



SBSI



انجمن علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران

Graphical evaluation of combining ability for root and sugar yield, quality traits, and rhizomania resistance in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) lines using line× tester design

Saeed Sadeghzadeh Hemayati^{1*}, Ali Saremirad¹, Babak Babaei¹, Masoud Ahmadi¹, Mahdi Hassani¹, Mastaneh Sharifi²
(Received: 19 Oct. 2025; Accepted: 23 Feb. 2026)

How to cite this article:

Sadeghzadeh Hemayati S, Saremirad A, Babaei B, Ahmadi M, Hassani M, Sharifi M. Graphical evaluation of combining ability for root and sugar yield, quality traits, and rhizomania resistance in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) lines using line× tester design. Journal of Sugar Beet. 2026; (41)2. 195-208. (In Persian with English abstract). DOI: 10.22092/jsb.2026.371078.1399.

Extended Abstract

Introduction

Sugar beet plays a vital role in meeting the global sugar demand. Breeding this plant has always faced several challenges. On the one hand, the strong negative correlation between root yield and sugar content makes it difficult to simultaneously improve these traits, and on the other hand, biological stresses such as rhizomania threaten production sustainability; therefore, it is essential to develop an efficient breeding approach that can identify superior parents for the production of resistant and high-yielding hybrids. In this regard, success in breeding programs requires a detailed understanding of the genetic basis of the traits. The line× tester mating design is one of the most common methods for estimating these parameters. However, the traditional line× tester analysis method has some limitations. To overcome these challenges, the use of graphical multivariate methods such as GGE Biplot can be useful. Therefore, in the present study, the genetic potential of new sugar beet lines was evaluated, the combining ability of lines for quantitative and qualitative performance and resistance to rhizomania disease were determined, and superior hybrids were identified using a comprehensive graphical analysis approach.

Materials and Methods

The plant material used in this study was a selected collection of genetic resources of the Sugar Beet Seed Institute. This collection included 19 pollinating lines of the S1 generation with favorable performance potential

as lines and 5 cytoplasmic male sterile (CMS) lines as testers, all of which had resistance to rhizomania in their genetic background. In order to produce the experimental population, a line× tester crossing design was used. In the crossing blocks, each maternal line was grown in the central rows and its specific paternal lines in two adjacent rows to ensure controlled and maximum pollination. At the end of the season, seeds from the maternal lines were harvested separately, thus producing 95 F1 hybrids for further evaluation. The evaluation experiments of the produced hybrids were conducted in six agricultural research stations including Karaj, Mashhad, Miandoab, Shiraz, Kermanshah and Hamedan. The planting operations were carried out in all regions in 2023. At each station, 95 hybrids along with four commercial control varieties were planted in five incomplete blocks in the form of an augmented design. Considering the implementation of the experiment in the form of an augmented design, first the raw data of root yield, sugar content and sugar yield of each hybrid in each environment were adjusted separately using control varieties to eliminate the heterogeneous effects of blocks in each location. Then, to eliminate environmental error and achieve an accurate estimate of the genetic potential of hybrids, a linear mixed model was used. Then, the adjusted data matrix consisting of 19 lines in 5 testers was used as the basis for graphical analysis.

Results and discussion

The results of the graphical analysis revealed distinct heterotic patterns of lines for root yield and sugar yield traits. For root yield, line L03 was the best combiner for

1. Sugar Beet Seed Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

* Corresponding author: S.sadeghzadeh@areeo.ac.ir

2. Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran.



testers T01, T02, and T03, while line L17 was the best combiner for testers T04 and T05. Regarding to sugar content, line L09 showed the highest combining ability with tester T03, and line L03 exhibited the best performance with four testers T01, T02, T04, and T05. For sugar yield, line× tester interaction pattern indicated that lines L03, L05, and L18 showed a good combination with testers T01, T02, T04, and T05, whereas lines L09 and L10 displayed highest specific combining ability (SCA) with tester T03. Furthermore, in the overall evaluation, lines L03 and L05 possessed the highest general combining ability (GCA). In case of Rhizomania resistance, crosses of line L09 with tester T03, line L14 with testers T02 and T05, line L13 with tester T04 and line L15 with tester T01 were identified as the best combination of resistance based on specific combining ability (SCA). The results demonstrated that lines L03 and L05 have significant potential for use in breeding programs due to their high GCA.

