

Original article

Evaluation of the efficiency of drought stress indices and identification of new drought-tolerant bread wheat lines

Armin Saed-Moucheshi^{1*}, Farshad Bakhtiar², Shahryar Sasani³, Davood Roodi⁴

1. Assistant Professor, Crop and Horticulture Sciences Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran
2. Associate Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agriculture Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
3. Associate Professor, Crop and Horticulture Sciences Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran
4. Assistant Professor, Crop and Horticulture Sciences Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Khorasan Razavi, Iran

Received 22 October 2024; Revised 1 January 2025; Accepted 15 January 2025

Extended abstract

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the most important and strategic crops worldwide, playing a crucial role in global food security. According to statistics published in 2023, the global wheat cultivation area is estimated at approximately 220 million hectares. This crop is particularly vital in the arid and semi-arid regions of Iran, where developing cultivars resistant to environmental stresses is essential. Therefore, introducing new drought-tolerant wheat varieties remains a key priority in national agricultural research programs. Various drought stress indices have been developed and extensively studied in scientific research to identify drought-resistant genotypes. The objective of the present study was to evaluate drought resistance and tolerance at the end of the growing season in selected sixth-generation genotypes using stress indices. Given the large number of genotypes (165), this study also provides a comprehensive comparison of the efficiency of different drought stress indices.

Materials and methods

A total of 165 bread wheat genotypes, including four control cultivars, were evaluated. The genotypes were selected from two groups, with one group consisting of inbred lines developed at the Agricultural and Natural Resources Research Center of Karaj and the other including genotypes derived from international CIMMYT trials. The genotypes were grown in two geographical regions, Neishabur and Kermanshah. Neishabur represented the drought-stress environment, where irrigation was withheld at the wheat flowering stage. An augmented design was employed to evaluate and compare the genotypes, including four control cultivars. In this study, all widely cited drought stress indices reported up to the time of writing were calculated, and their effectiveness was assessed in evaluating the drought tolerance of the genotypes.

Results and discussion

Analysis of grain yield under both stress and non-stress conditions using two-dimensional distribution diagrams showed that genotypes No. 125, 106, 92, 76, 73, 71 and 62 exhibited the highest yields under non-stress conditions while maintaining above-average performance under drought stress. Genotypes No. 103, 55, 56, 62, and 6 had the highest performance under terminal drought stress and also performed above average under normal conditions. Furthermore, based on the distribution diagram and performance analysis, genotypes 62 and 71 demonstrated good and relatively high yield performance

* Corresponding author: Armin Saed-Moucheshi; E-Mail: saedmoucheshi@gmail.com

under both normal and drought stress conditions. Based on the indices used, Geometric Mean Productivity (GMP) and Harmonic Mean (HARM) showed the highest efficiency for selecting drought-tolerant genotypes.

Conclusion

Overall, the results of this study indicated that some genotypes could be specifically selected for drought stress conditions and others for normal conditions, and subsequently carried forward to later generations for the development of new high-yielding cultivars. In addition, genotypes 62 and 71 were identified as highly suitable and dual-purpose genotypes for both drought stress and normal conditions. Furthermore, all drought tolerance indices reported in previous studies were calculated and evaluated, and the results revealed that among these indices, GMP and HARM showed the highest efficiency and discriminatory power in identifying genotypes suitable for both normal and drought stress conditions.

Keywords: 3D diagram, Augmented design, Heatmap, Scatter plot, Stress index

ارزیابی کارایی شاخص‌های تنش و معرفی لاین‌های جدید و متحمل به تنش خشکی در گندم نان

آرمین ساعدموچشی^{۱*}، فرشاد بختیار^۲، شهریار ساسانی^۳، داود رودی^۴

۱. استادیار بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران
۲. دانشیار بخش تحقیقات غلات، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، کرج، ایران
۳. دانشیار بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران
۴. استادیار بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خراسان رضوی، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: نمودار سه‌بعدی نمودار پراکنش طرح آگمنت شاخص تنش هیت‌مپ	گندم (<i>Triticum aestivum</i>) یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی و استراتژیک در سطح جهانی است که نقش اساسی در تأمین امنیت غذایی جهان ایفا می‌کند. طبق آمار منتشرشده در فائو سال ۲۰۲۳، سطح زیر کشت جهانی گندم حدود ۲۲۰ میلیون هکتار برآورد شده است. این محصول به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران که نیاز به ارقام مقاوم به تنش‌های محیطی دارند، از اهمیت زیادی برخوردار است. به همین دلیل، معرفی ارقام جدید گندم که به شرایط خشکی مقاوم باشند، یکی از اولویت‌های تحقیقات گندم در کشور است. برای شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی، از شاخص‌های مختلف تنش استفاده می‌شود که به‌طور گسترده در تحقیقات علمی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هدف از این پژوهش نیز بررسی مقاومت و تحمل به خشکی آخر فصل در ژنوتیپ‌های منتخب نسل F7 (PRWYT) با استفاده از شاخص‌های تنش و امکان‌سنجی معرفی ارقام جدید گندم نان مقاوم به خشکی آخر فصل بود. همچنین به دلیل بالا بودن تعداد ژنوتیپ‌ها (۱۶۵)، با استفاده از نتایج این پژوهش می‌توان مقایسه مناسبی در ارتباط با کارایی شاخص‌های تنش خشکی انجام داد. به‌صورت کلی نتایج این آزمایش نشان داد که از میان این ژنوتیپ‌ها می‌توان تعدادی را به‌صورت ویژه برای شرایط تنش و تعدادی را نیز به‌صورت ویژه برای شرایط نرمال انتخاب نموده و در نسل‌های بعدی جهت معرفی ارقام جدید پرمیانسیل بررسی کرد. از طرفی، دو ژنوتیپ شماره ۶۲ و ۷۱ را می‌توان به‌عنوان ژنوتیپ‌های بسیار مناسب برای هر دو شرایط تنش و نرمال به‌صورت دومنظوره معرفی نمود. در این پژوهش همچنین کلیه شاخص‌های تنش معرفی‌شده در منابع محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که از میان این شاخص‌ها، GMP و HARM دارای بیشترین قدرت و کارایی جهت شناسایی و تفکیک ژنوتیپ‌های مناسب هر دو شرایط تنش و نرمال بودند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰ تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۵ ۱۶۷-۱۶۷ (۱): ۱۹	

مقدمه

گندم با نام علمی *Triticum aestivum* به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی و استراتژیک در سطح جهانی و ملی، نقش پراهمیتی در تأمین امنیت غذایی ایفا کرده است. طبق آمار منتشرشده در سال ۲۰۲۳، سطح زیر کشت جهانی گندم حدود ۲۲۰ میلیون هکتار برآورد شده است. آسیا، با دارا بودن سهمی قابل‌توجه از این سطح زیر کشت، نقش عمده‌ای در تولید این محصول ایفا می‌کند (FAO, 2023). در ایران، گندم یکی از محصولات کلیدی است که بیش از ۶ میلیون هکتار از زمین‌های کشاورزی کشور را به خود اختصاص داده است (AREEO, 2023). این محصول به‌ویژه

