصلی صفات وزن خشک ریشه، زیست‌توده و عملکرد دانه در ۹۲ ژنوتیپ گندم نان در شرایط بدون تنش (الف و ب) و تنش شوری (ج و د) بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

Figure 5. Two-dimensional representation of root dry weight, biomass and grain yield in 92 bread wheat genotypes under non-stressed (a,b) and salinity conditions (c,d) based on the first two principal components

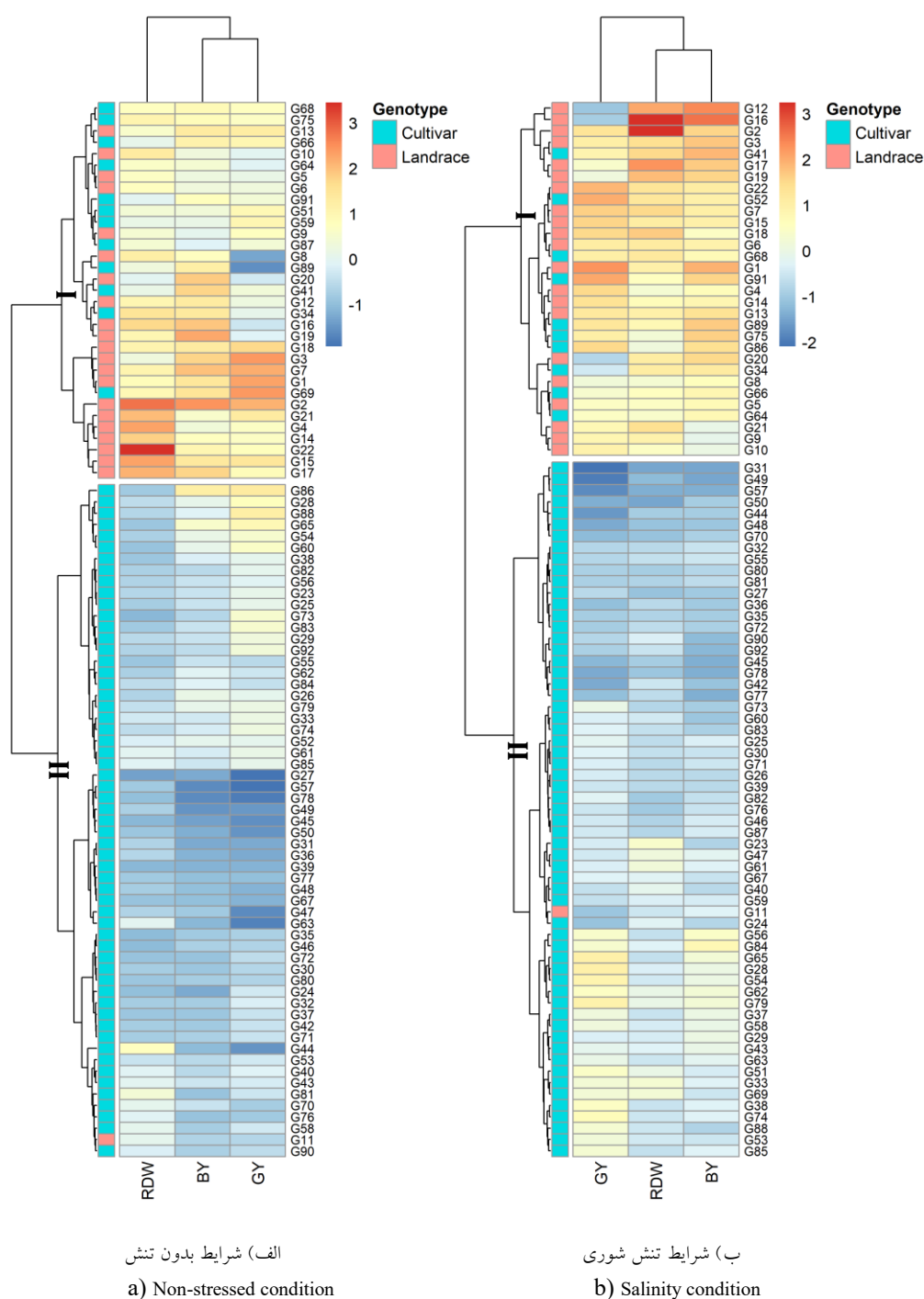
این شرایط ژنوتیپ‌های ابراهیم‌آباد اراک، اراک، الرج اراک و حاجی‌آباد کرمانشاه در هر سه صفت عملکردی مقادیر بالایی داشتند و به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها به شوری شناخته شدند. در همین خوشه، ژنوتیپ‌های محت علیا اراک، مشهد ۱ و مشهد ۱۶،

در شرایط تنش شوری نیز ژنوتیپ‌ها به دو خوشه اصلی تقسیم شدند، اما الگوی پراکنش و ترکیب ژنوتیپ‌ها تغییرات آشکاری نشان داد (شکل ۶ - ب). خوشه اول شامل ۳۱ ژنوتیپ (۲۱ لاین بومی و ۱۰ رقم تجاری) است. برخلاف شرایط بدون تنش، در

علی‌رغم برخورداری از زیست‌توده و وزن خشک ریشه مطلوب، دارای عملکرد دانه پایین‌تری بودند. همچنین ژنوتیپ‌های مشهد ۲۰ و کرخان اردبیل نیز زیست‌توده و وزن خشک ریشه بالایی داشتند، اما عملکرد دانه در آن‌ها کمتر بود؛ از این رو این ژنوتیپ‌ها را می‌توان به‌عنوان گزینه‌های مناسب برای اهداف تولید علوفه در محیط‌های شور در نظر گرفت. خوشه دوم که عمدتاً شامل ارقام تجاری و تنها یک لاین بومی است، از لحاظ دو یا هر سه صفت عملکردی مقادیر پایین‌تری داشتند. در این خوشه، ژنوتیپ‌های مانند البرز، چمران ۲، چناب، دریا، دز، سیروان، ورناک و استار به‌طور مشخص در هر سه صفت عملکردی مقادیر ضعیف‌تری نشان دادند و به‌عنوان حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها نسبت به شوری شناسایی شدند. هرچند تعدادی از ژنوتیپ‌های این خوشه نیز دارای عملکرد متوسطی در یک یا دو صفت بوده است. در این راستا مطالعه طالبی و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد که تجزیه خوشه‌ای برای صفات گیاهچه‌ای در مرحله جوانه‌زنی تحت تنش شوری (۱۲۰ میلی‌مولار NaCl) ابزاری کارآمد برای تفکیک ژنوتیپ‌های گندم بهاره است بطوری که از میان ۶۴ رقم ارزیابی‌شده، ژنوتیپ‌های خوشه دوم با مقادیر بالاتر صفات رشدی گیاهچه به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل معرفی شدند؛ در حالی که ژنوتیپ‌های خوشه اول، به دلیل افت چشمگیر همین صفات، در دسته حساس قرار گرفتند (۶۰). درمجموع، نتایج تحلیل PCA و خوشه‌بندی حرارتی ضمن تأیید یکدیگر، به‌طور واضح بیانگر قابلیت استفاده از این روش‌ها برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر، انتخاب و غربالگری سریع منابع ژرم‌پلاسمی گندم جهت برنامه‌های اصلاحی با هدف افزایش تحمل به شوری است.

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر اساس صفات عملکردی و شاخص‌های تحمل به تنش: در این پژوهش، صفات وزن خشک ریشه، زیست‌توده و عملکرد دانه تحت دو شرایط بدون تنش (Yp) و تنش شوری (Ys)، به‌همراه ۹ شاخص تحمل به شوری، در ۹۲ ژنوتیپ گندم نان مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که تنها دو مؤلفه اصلی با مقادیر ویژه بالاتر از یک، قادر به تبیین بیش از ۹۸ درصد از تغییرات کل بودند (جدول ۹). این موضوع نشان‌دهنده اعتبار و کفایت بالای این دو مؤلفه در تفسیر روابط میان صفات و شاخص‌ها است. علاوه بر این، ترسیم نمودار دوعبده مبتنی بر این دو مؤلفه اصلی، امکان تفکیک بهتر ژنوتیپ‌های برتر از لحاظ عملکرد و ثبات را فراهم می‌آورد. این نمودارها نه تنها به درک بهتر ارتباط بین صفات کمک می‌کنند، بلکه راهنمای ارزشمندی برای گزینش در برنامه‌های اصلاحی گندم نان جهت افزایش تحمل به شوری خواهند بود (شکل‌های ۷، ۸ و ۹)؛ بنابراین، استفاده از PCA به‌عنوان ابزاری قدرتمند در تحلیل داده‌ها، می‌تواند به شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و بهبود عملکرد در شرایط تنش کمک شایانی کند.

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای صفت وزن خشک ریشه نشان داد که مؤلفه اصلی اول با مقدار ویژه ۷/۰۵ و سهم ۶۴/۰۸ درصدی از واریانس کل (جدول ۹)، بیشترین نقش را در تفکیک ژنوتیپ‌ها ایفا می‌کند. در این مؤلفه، شاخص‌های YI، HM، MP، GMP، STI و وزن خشک ریشه در هر دو شرایط بدون تنش (YP) و تنش شوری (YS) بیشترین ضرایب را به خود اختصاص دادند. این مؤلفه عموماً بیانگر توان عملکردی ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف است.



