Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Crop Breeding Vol. 16, Issue 4, 2024 p: 37-50

OPEN ACCESS

Research Paper

Exploring the Genotype-Environment Interaction in Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) Genotypes for Optimal Selection

Mahdi Ramazi[1], Saeed Sadeghzadeh Hemayati[2], Heshmat Omidi[3] and Amirmohammad Naji[4]

1- Ph.D. student in Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Shahid University, Tehran, Iran
2- Sugar Beet Seed Institute (SBSI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, (Corresponding author: s.sadeghzadeh@areeo.ac.ir)
3- Professor of Crop Physiology, Department of Agronomy, Faculty of Agricultural Sciences, Shahed University, Tehran, Iran
4- Assistance Professor of plant Breeding, Department of Agronomy, Faculty of Agricultural Sciences, Shahed University, Tehran, Iran

Received: 13 April, 2024 Accepted: 25 July, 2024

Extended Abstract

Background: Genotype-environment interaction, reflecting how genotypes respond differently across environments, significantly impacts breeding progress. This phenomenon poses challenges for breeders in selecting and evaluating superior genotypes. Understanding the genotype-environment interaction enables breeders to meticulously assess and select genotypes that align well with target environment conditions. Moreover, it offers opportunities to identify genotypes that exhibit positive interactions with specific environments or demonstrate robust performance in diverse environments. By cultivating genotypes in varied environments, breeders can observe genotypic responses, facilitating the selection of superior and stable genotypes. A thorough exploration of the genotype-environment interaction necessitates the application of robust statistical methods. In this study, a series of sugar beet hybrids were grown in diverse environments to investigate the impact of the genotype-environment interaction on the quantitative production potential of root yield and white sugar yield, assess their adaptability, and employ different statistical approaches to identify successful hybrids.

Methods: This research involved the cultivation of 18 sugar beet genotypes that encompassed 15 hybrids and three control varieties previously developed to enhance resistance against rhizomania, rhizoctonia, and cyst nematode diseases. Phenotypic evaluations were conducted over two consecutive crop years (2022 and 2023) at two agricultural research stations in Karaj, Alborz, Iran, and Kermanshah, Kermanshah, Iran, utilizing a randomized complete block design with four replications. Standard agricultural practices, including weed control, irrigation, fertilizer application, and other farm management activities, were implemented, throughout the cropping season. Statistical analyses were performed on the collected data related to root yield and white sugar yield.

Results: The analysis of genotype main effects revealed a significant difference in both root yield and white sugar yield. The interaction effects of year-location and genotype-year-location at the 1% probability level for both root yield and white sugar yield traits and genotype-year at the 5% probability level on white sugar yield made a significant difference. These findings suggest that fluctuations in environmental conditions and genetic factors can impact genotype performance across diverse environments, leading to marked variations in root yield and white sugar yield among genotypes. Using the GGE biplot method, it was found that the first and second principal components of the genotype-environment interaction explained 93.44 and 3.85%, respectively, and a total of 97.29% of variations in the root yield. Regarding the white sugar yield, the first and second principal components of the genotype-environment interaction explained 95.10 and 2.54%, respectively, and a total of 97.64% of variations. Considering that the first and second principal components played an important role in the variance of the data, the respective biplots can well explain the genotype variations and the genotype-environment interaction. The association biplot illustrated positive correlations between experimental environments, with a strong positive correlation observed between Karaj in 2023 and Kermanshah in 2022 for the root yield. Similarly,

Copyright ©2024 Ramazi et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License which allows users to read, copy, distribute and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

a positive correlation between the environments of Karaj and Kermanshah was identified in terms of the white sugar yield. Genotypes 18, 15, 12, 14, and 8 exhibited superior root yields across locations, while genotypes 18, 15, and 14 excelled in the white sugar yield across the four studied environments. A combined assessment of stability and yield indicated that genotypes 18, 15, 12, and 14 excelled in the root yield, and genotypes 18, 15, and 14 performed exceptionally well in the white sugar yield and stability, being recognized as top-performing genotypes. Through the analysis of a hypothetical ideal genotype, genotypes 15, 12, and 14 were identified as the best yields in terms of root and white sugar yields, considering their proximity to the ideal genotype. By employing a multi-trait stability index with a selection pressure of 20%, genotype 16 emerged as the top-ranking genotype, followed by genotypes 10, 9, and 6. A comparison of trait values in the selected genotypes revealed increased root yield and sugar content, alongside decreased levels of potassium, *alpha-amino* nitrogen, and sodium, showcasing overall improvements across all studied traits with high heritability.

Conclusion: The results indicate that interactions between environmental factors and genetic makeup can influence the performance of different genotypes across varying conditions, leading to substantial variations in their outcomes. Overall, genotypes 18, 15, 14, and 10 were identified as the most stable genotypes.

Keywords: Adaptability, Breeding Progress, Stability

How to Cite This Article: Ramazi, M., Sadeghzadeh Hemayati, S., Omidi, H., & Naji, A. M. (2024). Exploring the Genotype-Environment Interaction in Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) Genotypes for Optimal Selection. *J Crop Breed,* 16(4), 37-50. DOI: 10.61186/jcb.16.4.37

مقاله پژوهشی

بررسی برهمکنش ژنوتیپ-محیط در ژنوتیپ‌های چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) برای گزینش بهینه

مهدی رمضی[۱]، سعید صادق‌زاده حمایتی[۲]، حشمت امیدی[۳] و امیرمحمد ناجی[۴]

۱- دانشجوی دکتری آگروتکنولوژی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران
۲- مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران، (نویسنده مسوول: s.sadeghzadeh@areeo.ac.ir)
۳- استاد فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه زراعت، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران
۴- استادیار اصلاح نباتات، گروه زراعت، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۰۴
صفحه ۳۷ تا ۵۰

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: برهمکنش ژنوتیپ-محیط پدیده‌ای است که به تفاوت پاسخ ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف اشاره دارد و بر پیشرفت برنامه‌های اصلاحی تأثیر می‌گذارد. این پدیده برای به‌نژادگران اهمیت خاصی دارد، زیرا انتخاب و ارزیابی ژنوتیپ‌های برتر را دشوار می‌کند. شناخت این پدیده به به‌نژادگران این امکان را می‌دهد تا در ارزیابی و انتخاب ژنوتیپ‌ها دقت بیشتری کرده و ژنوتیپ‌هایی را انتخاب کنند که با شرایط محیط هدف سازگار هستند. همچنین، برهمکنش ژنوتیپ-محیط می‌تواند فرصت‌هایی را برای به‌نژادگران فراهم کند تا ژنوتیپ‌هایی را انتخاب کنند که برهمکنش مثبت با محیط خاصی دارند یا عملکرد مناسبی در محیط‌های مختلف نشان می‌دهند. در نتیجه، با کشت ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف، می‌توان پاسخ‌های ژنوتیپی را ثبت کرد و ژنوتیپ‌های برتر و پایدار را انتخاب کرد. در مطالعه حاضر سعی شد تا مجموعه‌ای از هیبریدهای چغندرقند با هدف بررسی تأثیر برهمکنش ژنوتیپ- محیط بر پتانسیل تولید کمی ریشه و شکر سفید و نیز تعیین سازگاری آن‌ها، در محیط‌های با شرایط متفاوت کشت گردند و ضمن به‌کارگیری روش‌های آماری مختلف، هیبریدهای موفق شناسایی شوند.

مواد و روش‌ها: در پژوهش انجام‌شده، ۱۸ ژنوتیپ چغندرقند شامل ۱۵ هیبرید داخلی و سه شاهد خارجی بودند که قبلاً برای افزایش مقاومت به بیماری‌های ریزومانیا، ریزوکتونیا و نماتد مولد سیست تولید شده بودند. ارزیابی‌های فنوتیپی در دو سال متوالی (۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) در دو ایستگاه تحقیقات کشاورزی در کرج و کرمانشاه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار انجام شد. در طول فصل زراعی، مبارزه با علف‌های هرز، آبیاری، مصرف کود و سایر فعالیت‌های مدیریتی مزرعه انجام شد. پس از حصول داده‌های مربوط به عملکرد ریشه و عملکرد شکر سفید، تجزیه و تحلیل‌های آماری صورت پذیرفت.

یافته‌ها: میانگین مربعات اثر اصلی ژنوتیپ نشان داد که تفاوت معنی‌داری از نظر عملکرد ریشه و عملکرد شکر سفید بین ژنوتیپ‌های آزمایشی وجود دارد. اثرات برهمکنش سال×مکان و ژنوتیپ×سال×مکان در سطح احتمال یک درصد برای هر دو صفت عملکرد ریشه و عملکرد شکر سفید و ژنوتیپ×سال در سطح احتمال پنج درصد بر روی عملکرد شکر سفید تفاوت معنی‌داری ایجاد کردند. این نتایج نشان می‌دهند که تغییرات محیطی و ژنتیکی ممکن است عملکرد ژنوتیپ‌ها را در محیط‌های مختلف تحت تأثیر قرار دهد و باعث تفاوت‌های معنی‌دار در عملکرد ریشه و شکر سفید ژنوتیپ‌ها بین محیط‌ها شود. با استفاده از روش GGE بای‌پلات، مشخص شد که مؤلفه‌های اصلی اول و دوم به‌ترتیب ۹۳/۴۴ و ۳/۸۵ درصد و در مجموع ۹۷/۲۹ درصد از تغییرات عملکرد ریشه را تبیین کردند. در خصوص عملکرد شکر سفید، مؤلفه‌های اول و دوم به‌ترتیب ۹۵/۱۰ و ۲/۵۴ درصد و در مجموع ۹۷/۶۴ درصد از تغییرات را توجیه نمودند. با توجه به اینکه دو مؤلفه اصلی اول و دوم نقش مهمی در واریانس داده‌ها داشتند، بای‌پلات‌های مربوطه می‌توانند به‌خوبی تغییرات ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ×محیط را توضیح دهند. بای‌پلات همبستگی بین محیط‌ها نشان داد که از نظر عملکرد ریشه بین محیط‌های آزمایشی همبستگی مثبتی وجود دارد، همچنین بین شرایط محیطی کرج در سال ۱۴۰۲ و کرمانشاه در سال ۱۴۰۱ همبستگی مثبت کاملی برقرار است. بای‌پلات عملکرد شکر سفید نیز حاکی از همبستگی مثبت بین محیط‌های کرج و کرمانشاه بود. بر اساس بای‌پلات چندضلعی در دو مکان کرج و کرمانشاه در هر دو سال آزمایش، ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۵، ۱۲، ۱۴ و ۸ بهترین ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد ریشه بودند. از نظر عملکرد شکر سفید در چهار محیط تحت بررسی ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۵ و ۱۴ برتر بودند. بای‌پلات بررسی هم‌زمان پایداری و عملکرد نشان داد که ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۵، ۱۲ و ۱۴ دارای بیشترین میزان عملکرد ریشه و ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۵ و ۱۴ دارای بیشترین میزان عملکرد شکر سفید و پایداری بودند و به‌عنوان بهترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند. بر اساس بای‌پلات ژنوتیپ ایده‌آل فرضی، از نظر عملکرد ریشه ژنوتیپ‌های ۱۵، ۱۲ و ۱۴ و از نظر عملکرد شکر سفید ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۵، ۱۴، ۱۰ و ۱۲ با توجه به اینکه کم‌ترین فاصله را با ژنوتیپ ایده‌آل فرضی داشتند، به‌عنوان بهترین ژنوتیپ‌ها معرفی شدند. با استفاده از شاخص پایداری چندمتغیره و اعمال فشار گزینشی ۲۰ درصد، ژنوتیپ ۱۶ به‌عنوان رتبه اول و ژنوتیپ‌های ۱۰، ۹ و ۶ به‌عنوان رتبه‌های بعدی پایدارترین ژنوتیپ‌ها انتخاب شدند. مقایسه ارزش صفات در ژنوتیپ‌های منتخب نشان داد که ارزش صفات عملکرد ریشه و درصد قند ناخالص افزایش یافته و ارزش پتاسیم، نیتروژن آمینه و سدیم کاهش یافته است و در مجموع، ژنوتیپ‌های انتخابی باعث بهبود و پیشرفت در تمامی صفات مورد مطالعه شده‌اند. از طرفی تمامی صفات در ژنوتیپ‌های منتخب از وراثت‌پذیری بالایی برخوردار بودند.