عملکرد بالا تحت شرایط خشک‌سالی عملکرد قابل‌توجهی دارد. در مقاله‌های دیگر، آواد (Awaad, 2023) نشان داد که شاخص‌های SSI و YSI نیز می‌توانند به شناسایی ارقام با پایداری بیشتر در شرایط محیطی مختلف کمک کنند. بررسی‌های اخیر نشان داده است که ترکیب استفاده از این شاخص‌ها، به‌ویژه در ارزیابی عملکرد ژنوتیپ‌های گندم در شرایط تنش خشکی، نتایج قابل‌توجهی ارائه می‌دهد. نتایج این مطالعات بر این نکته تأکید دارد که شاخص‌های STI و SSI از جمله شاخص‌های مؤثری هستند که می‌توانند در تشخیص ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی در شرایط مزرعه‌ای کمک کنند. نتیجه پژوهش عبدالشاهی و همکاران (Abdolshahi et al., 2013) نشان‌دهنده نتایج مشابه بوده و شاخص STI به‌عنوان یک شاخص مهم معرفی گردید.

هدف این مطالعه، بررسی عملکرد ژنوتیپ‌های مختلف گندم تحت شرایط خشکی و ارزیابی آن‌ها با استفاده از شاخص‌های مختلف تنش است. استفاده از طیف گسترده‌ای از شاخص‌های تنش از جمله STI، SSI و YSI به ما این امکان را می‌دهد که ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی را شناسایی کرده و به بهبود برنامه‌های اصلاح نژاد و معرفی ارقام جدید گندم کمک نماییم. نتایج این پژوهش می‌تواند به توسعه روش‌های مقابله با خشکی و خشک‌سالی و بهبود عملکرد گندم در شرایط تنش‌های محیطی منجر شود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق با استفاده از ۱۶۵ لاین نسل F7 و چهار رقم شاهد گندم نان اجرا شد. ژنوتیپ‌ها در دو منطقه جغرافیایی کرمانشاه و نیشابور در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ کشت شدند. نیشابور به‌عنوان منطقه‌ای با شرایط تنش خشکی انتخاب گردید و در آزمایش مربوط به این منطقه آبیاری در مرحله ظهور سنبله گندم متوقف شد. ارقام شاهد شامل چهار رقم امین، دانش، فرین و ترابی از ارقام جدید معرفی‌شده توسط بخش تحقیقات غلات موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر بودند که هرکدام با چهار تکرار در میان ژنوتیپ‌ها به‌صورت طرح آگمنتد کشت شدند. شجره ژنوتیپ‌ها در جدول تکمیلی ۱ (فایل پیوست) آمده است. مطالعات ملی معرفی ارقام به‌صورت مداوم در ایستگاه‌های تحقیقاتی کشاورزی کشور در حال انجام است و هر ساله چندین رقم جدید معرفی می‌شود. برای معرفی ارقام جدید نیاز به تولید جمعیت و تنوع است که

در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران که نیاز به ارقام مقاوم به تنش‌های محیطی دارند، از اهمیت زیادی برخوردار است (Saed-Moucheshi et al., 2017). این ارقام به‌منظور بهبود عملکرد و کاهش اثرات منفی خشک‌سالی توسط مراکز تحقیقاتی همچون سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO) اصلاح‌شده‌اند.

خشکی و خشک‌سالی یکی از چالش‌های اساسی تولید محصولات کشاورزی، به‌ویژه گندم، در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Sohrabi et al., 2024). تأثیرات مخرب خشک‌سالی بر عملکرد گندم در سراسر جهان، از جمله در آسیا و ایران، به‌شدت احساس شده است (Saed-Moucheshi et al., 2023). بر اساس مطالعات اخیر، خشک‌سالی‌های پی‌درپی در مناطق مختلف ایران به‌طور میانگین موجب کاهش ۳۰ تا ۴۰ درصدی پتانسیل عملکرد گندم شده است (Woli et al., 2024). به همین دلیل، معرفی ارقام جدید گندم که به شرایط خشکی مقاوم باشند، از اولویت‌های تحقیقات کشاورزی در کشور است (Aliakbari et al., 2013; Mohammadi, 2018). به‌عنوان مثال، ارقام گندم اصلاح‌شده مانند باران و ریژاو که در سال‌های اخیر در ایران معرفی‌شده‌اند، با ویژگی‌های مقاومتی بالا، توانسته‌اند تأثیرات منفی خشک‌سالی را تا حدود زیادی کاهش دهند (AREEO, 2023).

برای شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی، از شاخص‌های مختلف تنش استفاده می‌شود که به‌طور گسترده در تحقیقات علمی موردبررسی قرار گرفته‌اند. شاخص تحمل به تنش (STI)، شاخص حساسیت به تنش (SSI) و شاخص عملکرد پایدار (YSI) از جمله مهم‌ترین این شاخص‌ها هستند که در مطالعات اخیر برای ارزیابی ژنوتیپ‌های گندم به‌کاررفته‌اند (Aliakbari et al., 2013; Riasat et al., 2020; Saed-Moucheshi et al., 2013). گذشته، این شاخص‌ها به‌عنوان ابزارهایی مؤثر برای تعیین مقاومت به خشکی و بهبود عملکرد گندم در شرایط تنش‌زا معرفی‌شده‌اند. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ی ساعدم‌وچشی و همکاران (Saed Moucheshi et al., 2009) مشخص شد که شاخص STI به‌طور خاص در شناسایی ژنوتیپ‌های با

جدول ۲. خصوصیات مربوط به خاک زراعی هر منطقه تحت کاشت ژنوتیپ‌ها آزمایشی گندم

خصوصیت Properties	کرمانشاه Kermanshah	نیشابور Neyshabour
نوع خاک Soil types	لومی-رسی Silk-Loamy	لومی-رسی Silk-Loamy
مواد آلی Organic matter	0.80%	0.75%
نیتروژن N (%)	0.12	0.14
فسفر P (ppm)	25	30
پتاسیم K (ppm)	300	350

در این مطالعه شاخص‌های زیر در محاسبه و ارزیابی نهایی ارائه شده در این مقاله آورده شدند:

حساسیت به تنش (SSI): (Kang & Zhang, 2010)

$$SSI = \frac{1 - \frac{Y_s}{\bar{Y}_p}}{1 - \frac{Y_s}{Y_p}} \quad [1]$$

نسبت عملکرد (YR): (Rosielle and Hamblin, 1981)

$$YR = 1 - \left(\frac{Y_s}{Y_p} \right) \quad [2]$$

شاخص تحمل (TOL): (Huang et al., 2012)

$$TOL = Y_p - Y_s \quad [3]$$

میانگین عملکرد (MP): (Fischer and Maurer, 1978)

$$MP = \frac{Y_s + Y_p}{2} \quad [4]$$

شاخص تولید پایدار (YI): (Baker & Sigua, 2015)

$$YI = \frac{Y_s}{\bar{Y}_s} \quad [5]$$

شاخص نسبت عملکرد در شرایط تنش (YSI):