شکل ۶- دندروگرام و heatmap ژنوتیپ‌های گندم نان بر اساس صفات وزن خشک ریشه، زیست‌توده و عملکرد دانه، مجذور فاصله اقلیدسی و روش خوشه‌بندی ward.D2، تحت شرایط بدون تنش و تنش شوری

Figure 6. Dendrogram and heat map of bread wheat genotypes based on root dry weight, biomass and grain yield, squared Euclidean distance and Ward.D2 clustering method, under non-stressed and salinity conditions

جدول ۹- نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر اساس وزن خشک ریشه، زیست‌توده، عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل به تنش شوری
Table 9. Results of principal component analysis based on root dry weight, biomass, grain yield and salinity stress tolerance indices

صفات مورد مطالعه	وزن خشک ریشه		زیست‌توده		عملکرد دانه	
Studied traits	Root dry weight		Biomass		Grain yield	
شاخص‌ها	مؤلفه اول	مؤلفه دوم	مؤلفه اول	مؤلفه دوم	مؤلفه اول	مؤلفه دوم
Indices	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2
YP	0.91	-0.41	0.89	0.46	0.74	0.67
YS	0.96	0.27	1.00	-0.04	1.00	-0.08
TOL	0.61	-0.77	0.58	0.81	0.27	0.96
MP	0.98	-0.19	0.95	0.30	0.90	0.44
GMP	1.00	-0.05	0.99	0.16	0.98	0.20
HM	0.99	0.08	1.00	0.05	1.00	0.03
SSI	-0.19	-0.98	-0.77	0.64	-0.80	0.59
STI	0.98	-0.07	0.98	0.17	0.97	0.21
YI	0.96	0.27	1.00	-0.04	1.00	-0.08
YSI	0.19	0.98	0.77	-0.64	0.80	-0.59
RSI	0.19	0.98	0.77	-0.64	0.80	-0.59
مقدار ویژه	7.05	3.82	8.72	2.24	8.26	2.70
Eigenvalue						
درصد واریانس	64.08	34.75	79.27	20.40	75.13	24.58
Percentage of variance						
درصد واریانس تجمعی	64.08	98.82	79.27	99.67	75.13	99.71
Cumulative percentage of variance						

YS و YP به ترتیب صفت عملکردی در شرایط بدون تنش و تنش شوری

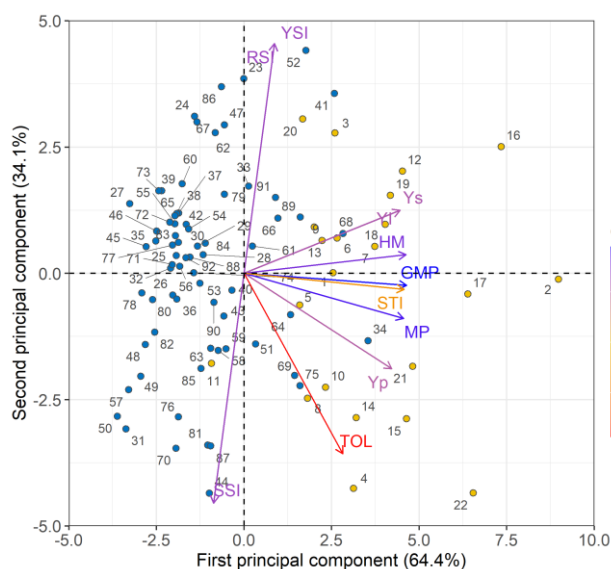
YP: yield under non-saline conditions; YS: yield under saline conditions

طبقه‌بندی شدند که این گروه‌بندی با میانگین وزن خشک ریشه و شاخص‌های تحمل آن‌ها به تنش شوری مرتبط بود. بر اساس شکل ۷، ژنوتیپ‌های اراک، حاجی‌آباد کرمانشاه، محت علیا اراک، کوره ساوه ۲، کرخان اردبیل و کوره ساوه ۱ دارای وزن خشک ریشه بالا در هر دو شرایط محیطی، به‌ویژه در شرایط تنش شوری، بودند و در ناحیه پایداری قرار گرفتند. در این میان، ژنوتیپ‌های اراک، کرخان اردبیل و کوره ساوه ۱ مطلوب‌ترین ارقام شناخته شدند. از سوی دیگر، ژنوتیپ‌های ورناک، چمران ۲، گلستان، دز، سیروان و البرز دارای وزن خشک ریشه مطلوب در شرایط بدون تنش بودند، اما در شرایط تنش شوری، وزن خشک ریشه پایینی نشان دادند و به‌عنوان ارقام حساس به شوری شناسایی شدند. در این میان، ژنوتیپ‌های چمران ۲، سیروان و البرز

ژنوتیپ‌های قرار گرفته در این مؤلفه اصلی علاوه بر نشان دادن وزن خشک ریشه بالاتر، از شاخص‌های تحمل به شوری مطلوب‌تری نیز برخوردار بودند. مؤلفه دوم با مقدار ویژه ۳/۸۲ و سهم ۳۴/۷۵ درصدی از واریانس تغییرات (جدول ۹)، بیانگر درجات مختلفی از پایداری و حساسیت ژنوتیپ‌ها در برابر تنش شوری است. در این مؤلفه، شاخص‌های TOL، SSI، YSI و RSI بیشترین ضرایب را داشتند. شاخص SSI که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر به تنش است، در سمت منفی این مؤلفه قرار گرفت. در مقابل، شاخص‌های پایداری مانند YSI و RSI در سمت مثبت بارگذاری شدند و بر ثبات عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط شوری دلالت داشتند (شکل ۷). مطابق با نمودار دایره‌ای حاصل از مقادیر مؤلفه‌های اول و دوم، ژنوتیپ‌های گندم در گروه‌های مختلفی

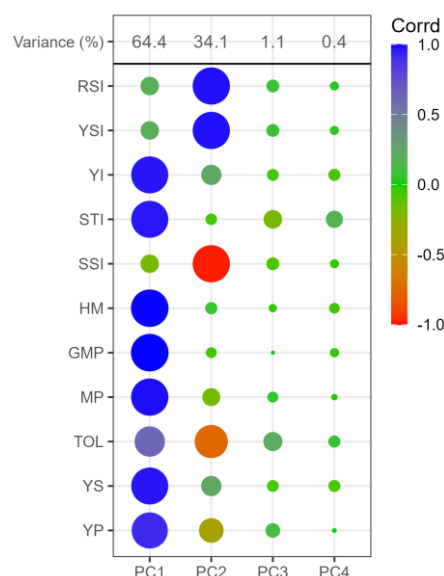
این راستا، ارقام ابراهیم‌آباد اراک، کرخان اردبیل و کوره ساوه به‌عنوان ارقام پایدار و دارای وزن خشک ریشه بالاتر در شرایط تنش شوری شناسایی شدند و برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شوند.

بیشترین حساسیت را نسبت به تنش شوری از خود نشان دادند. با توجه به تنوع ژنتیکی بالای ارقام مورد ارزیابی، انتخاب ارقام با عملکرد بالا در شرایط تنش شوری بر اساس نمودار دوبعدی امکان‌پذیر بود. در



ب) پراکنش ژنوتیپ‌ها و روابط شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش

b) Genotype distribution and stress tolerance and sensitivity indices correlations



الف) سهم مؤلفه‌های اصلی در شاخص‌های تحمل به تنش

a) Contribution of PCs to tolerance indices

شکل ۷- نمایش دوبعدی و سهم مؤلفه‌های اصلی برای شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش صفت وزن خشک ریشه در ۹۲ ژنوتیپ گندم نان بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