نتیجه‌گیری: نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که برهمکنش‌های محیطی و ژنتیکی می‌توانند عملکرد ژنوتیپ‌ها را در شرایط مختلف تحت تأثیر قرار دهد و باعث ایجاد اختلافات معنی‌دار در عملکرد آن‌ها شود. در مجموع، ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۵، ۱۴ و ۱۰ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها انتخاب شدند.

واژه‌های کلیدی: پیشرفت اصلاحی، پایداری، سازگاری

مقدمه

شرایط اقلیمی و خصوصیات خاک عوامل مهمی هستند که بر رشد گیاهان و بهره‌وری تولید محصولات کشاورزی تأثیر می‌گذارند (Taleghani *et al.*, 2023a; Tardieu, 2013). بنابراین، در بررسی مناسب‌ترین کشت، باید به تأثیر محیط توجه کرد (Saremirad & Taleghani, 2022)؛ زیرا عوامل محیطی می‌توانند پتانسیل ژنتیکی گیاه را تحت تأثیر قرار دهند و باعث محدودیت‌هایی در عملکرد آن در مزارع تجاری شوند (Trimpler *et al.*, 2017). برخی مطالعات نشان داده‌اند که فاصله بین عملکرد پتانسیل و عملکرد واقعی در مزارع کشاورزان در برخی کشورها بیش از ۳۰ درصد است (Jaggard *et al.*, 2012). این فاصله به‌دلیل عدم ثبات عملکرد ناشی از برهمکنش ژنوتیپ و عوامل محیطی (خاک، اقلیم و مدیریت مزرعه) است (De Vita *et al.*, 2010). از طرفی با افزایش

پتانسیل ژنتیکی عملکرد، گیاه تقاضای بیشتری برای منابع زراعی خود خواهد داشت که می‌تواند به افزایش تنش‌های زیستی یا غیرزیستی منجر شود (Rajabi *et al.*, 2022; Taleghani & Saremirad, 2023). برای مقابله با این چالش، باید پتانسیل عملکرد بالا را با تاب‌آوری بیشتر در برابر عوامل محیطی همراه کرد تا ثبات و پایداری عملکرد با افزایش پتانسیل عملکرد کاهش نیابد (Taleghani *et al.*, 2023a).

برهمکنش ژنوتیپ–محیط پدیده‌ای است که به تفاوت پاسخ ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف اشاره دارد (Kang, 2004; Kang, 1997). این پدیده در سطح جهانی توسط کشاورزان و به‌نژادگران شناخته شده است (Hassani *et al.*, 2024; Mostafavi & Saremirad, 2021a; Sadeghzadeh Hemayati *et al.*, 2022) و بر پیشرفت اصلاحی تأثیر می‌گذارد (Taleghani *et al.*, 2023a). به‌همین دلیل، برای به‌نژادگران اهمیت خاصی دارد؛ زیرا این پدیده انتخاب و ارزیابی ژنوتیپ‌های برتر را دشوار می‌کند (Saremirad & Taleghani, 2022). ویژگی‌های کمّی مانند عملکرد که از نظر اقتصادی و زراعی مهم هستند، می‌توانند تحت تأثیر برهمکنش ژنوتیپ–محیط قرار گیرند. شناخت این پدیده به به‌نژادگران این امکان را می‌دهد تا در ارزیابی و انتخاب ژنوتیپ‌ها دقت بیشتری کرده و ژنوتیپ‌هایی را انتخاب کنند که با شرایط محیط هدف سازگار هستند. همچنین، برهمکنش ژنوتیپ–محیط می‌تواند فرصت‌هایی را برای به‌نژادگران فراهم کند تا ژنوتیپ‌هایی را انتخاب کنند که برهمکنش مثبت با محیط خاصی دارند یا عملکرد مناسبی در محیط‌های مختلف نشان می‌دهند (Ceccarelli, 1996; Simmonds, 1991). در نتیجه، با کشت ژنوتیپ(ها) در محیط‌های مختلف، می‌توان پاسخ‌های ژنوتیپی را ثبت کرد و ژنوتیپ‌های برتر و پایدار را انتخاب کرد (Signor *et al.*, 2001; Taleghani *et al.*, 2023b).

پتانسیل عملکرد بالا در چغندرقند برای بهره‌وری کارآمد از زمین‌های قابل کشت، امری حیاتی و اجتناب‌ناپذیر است؛ زیرا این گیاه یکی از قابل‌توجه‌ترین گیاهان قندی است که حدود ۲۰ درصد (نزدیک به ۳۷ میلیون تن) از نیاز جهانی قند را تأمین می‌کند (FAO, 2023) و پس از نیشکر به‌عنوان دومین گیاه تأمین‌کننده قند جهان شناخته می‌شود (Monteiro *et al.*, 2018; Ribeiro *et al.*, 2016). ژنوتیپ‌های چغندرقند به‌شکل متفاوتی با محیط‌های مختلف سازگار می‌شوند، لذا ارزیابی هریک از آن‌ها با توجه به اهداف می‌تواند تفاوت‌هایی داشته باشد (Baker, 1988; Taleghani *et al.*, 2024). این ارزیابی‌ها برای معتبر بودن به یک سری آزمایش‌های محیطی چندگانه در مرحله گزینش پیشرفته نیاز دارند (Annicchiarico, 2002). هر ژنوتیپ باید برای چندین سال در چندین مکان مختلف ارزیابی شود تا بتوان ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار را در هنگام رشد و نمو در محیط‌های مختلف شناسایی کرد و برای کشت در مناطق هدف، توصیه نمود. در این‌خصوص آزمایش‌های ناحیه‌ای در بسیاری از کشورها در قالب ارزیابی ژنوتیپ‌ها برای نتایج قابل اعتمادتر انجام می‌شود. با کشت ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف، پاسخ‌های ژنوتیپی متفاوتی ثبت می‌شود که می‌توان یک هیبرید برتر و پایدار را بر پایه تجزیه و تحلیل این اطلاعات به‌شکل صحیح شناسایی نمود (Signor *et al.*, 2001).

مطالعه جامع برهمکنش ژنوتیپ– محیط نیاز به روش‌های آماری قدرتمندی دارد. روش‌های متعددی برای تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصل از آزمایش‌های ناحیه‌ای و مطالعه ماهیت برهمکنش ژنوتیپ– محیط توسط محققان ارائه شده است که به‌طورکلی در دو گروه اصلی روش‌های تک‌متغیره و چندمتغیره تقسیم‌بندی می‌شوند. در میان روش‌های چندمتغیره مدل گرافیکی GGE biplot از اهمیت بالایی برخوردار است. این مدل گرافیکی برای شناسایی محیط‌های بزرگ و ژنوتیپ‌های موفق در هر محیط بزرگ استفاده می‌شود. این مدل گرافیکی بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی پیشنهاد گردیده است (Gabriel, 1971; Gauch & Zobel, 1997; Kempton, 1984; Yan *et al.*, 2007). این روش از طریق نمایش گرافیکی برهمکنش ژنوتیپ– محیط به اصلاح‌گر کمک می‌کند تا به‌سادگی پایداری ژنوتیپ‌ها و ترکیب پایداری با عملکرد ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مختلف را بررسی نماید. ویژگی منحصربه‌فرد GGE biplot این است که به استناد نمودارهای حاصل می‌توان اظهار نمود که کدام ژنوتیپ در کدام محیط یا زیرگروه، از پتانسیل بالاتری برخوردار می‌باشد (Farshadfar *et al.*, 2012). افزون بر روش ذکر شده، اخیراً اولیوتو و همکاران (Olivoto *et al.*, 2019) مبانی نظری شاخص پایداری چندمتغیره (Multi-trait stability index: MTSI) را برای انتخاب ژنوتیپ‌های با کارایی بالا و پایدار در آزمایش‌های چندمحیطی بر اساس صفات متعدد با در نظر گرفتن هر دو مدل اثر ثابت و اثر تصادفی معرفی نمودند. شاخص پایداری MTSI بر اساس فاصله از ژنوتیپ ایده‌آلی که از طریق تجزیه به عامل‌ها برآورد می‌شود، محاسبه می‌گردد (Olivoto *et al.*, 2019). این شاخص امکان گزینش ژنوتیپ‌های پایدار را با گزینش ناهمسان مثبت برای صفاتی که افزایش آن‌ها مدنظر است و گزینش ناهمسان منفی برای صفاتی که کاهش آن‌ها مدنظر است، فراهم می‌کند. از طرفی این شاخص پایداری می‌تواند برای اصلاح‌کنندگان و کشاورزانی که هدف آن‌ها انتخاب هم‌زمان برای میانگین عملکرد و پایداری با در نظر گرفتن چندین صفت است، مفید باشد؛ به‌دلیل اینکه فرآیند گزینش منحصربه‌فردی را فراهم می‌کند که تفسیر آن آسان است و ساختار همبستگی را در بین صفات در نظر می‌گیرد (Olivoto *et al.*, 2019).