(Huang et al., 2012)

$$YSI = \frac{Y_s}{Y_p} \quad [6]$$

میانگین هندسی (GMP): (Fischer and Maurer, 1978)

$$GMP = \sqrt{(Y_s \times Y_p)} \quad [7]$$

شاخص میانگین هارمونیک (HARM): (Rosielle & Hamblin, 1981)

$$HARM = \frac{2 \times Y_s \times Y_p}{Y_s + Y_p} \quad [8]$$

این تنوع با استفاده از تلاقی ارقام معرفی شده از قبل و یا تلاقی با ارقام جدید بین‌المللی انجام می‌شود. بر این اساس جمعیت استفاده شده در این پژوهش نیز زیرمجموعه‌ای از تلاقی‌های انجام شده در این مرکز انتخاب ژنوتیپ‌های مفید و با پتانسیل بالا تا نسل هشتم است. این مطالعه نیز به روشنی می‌تواند ژنوتیپ‌های مفید را برای معرفی در سال‌های آینده با استفاده از بررسی پاسخ آن‌ها به شرایط تنش خشکی مشخص نماید.

ارقام شاهد با ۴ تکرار و سایر لاین‌ها با یک تکرار با استفاده از طرح آگمنند در دو منطقه شامل کرمانشاه (ایستگاه پژوهشی ماهیدشت) و خراسان (ایستگاه پژوهشی نیشابور) بررسی شدند. در هر دو ایستگاه، برای آماده‌سازی خاک، مراحل متعارف شامل شخم زدن، دیسک زدن و تسطیح انجام شد. جدول ۱ و جدول ۲ به ترتیب میزان بارش و خصوصیات خاک زراعی محل‌های آزمایش را نشان می‌دهند. کودهای شیمیایی شامل کود فسفات و نیتروژن در زمان کاشت با نسبت ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار به زمین اضافه شد. در تمامی مراحل داشت، آبیاری به صورت منظم انجام شد. تنش خشکی در نیشابور با قطع آبیاری در مرحله ظهور سنبله ایجاد شد. این مرحله از رشد، به دلیل نیاز بالای گندم به آب، بحرانی‌ترین مرحله به حساب می‌آید. سطح هر کرت در هر دو منطقه برابر ۶ مترمربع و به صورت ۱/۲ در ۱ متر به صورت طول و عرض بود. کاشت به صورت پشته‌ای انجام شد و فاصله بین پشته‌های برابر ۶۰ سانتی‌متر بود. عمق کاشت با استفاده دستگاه پلنتر تحقیقاتی مدل وینتراشتاگر به اندازه پنج سانتی‌متر بود و فاصله بین بذرها به صورت تقریبی برابر با دو سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

جدول ۱. مقدار بارش باران در مکان‌های آزمایشی به تفکیک ماه در سال ۱۴۰۲-۱۴۰۳

Table 1. Precipitation contents in experimental sites across months of the crop year 2022-2023

Month	ماه	کرمانشاه Kermanshah (mm)	نیشابور Neyshabour (mm)
October	مهر	10	12
November	آبان	40	24
December	آذر	120	50
January	دی	50	30
February	بهمن	70	25
March	اسفند	40	10
April	فروردین	10	0

بسیار بالا بوده و در نتیجه میانگین مربعات خطا مقدار بسیار پایین و ناچیزی می‌شود (جدول ۳). پایین بودن مقدار میانگین مربعات خطا باعث معنی‌دار شدن حتی کوچک‌ترین تفاوت‌ها بین ژنوتیپ‌ها می‌گردد به صورتی که تفاوت ناچیز بین ژنوتیپ‌ها نیز می‌تواند معنی‌دار در نظر گرفته شود. بر این اساس هر ژنوتیپ به‌عنوان یک گروه معنی‌دار در نظر گرفته شد و در نتیجه نیازی به قرار دادن حروف مربوط به گروه‌بندی برای تعیین معنی‌داری این ژنوتیپ‌ها نیست. در جدول پیوست ۲ نیز می‌توان نتایج عملکرد دانه هر ژنوتیپ در هر دو شرایط نرمال و تنش را مشاهده نمود.

جدول ۳. تجزیه واریانس مربوط به لاین‌های آزمایشی

Table 3. Analysis of variance			
منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار احتمال
S.O.V	df	MS	
لاین	164	8635.12	<0.0001
خشکی	1	9023.66	<0.0001
باقی‌مانده	164	8.328	
Error			

جهت بررسی و مقایسه بهتر ژنوتیپ‌ها و همچنین بررسی نحوه پاسخ آن‌ها به شرایط تنش خشکی، کلیه شاخص‌ها معرفی شده تنش برای ژنوتیپ‌ها محاسبه گردید که نتایج مربوط به مهم‌ترین آن‌ها در جدول تکمیلی ۲ (فایل پیوست) و شکل ۱ آورده شده است. شکل ۱ همچنین نمودارهای پراکنش عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش و نرمال نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج ژنوتیپ شماره ۱ (۵/۸۱) کیلوگرم در پلات در شرایط نرمال و ۳/۶۵ کیلوگرم در شش متر مربع در شرایط تنش) دارای کمترین عملکرد در شرایط نرمال و عملکرد بسیار پایین در شرایط تنش خشکی بود. همچنین، کمترین عملکرد در شرایط تنش مربوط به ژنوتیپ‌های ۴۱ (۳/۴۰) کیلوگرم در پلات، ۲۹ (۳/۴۹) کیلوگرم در پلات) و ۳۰ (۳/۶۷) کیلوگرم در پلات) بود که این ژنوتیپ‌ها دارای عملکرد پایین‌تر از میانگین در شرایط نرمال (۸/۳۱) کیلوگرم در پلات) بودند. ژنوتیپ‌های ۱ (۵/۸۱) کیلوگرم در پلات، ۱۴ (۶/۱۰) کیلوگرم در پلات، ۱۵ (۶/۳۴) کیلوگرم در پلات) و ۱۲ (۶/۱۵) کیلوگرم در پلات) نیز ژنوتیپ‌هایی با کمترین عملکرد در شرایط نرمال بودند، با این حال عملکرد ژنوتیپ‌های ۱۴، ۱۵

تحمل به تنش (STI): (Rosielle and Hamblin, 1981)

$$STI = \frac{Y_p \times Y_s}{\bar{Y}_p^2} \quad [9]$$

تنش نسبی (RDI): (Huang et al., 2012)

$$RDI = \frac{Y_s/Y_p}{\bar{Y}_s/\bar{Y}_p} \quad [10]$$

در این فرمول‌ها، Y_p ، Y_s ، \bar{Y}_p و \bar{Y}_s به ترتیب عملکرد هر ژنوتیپ در شرایط نرمال، عملکرد هر ژنوتیپ در شرایط تنش، میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ‌ها در شرایط نرمال و میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش است.