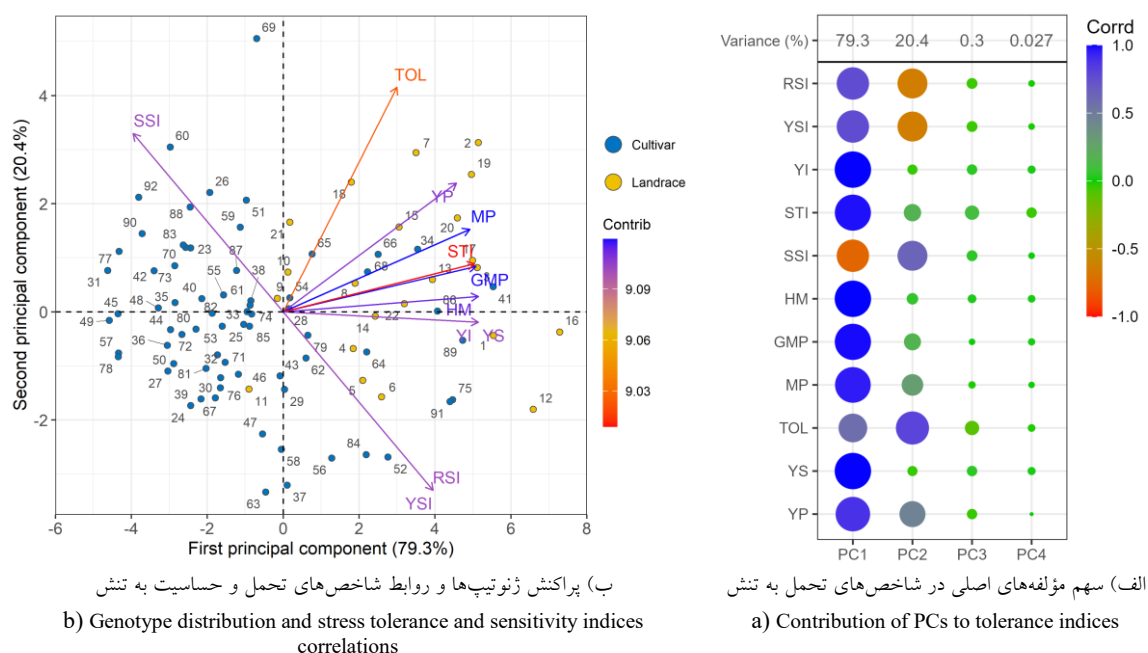
Figure 7. Two-dimensional representation of stress tolerance and sensitivity indices for the root dry weight in 92 bread wheat genotypes based on the first two principal components

ضرایب را داشتند. این مؤلفه عموماً بیانگر توان عملکردی ژنوتیپ‌ها در شرایط بدون تنش و تنش شوری است. همچنین، قرارگیری شاخص‌های YSI و RSI با ضرایب مثبت ۰/۷۷ در سمت مثبت مؤلفه اول، نشان‌دهنده ثبات نسبی و حفظ زیست‌توده ژنوتیپ‌های گندم نان در مواجهه با تنش شوری است. در مقابل، شاخص SSI با ضریب منفی ۰/۷۷ در این مؤلفه، نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌هایی که در مؤلفه اول نمره بالاتری کسب می‌کنند، حساسیت کمتری به تنش شوری از خود نشان می‌دهند (جدول ۹). مؤلفه دوم با مقدار ویژه ۲/۲۴ و سهم ۲۰/۴ درصدی از واریانس باقی‌مانده، بیشتر بر میزان حساسیت یا نوسان عملکرد

برای صفت زیست‌توده نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که دو مؤلفه اول مجموعاً حدود ۹۹/۷ درصد از کل واریانس موجود در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی را تبیین می‌کنند (جدول ۹) که با نتایج مطالعه مبشر و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد. همچنین آن‌ها نیز به سهم بالای دو مؤلفه اول ۹۹/۸۷ درصدی در تبیین تغییرات صفت زیست‌توده اشاره کرده‌اند (۶۱). مؤلفه اول با مقدار ویژه ۸/۷۲ و سهم واریانس ۷۹/۳ درصدی، بیشترین نقش را در تفکیک ژنوتیپ‌ها ایفا می‌کند. در این مؤلفه، شاخص‌های YI، HM، MP، GMP، STI و زیست‌توده در هر دو شرایط بدون تنش (YP) و تنش شوری (YS) بیشترین مقدار

تحت تنش تمرکز دارد. در این مؤلفه، شاخص‌های TOL (با ضرایب ۰/۵۸ در PC1 و ۰/۸۱ در PC2) و SSI (با ضرایب ۰/۷۷- در PC1 و ۰/۶۴ در PC2) بار مثبت‌تری نسبت به مؤلفه اول دارند. این وضعیت نشان می‌دهد که مؤلفه دوم به‌طور خاص به ارزیابی میزان حساسیت ژنوتیپ‌ها به تنش شوری و تغییرات زیست‌توده در این شرایط می‌پردازد (شکل ۸). ژنوتیپ‌هایی که در مؤلفه دوم نمره بالاتری کسب می‌کنند، در شرایط تنش شوری کاهش زیست‌توده قابل‌ملاحظه‌ای را داشتند. با ترکیب اطلاعات مؤلفه‌های اول و دوم، می‌توان ژنوتیپ‌های دارای زیست‌توده بالا، ثبات بیشتر و حساسیت کمتر به تنش را شناسایی و در برنامه‌های اصلاحی گندم برای بهبود تحمل به شوری و حفظ زیست‌توده گیاهی مورد استفاده قرار داد. نتایج تجزیه نمودار دوبعدی نشان داد که ژنوتیپ‌هایی که در راستای شاخص‌های تحمل و زیست‌توده در هر دو محیط (بدون تنش و تنش شوری) قرار دارند (شکل ۸)، قادرند ضمن حفظ تولید ماده خشک، در مواجهه با شوری نیز کاهش کمتری در زیست‌توده تجربه کنند. در مقابل، ژنوتیپ‌هایی که با شاخص‌های حساسیت نظیر TOL و SSI هم‌راستا هستند، افت محسوس‌تری در تولید زیست‌توده نشان می‌دهند. ژنوتیپ‌هایی که در راستای شاخص‌های مثبت (YS، GMP، MP، HM و STI) قرار دارند، به‌عنوان گزینه‌های متحمل به شوری و پایدار از نظر زیست‌توده شناسایی شدند. در مقابل، ارقامی که با شاخص‌های حساسیت TOL و SSI هم‌جهت هستند، مستعد کاهش شدید تولید ماده خشک در مواجهه با شوری می‌باشند. به‌کارگیری ژنوتیپ‌های متحمل در برنامه‌های اصلاحی، گامی کلیدی در ارتقای سطح تولید و پایداری محصول در مناطق شور محسوب می‌شود. براساس شکل ۸، ژنوتیپ‌های الرج اراک، کرخان اردبیل، شرفخانه، کوره ساوه ۱، اسکان اراک، مشهد ۱، رباط اراک و پرند ساوه

به‌عنوان ارقام متحمل و پایدار از نظر زیست‌توده معرفی شدند؛ این ارقام علاوه بر عملکرد بالا در شرایط بدون تنش، در شرایط تنش شوری نیز کاهش قابل‌توجهی در زیست‌توده نشان نمی‌دهند. در مقابل، ژنوتیپ‌های شیروودی، کاسگوژن، البرز، پیشگام و گنبد به‌عنوان ارقام حساس به تنش شوری شناسایی شدند؛ این ارقام در مواجهه با تنش شوری کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در تولید زیست‌توده را تجربه می‌کنند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ژنوتیپ‌های متحمل و پایدار (مانند کرخان اردبیل، کوره ساوه ۱، اراک، محبت علیا اراک و ابراهیم‌آباد اراک) در برنامه‌های اصلاحی می‌تواند به بهبود سطح تحمل به شوری و حفظ زیست‌توده گیاهی کمک شایانی نماید، در حالی که ژنوتیپ‌های حساس (مانند شیروودی، کاسگوژن و گنبد) در مواجهه با تنش شوری کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در تولید زیست‌توده را تجربه می‌کنند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر اساس عملکرد دانه و شاخص‌های تنش نشان داد که دو مؤلفه اول با مقادیر ویژه ۸/۲۶ و ۲/۷ حدود ۹۹ درصد از تغییرات کل موجود در ژنوتیپ‌های مطالعه‌شده را تبیین می‌کند (جدول ۹). این نتایج با مشاهدات مبشر و همکاران (۲۰۲۲) (۶۱) و آرازمجو و همکاران (۲۰۲۴) (۵۳) هم‌خوانی دارد. به‌عنوان مثال، آرازمجو و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که دو مؤلفه اول قادر به تبیین ۹۹/۶ درصد از تغییرات کل بوده و موفق به شناسایی ژنوتیپ‌های با تحمل بالا به شوری شدند. در این مطالعه، مؤلفه اصلی اول با توضیح ۷۵/۱ درصد از واریانس کل، به‌عنوان مؤلفه تحمل به شوری در نظر گرفته شد. این مؤلفه همبستگی قوی با صفات YS (عملکرد تحت تنش)، YP (عملکرد در شرایط بدون تنش)، YI، MP، GMP، HM و STI نشان داد و به‌طور عمده نمایانگر توان عملکردی ژنوتیپ‌ها در شرایط بدون تنش و تنش شوری است.