در مطالعه حاضر مجموعه‌ای از هیبریدهای چغندرقند با هدف بررسی تأثیر برهمکنش ژنوتیپ– محیط بر پتانسیل تولید کمی ریشه و محتوای قند و نیز تعیین سازگاری آن‌ها، در محیط‌های با شرایط متفاوت کشت گردیدند تا هیبریدهای موفق شناسایی شوند.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی

برای پژوهش حاضر، از ۱۸ ژنوتیپ چغندرقند شامل ۱۵ هیبرید داخلی و سه شاهد خارجی استفاده شد (جدول ۱). مجموعه‌ای از هیبریدها پیش از این در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند با هدف وارد نمودن ژن مقاومت به

بیماری‌های ریزومانیا، ریزوکتونیا و نماتد مولد سیست به پس‌زمینه ژنتیکی ژنوتیپ‌های با عملکرد کمی و کیفی مناسب تولید شده و مقاومت ژنتیکی این هیبریدها در برابر بیماری‌های مذکور به‌وسیله ارزیابی‌های مزرعه‌ای و مولکولی تأیید شد.

جدول ۱- مشخصات هیبریدهای چغندرقند و ارقام شاهد

Table 1. Properties of examined sugar beet new hybrids and check cultivars

نام Name	کد ژنوتیپ Genotype code	نام Name	کد ژنوتیپ Genotype code	نام Name	کد ژنوتیپ Genotype code
SBSI 13	13	SBSI 7	7	SBSI 1	1
SBSI 14	14	SBSI 8	8	SBSI 2	2
SBSI 15	15	SBSI 9	9	SBSI 3	3
KWS 1 (Check)	16	SBSI 10	10	SBSI 4	4
KWS 2 (Check)	17	SBSI 11	11	SBSI 5	5
KWS 3 (Check)	18	SBSI 12	12	SBSI 6	6

مکان‌های تحقیقاتی و طرح آزمایشی

ارزیابی‌های فنوتیپی ژنوتیپ‌های آزمایشی طی دو سال متوالی (۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) در دو ایستگاه تحقیقات کشاورزی در کرج و کرمانشاه انجام شد. مکان‌های منتخب از نظر ویژگی‌های اکولوژیکی، ارتفاع، بارندگی و دما (جداول ۲ و ۳) و همچنین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک متفاوت بودند (جدول ۴). در هریک از ایستگاه‌های تحقیقاتی، آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار انجام شد. هر ژنوتیپ در کرت جداگانه‌ای به ابعاد ۲۴ مترمربع (شش ردیف به طول هشت متر و فاصله بین ردیف ۵۰ سانتی‌متر) کاشته شد. تمامی آزمایش‌ها دهه اول اردیبهشت‌ماه در هر دو سال اجرای آن کشت شدند. در طول فصل زراعی، مبارزه با علف‌های هرز، آبیاری، مصرف کود و سایر فعالیت‌های مدیریتی مزرعه بر اساس نظر کارشناسان مربوطه انجام گردید. علاوه بر این، به‌طور مرتب ردیابی و پیشگیری از حمله آفات و بیماری‌های چغندرقند در هریک از ایستگاه‌های تحقیقاتی که لازم بود، انجام شد. از ۱ تا ۱۰ آبان ماه هر دو سال آزمایش، ریشه‌های چهار ردیف کشت میانی با حذف یک متر از ابتدا و انتهای خطوط برداشت (سطح برداشت معادل ۱۲ مترمربع)، شمارش و توزین گردید.

جدول ۲- ویژگی‌های محیطی ایستگاه‌های تحقیقاتی آزمایشی

Table 2. Properties of the environmental condition for the experimental research stations

طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع از سطح دریا Altitude (m)	مکان ایستگاه تحقیقاتی Location of the research station	سال Year	کد محیط Environment code
50°54'E	35°55'N	1312	کرج، البرز، ایران Karaj, Alborz, Iran	2022	E1
				2023	E2
47°04'E	34°19'N	1351	کرمانشاه، کرمانشاه، ایران Kermanshah, Kermanshah, Iran	2022	E3
				2023	E4

جدول ۳- مشخصات آب و هوایی ایستگاه‌های تحقیقاتی آزمایشی

Table 3. Weather characteristics at the experimental research stations

بارندگی Rainfall (mm)		حداقل درجه حرارت Minimum temperature (°C)		حداکثر درجه حرارت Maximum temperature (°C)		ماه Month	مکان ایستگاه تحقیقاتی Location of the research station
2023	2022	2023	2022	2023	2022		
43.00	43.00	6.47	7.13	19.57	21.07	April	کرج، البرز، ایران Karaj, Alborz, Iran
21.00	33.00	10.61	8.48	24.77	22.71	May	
12.00	2.00	14.80	16.80	30.07	31.57	June	
0.00	16.00	18.65	17.13	33.00	31.84	July	
1.00	0.00	17.71	17.03	31.19	30.45	August	
0.00	0.00	13.73	14.23	26.90	28.53	September	
25.00	16.00	8.16	9.23	19.65	21.65	October	
81.00	73.00	6.93	9.20	20.30	23.70	April	ماهیدشت، کرمانشاه، ایران Mahidasht, Kermanshah, Iran
43.00	11.00	11.35	11.42	25.94	26.81	May	
7.00	1.00	16.77	18.17	33.43	35.20	June	
0.00	0.00	22.16	21.39	38.35	38.00	July	
1.00	0.00	21.71	22.23	37.06	37.71	August	
0.00	1.00	17.20	17.43	32.97	33.40	September	
43.00	13.00	11.10	11.84	23.42	26.77	October	

جدول ۴- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در ایستگاه‌های تحقیقاتی آزمایشی

Table 4. Physical and chemical characteristics of soil at the experimental research stations

بافت Texture	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	پتاسیم K (ppm)	فسفر P (ppm)	کربن آلی O.C. (%)	هدایت الکتریکی EC ($ds.m^{-1}$)	اسیدیته pH	سال Year	مکان ایستگاه تحقیقاتی Location of the research station
Silty-clay-loam	13.60	57.00	29.40	503.00	2.67	1.35	0.95	7.15	2022	کرج، البرز، ایران Karaj, Alborz, Iran
Clay-loam	26.67	39.07	34.27	328.50	8.19	0.77	1.32	6.74	2023	
Silty-clay	8.00	48.40	43.60	424.00	24.40	1.16	1.05	7.76	2022	ماهیدشت، کرمانشاه، ایران Mahidasht, Kermanshah, Iran
Silty-clay	6.70	42.70	50.60	500.00	22.86	1.27	0.79	7.65	2023	

جمع‌آوری داده

ژنوتیپ‌های آزمایشی پس از برداشت، برای ارزیابی ویژگی‌های کیفی به آزمایشگاه کنترل کیفی ستاد مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند منتقل شدند. سپس ریشه‌ها شسته شده و با استفاده از دستگاه خودکار ونما نمونه خمیر تهیه گردید و در فریزر با دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. در زمان مقتضی، از نمونه‌های خارج‌شده از حالت انجماد، ۲۶ گرم برداشت و با ۱۷۷ میلی‌لیتر سو استات سرب (lead (II)

hydroxide acetate) به‌مدت سه دقیقه در داخل همزن مخلوط گردید. در نهایت محلول حاصله از صافی گذرانده شد و مایع شفافی به‌دست آمد که از آن در دستگاه بتالایزر (Betalyser، سیستم خودکار تجزیه کیفیت چغندرقند) برای اندازه‌گیری درصد قند ناخالص، نیتروژن آمینه و عنصرهای سدیم و پتاسیم استفاده شد (Kunz *et al.*, 2002). برای محاسبه عملکرد شکر سفید مربوط به هر ژنوتیپ، ابتدا درصد قند ملاس و درصد قند خالص به‌ترتیب بر اساس روابط ۱ و ۲ برآورد گردید (Reinfeld *et al.*, 1974)؛ سپس با جایگذاری درصد قند خالص و عملکرد ریشه هر ژنوتیپ آزمایشی در رابطه ۳ مقادیر عملکرد شکر سفید برای هریک از آن‌ها به‌دست آمد (Cook & Scott, 1993):

رابطه ۱:
$$MS = 0.0343(K^{+} + Na^{+}) + 0.094(alpha\ amino\ N) - 0.31$$

رابطه ۲:
$$WSC = SC - (MS + 0.6)$$

رابطه ۳:
$$WSY = WSC \times RY$$

در این روابط، MS درصد قند ملاس برحسب گرم قند در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه، K^{+} پتاسیم برحسب میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه، Na^{+} سدیم برحسب میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه، *alpha amino* N نیتروژن مضره برحسب میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه، WSC درصد قند خالص برحسب گرم قند در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه، SC درصد قند ناخالص برحسب گرم قند در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه، WSY عملکرد شکر سفید برحسب تن در هکتار و RY عملکرد ریشه برحسب تن در هکتار می‌باشد.

تجزیه و تحلیل آماری

در ابتدا پیش از انجام هرگونه تجزیه و تحلیلی فرض همگنی واریانس خطاهای آزمایشی در سال‌ها و مکان‌های مختلف با استفاده از آزمون بارتلت (Bartlett, 1937) انجام شد. پس از اینکه یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی تأیید گردید، تجزیه واریانس مرکب با فرض تصادفی بودن اثر سال و ثابت بودن اثرات مکان و ژنوتیپ برای صفات عملکرد ریشه و عملکرد شکر سفید با استفاده از رابطه ۴ در نرم‌افزار R انجام شد (Moore & Dixon, 2015):

رابطه ۴:
$$Y_{ijkl} = \mu + Y_i + L_j + YL_{ij} + B_{(ij)k} + T_l + YT_{il} + LT_{jl} + YLT_{ijl} + BT_{(ij)kl}$$

در این رابطه، Y_{ijkl} عملکرد تیمار lام در سال iام در مکان jام در تکرار kام، μ میانگین کل آزمایش، Y_i اثر سال iام، L_j اثر مکان jام، YL_{ij} برهمکنش سال iام با مکان jام، $B_{(ij)k}$ اثر تکرار در سال iام در مکان jام (خطای ۱)، T_l اثر تیمار lام، YT_{il} برهمکنش سال iام با تیمار lام، LT_{jl} برهمکنش مکان jام با تیمار lام، YLT_{ijl} برهمکنش سال iام با مکان jام با تیمار lام و $BT_{(ij)kl}$ اثر تکرار kام در تیمار lام داخل سال iام در مکان jام (خطای آزمایشی) می‌باشد.