Conclusion

The present study was conducted using a graphical analysis approach on data obtained from the line × tester design, and its results clearly showed that the genetic control of root yield, sugar content, and sugar yield is a function of both additive and non-additive effects of genes, but the contribution and pattern of these effects differ depending on the type of trait. Regarding functional traits, identifying distinct heterotic groups between testers and lines allows planning for crosses. Lines L03 and L05, with high GCA for sugar yield, are suitable candidates for population improvement programs. In contrast, line L09 has good potential for

heterosis exploitation due to its high SCA. In the field of rhizomania resistance, lines L09 in crosses with tester T03, L14 in crosses with testers T02 and T05, L13 in crosses with tester T04 and L15 in crosses with tester T01 were the best sources of resistance. The identification of stable lines such as L18 along with SCA lines such as L14 suggests the use of stable sources to stabilize resistance and the use of dedicated sources to achieve high levels of resistance through gene pyramiding.

Keywords: Heterotic group, Biplot, Genetic potential, Gene action.

References

- Badu-Apraku B, Akinwale RO. Biplot analysis of line× tester data of maize (*Zea mays* L.) inbred lines under stress and nonstress environments. *Cereal Research Communications*. 2019; 47(3): 518–30.
- Saremirad A, Abbasi S, Mostafai. Study of genetic structure of grain yield and some agro-morphological characteristics in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) using diallel analysis and GGE biplot method. *Journal of Crop Breeding*. 2021; 13(39): 130–39.
DOI: <https://doi.org/10.52547/jcb.13.39.130K>
- Taleghani D, Rajabi A, Saremirad A, Darabi S. 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*. 2024; 15(48): 201-12.



SBSI



انجمن علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران

ارزیابی گرافیکی ترکیب پذیری لاین های چغندرقد (*Beta vulgaris* L.) برای عملکرد ریشه و شکر، کیفیت تکنولوژیک و مقاومت به ریزومانیا با استفاده از طرح لاین × تستر[†]

سعید صادقی زاده حمایتی^{۱*}؛ علی صارمی راد^۲؛ بابک بابائی^۳؛ مسعود احمدی^۳؛ مهدی حسنی^۲؛ مستانه شریفی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۴

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.22092/jsb.2026.371078.1399

س. صادق زاده حمایتی، ع. صارمی راد، ب. بابائی، م. احمدی، م. حسنی و م. شریفی، ۱۴۰۴. ارزیابی گرافیکی ترکیب پذیری لاین های چغندرقد (*Beta vulgaris* L.) برای عملکرد ریشه و شکر، کیفیت تکنولوژیک و مقاومت به ریزومانیا با استفاده از طرح لاین × تستر. چغندرقد ۴۱(۲): ۱۹۵-۲۰۸

چکیده

این مطالعه به منظور برآورد ترکیب پذیری و شناسایی گروه های هتروژیک در لاین های چغندرقد، با استفاده از روش گرافیکی لاین × تستر انجام شد. تعداد ۱۹ لاین گرده افشان با ۵ سینگل کراس به عنوان تستر تلاقی داده شدند و ۹۵ هیبرید حاصل برای صفات عملکرد ریشه، درصد قند، عملکرد شکر و مقاومت به بیماری ریزومانیا مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاصل از تجزیه گرافیکی، وجود گروه های هتروژیک متمایز را برای صفات عملکرد ریشه و شکر آشکار ساخت. برای عملکرد ریشه، لاین L03 بهترین ترکیب شونده برای تسترهای T01، T02 و T03 و لاین L17 بهترین ترکیب شونده برای تسترهای T04 و T05 بود. برای صفت درصد قند، لاین L09 بالاترین ترکیب پذیری را با تستر T03 و لاین L03 بهترین ترکیب پذیری را با چهار تستر T01، T02، T04 و T05 نشان داد. در خصوص عملکرد شکر، الگوی برهمکنش لاین × تستر نشان داد که لاین های L03، L05 و L18 بهترین عملکرد را در ترکیب با تسترهای T01، T02، T04 و T05 داشتند، در حالی که لاین های L09 و L10 بالاترین سازگاری خصوصی را با تستر T03 نشان دادند؛ همچنین در ارزیابی کلی، لاین های L03 و L05 واجد بالاترین ترکیب پذیری عمومی بودند. در بررسی مقاومت به بیماری ریزومانیا، لاین های L09 در تلاقی با تستر T03، L14 در تلاقی با تسترهای T02 و T05، L13 در تلاقی با تستر T04 و L15 در تلاقی با تستر T01 به عنوان بهترین منابع مقاومت بر مبنای ترکیب پذیری خصوصی شناسایی شدند. نتایج نشان داد که لاین های L03 و L05 به دلیل ترکیب پذیری عمومی بالا پتانسیل مناسبی برای استفاده در برنامه های به نژادی دارند. این مطالعه کارایی روش گرافیکی را در تفکیک والدین و انتخاب هیبریدهای برتر تأیید می کند.