شکل ۸- نمایش دوبعدی شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش صفت زیست توده در ۹۲ ژنوتیپ گندم نان بر اساس دو مؤلفه اول حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

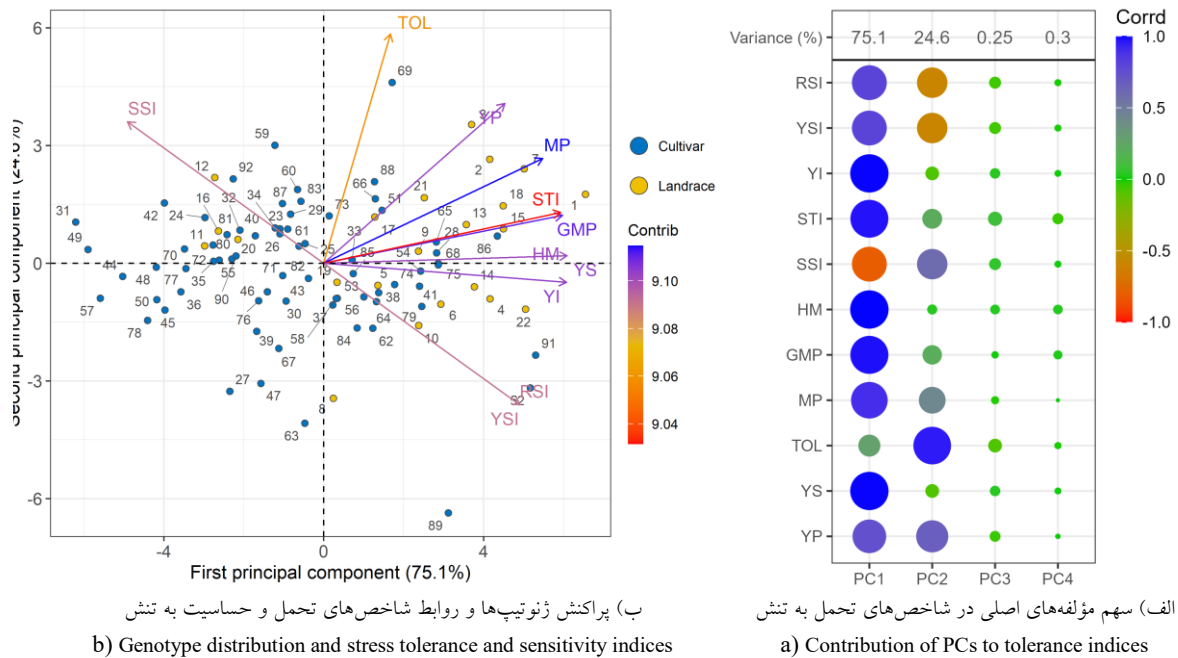
Figure 8. Two-dimensional representation of stress tolerance and sensitivity indices for the biomass in 92 bread wheat genotypes based on the first two principal components

ابراهیم آباد اراک، حاجی آباد کرمانشاه، کوره ساوه^۲، قهته ساروق، افق و اراک به دلیل دارا بودن مقدار بالای PC1 و مقدار پایین PC2، به عنوان ژنوتیپ‌های برتر (متحمل و پایدار) شناسایی شدند. در مقابل، ژنوتیپ‌های حساس (مانند مشهد^{۲۰}، شیراز، تجن، سیروان، البرز و دز) هرچند ممکن است در شرایط بدون تنش عملکرد نسبی قابل قبولی داشته باشند، اما در شرایط تنش شوری دچار افت عملکرد شدید می‌شوند و نیازمند بهبود از طریق دورگ‌گیری با ارقام مقاوم‌تر هستند (شکل ۹). نتایج پژوهش رواری و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از شاخص‌های STI، GMP، MP و HM و نسبت یونی Na^+/K^+ در برگ پرچم نشان داد که ژنوتیپ‌های افق، روشن و ارگ با حفظ عملکرد بالا تحت تنش شوری، به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل و ارقام سیروان و تجن با عملکرد پایین‌تر، به عنوان ژنوتیپ‌های حساس شناسایی شدند (۶۲). با توجه به تنوع ژنتیکی بالای ارقام ارزیابی‌شده،

همچنین، شاخص حساسیت SSI با بار منفی (۰/۸۰-) در این مؤلفه حضور داشت که نشان‌دهنده آن است که ژنوتیپ‌هایی با امتیاز بالای PC1 حساسیت کمتری به تنش شوری دارند. مؤلفه اصلی دوم (PC2) با توضیح ۲۴/۶ درصد از واریانس کل، ارتباط قوی با شاخص‌های SSI و TOL داشت و به عنوان مؤلفه حساسیت به شوری معرفی شد. این مؤلفه بیانگر تفاوت در حساسیت ژنوتیپ‌ها به تنش شوری و میزان افت عملکرد در مواجهه با تنش است. در این مؤلفه، شاخص‌های YSI و RSI نیز با بارهای منفی (۰/۵۹-) حضور دارند؛ این الگو نشان‌دهنده پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط شور در صورت داشتن امتیاز منفی در PC2 است (جدول ۹ و شکل ۹). بر این اساس، انتخاب ژنوتیپ‌هایی با مقدار بالای PC1 و مقدار پایین PC2 برای هر دو شرایط تنش و بدون تنش مطلوب است. در همین راستا، ژنوتیپ‌های هما، روشن زمستان، عزیزآباد فراهان، ساروق، ارگ،

زمستان، رصد و افق به عنوان ارقام دارای عملکرد برتر در شرایط تنش شوری و پایدار شناسایی شده و برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شوند.

انتخاب ارقام پایدار با عملکرد بالا در شرایط تنش شوری بر اساس نمایش دوبعدی امکان‌پذیر بوده است. در این راستا، ارقام ابراهیم‌آباد اراک، روشن



شکل ۹- نمایش دوبعدی شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش صفت عملکرد دانه در ۹۲ ژنوتیپ گندم نان بر اساس دو مؤلفه اصلی حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

Figure 9. Two-dimensional representation of stress tolerance and sensitivity indices for the grain yield in 92 bread wheat genotypes based on the first two principal components

سیوند، البرز، شیراز و زارع که در راستای بردارهای شاخص حساسیت SSI قرار گرفته‌اند، افت قابل توجهی در عملکرد دانه و وزن خشک ریشه تجربه کرده و حساسیت بالایی به شوری از خود نشان می‌دهند. حسینی و همکاران (۲۰۱۲) با محاسبه شاخص‌های تحمل به شوری بر پایه وزن خشک ریشه در ۴۴ ژنوتیپ برنج، نتیجه گرفتند که سه شاخص GMP، STI و MP مناسب‌ترین شاخص‌ها برای ارزیابی تحمل به شوری هستند و امکان شناسایی دقیق ژنوتیپ‌های مقاوم به شوری را فراهم می‌سازند (۶۳). موقعیت و جهت‌گیری بردارهای هر ژنوتیپ در نمودار دوبعدی نشان می‌دهد که ارقام پایدار و متحمل، ضمن حفظ توان تولید در محیط

مقایسه‌ی پراکنش ژنوتیپ‌ها در نمایش دوبعدی حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای وزن خشک ریشه و عملکرد دانه: مقایسه دو نمودار دوبعدی به دست آمده برای پراکندگی ژنوتیپ‌ها بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در صفات عملکرد دانه و وزن خشک ریشه (شکل‌های ۷ و ۹) نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌های کوره ساوه ۲، حاجی‌آباد کرمانشاه، اراک و ابراهیم‌آباد اراک بیشترین نزدیکی به شاخص‌های پایداری و تحمل (مانند STI، GMP، MP و HM) دارند. این ژنوتیپ‌ها در مواجهه با تنش شوری، کاهش کمتری در وزن خشک ریشه و عملکرد دانه نشان می‌دهند و به عنوان ارقامی پایدار و متحمل معرفی می‌شوند. در مقابل، ژنوتیپ‌های

بدون تنش، با حداقل کاهش در وزن خشک ریشه مواجه می‌شوند. این ویژگی‌ها آن‌ها را به گزینه‌هایی ایده‌آل برای برنامه‌های اصلاحی جهت افزایش تحمل به شوری و پایداری عملکرد تبدیل کرده است. از سوی دیگر، ژنوتیپ‌های حساس، علیرغم عملکرد مطلوب در شرایط بدون تنش، در مواجهه با شوری نیازمند راهبردهای اصلاحی یا مدیریتی تکمیلی به‌منظور کاهش میزان افت در صفات کلیدی و جبران حساسیت بالا هستند. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که استفاده از شاخص‌های پایداری و تحمل در تحلیل‌های چندمتغیره مانند PCA و نمایش دوبعدی، می‌تواند به شناسایی دقیق‌تر ژنوتیپ‌های متحمل و پایدار کمک کند و به‌عنوان راهنمایی ارزشمند در برنامه‌های اصلاحی و مدیریت زراعی مورد استفاده قرار گیرد.

گروه‌بندی ژنوتیپ‌های گندم نان بر اساس تجزیه خوشه‌ای شاخص‌های تحمل به تنش برای صفات وزن خشک ریشه و عملکرد دانه: تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های گندم نان بر اساس شاخص‌های تحمل به تنش و عملکرد دو صفت کلیدی (وزن خشک ریشه و عملکرد دانه) در شرایط تنش و بدون تنش انجام شد. نتایج حاصل تنوع ژنتیکی قابل‌توجهی را نشان داد و ژنوتیپ‌ها در چهار خوشه متمایز با الگوهای متفاوت پاسخ به شوری طبقه‌بندی شدند (شکل ۱۰). صحت گروه‌بندی حاصل از تابع تشخیص خطی برای عملکرد دانه و وزن خشک ریشه به‌ترتیب ۰/۹۲۴ و ۰/۹۳۵ و ضریب کاپا به‌ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۹۱ بود. این نتایج بیانگر انسجام بالای طبقه‌بندی و توانایی بالای آن در تفکیک دقیق ژنوتیپ‌ها براساس الگوی پاسخ آن‌ها به تنش شوری است.

تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های گندم نان بر اساس عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل به تنش: بررسی الگوی گروه‌بندی برای عملکرد دانه و شاخص‌های

تحمل به تنش (شکل ۱۰ -الف) نشان داد که گروه I، شامل ۲۹ ژنوتیپ (۲۱ رقم تجاری و ۸ لاین بومی) است که در بیشتر شاخص‌های تحمل شوری، به‌ویژه شاخص‌های مرتبط با عملکرد و پایداری، مقادیر بالایی کسب کرده‌اند. این ژنوتیپ‌ها از پتانسیل بالایی برای حفظ عملکرد در شرایط تنش برخوردارند و به عنوان گزینه‌های ارزشمندی برای برنامه‌های اصلاحی جهت افزایش سطح تحمل به شوری مطرح هستند. به عنوان مثال، ژنوتیپ‌های الوس جرد ساوه، عزیزآباد فراهان، ملایر، شیراز، خرم‌آباد، برند ساوه، ساروق و کرج ۱ به دلیل داشتن مقادیر کمتر شاخص حساسیت و مقادیر بیشتر شاخص‌های تحمل، جزو ژنوتیپ‌های متحمل محسوب می‌شوند. گروه II شامل ۱۴ ژنوتیپ (۵ رقم تجاری و ۹ لاین بومی) بود، به عنوان گروهی از ژنوتیپ‌های مقاوم با عملکرد پایدار شناخته می‌شود. این ژنوتیپ‌ها در شاخص‌های YP، YS، STI، MP، GMP و HM مقادیر بالایی نشان داده‌اند و عملکرد برتری را در شرایط بدون تنش و تنش شوری ارائه می‌دهند. ثبات عملکرد این ژنوتیپ‌ها، آن‌ها را به گزینه‌های بسیار مناسبی برای برنامه‌های اصلاحی تبدیل کرده است. به عنوان مثال، ژنوتیپ‌های کاسگوژن، حاجی‌آباد کرمانشاه، الرج اراک، اراک، ابراهیم‌آباد اراک، شرفخانه، کوره ساوه ۱، کوره ساوه ۲ و اوحدی در این گروه قرار دارند. گروه III، بزرگ‌ترین گروه بوده و شامل ۳۷ ژنوتیپ (۳۲ رقم تجاری و ۵ لاین بومی) است که عملکرد متوسطی در شاخص‌های تحمل به شوری برخوردارند. این ژنوتیپ‌ها می‌توانند به عنوان منابع ارزشمندی در برنامه‌های به‌نژادی گندم نان برای بهبود صفات تحمل به شوری مورد استفاده قرار گیرند. در نهایت، گروه IV، شامل ۱۲ ژنوتیپ تجاری است که به شدت حساس به شوری هستند. این ژنوتیپ‌ها دارای مقادیر بالای شاخص حساسیت و مقادیر پایین شاخص‌های

تحمل هستند و می‌توانند در مطالعات ژنتیکی به منظور شناسایی ژن‌ها و مسیرهای حساس به شوری مورد استفاده قرار گیرند. به عنوان مثال، ژنوتیپ‌های جناب، ورناک، دریا، گلستان، رسول، آرتا، البرز، تجن، سیروان و چمران ۲ بسیار حساس به شوری هستند. در یک مطالعه نیز، با به‌کارگیری تجزیه خوشه‌ای برای ارزیابی تحمل ۴۱ رقم گندم به تنش شوری، ژنوتیپ‌های سیروان، تجن و آرتا در گروه ارقام حساس طبقه‌بندی شدند (۶۲). نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های مبشر و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد؛ آنان با استفاده از تحلیل خوشه‌ای بر پایه ترکیب عملکرد دانه و شاخص‌های کمی تحمل به شوری، در ارزیابی ۶۴ لاین خالص نو ترکیب گندم تحت آبیاری شور (۱۵ دسی زیمنس بر متر)، چهار خوشه مستقل را آشکار ساخت. خوشه نخست بالاترین عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل و پایین‌ترین مقادیر شاخص‌های حساسیت را دارا بود، در حالی که خوشه چهارم ویژگی‌های وارون آن را نشان داد. خوشه‌های دوم و سوم نیز در سطوح میانی تحمل و حساسیت قرار گرفتند. این شواهد تأکید می‌کند که خوشه‌بندی مبتنی بر ادغام صفات عملکردی و شاخص‌های کمی، رویکردی کارآمد برای تفکیک دقیق ژنوتیپ‌های متحمل و حساس و گزینش مواد برتر در برنامه‌های اصلاحی هدفمند محسوب می‌شود (۶۱).

تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های گندم نان بر اساس وزن خشک ریشه و شاخص‌های تحمل به تنش: تحلیل خوشه‌ای برای صفت وزن خشک ریشه و شاخص‌های تحمل به تنش (شکل ۱۰-ب) نیز ژنوتیپ‌ها را به چهار گروه متمایز تقسیم کرد. گروه I، بزرگ‌ترین گروه بوده و شامل ۳۹ ژنوتیپ (عمدتاً ارقام تجاری) است که تنوع نسبتاً بالایی از نظر تحمل به شوری نشان می‌دهند و در دامنه‌ای از نیمه‌متحمل تا نیمه‌حساس قرار می‌گیرند. گروه II با ۲۳ ژنوتیپ

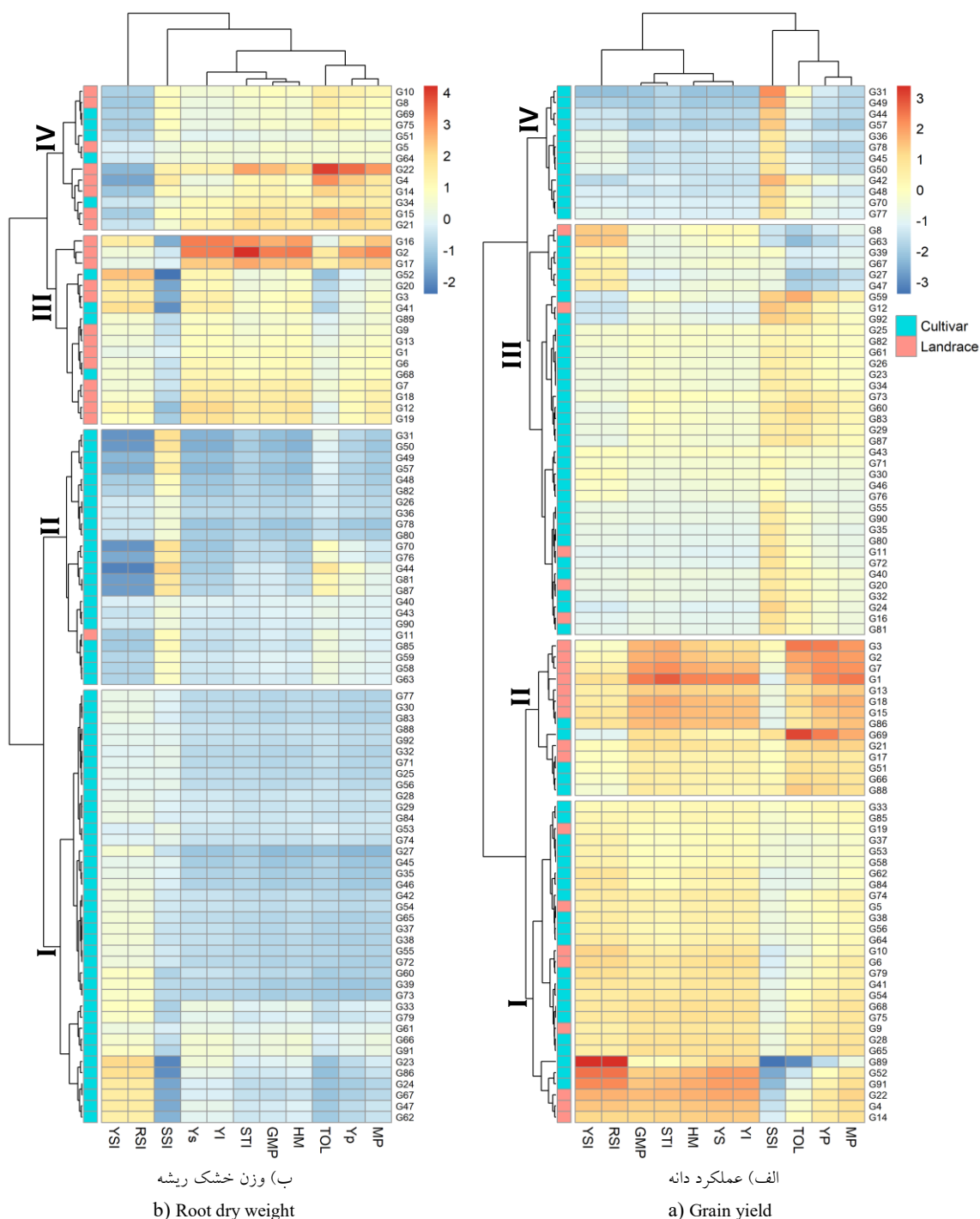
(شامل ۲۲ رقم تجاری و یک لاین بومی) مشخص شده است که دارای مقادیر پایین در شاخص‌های تحمل و مقادیر بالا در شاخص‌های حساسیت هستند. این ژنوتیپ‌ها می‌توانند به عنوان منابع ارزشمند در پیش‌به‌نژادی برای بهبود صفات تحمل به شوری مورد استفاده قرار گیرند. به عنوان مثال، ژنوتیپ‌های ورناک، البرز، آرتا، دز، رسول، سیروان، دریا و گلستان که بسیار حساس به شوری هستند، در این گروه قرار دارند. گروه III شامل ۱۷ ژنوتیپ (۱۳ لاین‌های بومی و ۴ رقم تجاری) است که در شاخص‌های عملکردی YP، YS، STI، MP، GMP و HM مقادیر بالا و در شاخص‌های حساسیت مقادیر پایینی نشان داده‌اند. این ژنوتیپ‌ها در هر دو شرایط تنش و بدون تنش از وزن خشک ریشه بالایی برخوردارند که بیانگر ثبات عملکردی قابل‌توجه آن‌هاست. این ژنوتیپ‌ها به عنوان گزینه‌های مناسبی برای برنامه‌های به‌نژادی متحمل به شوری مطرح هستند. به عنوان مثال، ژنوتیپ‌های محت علیا اراک، گاسپارد، حاجی‌آباد کرمانشاه، الراج اراک، اراک، ابراهیم‌آباد اراک، شرفخانه، کوره ساوه ۱، کوره ساوه ۲ و مشهد ۲۰ در این گروه قرار دارند. گروه IV شامل ۱۳ ژنوتیپ (۸ لاین بومی و ۵ رقم تجاری) است که عمدتاً در شاخص‌های تحمل به شوری، به‌ویژه شاخص‌های عملکرد و پایداری، مقادیر بسیار بالایی کسب کرده‌اند. این ژنوتیپ‌ها توانایی قابل‌توجهی در حفظ عملکرد تحت شرایط تنش نشان می‌دهند. به عنوان مثال، ژنوتیپ‌های خرم‌آباد، الوس جرد ساوه، عزیزآباد فراهان، قهته ساروق، نوید، کرج ۱، ملایر، ساروق و پرند ساوه به دلیل داشتن مقادیر بالای شاخص‌های تحمل و مقادیر پایین شاخص‌های حساسیت، جزء ژنوتیپ‌های بسیار متحمل به شمار می‌روند و در برنامه‌های به‌نژادی از ارزش بالایی برخوردارند.