تجزیه گرافیکی GGE بای‌پلات بر اساس تجزیه به مقادیر منفرد طبق رابطه ۵ صورت پذیرفت (Yan & Kang, 2002):

رابطه ۵:
$$Y_{ij} - \mu - \beta_j = \lambda_1 \xi_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \xi_{i2} \eta_{j2} + \varepsilon_{ij}$$

در این رابطه Y_{ij} میانگین ژنوتیپ iام در محیط jام، μ میانگین کل ژنوتیپ‌ها، β_j اثر اصلی محیط jام، λ_1 و λ_2 مقادیر ویژه برای اولین و دومین مؤلفه، ξ_{i1} و ξ_{i2} بردارهای ویژه ژنوتیپی و η_{j1} و η_{j2} بردارهای محیطی مؤلفه اول و دوم و ε_{ij} مقدار باقیمانده برای ژنوتیپ iام در محیط jام هستند. برای تجزیه داده‌ها به‌روش گرافیکی بای‌پلات از نرم‌افزار R بر اساس چهار الگوی: ۱. بررسی روابط میان محیط‌ها، ۲. تعیین بهترین رقم در هر مکان، ۳. گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس میانگین عملکرد و پایداری و ۴. رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها براساس ژنوتیپ ایده‌آل استفاده شد.

شاخص پایداری MTSI برای محاسبه میانگین عملکرد و پایداری هم‌زمان صفات عملکرد ریشه، درصد قند ناخالص، غلظت سدیم، پتاسیم و نیتروژن آمینه بر اساس رابطه ۶ برآورد شد (Olivoto *et al.*, 2019).

رابطه ۶:
$$\mathrm{MTSI}_i = \left[\sum_{i=1}^{f} \left(\gamma_{ij} - \gamma_j\right)^2\right]^{0.5}$$

در این رابطه، MTSI_i شاخص پایداری چندمتغیره ژنوتیپ iام، γ_{ij} امتیاز ژنوتیپ iام در عامل jام، γ_j نمره ژنوتیپ ایده‌آل در عامل jام می‌باشد. امتیازها بر اساس تجزیه به عامل‌ها برای ژنوتیپ‌ها و صفات محاسبه شد.

نتایج و بحث

مقادیر غیر معنی‌دار کای‌اسکوئر به‌دست‌آمده از آزمون بارتلت برای این صفات نیز مؤید یکنواختی واریانس خطای آزمایشی در چهار محیط (دو منطقه در دو سال) مورد بررسی بود. پس از تأیید برقراری مفروضات، تجزیه واریانس مرکب برای تشریح اثرات اصلی و کمی کردن برهمکنش‌های بین منابع تغییر انجام شد. میانگین مربعات اثر اصلی ژنوتیپ در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری را برای هر دو صفت عملکرد ریشه و عملکرد شکر سفید نشان داد. اثرات برهمکنش سال– مکان و ژنوتیپ– سال– مکان در سطح احتمال یک درصد برای هر دو صفت مورد مطالعه و ژنوتیپ– سال در سطح احتمال پنج درصد بر روی عملکرد شکر سفید تفاوت معنی‌داری ایجاد کردند (جدول ۵). تغییرات قابل توجه در سال‌ها، مکان‌ها و ژنوتیپ‌های آزمایشی ممکن است به تغییرات در شرایط محیطی و ساختار ژنتیکی گیاه نسبت داده شود که از یک محیط به محیط دیگر متفاوت است. این امر سبب شده است تا عملکرد ریشه و شکر سفید ژنوتیپ‌های آزمایشی از محیطی به محیط دیگر متفاوت باشد. همین موضوع تأییدکننده غیر قابل اجتناب بودن برهمکنش‌های مختلف در تحقیقات کشاورزی است (Sabaghnia *et al.*, 2010; Yan & Kang, 2002). برهمکنش ژنوتیپ– محیط در درجه اول این واقعیت را نمایان می‌کند که ژنوتیپ‌ها به مکان‌های مختلف واکنش نشان می‌دهند، لذا بر ضرورت ارزیابی ژنوتیپ‌ها در محیط‌های متنوع تأکید می‌شود (Hassani *et al.*, 2024; Saremirad & Taleghani, 2022). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش صادق‌زاده حمایتی و همکاران (Sadeghzadeh Hemayati *et al.*, 2022)، محیط و برهمکنش آن با ساختار ژنتیکی

ژنوتیپ‌های مختلف، نقش به‌سزایی را بر بیان فنوتیپی عملکرد شکر سفید ژنوتیپ‌های چغندرقند داشته است و سبب شده است تا ژنوتیپ‌ها با توجه به شرایط محیط‌های مختلف، پاسخ‌های متفاوتی را از نظر عملکرد شکر سفید ارائه نمایند. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه صارمی‌راد و طالقانی (Saremirad & Taleghani, 2022)، حاکی از این بود که برهمکنش ژنوتیپ- محیط، ویژگی‌های کمی و کیفی عملکرد قند هیبریدهای چغندرقند را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد، لذا هنگام اصلاح هیبریدهای جدید باید این موضوع مدنظر قرار گیرد؛ زیرا برآورد برهمکنش ژنوتیپ- محیط این امکان را فراهم می‌نماید تا در خصوص اصلاح برای سازگاری عمومی یا خصوصی که بستگی به ثبات و پایداری عملکرد در یک دامنه محدود یا گسترده‌ای از شرایط محیطی دارد، تصمیم‌گیری شود و گام مؤثری در جهت توسعه ارقام حائز پایداری و سازگاری با محیط/های هدف طی گردد. در این راستا روش‌های آماری چندمتغیره می‌تواند در آشکارسازی و درک بهتر برهمکنش ژنوتیپ- محیط مفیدتر باشد (Hassani *et al.*, 2024).

جدول ۵- تجزیه واریانس مرکب صفات مورد مطالعه در ژنوتیپ‌های چغندرقند

Table 5. Combined analysis of variance for the studied traits of sugar beet genotypes

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	عملکرد ریشه Root yield	عملکرد شکر سفید White sugar yield
سال Year	1	39.56^{ns}	20.53^{ns}
مکان Location	1	82840.64^{ns}	397.20^{ns}
سال×مکان Year× Location	1	4983.86**	208.83**
خطای ۱ Error 1	12	435.92	7.70
ژنوتیپ Genotype	17	2886.56**	94.85**
سال×ژنوتیپ Year× Genotype	17	156.60^{ns}	3.92*
مکان×ژنوتیپ Location × Genotype	17	88.42^{ns}	2.76^{ns}
سال×مکان×ژنوتیپ Year × Location × Genotype	17	708.05**	21.66**
خطای ۲ Error 2	204	110.26	2.12

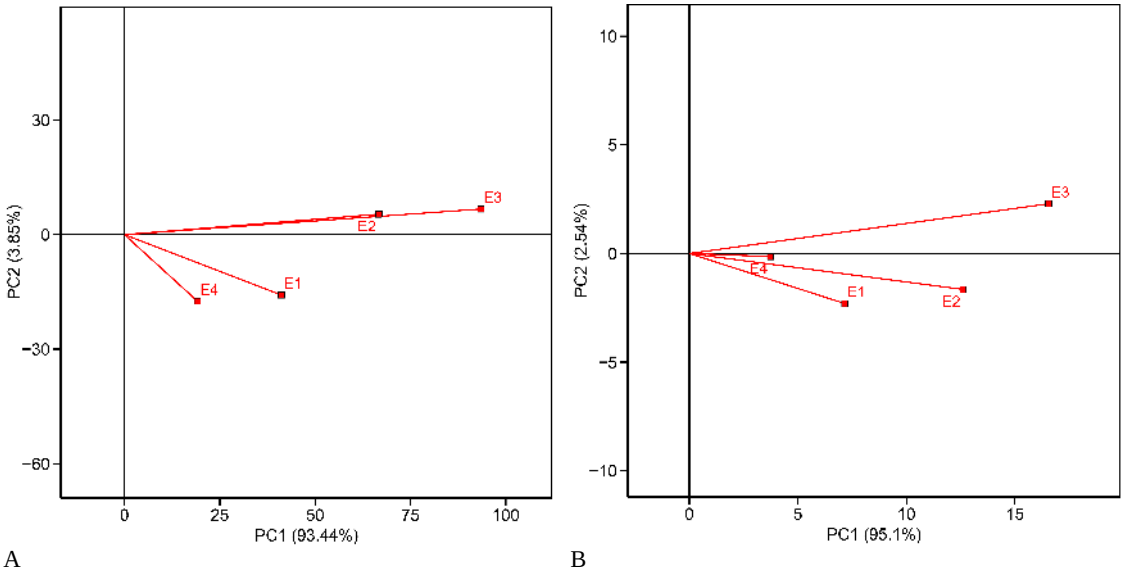
*، ** و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد و غیر معنی‌دار

ns, *, **: non-significant and significant at five and one percent probability levels, respectively

جهت شناسایی تنوع بین ژنوتیپ‌ها، محیط‌ها و مطالعه برهمکنش ژنوتیپ- محیط از روش تجزیه گرافیکی GGE بای‌پلات استفاده شد. نتایج حاصل از روش GGE بای‌پلات نشان داد که مؤلفه‌های اصلی اول و دوم به‌ترتیب ۹۳/۴۴ و ۳/۸۵ درصد و در مجموع ۹۷/۲۹ درصد از تغییرات کل موجود در داده‌های عملکرد ریشه را تبیین نمود. در عملکرد شکر سفید دو مؤلفه اول به‌ترتیب ۹۵/۱۰ و ۲/۵۴ درصد و در مجموع ۹۷/۶۴ درصد تغییرات را توجیه کردند. از آنجایی‌که دو مؤلفه اصلی اول برهمکنش در صفات مختلف مورد مطالعه سهم قابل ملاحظه‌ای از واریانس داده‌ها را در برگرفتند، می‌تواند مؤید اعتبار نسبتاً زیاد نمودارهای بای‌پلات حاصل از این مطالعه در تبیین تغییرات ژنوتیپ و ژنوتیپ- محیط باشد. هنگامی‌که مجموع مؤلفه‌های اصلی اول و دوم نتواند تغییرات موجود در داده‌ها را توجیه کند، نشان‌دهنده ماهیت پیچیده برهمکنش ژنوتیپ- محیط خواهد بود (Yan & Tinker, 2005)، اما این امر به‌معنای نامعتبر بودن بای‌پلات نیست (Yan *et al.*, 2007). زمانی‌که نمودارهای بای‌پلات، حداقل ۶۰ درصد از واریانس داده‌ها را توجیه نماید، می‌توان برای تعیین ابر محیط‌ها (Mega-environments) از آن استفاده نمود (Yang *et al.*, 2009). حسنی و همکاران (Hassani *et al.*, 2018) نشان دادند که ۶۲/۹ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ- محیط به‌وسیله دو مؤلفه اول توجیه می‌شود. صارمی‌راد و همکاران (Saremirad *et al.*, 2020) در آزمایشی مجموع مؤلفه‌های اول و دوم را نزدیک به ۷۴ درصد برآورد نمودند و اظهار کردند که مؤلفه اول سهمی در حدود ۴۷ درصد و مؤلفه دوم سهمی نزدیک به ۲۷ درصد از تغییرات کل داده‌ها را دارا می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش طالقانی و همکاران (Taleghani *et al.*, 2022) نشان داد که مؤلفه اول و دوم در مجموع ۸۳/۶۴ درصد از تغییرات کل عملکرد شکر سفید را توجیه می‌کنند. در مطالعه دنگ و همکاران (Dang *et al.*, 2024) مؤلفه‌های اول و دوم به‌ترتیب ۴۲/۱۲ و ۲۱/۴۳ درصد از تغییرات عملکرد ریشه را تبیین نمودند. در مطالعه‌ای دیگر (Ćurčić *et al.*, 2017) مقادیر این دو مؤلفه به‌ترتیب برابر با ۵۹/۳۰ و ۲۳/۱۰ درصد و مجموع آن برابر با ۸۴/۴۰ درصد بود.