رقم‌های شاهد در این آزمایش به‌صورت تجزیه مرکب تحلیل گردیده و مقدار میانگین مربعات خطای باقی‌مانده محاسبه گردید و در نهایت از آن برای محاسبه مقدار LSD استفاده شد. همچنین، برای تجزیه داده‌ها از یک روش دیگر به نام تحلیل واریانس دوطرفه نیز استفاده شد که در آن مکان‌های آزمایش به‌عنوان یک فاکتور و ژنوتیپ‌ها نیز به‌عنوان فاکتور دوم مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار پایتون تجزیه و تحلیل شدند. کدهای مورد استفاده جهت این محاسبات توسط نویسندگان در نرم‌افزار پایتون نوشته شد. پایتون استفاده شده در این مطالعه نسخه ۳.۱۲ بود و از محیط کاربری اسپایدر نسخه ۵ و جویپتر نوت‌بوک جهت نوشتن و اجرای کدها استفاده گردید. همچنین، برای تجزیه واریانس لاین‌ها و اطمینان از تفاوت آن‌ها در پاسخ به تنش خشکی، در شرایط نرمال و تنش به‌عنوان تکرار در نظر گرفته شد (یک تکرار به‌عنوان شرایط نرمال و یک تکرار به‌عنوان شرایط تنش و در مجموع دو تکرار با استفاده از روش تحلیل واریانس دوطرفه). در نهایت همه بوته‌های هر کرت برداشت گردید و عملکرد به‌صورت کیلوگرم در واحد ۶ مترمربع یادداشت‌برداری شد. برای تحلیل واریانس و سایر آنالیزها نیز مقدار عملکرد هر کرت به عملکرد در واحد مترمربع تبدیل شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس لاین‌ها نشان‌دهنده معنی‌دار بودن تفاوت بین ژنوتیپ‌های آزمایشی و همچنین تفاوت بین دو شرایط نرمال و تنش بود. با توجه به تعداد بالای ژنوتیپ‌های مورد بررسی، مقدار درجه آزادی خطا در جدول تجزیه واریانس

مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها تنش را بهتر تحمل کرده و در شرایط یکسان افت عملکرد کمتری داشته باشند (Saed-Moucheshi et al., 2023). استفاده از شاخص‌های تحمل به خشکی و بررسی همبستگی آن‌ها با عملکرد برای معرفی لاین‌هایی که در شرایط تنش خشکی، عملکرد بالایی دارند بکار گرفته شده است (Rosielle and Hamblin, 1981). شاخص‌های تنش محاسبه‌شده برای تک‌تک ژنوتیپ‌ها به صورت نمودارهای پراکنش دویعدی (شکل ۱) و سه‌بعدی (شکل ۲) آورده شده‌اند. نتایج مربوط به این شاخص‌ها نشان داد که بالاترین (۸/۲) و پایین‌ترین (۴/۶) GMP به ترتیب متعلق به ژنوتیپ‌های ۷۱ و ۱ بود. بالاترین مقدار HARM (۸) در ژنوتیپ شماره ۶۲ و پایین‌ترین مقدار آن (۴/۵) در ژنوتیپ شماره ۱ مشاهده شد. کمترین مقدار STI که برابر با ۰/۴۴ بود در ژنوتیپ شماره ۱۳۹ و بیشترین مقدار آن که برابر ۰/۹۶ بود در ژنوتیپ شماره ۱۸ به دست آمد. شاخص TOL نیز از جمله شاخص‌ها مورد بررسی در این مطالعه بود که نمودارهای پراکنش دویعدی و سه‌بعدی برای آن نیز رسم گردید (شکل ۲) و بیشترین (۵/۸۶) و کمترین (۰/۲۴) مقدار آن به ترتیب در ژنوتیپ‌ها شماره ۱۳۹ و ۱۹ به دست آمد. در نهایت نمودار کلاستر ژنوتیپ‌ها (شکل ۳) بر اساس همه شاخص‌های محاسبه‌شده. نتایج نشان داد که می‌توان این ۱۶۵ ژنوتیپ را به صورت کلی به چهار کلاستر یا خوشه تقسیم کرد. این چهار گروه با دقت توانایی تفکیک ژنوتیپ‌ها بر اساس بالا یا پایین بودن عملکرد در هر شرایط تنش یا نرمال را دارا بودند.

بررسی شاخص‌هایی که به عنوان شاخص‌های مهم با کارایی بالا در پژوهش‌های گذشته بررسی شده‌اند نشان داد که تعدادی از آن‌ها کارایی بسیار بالایی برای تشخیص ژنوتیپ‌ها مناسب ندارند. بر این اساس نتایج مربوط به شاخص‌های STI و TOL به روشنی ژنوتیپ‌هایی را برجسته کردند که در دو قطب مخالف هم قرار داشتند، برای مثال ژنوتیپ ۱۳۹ یک ژنوتیپ با عملکرد بالا در شرایط نرمال ولی عملکرد پایینی در شرایط تنش بود و ژنوتیپ ۱۹ که دارای عملکرد بالا در شرایط تنش و عملکرد پایینی در شرایط نرمال بود. این نتایج مربوط به دو شاخص فوق نشان می‌دهد که آن‌ها دارای قدرت بالایی در تفکیک و تشخیص ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در هر دو شرایط و یا عملکرد پایینی در هر دو شرایط را دارا نیستند؛ بنابراین، بهتر است که به جای آن‌ها از شاخص‌های GMP و HARM که قدرت بالایی برای