به شوری هستند. در مقابل، ژنوتیپ‌های حساس نظیر ورناک، البرز، آرتا، رسول، سیروان، دریا و گلستان که در هر دو صفت دارای مقادیر پایین و حساسیت بالا هستند، می‌توانند در مطالعات ژنتیکی به منظور شناسایی ژن‌ها و مسیرهای تحمل و حساسیت به شوری مورد استفاده قرار گیرند.

بررسی تطابق گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها براساس شاخص‌های تحمل به شوری برای صفات عملکرد دانه و وزن خشک ریشه: برای ارزیابی میزان تطابق گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها براساس شاخص‌های تحمل به شوری در دو صفت عملکرد دانه و وزن خشک ریشه، ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن بین دو ماتریس فاصله اقلیدسی ژنوتیپ‌ها محاسبه شد. این تحلیل به ارزیابی میزان شباهت در الگوهای گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها در دو صفت عملکرد دانه و وزن خشک ریشه پرداخت و نمودار پراکنش حاصل، فواصل اقلیدسی ژنوتیپ‌ها را برای این دو صفت به‌طور هم‌زمان نشان می‌دهد (شکل ۱۱). مقدار ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن به‌دست آمده برابر با 0.328^{***} و از نظر آماری بسیار معنی‌دار بود. این میزان همبستگی بیانگر آن است که گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها براساس شاخص‌های تحمل محاسبه شده بر مبنای عملکرد دانه و وزن خشک ریشه در شرایط تنش شوری، از تطابق قابل قبولی برخوردار است. بنابراین، امکان گزینش همزمان برای بهبود این دو صفت وجود داشته و می‌توان به‌طور مؤثر آن‌ها را در برنامه‌های اصلاحی گندم تحت تنش شوری به کار برد.

مطالعه نشان داد که ژنوتیپ‌های دارای عملکرد دانه بالا، به‌ویژه در ژنوتیپ‌های متحمل و مقاوم به شوری، وزن خشک ریشه در شرایط تنش و بدون تنش به‌طور قابل توجهی بالاتر بوده است. این یافته نشان‌دهنده نقش اساسی سیستم ریشه‌ای قوی در افزایش توان جذب آب و عناصر غذایی و در نتیجه حفظ و پایداری عملکرد دانه در شرایط تنش است. در مقابل، ژنوتیپ‌های حساس که عملکرد دانه و وزن خشک ریشه پایینی دارند، از مکانیسم‌های فیزیولوژیکی و مولکولی ضعیف‌تری برای مقابله با شوری برخوردارند. این رابطه مثبت، ضرورت توجه همزمان به این دو صفت را در برنامه‌های اصلاحی تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که بهبود همزمان این صفات می‌تواند منجر به تولید ارقام متحمل‌تر به شوری شود.

همپوشانی در گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها براساس شاخص‌های تحمل به شوری برای صفات عملکرد دانه و وزن خشک ریشه: گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها براساس شاخص‌های تحمل به شوری در هر دو صفت عملکرد دانه و وزن خشک ریشه، بیانگر همپوشانی قابل توجهی میان ژنوتیپ‌های برتر انتخاب‌شده است. این همپوشانی نشان می‌دهد که عملکرد این ژنوتیپ‌ها در هر دو شرایط بدون تنش و تنش شوری نسبتاً پایدار بوده و امکان گزینش همزمان برای بهبود این صفات را فراهم می‌سازد (شکل ۱۰). ژنوتیپ‌هایی نظیر حاجی‌آباد کرمانشاه، الرج اراک، اراک، ابراهیم‌آباد اراک، شرفخانه، کوره ساوه ۱ و کوره ساوه ۲ که عملکرد پایداری در هر دو صفت نشان می‌دهند، گزینه‌های مناسبی برای اصلاح ارقام متحمل

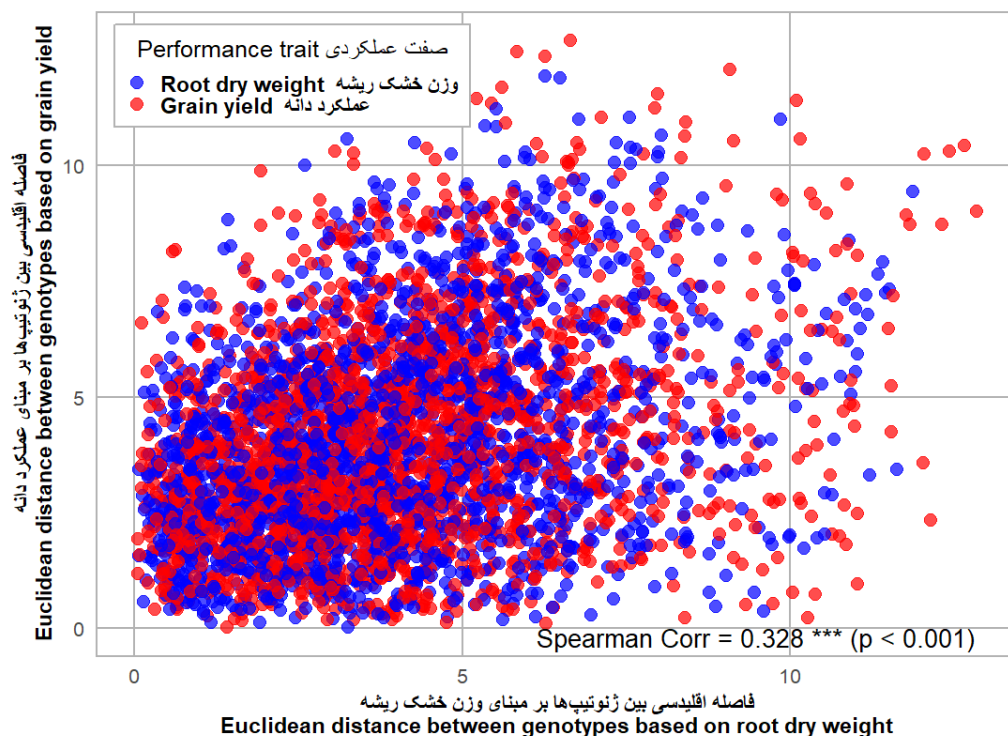


شکل ۱۰- دندروگرام و **heat map** حاصل از تجزیه خوشه‌ای برای ژنوتیپ‌های مورد مطالعه براساس مجذور فاصله اقلیدسی و روش خوشه‌بندی ward.D2

Figure 10. Dendrogram and heat map derived from cluster analysis of the studied genotypes based on Euclidean distance and Ward.D2 clustering method