شکل ۱ همبستگی و روابط بین محیط‌ها را نمایان می‌سازد. مطالعه همبستگی میان محیط‌های تحت بررسی می‌تواند روابط بین محیط‌ها را معین نموده و در آزمایش‌های آتی از نظر صرف وقت و هزینه مفید باشد. در این نمودار هراندازه زاویه بین بردارهای محیط‌ها کم‌تر باشد، بین محیط‌ها همبستگی بیشتری وجود دارد. در واقع بالا بودن همبستگی بین محیط‌ها به‌معنای وجود همبستگی بالا بین رتبه ژنوتیپ‌ها در آن محیط‌ها است. همان‌طور که در نمودار عملکرد ریشه (شکل A۱) نشان داده شده است، اگرچه بین محیط‌های آزمایشی همبستگی مثبتی وجود دارد، اما بین شرایط محیطی کرج در سال ۱۴۰۲ و کرمانشاه در سال ۱۴۰۱ همبستگی مثبت کاملی مشاهده شد. لذا بین رتبه عملکرد ریشه ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در محیط‌های مورد بررسی تفاوت چندانی وجود ندارد. بای‌پلات عملکرد شکر سفید (شکل B۱) نیز حاکی از همبستگی مثبت

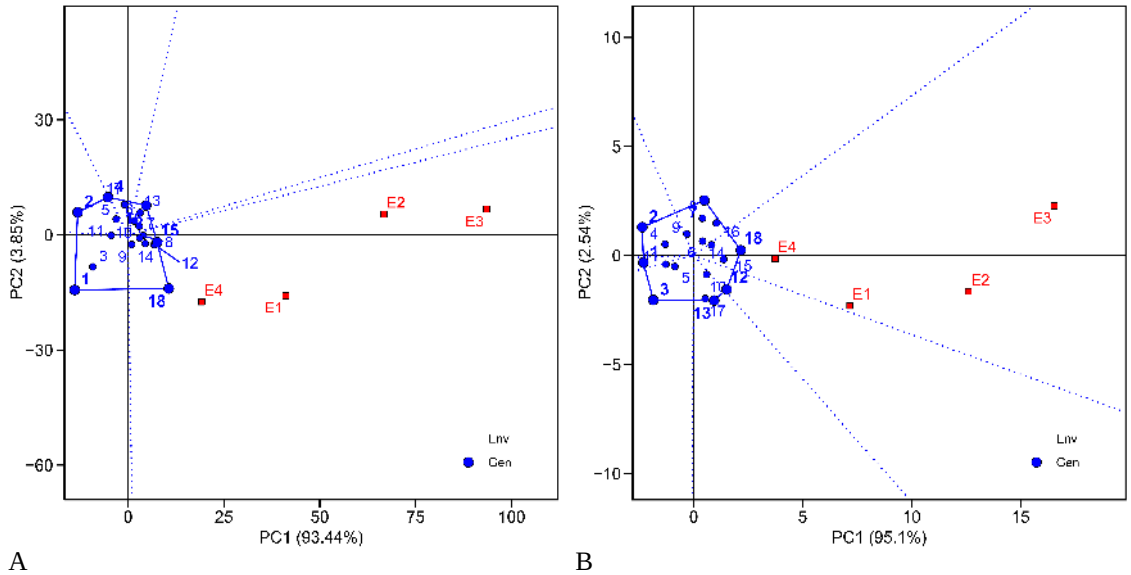
بین محیط‌های کرج و کرمانشاه بود. طول بردار محیط‌ها تقریبی از انحراف معیار درون هر محیط است و نیز به‌عنوان شاخصی جهت تمایز محیط‌ها می‌باشد، بدین‌صورت که محیط‌های با طول بردار بیشتر از انحراف معیار بیشتری برخوردار هستند و بنابراین قابلیت تمایز بیشتری دارند (Yan & Kang, 2002)؛ لذا یکی از ویژگی‌های مهم هر محیط قابلیت تمایز آن می‌باشد، به‌نحوی‌که محیط‌های فاقد قابلیت تمایز نمی‌توانند اطلاعات مفیدی در مورد ژنوتیپ‌های استفاده شده در آزمایش ارائه کنند (Yan & Kang, 2002). بررسی بردارهای محیط‌ها حاکی از این بود که محیط‌های کرج در سال ۱۴۰۱ و کرمانشاه در سال ۱۴۰۲ دارای طول بردارهای بلندی هستند که نشان‌دهنده قابلیت تمایز بالای این محیط‌ها است و محیط کرمانشاه در سال ۱۴۰۲ به‌علت دارا بودن طول بردار کوتاه‌تر قابلیت تمایز کم‌تری داشت. در نهایت مطالعه بای‌پلات همبستگی محیط‌ها نشان داد که بیش‌تر محیط‌های مورد آزمایش دارای قابلیت تمایز بالایی بودند و می‌توانند در آزمایش‌های مطالعه برهمکنش ژنوتیپ–محیط میان ژنوتیپ‌های چغندرقند تمایز مناسبی ایجاد نمایند.



شکل ۱– بای‌پلات رابطه بین محیط‌ها بر اساس (A) عملکرد ریشه و (B) عملکرد شکر سفید

Figure 1. Biplot examine the relationship between the environments based on (A) root yield and (B) white sugar yield

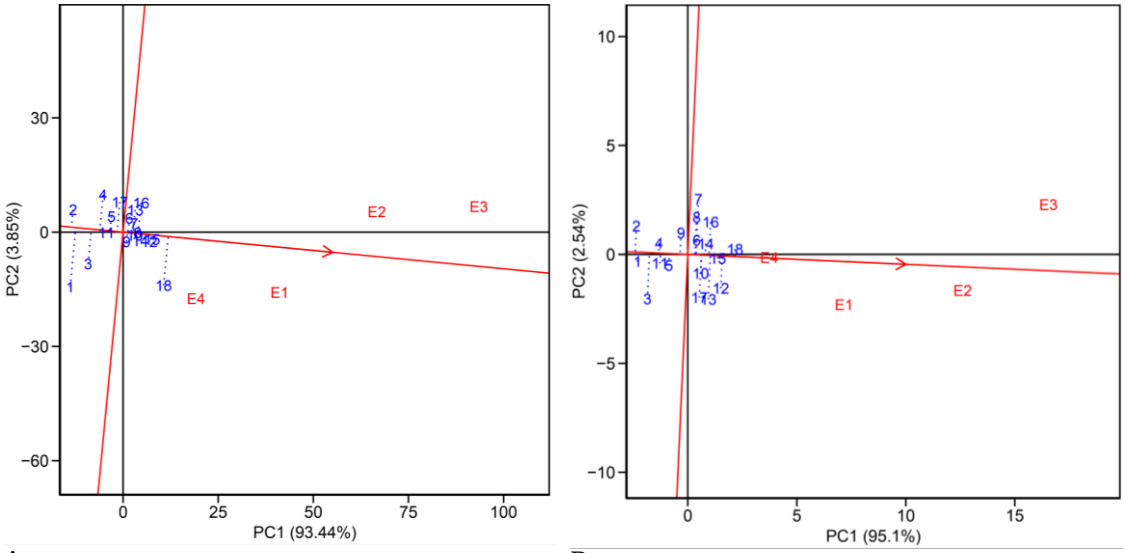
شکل ۲ مربوط به نمودار بای‌پلات چندضلعی صفات مختلف تحت بررسی می‌باشد که برای شناسایی محیط‌های بزرگ (ابر محیط‌ها) و ارقام برتر در محیط‌های مختلف رسم شد. در این بای‌پلات، یک چندضلعی مشاهده می‌شود که از اتصال ژنوتیپ‌هایی که حداکثر فاصله را از مبدأ مختصات دارند، حاصل می‌شود. در بای‌پلات عملکرد ریشه (شکل A۲) ژنوتیپ‌های ۱۶، ۱۵، ۱۸، ۱، ۲ و ۴ و در بای‌پلات عملکرد شکر سفید (شکل B۲) ژنوتیپ‌های ۷، ۱۸، ۱۲، ۱۳، ۳، ۱ و ۲ در دورترین فاصله قرار گرفتند و سبب تشکیل چندضلعی شدند. سپس از مبدأ مختصات خطوطی عمود بر اضلاع این چندضلعی رسم گردید و محیط‌های بزرگ مشخص شد (Yan *et al.*, 2007). در بخش‌هایی که محیط‌ها قرار گرفتند و در رأس آن‌ها ژنوتیپ‌ها وجود دارند، بدان معنا می‌باشد که این ژنوتیپ‌ها در آن محیط‌ها از ارزش عملکردی خوبی برخوردار هستند؛ به‌عبارتی، بهترین ژنوتیپ‌ها برای کشت در این محیط‌ها می‌باشند. بر این اساس در دو مکان کرج و کرمانشاه در هر دو سال آزمایش ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۵، ۱۲، ۱۴ و ۸ بهترین ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد ریشه بودند. از نظر عملکرد شکر سفید در چهار محیط تحت بررسی ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۵ و ۱۴ برتر بودند. ژنوتیپ‌هایی که در بخش‌هایی قرار گرفتند که هیچ محیطی در آن وجود ندارد؛ یعنی برای کشت در هیچ‌یک از محیط‌های مورد بررسی، مطلوب نیستند و جزو ژنوتیپ‌های ضعیف هستند. بر اساس بای‌پلات چندضلعی، محیط‌های آزمایشی از نظر هر دو صفت عملکرد ریشه و عملکرد شکر سفید در یک ابرمحیط قرار گرفتند. رنجی و همکاران (Ranji *et al.*, 2005) با ارزیابی ارقام مختلف چغندرقند، ژنوتیپ‌های پایدار در محیط‌های مختلف را شناسایی کردند. حسنی و همکاران (Hassani *et al.*, 2021) با استفاده از نمودار چندضلعی، محیط‌های مختلف کشت چغندرقند را در دو گروه قرار داده و ژنوتیپ‌های دارای بالاترین سازگاری با آن‌ها را معرفی نمودند. صارمی‌راد و طالقانی (Saremirad & Taleghani, 2022) هیبریدهای چغندرقند را در هفت منطقه از نظر پایداری ارزیابی نمودند. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه آن‌ها، حاکی از این بود که برهمکنش ژنوتیپ– محیط، ویژگی‌های کمی و کیفی عملکرد قند هیبریدهای چغندرقند را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد، لذا هنگام اصلاح هیبریدهای جدید باید این موضوع مدنظر قرار گیرد؛ زیرا برآورد برهمکنش ژنوتیپ– محیط این امکان را فراهم می‌نماید تا در خصوص اصلاح برای سازگاری عمومی یا خصوصی که بستگی به ثبات و پایداری عملکرد در یک دامنه محدود یا گسترده‌ای از شرایط محیطی دارد، تصمیم‌گیری شود و گام مؤثری در جهت توسعه ارقام حائز پایداری و سازگاری با محیط/های هدف طی گردد.