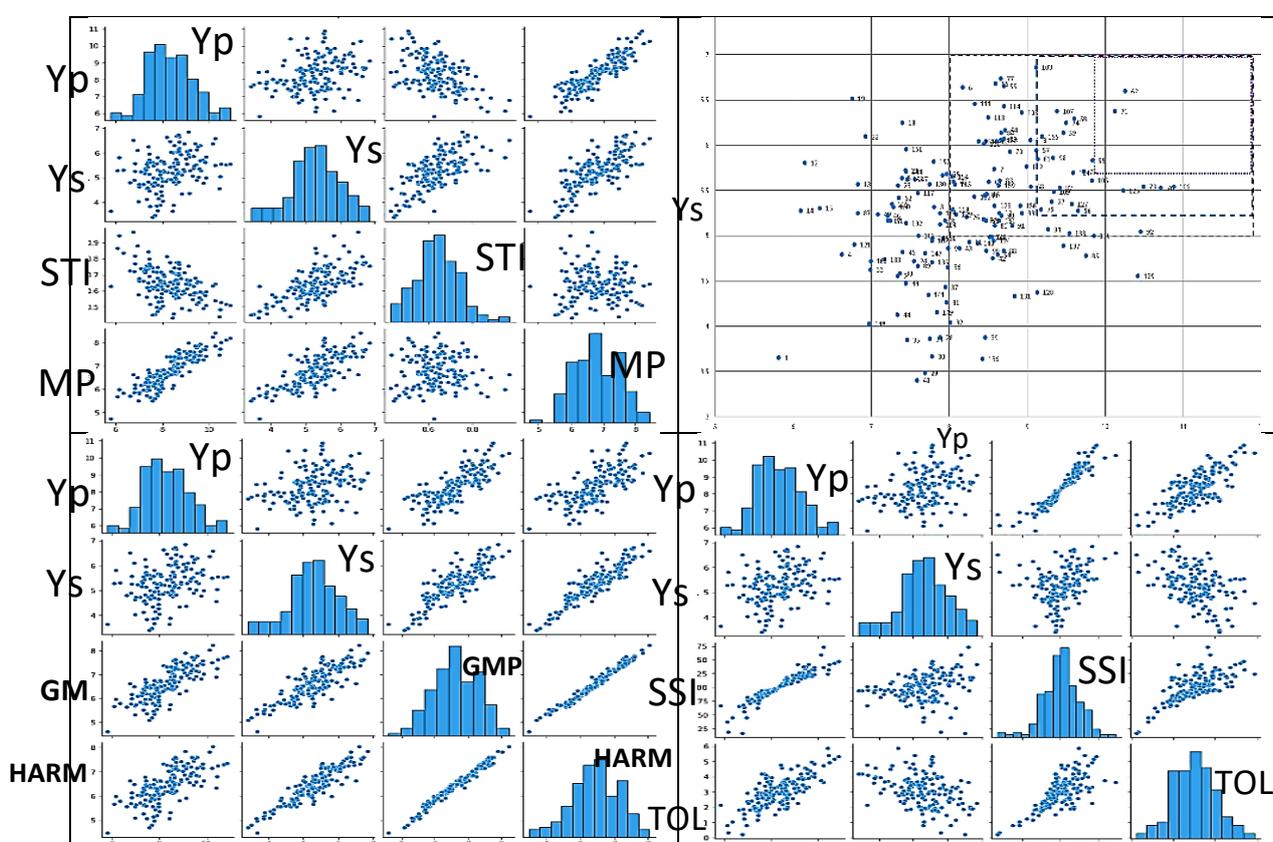
و ۱۲ در شرایط تنش بالاتر از میانگین (۵/۳۰) کیلوگرم در پلات) بود.

بررسی عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش و نرمال با استفاده از نمودار پراکنش دویعدی نشان داد که ژنوتیپ‌های شماره ۱۲۵ (۱۰/۲۳) کیلوگرم در پلات)، ۱۰۶ (۱۰/۸۸) کیلوگرم در پلات)، ۹۲ (۱۰/۴۵) کیلوگرم در پلات)، ۷۶ (۱۰/۷۱) کیلوگرم در پلات)، ۷۳ (۱۰/۴۸) کیلوگرم در پلات)، ۷۱ (۱۰/۱۲) کیلوگرم در پلات) و ۶۲ (۱۰/۲۵) کیلوگرم در پلات) ژنوتیپ‌هایی هستند که دارای بیشترین عملکرد در شرایط نرمال است و دارای عملکرد بالاتر از میانگین در شرایط تنش خشکی نیز هستند. ژنوتیپ‌های ۱۰۳ (۳/۸۶) کیلوگرم در پلات)، ۷۷ (۶/۷۴) کیلوگرم در پلات)، ۵۵ (۶/۶۵) کیلوگرم در پلات)، ۵۶ (۶/۶۸) کیلوگرم در پلات)، ۶۲ (۶/۶۰) کیلوگرم در پلات) و ۶ (۶/۶۴) کیلوگرم در پلات) نیز از جمله ژنوتیپ‌های با بیشترین عملکرد در شرایط تنش و عملکرد بالاتر از میانگین در شرایط نرمال هستند. از طرفی نمودار پراکنش و بررسی عملکرد در شرایط تنش و نرمال نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌های ۶۲ (۶/۶) کیلوگرم در پلات در شرایط تنش و ۱۰/۲۵ کیلوگرم در پلات در شرایط نرمال) و ۷۱ (۶/۳۸) کیلوگرم در پلات در شرایط تنش و ۱۰/۱۲ کیلوگرم در پلات در شرایط نرمال) از جمله ژنوتیپ‌هایی هستند در بخش ربع دوم نمودار پراکنش عملکرد در شرایط تنش و نرمال (شکل ۱) قرار گرفته‌اند، به این معنی که این دو ژنوتیپ دارای عملکرد مناسب و تقریباً بالا در هر دو شرایط نرمال و تنش خشکی بوده‌اند.

در بررسی کارایی شاخص‌های تحمل تنش، فرناندز با بررسی عملکرد ژنوتیپ‌ها در دو محیط نرمال و تنش، ژنوتیپ‌ها را از نظر واکنش به این دو شرایط به چهار گروه تقسیم کرد (Fernandez, 1992): ۱- ژنوتیپ‌هایی که در هر دو شرایط محیطی نرمال و تنش، عملکرد بالایی دارند (گروه A). ۲- ژنوتیپ‌هایی که فقط در شرایط نرمال عملکرد بالایی دارند (گروه B). ۳- ژنوتیپ‌هایی که فقط در شرایط تنش عملکرد بالایی دارند (گروه C) و ۴- ژنوتیپ‌هایی که در هر دو شرایط محیطی نرمال و تنش عملکرد کمی دارند (گروه D). ژنوتیپ‌هایی با عملکرد زیاد در هر دو شرایط محیطی برای اهداف اصلاحی مناسب می‌باشند. همواره هدف از تهیه ارقام متحمل به خشکی، معرفی ارقامی بوده که به طور نسبی در

عملکرد در شرایط نرمال نیز همبستگی شاخص‌های GMP، HARM، MP و SSI مثبت و بالا بود در حالی همبستگی آن شاخص‌های STI، YSI، RDI و GM منفی و پایین بود. این مقدار همبستگی‌ها نیز نتایج مربوط به کارایی بالایی دو شاخص GMP و HARM را تأیید می‌کند. همچنین گروه‌بندی شاخص‌های تنش نشان داد که شاخص MpSTI در یک گروه با فاصله بسیار کم با عملکرد در شرایط تنش قرار گرفت و شاخص SSI نیز به همین صورت با عملکرد در شرایط نرمال در یک خوشه با فاصله کم قرار گرفت.