شود و به تولید ارقامی با عملکرد پایدار و قابل اطمینان در محیط‌های نامساعد منجر گردد. بنابراین، یافته‌های این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنای علمی برای طراحی و اجرای پژوهش‌های آتی در راستای بهینه‌سازی صفات عملکردی و ریشه‌ای در برنامه‌های اصلاحی مرتبط با تحمل به تنش شوری مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج به‌دست‌آمده از این تحلیل ضمن تأکید بر لزوم توجه هم‌زمان به صفات عملکرد دانه و وزن خشک ریشه در شرایط تنش شوری، زمینه را برای تدوین و توسعه استراتژی‌های به‌نژادی چندوجهی و دقیق‌تر فراهم می‌آورد. وجود این همبستگی مثبت و معنی‌دار، می‌تواند موجب افزایش کارایی و دقت در شناسایی و گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به شوری



شکل ۱۱- نمودار پراکنش ماتریس‌های فاصله ژنوتیپ‌ها در صفت عملکرد دانه و وزن خشک ریشه، و ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپرمن

Figure 11. Scatter plot of genotype distance matrices for root dry weight and grain yield; and Spearman correlation coefficient

نتیجه‌گیری کلی

ژنوتیپ‌های برتر محسوب می‌شود و درک بهتر سازوکارهای تحمل به شوری را فراهم می‌کند. نتایج حاصل از این پژوهش که از طریق مجموعه‌ای جامع از تحلیل‌های آماری شامل تجزیه واریانس، ضرایب همبستگی، تجزیه رگرسیون، تجزیه مؤلفه‌های اصلی و تحلیل خوشه‌ای به دست آمد، نشان داد که صفات وزن خشک ریشه و عملکرد دانه به‌عنوان صفات اصلی و تأثیرگذار در افزایش تحمل به شوری قابل شناسایی هستند. این صفات در شرایط تنش، ثبات و

توسعه ارقام گندم متحمل به تنش شوری مستلزم بهره‌گیری از منابع ژنتیکی متنوع و گزینش دقیق صفات کلیدی ژنوتیپ‌های برتر در شرایط تنش است (۶۴). با توجه به چندرزی بودن و ماهیت پیچیده و همچنین وراثت‌پذیری نسبتاً پایین عملکرد دانه، استفاده از رویکردهای چندصفتی و تلفیقی، مبتنی بر صفات عملکردی کلیدی و شاخص‌های تحمل به تنش، روشی کارآمد برای شناسایی و گزینش

ژنتیکی و فیزیولوژیکی مرتبط با حساسیت به تنش شوری و انجام مطالعات ژنتیکی تکمیلی استفاده شوند. به طور کلی، یافته‌های این پژوهش ضمن تأکید بر اهمیت گزینش همزمان و تلفیقی برای صفات عملکردی و ساختار ریشه‌ای در شرایط تنش شوری، زمینه‌ساز توسعه راهبردهای اصلاحی مؤثر و هدفمند جهت ایجاد ارقام متحمل و پایدار گندم در شرایط محیطی نامساعد است همچنین می‌توانند به عنوان مبنایی برای انجام تحقیقات آینده با تمرکز بر شناسایی ژن‌ها و QTL‌های کلیدی مرتبط با تحمل و حساسیت به شوری به کار گرفته شوند و به افزایش دقت و سرعت در برنامه‌های اصلاحی گندم کمک نمایند.

پایداری مناسبی از خود نشان دادند و ارتباط مثبت و معنی‌داری میان آن‌ها مشاهده شد. نتایج شاخص‌های تحمل به تنش نظیر STI، GMP، MP و HM نیز مؤید آن بود که ژنوتیپ‌هایی با عملکرد دانه و وزن خشک ریشه بالا در شرایط تنش، دارای بالاترین مقادیر این شاخص‌ها بوده و بنابراین می‌توانند به عنوان والدین مطلوب در برنامه‌های به‌نژادی برای افزایش تحمل به شوری مورد استفاده قرار گیرند. در مقابل، ژنوتیپ‌هایی که در شرایط تنش شوری کاهش شدیدی در صفات یادشده داشتند و مقادیر بالای شاخص حساسیت (SSI) را نشان دادند، می‌توانند به عنوان منابع ارزشمند برای شناسایی مسیرهای

References

- Gooding, M. (2023). Wheat. In P. Shewry, H. Koxsel, and J. Taylor (Eds.), *ICC Handbook of 21st Century Cereal Science and Technology* 1 edition. Elsevier, 121-130.
- FAO, (2024). Crop Prospects and Food Situation – *Triannual Global Report No. 1*, March 2024. Rome. Available online: <https://doi.org/10.4060/cd0022>.
- Isayenkov, S.V. & Maathuis, F.J. (2019). Plant salinity stress: many unanswered questions remain. *Frontiers in plant science*, 10, 80.
- Tarolli, P., Luo, J., Park, E., Barcaccia, G., & Masin, R. (2024). Soil salinization in agriculture: Mitigation and adaptation strategies combining nature-based solutions and bioengineering. *Iscience*, 27(2), 1-9.
- Zhu, J. K. (2016). Abiotic stress signaling and responses in plants. *Cell*, 167(2), 313-324.
- Munns, R. (2005). Genes and salt tolerance: bringing them together. *New phytologist*, 167(3), 645-663.
- Munns, R. & Gilliam, M. (2015). Salinity tolerance of crops—what is the cost?. *New phytologist*, 208(3), 668-673.
- Safdarian, M., Askari, H., Shariati, J. V., & Nematzadeh, G. (2019). Transcriptional responses of wheat roots inoculated with *Arthrobacter nitroguajacolicus* to salt stress. *Scientific reports*, 9(1), 1792.
- Eswar, D., Karuppusamy, R., & Chellamuthu, S. (2021). Drivers of soil salinity and their correlation with climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 50, 310-318.
- Zhang, J. L. & Shi, H. (2013). Physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance. *Photosynthesis research*, 115, 1-22.
- Maas, E. V. & Poss, J. A. (1989). Salt sensitivity of wheat at various growth stages. *Irrigation Science*, 10, 29-40.
- Munns, R. & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59(1), 651- 681.
- Ashraf, M. H. P. J. C. & Harris, P. J. (2013). Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica*, 51, 163-190.
- Francois, L. E., Maas, E. V., Donovan, T. J., & Youngs, V. L. (1986). Effect of salinity on grain yield and quality, vegetative growth, and germination of Semi-Dwarf and durum wheat1. *Agronomy Journal*, 78(6), 1053-1058.

15. El-Hendawy, S. E., Hu, Y., Yakout, G. M., Awad, A. M., Hafiz, S. E., & Schmidhalter, U. (2005). Evaluating salt tolerance of wheat genotypes using multiple parameters. *European journal of agronomy*, 22(3), 243-253.
16. Egamberdieva, D., Wirth, S., Bellingrath-Kimura, S. D., Mishra, J., & Arora, N. K. (2019). Salt-tolerant plant growth promoting rhizobacteria for enhancing crop productivity of saline soils. *Frontiers in microbiology*, 10, 2791.
17. Reddy, I. N. B. L., Kim, S. M., Kim, B. K., Yoon, I. S., & Kwon, T. R. (2017). Identification of rice accessions associated with K^+/Na^+ ratio and salt tolerance based on physiological and molecular responses. *Rice Science*, 24(6), 360-364.
18. Mokarian, K., Maali Amiri, R., Tabatabaee, M. T., & Daneshmand, F. (2021). Response evaluation to salinity stress in some bread wheat genotypes using tolerance indices. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 52(3), 97-111.
19. Farid, N. M., Iswoyo, H., & Anshori, M. F. (2024). Utilizing Stress Tolerance Index and Principal Component Analysis for Rice Selection in Hydroponic Drought Screening Based on Physiological Traits. *International Journal of Agriculture and Biosciences*, 13(4), 736-743.
20. Ashraf, M. (2004). Some important physiological selection criteria for salt tolerance in plants. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 199(5), 361-376.
21. El-Hendawy, S., Al-Suhaibani, N., Mubushar, M., Tahir, M. U., Marey, S., Refay, Y., & Tola, E. (2022). Combining hyperspectral reflectance and multivariate regression models to estimate plant biomass of advanced spring wheat lines in diverse phenological stages under salinity conditions. *Applied Sciences*, 12(4), 1983.
22. Kanbar, A., Toorchi, M., & Shashidhar, H. E. (2009). Relationship between root and yield morphological characters in rainfed low land rice (*Oryza sativa* L.). *Cereal Research Communications*, 37, 261-268.
23. Shoaib, M., Banerjee, B. P., Hayden, M., & Kant, S. (2022). Roots' drought adaptive traits in crop improvement. *Plants*, 11(17), 2256.
24. Iqbal, S., Akhtar, J., Naz, T., Riaz, U., Hussain, S., Mazhar, Z., & Iqbal, M. M. (2020). Root morphological adjustments of crops to improve nutrient use efficiency in limited environments. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(19), 2452-2465.
25. Kaysar, M. S., Sarker, U. K., Monira, S., Hossain, M. A., Haque, M. S., Somaddar, U., ... & Uddin, M. R. (2022). Dissecting the relationship between root morphological traits and yield attributes in diverse rice cultivars under subtropical condition. *Life*, 12(10), 1519.
26. Atta, B.M., Mahmood, T., & Trethowan, T.M. (2013). Relationship between root morphology and grain yield of wheat in north-western NSW, Australia. *Australian Journal of Crop Science*, 7(13), 2108-2115.
27. Lopes, M. S. & Reynolds, M. P. (2010). Partitioning of assimilates to deeper roots is associated with cooler canopies and increased yield under drought in wheat. *Functional Plant Biology*, 37(2), 147-156.
28. Fischer, R. A. & Maurer, R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29(5), 897-912.
29. Rosielle, A. A. & Hamblin, J. (1981). Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment 1. *Crop science*, 21(6), 943-946.
30. Fernandez, G. C. (1992). Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In C. G. Kuo, *Adaptation of food crops to temperature and water stress*, 257-270.
31. Bouslama, M. & Schapaugh Jr, W. T. (1984). Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance 1. *Crop science*, 24(5), 933-937.
32. Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campanile, R. G., Ricciardi, G. L., & Borghi, B. (1997). Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. *Canadian Journal of plant science*, 77(4), 523-531.
33. Golestani Araghi, S. & Assad, M. T. (1998). Evaluation of four screening techniques for drought resistance and their relationship to yield reduction ratio in wheat. *Euphytica*, 103, 293-299.