شکل ۲- بای‌پلات چندضلعی برای تعیین ژنوتیپ‌های مناسب در هر محیط بر اساس (A) عملکرد ریشه و (B) عملکرد شکر سفید
Figure 2. Polygons of GGE biplot method for determine the appropriate genotypes in every environment based on (A) root yield and (B) white sugar yield

برای بررسی هم‌زمان پایداری و عملکرد ژنوتیپ‌های مورد بررسی از نمودار بای‌پلات مختصات محیط متوسط (شکل ۳) استفاده گردید. در این نمودار محور افقی که دارای یک فلش می‌باشد و از دایره کوچکی که نمایانگر میانگین محیط‌ها است و همچنین از مبدأ مختصات عبور می‌کند، نمایش‌دهنده میانگین عملکرد ریشه (شکل A۳) و عملکرد شکر سفید (شکل B۳) است و هر ژنوتیپی که در طول این محور و در مجاورت دایره کوچک (روی محور) قرار دارد، از میانگین عملکرد بیشتری برخوردار است (Yan *et al.*, 2000). محوری که عمود بر محور میانگین عملکرد است، نشان‌دهنده سنجش پایداری ژنوتیپ‌ها است؛ ژنوتیپ‌های دارای عملکرد بالاتر از متوسط در سمت راست محور و ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایین‌تر از متوسط در سمت چپ محور قرار می‌گیرند. بنابر آنچه عنوان شد، ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۵، ۱۲ و ۱۴ دارای بیشترین میزان عملکرد ریشه و ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۵ و ۱۴ دارای بیشترین میزان عملکرد شکر سفید و پایداری بودند و به‌عنوان بهترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند. مطالعه‌های مختلف انجام‌شده (Kaya *et al.*, 2006; Mostafavi & Saremirad, 2021b; Saremirad & Mostafavi, 2021) و نیز نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد، نمودار بای‌پلات مختصات محیط متوسط در روش GGE بای‌پلات، از روش‌های مفید در تجزیه پایداری به‌شمار می‌رود که اطلاعات خوبی در خصوص پایداری ارقام در اختیار قرار می‌دهد. در آزمایش مصطفوی و همکاران (Mostafavi *et al.*, 2018)، بر پایه این بای‌پلات رقم JAM پایدارترین رقم شناخته شد و ارقام (113×KWS)×302-HSF.20، (113×A37).1)×S1.88239 و (113×A37.1)×SH-1-HSF.5 به‌ترتیب دارای عملکرد و پایداری پایین بودند. در مطالعه طالقانی و صارمی‌راد (Taleghani & Saremirad, 2023) رقم FDIR19B3021 و پس از آن ارقام SVZA2019، دراووس و مودکس دارای بیشترین میزان عملکرد شکر سفید و پایداری بودند و به‌عنوان بهترین ارقام معرفی شدند.

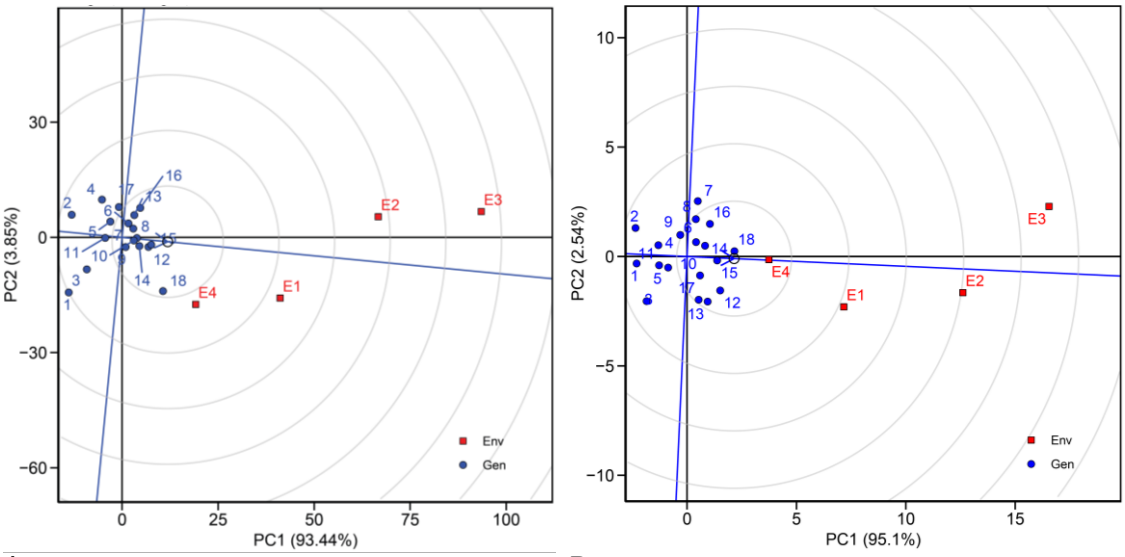
شناسایی ژنوتیپ ایده‌آل فرضی بر اساس مفاهیم پایداری و عملکرد بالا می‌باشد. بر این اساس، ژنوتیپی مطلوب می‌باشد که دارای بیشترین میزان عملکرد و حداکثر پایداری باشد و هر ژنوتیپی که نزدیک‌ترین فاصله را از این ژنوتیپ فرضی دارا باشد، به‌عنوان یک ژنوتیپ برتر و ژنوتیپی که دارای بیشترین میزان فاصله از این ژنوتیپ ایده‌آل فرضی باشد، به‌عنوان نامطلوب‌ترین ژنوتیپ شناخته می‌شود (Yan & Kang, 2002). بر این اساس، از نظر عملکرد ریشه ژنوتیپ‌های ۱۵، ۱۲ و ۱۴ و از نظر عملکرد شکر سفید ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۵، ۱۴، ۱۰ و ۱۲ با توجه به اینکه کم‌ترین فاصله را با ژنوتیپ ایده‌آل فرضی داشتند، به‌عنوان بهترین ژنوتیپ‌ها معرفی شدند و ژنوتیپ‌های ۱، ۲ و ۳ (از نظر هر دو صفت مورد مطالعه) به‌علت اینکه دارای بیشترین فاصله از ژنوتیپ ایده‌آل فرضی بود، تحت‌عنوان ژنوتیپ‌های نامطلوب شناخته شدند (شکل ۴). طالقانی و صارمی‌راد (Taleghani & Saremirad, 2023) بر اساس این نمودار، ارقام FDIR19B3021، SVZA2019 و دراووس را به‌علت اینکه کم‌ترین فاصله را از رقم ایده‌آل فرضی داشتند، به‌عنوان بهترین ارقام معرفی کردند.



A B

شکل ۳– بای‌پلات رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های چغندرقند بر اساس میانگین (A) عملکرد ریشه و (B) عملکرد شکر سفید و پایداری

Figure 3. Biplot for ranking sugar beet genotypes based on the average (A) root yield and (B) white sugar yield and stability



A B

شکل ۴– بای‌پلات رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های چغندرقند بر اساس ژنوتیپ ایده‌آل از نظر (A) عملکرد ریشه و (B) عملکرد شکر سفید

Figure 4. Biplot of ranking sugar beet genotypes based on hypothetical ideal genotype in terms of (A) root yield and (B) white sugar yield

شاخص پایداری چندمتغیره (MSTI)

تجزیه به عامل‌ها بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی صورت پذیرفت و تفسیر نتایج پس از چرخش وریماکس انجام شد. در جدول ۶ نتایج تجزیه به عامل‌ها ارائه شده است. عامل‌هایی که مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک داشتند، انتخاب شدند و واریانس هر عامل نیز برحسب درصد که نشان‌دهنده اهمیت آن در تفسیر تغییرات کلی داده‌ها است، بیان شد. در این تجزیه دو عامل مستقل از هم در مجموع ۸۵/۸۹ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه نمودند. عامل اول ۵۶/۹۷ درصد از کل واریانس داده‌ها را توجیه و دارای مقدار ویژه برابر با ۲/۸۵ بود. این عامل دارای ضرایب عاملی بزرگ منفی برای عملکرد ریشه، درصد قند ناخالص و غلظت سدیم ریشه بود. عامل دوم با مقادیر ویژه ۱/۴۵ و توجیه ۲۸/۹۲ درصد از تغییرات، شامل ضرایب عاملی بزرگ و منفی برای صفات غلظت پتاسیم و نیتروژن آمینه بود. شاخص پایداری MTSI ژنوتیپ‌های مورد مطالعه بر پایه نمرات عاملی دو عامل مذکور محاسبه شد. طبق این شاخص، هرچه ژنوتیپی مقدار کمتری از این شاخص را دارا باشد، فاصله کمتری از ژنوتیپ ایده‌آل دارد، به بیان بهتر قرابت بیشتری با ژنوتیپ ایده‌آل پایدار دارد. از سوی دیگر، هرچه مقدار شاخص پایداری MTSI برای ژنوتیپی بیشتر باشد، به این معنی است که فاصله آن از ژنوتیپ ایده‌آل پایدار بیشتر است و نباید انتخاب شود. در شکل A۵ ژنوتیپ‌های آزمایشی از بیشترین مقدار تا کمترین مقدار شاخص پایداری MTSI رتبه‌بندی شده‌اند؛ به‌طوری‌که ژنوتیپ دارای بیشترین مقدار شاخص مذکور در