کلمات کلیدی: بای پلات، پتانسیل ژنتیکی، عمل ژن، گروه هتروژیک

†- این مقاله برگرفته از طرح تحقیقاتی به شماره مصوب ۰۰۴-۰۰۲-۰۰۲-۰۰۲ است.

۱. استاد، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۲. استادیار، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

*- نویسنده مسئول: S.sadeghzadeh@areeo.ac.ir

۳. دانشیار، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۴. مربی، بخش تحقیقات چغندرقد مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.



مقدمه

چغندرقد نقش حیاتی در تأمین نیاز جهانی شکر ایفا می‌کند. اصلاح این گیاه همواره با چالش‌های متعددی روبرو بوده است. از یک سو، همبستگی منفی و قوی میان عملکرد ریشه و درصد قند، بهبود هم‌زمان این صفات را دشوار می‌سازد (Taleghani et al. 2024) و از سوی دیگر، تنش‌های زیستی مانند بیماری ریزومانیا، پایداری تولید را تهدید می‌کنند بنابراین، تدوین یک رویکرد به‌نژادی کارآمد که بتواند والدین برتر را برای تولید هیبریدهای مقاوم و پر محصول شناسایی کند، ضروری است. موفقیت در برنامه‌های اصلاحی مستلزم درک دقیق اساس ژنتیکی صفات است. پارامترهای ژنتیکی نظیر قابلیت ترکیب‌پذیری عمومی (General Combining Ability, GCA) و خصوصی (Specific Combining Ability, SCA)، شاخص‌های کلیدی برای گزینش والدین و پیش‌بینی عملکرد هیبریدها هستند (Sprague and Tatum 1942). طرح تلاقی لاین× تستر (Kempthorne 1957) یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای برآورد این پارامترها است زیرا امکان ارزیابی تعداد زیادی لاین (والد پدری) را در ترکیب با تعداد محدودی تستر (والد مادری) فراهم می‌کند. با این حال روش سنتی تجزیه لاین× تستر دارای محدودیت‌هایی است. نخست این‌که نتایج معمولاً در قالب جداول حجیم ارائه می‌شوند که درک روابط متقابل بین لاین‌ها و تسترها را دشوار می‌سازد، دوم این‌که آزمون‌های آماری کلاسیک تنها می‌توانند تفاوت‌های کلی را نشان دهند و قادر به نمایش بصری الگوهای برهمکنش ژنتیکی نیستند. برای غلبه بر این چالش‌ها، استفاده از روش‌های چندمتغیره گرافیکی مانند GGE biplot پیشنهاد شده است (Yan and Kang 2002; Kahrman et al. 2016).