34. Arzani, A. (2008). Improving salinity tolerance in crop plants: a biotechnological view. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 44, 373-383.
35. Cuartero, J., Bolarin, M. C., Moreno, V., & Pineda, B. (2009). Molecular tools for enhancing salinity tolerance in plants. *Molecular Techniques in Crop Improvement: 2nd Edition*, 373-405.
36. Zhou, Y., Feng, C., Wang, Y., Yun, C., Zou, X., Cheng, N., Zhang, W., Jing, Y. & Li, H. (2024). Understanding of plant salt tolerance mechanisms and application to molecular breeding. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(20), 10940.
37. Gregoria, G. B., Senadhira, D., & Mendoza, R. D. (1997). Screening rice for salinity tolerance. *IRRI Discussion Paper* 22, 1–30. International Rice Research Institute, Los Baños. Laguna, Philippines.
38. Pour-Aboughadareh, A., Yousefian, M., Moradkhani, H., Moghaddam Vahed, M., Poczai, P., & Siddique, K. H. (2019). iPASTIC: An online toolkit to estimate plant abiotic stress indices. *Applications in plant sciences*, 7(7), e11278.
39. Fischer, R. A. & Wood, J. T. (1979). Drought resistance in spring wheat cultivars. III. Yield associations with morpho-physiological traits. *Australian Journal of Agricultural Research*, 30(6), 1001-1020.
40. Bouslama, M. & Schapaugh Jr, W. T. (1984). Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance 1. *Crop science*, 24(5), 933-937.
41. Karimzadeh, H., Borzouei, A., Naserian, B., Tabatabaee, S. A., & Rahemi, M. R. (2023). Investigating the response mechanisms of bread wheat mutants to salt stress. *Scientific Reports*, 13(1), 18605.
42. Mansour, E., Moustafa, E. S., Abdul-Hamid, M. I., Ash-shormillesy, S. M., Merwad, A. R. M., Wafa, H. A., & Igartua, E. (2021). Field responses of barley genotypes across a salinity gradient in an arid Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, 258, 107206.
43. Shahsavand Hassani, H., Roudbari, Z., Mohammadi-Nejad, G., & Esmaeilzadeh-Moghaddam, M. (2021). Study the morphophysiological responses of promising Iranian new and natural trans chromosomal secondary tritipyrum cereal lines to Salinity conditions in Iran. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 52(1), 75-86.
44. Khan, M.M., Rahman, M.M., Hasan, M.M., Amin, M.F., Matin, M.Q.I., Faruq, G., Alkeridis, L.A., Gaber, A. & Hossain, A. (2024). Assessment of the salt tolerance of diverse bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes during the early growth stage under hydroponic culture conditions. *Heliyon*, 10(7), e29042.
45. Manhou, K., Moussadek, R., Yachou, H., Zouahri, A., Douaik, A., Hilal, I., Ghanimi, A., Hmouni, D. & Dakak, H. (2024). Assessing the Impact of Saline Irrigation Water on Durum Wheat (cv. Faraj) Grown on Sandy and Clay Soils. *Agronomy*, 14(12), 2865.
46. Afzal, I., Basra, S. M. A., Cheema, M. A., Farooq, M., Jafar, M. Z., Shahid, M., & Yasmeen, A. (2013). Seed priming: A shotgun approach for alleviation of salt stress in wheat. *International Journal of Agriculture and Biology*, 15(6), 1199-1203.
47. Dadshani, S., Sharma, R. C., Baum, M., Ogbonnaya, F. C., Leon, J., & Ballvora, A. (2019). Multi-dimensional evaluation of response to salt stress in wheat. *PloS one*, 14(9), e0222659.
48. Akbari Ghogdi, E., Izadi-Darbandi, A., Borzouei, A., & Majdabadi, A. (2011). Evaluation of morphological changes in some wheat genotypes under salt stress. *Journal of Soil and Plant Interactions-Isfahan University of Technology*, 1(4), 71-83.
49. Shamuyarira, K. W., Shimelis, H., Figlan, S., & Chaplot, V. (2023). Combining ability analysis of yield and biomass allocation related traits in newly developed wheat populations. *Scientific Reports*, 13(1), 11832.
50. Akbarpour, O. A., Dehghani, H., & Rousta, M. J. (2015). Evaluation of salt stress of Iranian wheat germplasm under field conditions. *Crop and Pasture Science*, 66(8), 770-781.
51. Farshadfar, E., Zamani, M., Motallebi, M., & Imamjomeh, A. (2001). Selection for drought resistance in chickpea lines. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 32(1): 65-77 [In Persian].

52. Bakhshi, B., Taghi Tabatabaei, S. M., Naroui Rad, M. R., & Masoudi, B. (2021). Identification of salt tolerant genotypes in wheat using stress tolerance indices. *bioRxiv*, 2021-02, 1-23.
53. Arazmjoo, E. & Amini Sefidab, A. (2024). Investigation of agronomic traits, dry matter remobilization and stress indices in promising bread wheat genotypes under salinity stress. *Journal of Central European Agriculture*, 25(1), 94-109.
54. Shafi, S., Shafi, I., Zaffar, A., Zargar, S.M., Shikari, A.B., Ranjan, A., Prasad, P.V. & Sofi, P.A. (2023). The resilience of rice under water stress will be driven by better roots: Evidence from root phenotyping, physiological, and yield experiments. *Plant Stress*, 10, 100211.
55. Iqbal, M. A., Rahim, J., Naeem, W., Hassan, S., Khattab, Y., & El-Sabagh, A. (2021). Rainfed winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars respond differently to integrated fertilization in Pakistan. *Fresenius Environ. Bull.*, 30(4), 3115-3121.
56. Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2003). Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. *Functional plant biology*, 30(3), 239-264.
57. Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, cell & environment*, 25(2), 239-250.
58. Nouri, A., Etminan, A., Teixeira da Silva, J. A., & Mohammadi, R. (2011). Assessment of yield, yield-related traits and drought tolerance of durum wheat genotypes (*Triticum turjidum* var. durum Desf.). *Australian journal of crop science*, 5(1), 8-16.
59. Hussain, N., Sohail, Y., Shakeel, N., Javed, M., Bano, H., Gul, H.S., Zafar, Z.U., Frahat Zaky Hassan, I., Ghaffar, A., Athar, H.U.R. & Ajaj, R. (2022). Role of mineral nutrients, antioxidants, osmotic adjustment and PSII stability in salt tolerance of contrasting wheat genotypes. *Scientific Reports*, 12(1), 12677.
60. Talebi Qormik, R., Alipour, H., & Darvishzadeh, R. (2024). Salinity stress tolerance in Iranian spring wheat cultivars during germination. *Iranian Journal of Seed Research*, 11(1), 129-143.
61. Mubushar, M., El-Hendawy, S., Tahir, M. U., Alotaibi, M., Mohammed, N., Refay, Y., & Tola, E. (2022). Assessing the suitability of multivariate analysis for stress tolerance indices, biomass, and grain yield for detecting salt tolerance in advanced spring wheat lines irrigated with saline water under field conditions. *Agronomy*, 12(12), 3084.
62. Ravari, S. Z., Dehghani, H., & Naghavi, H. (2016). Assessing salinity tolerance of bread wheat varieties using tolerance indices based on K^+/Na^+ ratio of flag leaf. *Cereal Research*, 6(2), 133-144.
63. Hosseini, S. J., Sarvestani, Z. T., & Pirdashti, H. (2012). Analysis of tolerance indices in some rice (*Oryza sativa* L.) genotypes at salt stress condition. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3(1), 1-10.
64. Moustafa, E. S., Ali, M. M., Kamara, M. M., Awad, M. F., Hassanin, A. A., & Mansour, E. (2021). Field screening of wheat advanced lines for salinity tolerance. *Agronomy*, 11(2), 281.