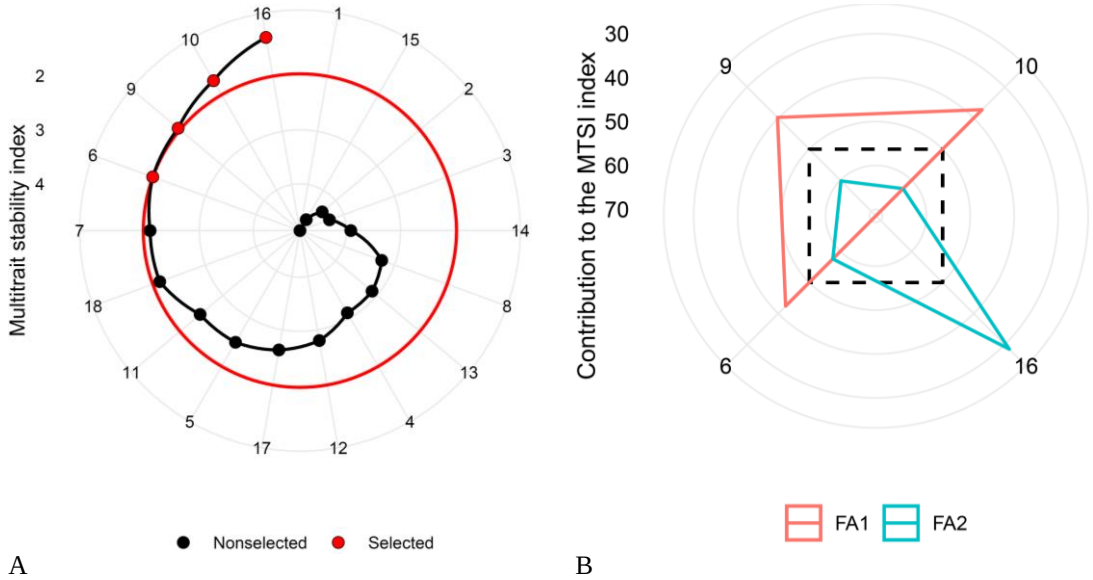
مرکز و ژنوتیپ دارای کمترین مقدار شاخص مذکور در خارجی‌ترین مدار قرار گرفته است. بر این اساس، با اعمال فشار گزینشی ۲۰ درصد، ژنوتیپ ۱۶ در رتبه نخست و ژنوتیپ‌های ۱۰، ۹ و ۶ در رتبه‌های بعدی ایده‌آل‌ترین ژنوتیپ‌های پایدار از نظر تمامی صفات مورد مطالعه قرار گرفتند. مقایسه ارزش صفات در ژنوتیپ‌های منتخب بر اساس شاخص پایداری MTSI با ارزش صفات در همه ژنوتیپ‌های آزمایشی نشان داد که میانگین ارزش صفات عملکرد ریشه و درصد قند ناخالص در ژنوتیپ‌های منتخب افزایش و میانگین ارزش پتاسیم، نیتروژن آمینه و سدیم کاهش یافته است. افزایش ارزش صفات عملکرد ریشه و درصد قند ناخالص در جهت اهداف مدنظر قرار داشت. اهدافی که در صفات سدیم، پتاسیم و نیتروژن آمینه دنبال می‌شود، کاهش ارزش آن‌ها است که ژنوتیپ‌های منتخب از نظر این صفات کاهش قابل‌توجهی به‌همراه داشتند. به‌طور کلی ژنوتیپ‌های انتخابی سبب ایجاد پیشرفت گزینش مطلوبی در تمامی صفات مورد مطالعه شدند (جدول ۶). تمامی صفات موردمطالعه در ژنوتیپ‌های منتخب از وراثت‌پذیری بالایی برخوردار بودند. در شکل B۵ نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌های انتخابی بر اساس سهم هر عامل در شاخص پایداری MTSI ارائه شده است. بر اساس این نمودار، کمترین سهم توجیه شده توسط یک عامل (نزدیک به لبه خارجی) نشان‌دهنده نزدیک بودن صفات درون آن عامل به حالت ایده‌آل پایدار است. خط‌چین نشان‌دهنده ارزش نظری است، در صورتی‌که همه عوامل به یک اندازه نقش داشته باشند. با توجه به این‌که هر ژنوتیپ برای عامل‌هایی که سهم کمتری در آن‌ها دارد از لحاظ صفات درون آن عامل به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک‌تر است، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۹ و ۶ که کمترین مقدار را در عامل اول داشتند، برای صفات عملکرد ریشه، درصد قند ناخالص و غلظت سدیم که بیشترین ضرایب عاملی را در این عامل داشتند، به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک هستند. ژنوتیپ ایده‌آل با توجه به صفات قرار گرفته در هر عامل و اهدافی که برای بهبود آن صفات مدنظر است، تعریف می‌شود. ژنوتیپ ۱۶ کمترین سهم عامل دوم را به‌خود اختصاص داد؛ در نتیجه، این ژنوتیپ از لحاظ صفات پتاسیم و نیتروژن آمینه بسیار نزدیک به ژنوتیپ ایده‌آل بود. به بیان بهتر، این ژنوتیپ غلظت پتاسیم و نیتروژن آمینه پایینی دارند. شریفی و همکاران (Sharifi *et al.*, 2021) در ارزیابی عملکرد و سایر صفات زراعی در مجموعه‌ای از ژنوتیپ‌های برنج از شاخص پایداری MTSI استفاده کردند و نشان دادند این شاخص به‌خوبی قادر به شناسایی ژنوتیپ‌های برتر از نظر عملکرد، پایداری عملکرد و سایر صفات زراعی بود. رجبی و همکاران (Rajabi *et al.*, 2022) بر اساس نتایج شاخص MTSI پنج ژنوتیپ چغندرقند را به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار در شرایط آلوده به بیماری ریزومانیا معرفی کردند. طالقانی و همکاران (Taleghani *et al.*, 2023a) با استفاده از شاخص MTSI چهار ژنوتیپ ایده‌آل به‌صورت هم‌زمان از نظر صفات عملکرد ریشه، عملکرد شکر سفید، درصد قند ناخالص و ضریب استحصال شکر شناسایی کردند. این نتایج با یافته‌های به‌دست‌آمده از این مطالعه در رابطه با کارایی شاخص MTSI در شناسایی ژنوتیپ‌های برتر مطابقت داشت.

جدول ۶- پیش‌بینی دیفرانسیل گزینش برای صفات مورد مطالعه بر اساس شاخص پایداری چندمتغیره

Table 6. Prediction of selection differential for studied traits based on the multi-trait stability index

متغیر Variable	عامل اول FA1	عامل دوم FA2	هدف Goal	وراثت‌پذیری h^2	گزینش ناهمسان SD (%)	پیشرفت گزینش SG (%)
عملکرد ریشه Root yield	-0.92	-0.13	increase	0.88	6.43	5.72
درصد قند ناخالص Sugar content	-0.93	0.08	increase	0.80	1.91	1.53
سدیم Na^+	-0.97	0.01	decrease	0.87	-8.06	-7.01
پتاسیم K^+	-0.30	-0.82	decrease	0.84	-5.05	-4.28
نیتروژن آمینه *alpha amino* N	0.27	-0.86	decrease	0.85	-2.43	-2.08
مجموع کاهش Total decrease	-	-	-	-	-15.54	-13.37
مجموع افزایش Total increase	-	-	-	-	8.34	7.25
مقادیر ویژه Eigenvalues	2.85	1.45	-	-	-	-
واریانس نسبی Variance (%)	56.97	28.92	-	-	-	-
واریانس تجمعی Cumulative variance (%)	56.97	85.89	-	-	-	-

FA: Factor, h^2: Heritability, SD: Selection differential, SG: Selection gain



شکل ۵– رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها به‌ترتیب صعودی بر اساس شاخص پایداری چندمتغیره (A) و ارزیابی ژنوتیپ‌های منتخب از نظر نقاط قوت و ضعف آن‌ها به‌عنوان نسبت هر عامل در شاخص پایداری چندمتغیره (B)

Figure 5. Ranking of genotypes in ascending order based on the multi trait stability index (A), and evaluation of selected genotypes in terms of their strengths and weaknesses represented as the ratio of each factor in the calculated multi trait stability index (B)

نتیجه‌گیری کلی

برهمکنش ژنوتیپ– محیط به تفاوت در پاسخ ژنوتیپ‌ها در محیط‌های گوناگون اشاره می‌کند و بر توسعه برنامه‌های به‌نژادی تأثیرگذار است. این امر برای به‌نژادگران اهمیت زیادی دارد زیرا انتخاب و ارزیابی ژنوتیپ‌های برتر را مشکل می‌کند. شناخت این پدیده به به‌نژادگران امکان می‌دهد که در انتخاب ژنوتیپ‌ها دقت بیشتری داشته باشند و انتخاب‌هایی انجام دهند که با محیط هدف سازگاری داشته باشند. همچنین، برهمکنش ژنوتیپ– محیط می‌تواند فرصت‌هایی فراهم آورد تا ژنوتیپ‌های دارای برهمکنش مثبت با شرایط خاص یا عملکرد مناسب در محیط‌های مختلف انتخاب شوند. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که برهمکنش‌های محیطی و ژنتیکی می‌توانند عملکرد ژنوتیپ‌ها را در شرایط مختلف تحت تأثیر قرار دهد و باعث ایجاد اختلافات معنی‌دار در عملکرد آن‌ها شود. از طریق روش‌های آماری قوی، تأثیرات این برهمکنش بر عملکرد ژنوتیپ‌ها مورد بررسی قرار گرفت و ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۵، ۱۴ و ۱۰ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها انتخاب شدند. این تحقیق نشان داد که انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب با توجه به برهمکنش ژنوتیپ– محیط می‌تواند منجر به بهبود عملکرد و پایداری آن‌ها شود.

References

Annicchiarico, P. (2002). Genotype x environment interactions: challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations. Food & Agriculture Org.

Baker, R. (1988). Tests for crossover genotype-environmental interactions. *Canadian Journal of plant Science*, *68*(2), 405-410.

Bartlett, M. S. (1937). Properties of sufficiency and statistical tests. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences*, *160*(901), 268-282.

Ceccarelli, S. (1996). Positive interpretation of genotype by environment interactions in relation to sustainability and biodiversity. *Plant Adaptation and Crop Improvement.*, 467-486.

Cook, D., & Scott, R. (1993). *The sugar beet crop: science into practice*. Champan and Hall Press.

Ćurčić, Ž., Danojević, D., Mitrović, B., Ćirić, M., Taški-Ajduković, K., & Nagl, N. (2017). GGE biplot analysis of sugar beet multi-environment trials. *Ratarstvo in Povrtarstvo*, *54*(2), 61-67.

Dang, X., Hu, X., Ma, Y., Li, Y., Kan, W., & Dong, X. (2024). AMMI and GGE biplot analysis for genotype× environment interactions affecting the yield and quality characteristics of sugar beet. *PeerJ*, *12*, e16882.