روش GGE biplot که ابتدا برای تجزیه داده‌های چندمحیطی توسعه یافت (Yan and Hunt 2002)، ابزاری قدرتمند برای تجزیه داده‌های ژنتیکی است. در کاربرد این روش برای طرح لاین× تستر، یک تغییر مفهومی در مدل ایجاد می‌شود. در این روش لاین‌ها به‌عنوان ژنوتیپ و تسترها به‌عنوان محیط در نظر گرفته می‌شوند (Ruswandi et al. 2015; Badu-Apraku

2019). از نظر ریاضی، این روش داده‌های حاصل از تلاقی را به مؤلفه‌های اصلی تجزیه می‌کند و امکان ترسیم هم‌زمان ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی را در یک فضای دوبعدی فراهم می‌آورد. روش GGE biplot به‌طور گسترده برای تجزیه داده‌های حاصل از طرح‌های دی‌آل در محصولاتی نظیر گندم دوروم (*Triticum turgidum* var. durum) (Sadeghzadeh-Ahari et al. 2014)، جو (*Hordeum vulgare*) (Saremirad and Mostafavi 2018)، برنج (*Oryza sativa*) (Sharifi 2012; Sharifi and Motlagh 2011)، یونجه (*Medicago sativa*) (Ghotbi et al. 2018)، ذرت (*Zea mays*) (Mostafavi et al. 2012) و آفتابگردان (*Helianthus annuus*) (Darvishzadeh et al. 2009) به کار رفته و به نتایج سودمندی در شناسایی ساختار ژنتیکی و ترکیب‌پذیری صفات منجر شده است.

در چغندرقد، مطالعات متعددی (Mahmudi and Abbasi 2002; Orazizade et al. 2018) با استفاده از روش لاین× تستر به بررسی وراثت صفات مختلف پرداخته‌اند. برخی تحقیقات نقش غالب اثرات ژنی غیر افزایشی را در کنترل عملکرد ریشه و شکر گزارش کرده‌اند (Cacic et al. 1999; Doney 1981). در حالی که سایر مطالعات بر اهمیت اثرات افزایشی ژن‌ها در وراثت صفات مربوط به کیفیت محصول مانند درصد قند تأکید داشته‌اند (Taleghani et al. 2024). با این حال، اکثر این پژوهش‌ها بر روی لاین‌هایی با مقاومت به یک یا دو عامل تنش‌زا متمرکز بوده‌اند. اخیراً لاین‌های والدینی جدیدی در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقد توسعه یافته‌اند که حامل ژن‌های مقاومت هم‌زمان به دو یا سه بیماری مهم چغندرقد در کشور (ریزومانیا، پوسیدگی ریزوکتونیایی و نماتد) هستند. پتانسیل ژنتیکی این منابع ارزشمند و نحوه به ارث رسیدن صفات مهم زراعی در تلاقی‌های آن‌ها به‌صورت جامع ارزیابی نشده است.

مطالعه‌های اخیر نشان داده‌اند که تجزیه گرافیکی می‌تواند با دقت بالایی گروه‌های هتروتیک را به‌ویژه در گیاهان دگرگشن

شناسایی کرده و کارایی تسترها را در تفکیک لاین‌ها مشخص نماید (Badu-Apraku and Akinwale 2019). همچنین، بای‌پلات چندوجهی در این روش، شناسایی بهترین هیبریدها برای اهداف خاص اصلاحی را تسهیل می‌کند (Ruswandi et al., 2015). باوجود کاربرد موفقیت‌آمیز این روش در گیاهانی نظیر ذرت، استفاده از آن برای برآورد اثر ژنتیکی صفات کمی و کیفی چغندر قند کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا هدف از این پژوهش، ارزیابی پتانسیل ژنتیکی لاین‌های جدید چغندر قند، تعیین ترکیب‌پذیری لاین‌ها برای عملکرد کمی و کیفی و مقاومت به بیماری ریزومانیا و شناسایی هیبریدهای برتر با استفاده از رویکرد جامع تجزیه گرافیکی بود.