تشخیص ژنوتیپ‌های پربازده در هر دو شرایط نرمال و تنش را دارا بودند استفاده شود. برای بررسی بهتر این شاخص‌ها، شکل ۴ مقدار همبستگی بین کلیه شاخص‌های معرفی‌شده را به صورت یک نقشه حرارتی نشان می‌دهد. همچنین در این شکل نمودار خوشه‌ای شاخص‌ها نیز به تصویر کشیده شده است. همبستگی عملکرد در شرایط تنش با شاخص‌های GMP، HARM، MpSTI، MsSTI و YI مثبت و بالا بود در حالی پایین‌ترین همبستگی آن با شاخص‌های TOL، YI و SSPI به دست آمد. در ارتباط



شکل ۱. نمودار پراکنش مربوط به عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش خشکی و نرمال در برابر شاخص‌های محاسبه‌شده خشکی. SSI: حساسیت به تنش، YR: نسبت عملکرد، TOL: شاخص تحمل، MP: میانگین عملکرد، YI: شاخص تولید پایدار، YSI: شاخص نسبت عملکرد در شرایط تنش، GMP: میانگین هندسی، HARM: شاخص میانگین هارمونیک، STI: تحمل به تنش.

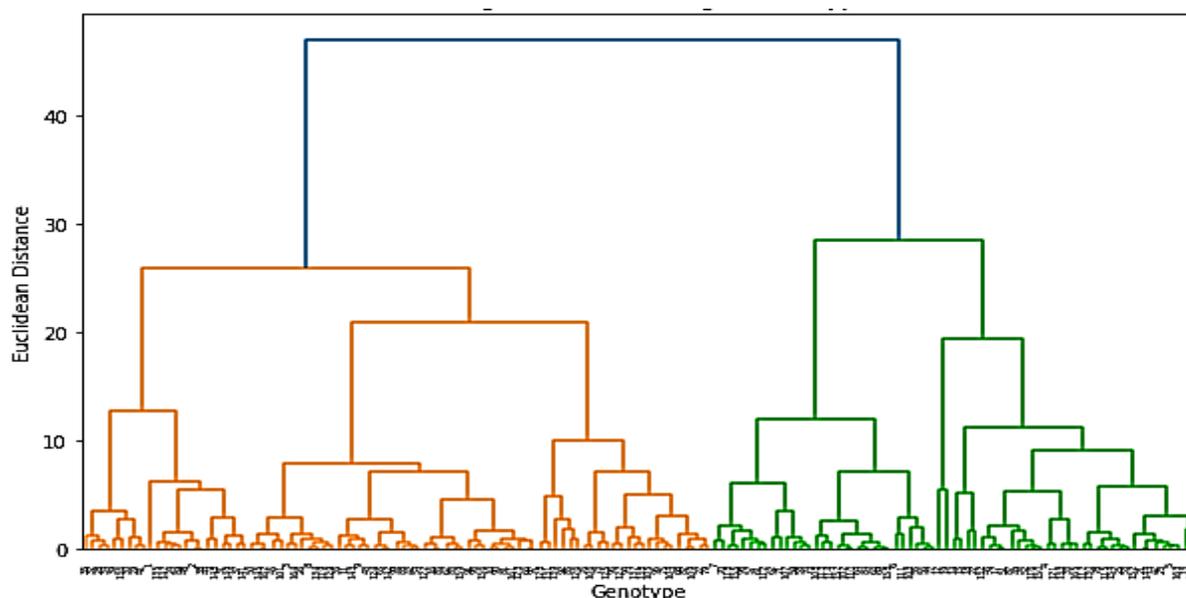
Fig. 1. Scatter plot for grain yield of the evaluated genotypes versus calculated stress indices. SSI: Stress Sensitivity Index, YR: Yield Ratio, TOL: Tolerance Index, MP: Average Productivity Index, YI: Yield Index, YSI: Stress Yield Ratio Index, GMP: Geometric Mean Productivity, HARM: Harmonic Mean, STI: Stress Tolerance Index.

نهایی آن توانایی استفاده از آن‌ها به جای یکدیگر است. از طرفی رابطه و مقادیر ضرایب همبستگی بین شاخص‌ها در مطالعات مختلف برای گونه‌های دیگر و حتی برای مجموعه ژنوتیپ‌های متنوع دیگر نیز متفاوت است. در نتیجه، توصیه می‌شود که برای هر مطالعه و هر مجموعه ژنوتیپ، همبستگی

با توجه به نتایج پژوهش پیش‌رو، از میان شاخص‌های تحمل محاسبه‌شده برخی دارای همبستگی کامل (مثبت یا منفی) و یا همبستگی بالاتر از ۰/۸ با یکدیگر بودند که نشان‌دهنده شباهت بالای این شاخص‌ها جهت استفاده برای انتخاب ارقام و ژنوتیپ‌های مناسب و متحمل است و نتیجه

همکاران (Patel et al., 2019). همچنین سانچز و همکاران (Sánchez-Reinoso et al., 2020) از نمودار سه‌بعدی برای عملکرد دانه گندم و لوبیا در شرایط تنش رطوبتی و نرمال در مقابل STI، SSI و TOL برای شناسایی ژنوتیپ‌های مناسب این گیاهان استفاده کردند.

(Aliakbari et al., 2013; Bano et al., 2021; Naghavi et al., 2013; Nargeseh et al., 2020). طبق مطالعات قبلی شاخص‌های تنش STI، SSI، TOL و GMP شاخص‌های هستند که بیشترین استفاده را داشته‌اند (Aliakbari et al., 2013; Garbrecht et al., 2014;)



شکل ۳. نمودار کلاستر مربوط به ژنوتیپ‌های گندم بر اساس شاخص‌های محاسبه‌شده خشکی

Fig 3. Cluster dendrogram of the evaluated genotypes based on calculated stress indices.

به احتمال زیاد برای هر دو شرایط نرمال و تنش به صورت نسبی مطلوب هستند.