De Vita, P., Mastrangelo, A., Matteu, L., Mazzucotelli, E., Virzi, N., Palumbo, M., Storto, M. L., Rizza, F., & Cattivelli, L. (2010). Genetic improvement effects on yield stability in durum wheat genotypes grown in Italy. *Field Crops Research*, *119*(1), 68-77.

FAO. (2023). *The State of Food Security and Nutrition in the World. Building Climate Resilience for Food Security and Nutrition. The State of the World*.

Farshadfar, E., Mohammadi, R., Aghaee, M., & Vaisi, Z. (2012). GGE biplot analysis of genotype x environment interaction in wheat-barley disomic addition lines. *Australian Journal of Crop Science*, *6*(6), 1074-1079.

Gabriel, K. R. (1971). The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika*, *58*(3), 453-467.

Gauch, H. G., & Zobel, R. W. (1997). Identifying mega - environments and targeting genotypes. *Crop Science*, *37*(2), 311-326.

Hassani, M., Hamze, H., & Mansouri, H. (2021). Evaluation of adaptability and stability of root yield and white sugar yield (*Beta vulgaris* L.) in sugar beet genotypes using multivariate AMMI and GGE biplot method. *Journal of Crop Breeding*, *13*(37), 222-235. [In Persian]

Hassani, M., Heidari, B., Dadkhodaie, A., & Stevanato, P. (2018). Genotype by environment interaction components underlying variations in root, sugar and white sugar yield in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Euphytica*, *214*(4), 1-21.

Hassani, M., Mahmoudi, S. B., Saremirad, A., & Taleghani, D. (2024). Genotype by environment and genotype by yield*trait interactions in sugar beet :analyzing yield stability and determining key traits association. *Scientific Reports*, *13*(1), 23111. https://doi.org/10.1038/s41598-023-51061-9

Jaggard, K., Koch, H., Sanz, J. A., Cattanach, A., Duval, R., Eigner, H., Legrand, G., Olsson, R., Qi, A., & Thomsen, J. (2012). The yield gap in some sugar beet producing countries. *International Sugar Journal*, *114*(1363), 496-499.

Kang, M. (2004). *Breeding: genotype by environment interaction. In 'Encyclopedia of plant and crop science'.(Ed. RM Goodman)*. Marcel Dekker: New York.

Kang, M. S. (1997). Using genotype-by-environment interaction for crop cultivar development. *Advances in Agronomy*, *62*(1), 199-252.

Kaya, Y., Akçura, M., & Taner, S. (2006). GGE-biplot analysis of multi-environment yield trials in bread wheat. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *30*(5), 325-337.

Kempton, R. (1984). The use of biplots in interpreting variety by environment interactions. *The Journal of Agricultural Science*, *103*(1), 123-135.

Kunz, M., Martin, D., & Puke, H. (2002). Precision of beet analyses in Germany explained for polarization. *Zuckerindustrie*, *127*(1), 13-21.

Monteiro, F., Frese, L., Castro, S., Duarte, M. C., Paulo, O. S., Loureiro, J., & Romeiras, M. M. (2018). Genetic and genomic tools to asssist sugar beet improvement: the value of the crop wild relatives. *Frontiers in Plant Science*, *9*, 74-85.

Moore, K. J., & Dixon, P. M. (2015). Analysis of combined experiments revisited. *Agronomy Journal*, *107*(2), 763-771.

Mostafavi, K., Orazizadeh, M., Rajabi, A., & Ilkaei, M. N. (2018). Stability and adaptability analysis in sugar beet varieties for sugar content using GGE-biplot and AMMI methods. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, *24*(1), 40-45.

Mostafavi, K., & Saremirad, A. (2021a). Genotype-environment interaction study in corn genotypes using additive main effects and multiplicative interaction method and GGE-biplot method. *Journal of Crop Production*, *14*(3), 1-12. https://doi.org/https://doi.org/10.22069/ejcp.2022.17527.2293

Mostafavi, K., & Saremirad, A. (2021b). Genotype - Environment Interaction Study in Corn Genotypes Using additive main effects and multiplicative interaction method and GGE- biplot Method. *Journal of Crop Production*, *14*(3), 1-12. https://doi.org/10.22069/ejcp.2022.17527.2293

Olivoto, T., Lúcio, A. D. C., da Silva, J. A. G., Sari, B. G., & Diel, M. I. (2019). Mean Performance and Stability in Multi-Environment Trials II: Selection Based on Multiple Traits. *Agronomy Journal*, *111*(6), 2961-2969. https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0221

Rajabi, A., Ahmadi, M., Bazrafshan, M., Hassani, M., & Saremirad, A. (2022). Evaluation of resistance and determination of stability of different sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genotypes in rhizomania-infected conditions. *Food Science & Nutrition*, *11*(3), 1403-1414. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fsn3.3180

Ranji, Z., Mesbah, M., Amiri, R., & Vahedi, S. (2005). Study on the efficiency of AMMI method and pattern analysis for determination of stability in sugar beet varieties. *Iranian Journal of Crop Science*, *7*(1), 1-20.

Reinfeld, E., Emmerich, G., Baumgarten, C., Winner, & Beiss, U. (1974). *Zur Voraussage des Melassez zuckersaus Ruben analysen Zucker*. Chapman & Hall, World Crop Series.

Ribeiro, I. C., Pinheiro, C., Ribeiro, C. M., Veloso, M. M., Simoes-Costa, M. C., Evaristo, I., Paulo, O. S., & Ricardo, C. P. (2016). Genetic diversity and physiological performance of Portuguese wild beet (*Beta vulgaris* spp. *maritima*) from three contrasting habitats. *Frontiers in Plant Science*, *7*(1), 1293.

Sabaghnia, N., Dehghani, H., Alizadeh, B., & Mohghaddam, M. (2010). Genetic analysis of oil yield, seed yield, and yield components in rapeseed using additive main effects and multiplicative interaction biplots. *Agronomy Journal*, *102*(5), 1361-1368.

Sadeghzadeh Hemayati, S., Saremirad, A., Hosseinpour, M., Jalilian, A., Ahmadi, M., Azizi, H., Hamidi, H., Hamdi, F., & Matloubi Aghdam, F. (2022). Evaluation of White Sugar Yield Stability of Some

Commercially Released Sugar Beet Cultivars in Iran from 2011-2020. *Seed and Plant Journal*, *38*(3), 339-364. https://doi.org/10.22092/spj.2023.362024.1305

Saremirad, A., & Mostafavi, K. (2021). Using AMMI and Biplot Graphical Analysis Multivariate Methods to Evaluate the Effect of Genotype-Environment Interaction in Cotton Genotypes. *Iranian Journal of Cotton Researches*, *8*(2), 127-144. https://doi.org/10.22092/ijcr.2021.353002.1163

Saremirad, A., Mostafavi, K., & Mohammadi, A. (2020). Genotype- Environment Interaction Study Base GGE biplot Method for Kernel Yield in Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Cultivars. *Journal of Crop Breeding*, *12*(34), 43-53. http://jcb.sanru.ac.ir/article-1-1006-fa.html [In Persian]

Saremirad, A., & Taleghani, D. (2022). Utilization of univariate parametric and non-parametric methods in the stability analysis of sugar yield in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) hybrids. *Journal of Crop Breeding*, *14*(43), 49-63. [In Persian]

Sharifi, P., Abbasian, A., & Mohaddesi, A. (2021). Evaluation the Mean Performance and Stability of Rice Genotypes by Combining Features of AMMI and BLUP Techniques and Selection Based on Multiple Traits. *Plant Genetic Researches*, *7*(2), 163-180.

Signor, C. E. L., Dousse, S., Lorgeou, J., Denis, J. B., Bonhomme, R., Carolo, P., & Charcosset, A. (2001). Interpretation of genotype× environment interactions for early maize hybrids over 12 years. *Crop Science*, *41*(3), 663-669.

Simmonds, N. (1991). Selection for local adaptation in a plant breeding programme. *Theoretical and Applied Genetics*, *82*(3), 363-367.

Taleghani, D., Rajabi, A., Saremirad, A., & Darabi, S. (2024). Estimation of gene action and genetic parameters of some quantitative and qualitative characteristics of sugar beet (*Beta Vulgaris* L.) by line ×tester analysis. *Crop Breeding*, *15*(48), 201-212.

Taleghani, D., Rajabi, A., Saremirad, A., & Fasahat, P. (2023a). Stability analysis and selection of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genotypes using AMMI, BLUP, GGE biplot and MTSI. *Scientific Reports*, *13*(1), 10019. https://doi.org/10.1038/s41598-023-37217-7

Taleghani, D., Rajabi, A., Saremirad, A., & khodadadi, s. (2023b). Genotype- environment interaction analysis and selection of sugar beet stable genotypes in terms of white sugar yield using AMMI model . *Plant Productions*, *46*(2), 155-169. https://doi.org/10.22055/ppd.2023.43177.2089

Taleghani, D., & Saremirad, A. (2023). Evaluation of the sugar beet (*Beta vulgaris* L.) half-sib lines response to drought stress. *Crop Science Research in Arid Regions*, *5*(1), 81-104.

Taleghani, D., Saremirad, A., Hosseinpour, M., Ahmadi, M., Hamidi, H., & Nemati, R. (2022). Genotype × Environment Interaction Effect on White Sugar Yield of Winter-Sown Short-Season Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) Cultivars. *Seed and Plant Journal*, *38*(1), 53-69. https://doi.org/10.22092/spj.2022.360021.1275

Tardieu, F. (2013). Plant response to environmental conditions: assessing potential production, water demand, and negative effects of water deficit. *Frontiers in Physiology*, *4*(17), 1-11.

Trimpler, K., Stockfisch, N., & Märländer, B. (2017). Efficiency in sugar beet cultivation related to field history. *European Journal of Agronomy*, *91*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.08.007

Yan, W., Hunt, L. A., Sheng, Q., & Szlavnics, Z. (2000). Cultivar evaluation and mega - environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*, *40*(3), 597-605.

Yan, W., & Kang, M. S. (2002). *GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists*. CRC press.

Yan, W., Kang, M. S., Ma, B., Woods, S., & Cornelius, P. L. (2007). GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype - by - environment data. *Crop Science*, *47*(2), 643-653.

Yan, W., & Tinker, N. A. (2005). An integrated biplot analysis system for displaying, interpreting, and exploring genotype× environment interaction. *Crop Science*, *45*(3), 1004-1016.

Yang, R. C., Crossa, J., Cornelius, P. L., & Burgueño, J. (2009). Biplot analysis of genotype× environment interaction: Proceed with caution. *Crop Science*, *49*(5), 1564-1576.