مواد و روش‌ها

مواد ژنتیکی و تولید هیبریدهای آزمایشی

جدول ۱ مشخصات لاین‌های والدینی (پدری و مادری) برگزیده چغندر قند

Table 1 Characteristics of the elite paternal and maternal sugar beet lines

کد Code	لاین Line	کد Code	تستر Tester
L01	S1-940655	T01	201-25/301-28
L02	S1-950123	T02	201-9/301-11
L03	S1-960104	T03	940033/940132
L04	S1-960132	T04	940047/940170
L05	S1-960146	T05	940107/940170
L06	S1-960147	-	-
L07	S1-970020	-	-
L08	S1-970062	-	-
L09	S1-970080	-	-
L10	S1-970099	-	-
L11	S1-970121	-	-
L12	S1-970143	-	-
L13	S1-970146	-	-
L14	S1-970168	-	-
L15	S1-970172	-	-
L16	S1-970186	-	-
L17	S1-970191	-	-
L18	S1-970192	-	-
L19	S1-970199	-	-

هیبرید به همراه چهار رقم شاهد تجاری (آلبوس، BTS6975N، دنزل و جوکر) در قالب طرح مقایسه عملکرد مقدماتی (آگمنت) در پنج بلوک ناقص کشت شدند. نحوه چیدمان در هر بلوک به این صورت بود که چهار رقم شاهد در تمامی بلوک‌ها تکرار شدند (به‌عنوان مبنای برآورد خطا)، اما ۹۵ هیبرید آزمایشی بدون تکرار و به‌صورت تصادفی در بین بلوک‌ها توزیع گردیدند. هر واحد

طرح آزمایشی و ارزیابی‌های مزرعه‌ای

آزمایش‌های ارزیابی هیبریدهای تولیدی در شش ایستگاه تحقیقات کشاورزی شامل کرج، مشهد، میاندوآب، شیراز، کرمانشاه و همدان اجرا شد. عملیات کشت در تمامی مناطق به‌صورت بهاره در بازه زمانی اواسط فروردین‌ماه تا اواسط اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۲ انجام گرفت. در هر ایستگاه، تعداد ۹۵

آزمایشی شامل یک خط کاشت به طول هشت متر با فاصله بین ردیف ۵۰ سانتی‌متر بود.

جمع‌آوری داده‌ها و اندازه‌گیری صفات

پس از برداشت، ریشه‌های هر پلات آزمایشی توزین شدند و عملکرد ریشه به تن در هکتار تعمیم یافت. سپس با استفاده از دستگاه خودکار ونما نمونه خمیر از آن‌ها تهیه گردید و در آزمایشگاه کنترل کیفی ستاد مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقد از نظر ویژگی کیفی درصد قند ناخالص ارزیابی شد (Kunz et al. 2002). در نهایت، عملکرد شکر از مقادیر به‌دست‌آمده برای این دو ویژگی و بر اساس رابطه ۱ محاسبه گردید:

$$SY = RY \times SC \quad \text{رابطه ۱:}$$

در این رابطه، SY عملکرد شکر برحسب تن در هکتار، RY عملکرد ریشه برحسب تن در هکتار و SC درصد قند برحسب گرم قند در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه است.

علاوه بر این، یادداشت‌برداری از شدت بیماری ریزومانیا در مرحله برداشت ریشه‌ها بر اساس روش لوترباچر و همکاران (Luterberacher et al. 2005) در مقیاس ۹-۱ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی مشهد انجام شد. آزمایش در سایر ایستگاه‌ها نیز در شرایط آلوده به بیماری انجام شد اما داده‌های شدت آلودگی ثبت نگردید. در این روش آلودگی گیاهان با ثبت نمره ۱ برای گیاهان با ریشه‌های سالم (فاقد ریشه ریشی یا تغییر رنگ)، نمره ۳ برای گیاهان با ریشه ریشی محدود و قدری تغییر رنگ یافته، نمره ۵ برای گیاهان با ریشه ریشی متوسط و تغییر رنگ یافته، نمره ۷ برای گیاهان با ریشه ریشی شدید، نکروز و به‌شدت تغییر رنگ یافته و نمره ۹ برای گیاهان مرده، ریشه‌های نکروز شده و پوسیده بررسی شد. نمرات ۲، ۴، ۶ و ۸ به گیاهانی که حد واسط دو نمره فرد بودند، اختصاص داده شد.