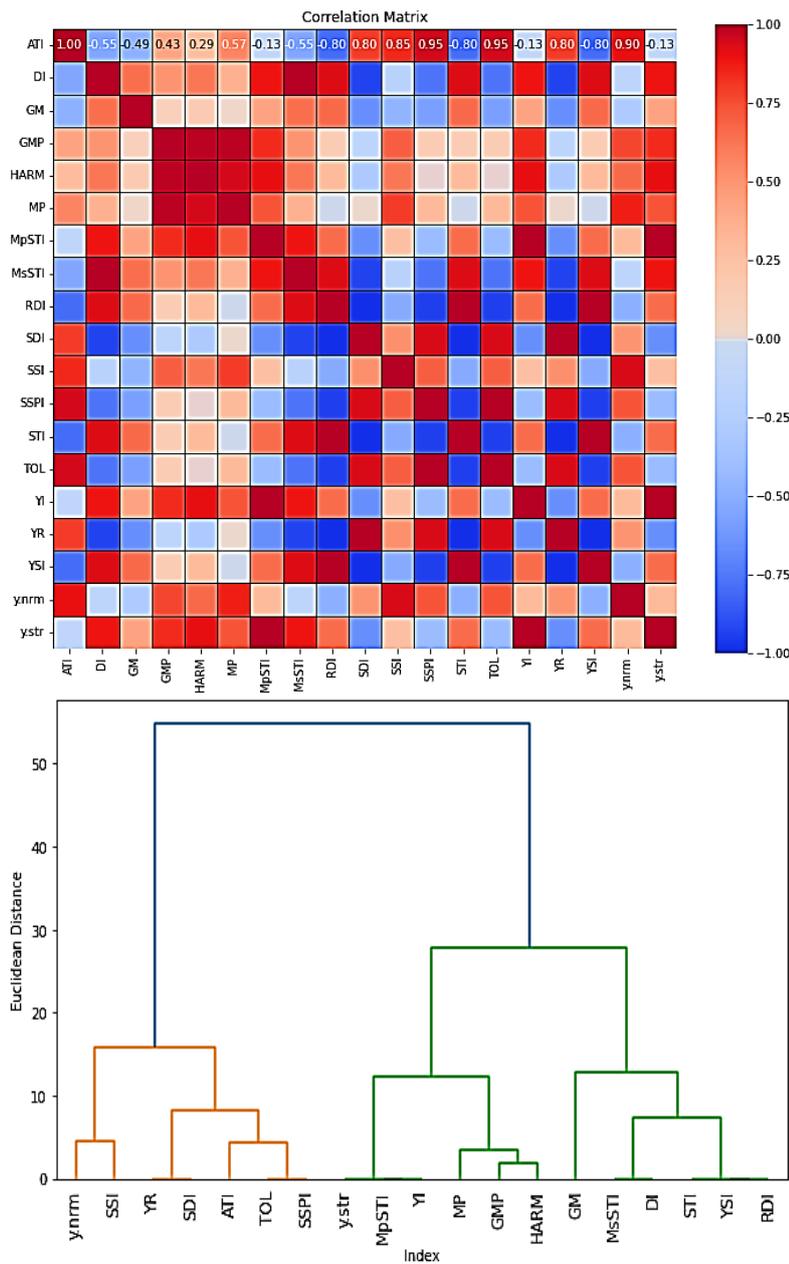
مجموعه داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های مختلف نتایج متفاوتی را در ارتباط با برتری نسبی استفاده از شاخص‌های تحمل تنش نشان داده است. از این رو استفاده از روشی که قادر به ادغام نتایج تمام شاخص‌ها با هم و گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس آن‌ها باشد ضروری به نظر می‌رسد. چنین روشی باید دارای قدرت تفکیک ژنوتیپ‌ها از هم بر اساس تک‌تک شاخص‌ها و همچنین بر اساس نتایج همه شاخص‌های مورد استفاده باشد. در پژوهش حاضر از روش گرافیکی نقشه حرارتی، استفاده گردید. از طرفی، پژوهشگران مختلفی از این روش جهت گروه‌بندی تیمارها و یا صفات‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های خود استفاده کرده‌اند (Aliakbari et al., 2013; Ghasemi Soloklui et al., 2019; Riasat et al., 2019; Saed-Moucheshi et al., 2019; Zareei et al., 2022).

همان‌طور که ذکر شد، مجموعه داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های مختلف نتایج متفاوتی را در ارتباط با برتری نسبی استفاده از شاخص‌های تحمل تنش نشان داده است. از این رو استفاده از روشی که قادر به ادغام نتایج تمام شاخص‌ها با هم و گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس آن‌ها باشد ضروری به نظر می‌رسد. چنین روشی باید دارای قدرت تفکیک ژنوتیپ‌ها از هم بر اساس تک‌تک شاخص‌ها و همچنین بر اساس نتایج همه شاخص‌های مورد استفاده باشد. از طرفی، پژوهشگران مختلفی از این روش جهت گروه‌بندی تیمارها و یا صفات‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های خود استفاده کرده‌اند (Aliakbari et al., 2013; Ghasemi Soloklui et al., 2019; Riasat et al., 2019; Saed-Moucheshi et al., 2019; Zareei et al., 2022). حاصل از روش نمودارهای سه‌بعدی و بای‌پلات بر اساس عملکرد در شرایط نرمال و تنش این نتیجه را تأیید کرد؛ بنابراین، از نظر شاخص‌های تحمل تنش که با روش‌های تک و چند متغیره بررسی گردیدند، ژنوتیپ و ارقام نامبرده

نتیجه‌گیری نهایی

کیلوگرم در پلات در شرایط تنش و ۱۰/۱۲ کیلوگرم در پلات در شرایط نرمال) ژنوتیپ‌های را می‌توان به‌عنوان ژنوتیپ‌های بسیار مناسب برای هر دو شرایط تنش و نرمال به‌صورت دومنظوره معرفی نمود. در این پژوهش همچنین کلیه شاخص‌های تنش معرفی‌شده در منابع محاسبه و موردبررسی قرار گرفت و مشخص گردید که از میان این شاخص‌ها، GMP و HARM دارای بیشترین قدرت جهت شناسایی و تفکیک ژنوتیپ‌های مناسب هر دو شرایط تنش و نرمال بودند.

در این پژوهش تعداد زیاد لاین‌های موردبررسی (۱۶۵) باعث بالاتر رفتن دقت انتخاب‌ها و معرفی شاخص‌ها شده است. به‌صورت کلی نتایج این آزمایش نشان داد که از میان این لاین‌ها می‌توان تعدادی را برای اصلاح ارقام گندم در شرایط تنش و نرمال در نسل‌های پیشرفته به کار برد. از طرفی، دو ژنوتیپ شماره ۶۲(۶/۶) کیلوگرم در پلات در شرایط تنش و ۷۱(۳۸/۶) کیلوگرم در پلات در شرایط نرمال) و



شکل ۴. نمودار نقشه حرارتی و کلاستر مربوط به شاخص‌های محاسبه‌شده در ژنوتیپ‌های گندم

Fig. 4. Heatmap and cluster dendrogram of the evaluated genotypes based on calculated stress indices