تجزیه آماری

با توجه به اجرای آزمایش در قالب طرح آگمنت، ابتدا داده‌های خام هر یک از صفات عملکرد ریشه، درصد قند ناخالص و عملکرد شکر در هر محیط به‌صورت جداگانه با استفاده از ارقام

شاهد تعدیل شدند تا اثرات ناهمگن بلوک‌ها در هر مکان حذف گردد. سپس، برای حذف خطای محیطی و دستیابی به برآورد دقیق پتانسیل ژنتیکی هیبریدها، از مدل خطی مخلوط استفاده شد. در این مدل، مکان‌ها به‌عنوان اثر تصادفی در نظر گرفته شدند تا امکان تعمیم نتایج فراهم شود. سپس مقادیر تعدیل‌شده برای هر ترکیب (لاین × تستر) محاسبه گردید. استفاده از این مقادیر باعث می‌شود که اثرات محیطی و خطاهای آزمایشی به حداقل رسیده و داده‌های ورودی برای تجزیه گرافیکی، ماهیت دقیق‌تری داشته باشند. سپس، ماتریس داده‌های تعدیل‌شده شامل ۱۹ لاین در پنج تستر مبنای تجزیه گرافیکی قرار گرفت. تجزیه گرافیکی با استفاده از روش GGE biplot و بر اساس رابطه ۲ انجام شد (Ruswandi et al. 2015):

رابطه ۲:

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

در این رابطه، Y_{ij} مقادیر تعدیل‌شده برای هیبرید حاصل از تلاقی لاین i با تستر j ، β_j میانگین عملکرد تمام لاین‌ها در ترکیب با تستر، λ_1 و λ_2 مقادیر ویژه برای مؤلفه‌های اصلی اول و دوم، ξ_{i1} و ξ_{i2} بردارهای ویژه مؤلفه‌های اصلی اول و دوم مربوط به لاین i ، η_{j1} و η_{j2} بردارهای ویژه مؤلفه‌های اصلی اول و دوم مربوط به تستر j و ε_{ij} باقیمانده مدل است. تمامی محاسبات آماری و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار R انجام گرفت.

نتایج و بحث

تجزیه گرافیکی ترکیب‌پذیری برای عملکرد ریشه

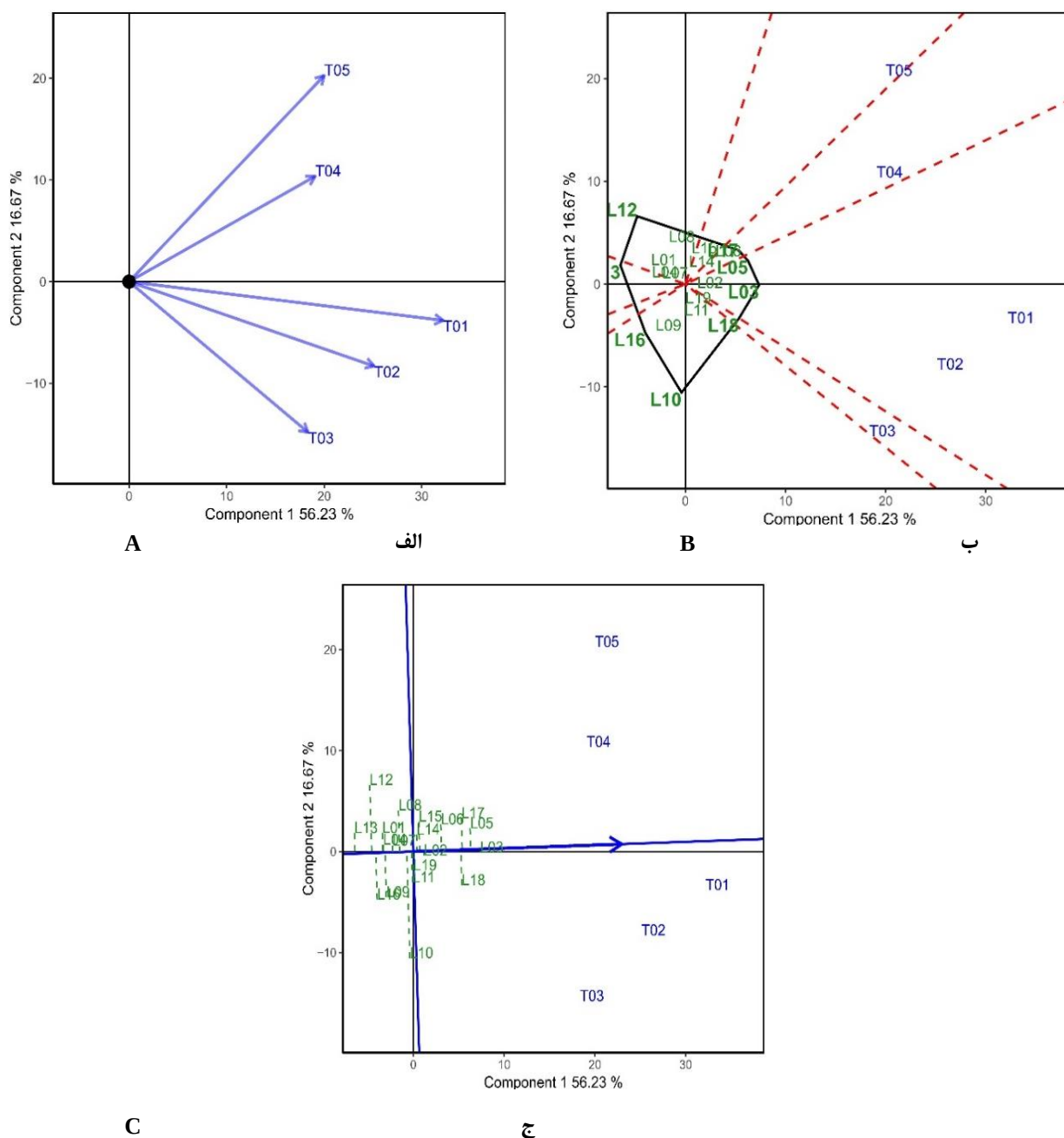
تجزیه گرافیکی عملکرد ریشه نشان داد که دو مؤلفه اصلی اول در مجموع ۷۲/۹۰ درصد از کل تغییرات مربوط به اثر تلاقی‌ها را تبیین نمودند که نشان‌دهنده اعتبار بالای این روش برای تفسیر قابل اتکای الگوهای پیچیده ترکیب‌پذیری است. در گام نخست، روابط متقابل بین تسترها و قدرت تمایز آن‌ها ارزیابی گردید (شکل ۱ الف). تستر T01 با داشتن بلندترین بردار، به‌عنوان قدرتمندترین تستر در تفکیک و تمایز لاین‌ها شناخته شد. زاویه بین بردار تسترها که نشان‌دهنده همبستگی ژنتیکی پاسخ آن‌ها است، وجود دو الگوی رفتاری متفاوت را آشکار ساخت.

تسترهای T01، T02 و T03 با زوایای حاده نسبت به یکدیگر (همبستگی مثبت بالا)، یک گروه همگن را تشکیل دادند؛ در حالی که تسترهای T04 و T05 ضمن قرارگرفتن در یک گروه مشترک، با تشکیل زاویه‌ای باز نسبت به گروه اول، الگوی متفاوتی از ترکیب‌پذیری را نشان دادند.

بای‌پلات چندوجهی برای شناسایی بهترین هیبریدها در هر بخش ترسیم شد (شکل ۱ ب). در این نمودار، لاین‌هایی که در گوشه‌های چندضلعی قرار می‌گیرند، بهترین عملکرد را در ترکیب با تسترهای قرارگرفته در آن بخش دارند. نتایج نشان داد که لاین L03 بهترین ترکیب‌شونده برای گروه اول تسترها شامل T01، T02 و T03 است. همچنین، لاین L05 نیز در همین بخش و در مجاورت لاین L03 قرار گرفت. این موقعیت نشان می‌دهد که لاین L05 نیز الگوی مشابهی با لاین L03 داشته و پتانسیل بالایی برای تولید هیبرید با این تسترها دارد. در مقابل، لاین L17 به‌عنوان بهترین والد در ترکیب با گروه دوم تسترها شامل T04 و T05 شناسایی شد. قرارگیری این دو لاین در بخش‌های مخالف بای‌پلات و اختصاصی بودن آن‌ها برای تسترهای مختلف، بیانگر وجود برهمکنش لاین × تستر قابل توجه است. این نتیجه با نتایج محققین متعددی همخوانی دارد که بر نقش غالب اثرات ژنی غیر افزایشی (غالبیت و اپیستازی) در وراثت صفات عملکردی چغندر قند تأکید کرده‌اند (Cacic et al. 1999; Doney 1981). به‌طور خاص، مطالعه عباسی و همکاران (Abbasi et al. 2019) نیز نشان داد که واریانس غالبیت برای عملکرد ریشه سهم بیشتری نسبت به واریانس افزایشی دارد که اهمیت شناسایی هیبریدهای خاص با ترکیب‌پذیری خصوصی بالا را نشان می‌دهد.