منابع

- Abdolshahi, R., Safarian, A., Nazari, M., Pourseyedi, S., Mohamadi-Nejad, G., 2013. Screening drought-tolerant genotypes in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) using different multivariate methods. *Archives of Agronomy and Soil Science* 59, 685-704. <https://doi.org/10.1080/03650340.2012.667080>
- Aliakbari, M., Saed-Moucheshi, A., Hasheminasab, H., Pirasteh-Anosheh, H., Asad, M.T., Emam, Y., 2013. Suitable stress indices for screening resistant wheat genotypes under water deficit conditions. *International Journal of Agronomy and Plant Production*. 4, 2665-672.
- Awaad, H.A., 2023. Techniques and measurements of assessing genotypes for salinity tolerance. In: Pessarakli, M. (Ed.). *Salinity Resilience and Sustainable Crop Production Under Climate Change*. Springer Publication. CA. USA. pp. 333-371. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-48542-8>
- Bano, H., Athar, H.u.R., Zafar, Z.U., Kalaji, H.M., Ashraf, M., 2021. Linking changes in chlorophyll a fluorescence with drought stress susceptibility in mung bean (*Vigna radiata* L. Wilczek). *Physiologia Plantarum*. 172, 1244-1254. <https://doi.org/10.1111/ppl.13327>
- FAO., 2023. World wheat cultivation area statistics. Data retrieved from FAO's website.
- Fernandez, G.C., 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: *Proceedings of The International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress*, p. 257-270. Spring Nature Publication. USA.
- Fischer, R., Maurer, R., 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Crop and Pasture Science*. 29, 897-912.
- Garbrecht, J.D., Zhang, X.C., Steiner, J.L., 2014. Climate change and observed climate trends in the fort cobb experimental watershed. *Journal of Environmental Quality*. 43, 1319-27. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.07.0286>
- Ghasemi Soloklui, A.A., Gharaghani, A., Oraguzie, N., Saed-Moucheshi, A., Vazifeshenas, M., 2019. Genetic diversity, heritability and inter-relationships of fruit quality and taste attributes among Iranian pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars using multivariate statistical analysis. *The International Journal of Tropical and Subtropical Horticulture*. 74, 303-318. <https://doi.org/10.17660/th2019/74.6.5>
- Huang, G., Ma, S., Bai, L., Zhang, L., Ma, H., Jia, P., Liu, J., Zhong, M., Guo, Z., 2012. Signal transduction during cold, salt, and drought stresses in plants. *Molecular Biology Reports*. 39, 969-987. <https://doi.org/10.1007/s11033-011-0823-1>
- Mohammadi, R., 2018. Breeding for increased drought tolerance in wheat: a review. *Crop and Pasture Science*. 69, 223-241. <https://doi.org/10.1071/CP17387>
- Naghavi, M.R., Aboughadareh, A.P., Khalili, M., 2013. Evaluation of drought tolerance indices for screening some of corn (*Zea mays* L.) cultivars under environmental conditions. *Notulae Scientia Biologicae*. 5, 388-393. <https://doi.org/10.15835/nsb.5.3.9049>
- Nargeseh, H.E., Aghaalikhani, M., Rad, A.H.S., Mokhtassi-Bidgoli, A., Sanavy, S.A.M.M., 2020. Comparison of 17 rapeseed cultivars under terminal water deficit conditions using drought tolerance indices. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 22, 489-503. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.16807073.2020.22.2.10.8>
- Patel, A.R., Patel, M.L., Patel, R.K., Mote, B.M., 2019. Effect of different sowing date on phenology, growth and yield of rice—a review. *Plant Archives*. 19, 12-16. [http://www.plantarchives.org/PDF%2019-1/12-16%20\(4578\).pdf](http://www.plantarchives.org/PDF%2019-1/12-16%20(4578).pdf)
- Ramirez-Vallejo, P., Kelly, J.D., 1998. Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica*. 99, 127-136.
- Riasat, M., Kiani, S., Saed-Moucheshi, A., Pessarakli, M., 2019. Oxidant related biochemical traits are significant indices in triticale grain yield under drought stress condition. *Journal of Plant Nutrition*. 42, 111-126. <http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2018.1549675>
- Riasat, M., Saed-Moucheshi, A., Jafari, A.A., 2020. Effect of drought stress levels on seedling morpho-physiological traits of alfalfa (*Medicago sativa*) populations grown in glasshouse. *Journal of Rangeland Science*. 10,

- 86-97.
https://journals.iau.ir/article_671441_8a31bb4af1a6e501a2db7b9bf61c8222.pdf
- Rosielle, A., Hamblin, J., 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment. *Crop Science*. 21, 943-946.
- Saed-Moucheshi, A., Mozafari, A.A., Pessarakli, M., Rezaei Mirghaed, E., Sohrabi, F., Zaheri, S., Barzegar Marvasti, F., Baniasadi, F., 2023. Improved strategy of screening tolerant genotypes in drought stress based on a new program in R-language: a practical triticale breeding program. *Journal of Plant Nutrition*. 46, 495-512.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2096467>
- Saed-Moucheshi, A., Pessarakli, M., Heidari, B., 2013. Comparing relationships among yield and its related traits in mycorrhizal and nonmycorrhizal inoculated wheat cultivars under different water regimes using multivariate statistics. *International Journal of Agronomy*. 13, 345-355.
<https://doi.org/10.1155/2013/682781>
- Saed-Moucheshi, A., Pessarakli, M., Mikhak, A., Ostovar, P., Ahamadi-Niaz, A., 2017. Investigative approaches associated with plausible chemical and biochemical markers for screening wheat genotypes under salinity stress. *Journal of Plant Nutrition*. 40, 2768-2784.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1382529>
- Saed-Moucheshi, A., Razi, H., Dadkhodaie, A., Ghodsi, M., Dastfal, M., 2019. Association of biochemical traits with grain yield in triticale genotypes under normal irrigation and drought stress conditions. *Australian Journal of Crop Science*. 13, 272.
<https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.02.p1403>
- Saed-Moucheshi, A., Sohrabi, F., Fasihfar, E., Baniasadi, F., Riasat, M., Mozafari, A.A., 2021. Superoxide dismutase (SOD) as a selection criterion for triticale grain yield under drought stress: a comprehensive study on genomics and expression profiling, bioinformatics, heritability, and phenotypic variability. *BMC Plant Biology*. 21, 1-19.
<https://doi.org/10.1186/s12870-021-02919-5>
- Saed Moucheshi, A., Heidari, B., Farshadfar, E., 2009. Evaluation of stress indices for drought tolerance screening of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Crop Breeding*. 1, 49-64. [In Persian]
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286128.1388.1.4.5.1>
- Sánchez-Reinoso, A.D., Ligarreto-Moreno, G.A., Restrepo-Díaz, H., 2020. Evaluation of drought indices to identify tolerant genotypes in common bean bush (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Integrative Agriculture*. 19, 99-107.
[https://doi.org/10.1016/S2095-119\(9\)62620-1](https://doi.org/10.1016/S2095-119(9)62620-1)
- Sohrabi, F., Saed-Moucheshi, A., Saed-Moucheshi, Z., Pessarakli, M., 2024. Effects of abiotic stresses on the photosynthesis apparatus in plants. In: Pessarakli, M. (Ed.). *Handbook of Photosynthesis*. CRC Press. New York, USA. pp. 513-525. <https://doi.org/10.1201/b22922>
- Woli, P., Smith, G.R., Long, C.R., Rouquette Jr, F.M., 2024. Estimating the yield loss of winter wheat from drought in the united states southern plains region as influenced by El Niño-Southern Oscillation (ENSO). *Agricultural Sciences*. 15, 1018-1034.
<https://doi.org/10.4236/as.2024.159055>
- Zareei, E., Karami, F., Aryal, R., Saed-Moucheshi, A., 2022. Genotypic by phenotypic interaction affects the heritability and relationship among quantity and quality traits of strawberry (*Fragaria* × *Ananassa*). *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*. 23, 1-20.
<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19205162>