به‌منظور رتبه‌بندی دقیق لاین‌ها و تفکیک اثر ژنتیکی، از

بای‌پلات مختصات تستر متوسط (شکل ۱ ج) استفاده شد. در این بای‌پلات، محور افقی که با فلش مشخص شده است، نشان‌دهنده‌ی میانگین عملکرد تسترها در تمام تلاقی‌ها یا همان ترکیب‌پذیری عمومی است. بر این اساس، لاین‌های L03 و L05 با قرارگیری در سمت راست محور و داشتن بیشترین پیشروی در جهت فلش، بالاترین ترکیب‌پذیری عمومی را برای عملکرد ریشه نشان دادند. اگرچه نتایج اولیه (شکل ۱ ب) حاکی از سهم بالایی اثرات غیر افزایشی (ترکیب‌پذیری خصوصی) بود، اما شناسایی لاین‌هایی با ترکیب‌پذیری عمومی بالا همچنان حائز اهمیت است زیرا این لاین‌ها والدین مطمئنی برای اصلاح جمعیت هستند. محور عمودی در این بای‌پلات (شکل ۱ ج)، بیانگر میزان انحراف لاین از عملکرد مورد انتظار یا همان ترکیب‌پذیری خصوصی است. لاین‌هایی مانند L02 و L03 که فاصله کمتری از محور افقی دارند، پایداری عمومی بیشتری داشته و کمتر تحت تأثیر برهمکنش با تسترها هستند. در مقابل، لاین‌هایی مانند L17 و L18 با داشتن فاصله زیاد از محور افقی، ترکیب‌پذیری خصوصی بالایی را نشان دادند. به‌طور مشخص، لاین L17 علی‌رغم داشتن ترکیب‌پذیری عمومی متوسط، به دلیل ترکیب‌پذیری خصوصی بالا در ترکیب با تسترهای T04 و T05، پتانسیل مناسبی برای تولید هیبرید دارد. این نتایج، اگرچه برای صفات کیفی نظیر عیار قند و ناخالصی‌های ریشه توسط طالقانی و همکاران (Taleghani et al. 2024) گزارش شده بود؛ نشان می‌دهد که در ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، پتانسیل بالایی برای گزینش بر اساس ترکیب‌پذیری عمومی نیز وجود دارد. در مقابل، عملکرد مناسب لاین L17، مجدداً یافته‌های پیشین مبنی بر اهمیت اثرات غیر افزایشی را تأیید می‌کند (Abbasi et al. 2019; Taleghani et al. 2024).



شکل ۱ تجزیه گرافیکی بای‌پلات برای ترکیب‌پذیری صفت عملکرد ریشه در ۱۹ لاین و ۵ تستر چغندر قند. الف) ارزیابی تسترها بر اساس قدرت تمایز و شناسایی گروه‌های هترووتیک احتمالی؛ ب) بای‌پلات چندوجهی برای شناسایی بهترین ترکیب‌های هیبریدی؛ ج) ارزیابی جامع لاین‌ها بر اساس میانگین عملکرد (ترکیب‌پذیری عمومی) و میزان برهمکنش (ترکیب‌پذیری خصوصی).

Fig 1 Biplot graphical analysis of combining ability for root yield in 19 lines and 5 testers of sugar beet. A) Evaluation of testers based on discriminating power for identifying heterotic groups; B) The which-won-where polygon view for identifying the best specific hybrid combinations; C) Comprehensive evaluation of lines based on mean performance (general combining ability) and interaction effects (specific combining ability).

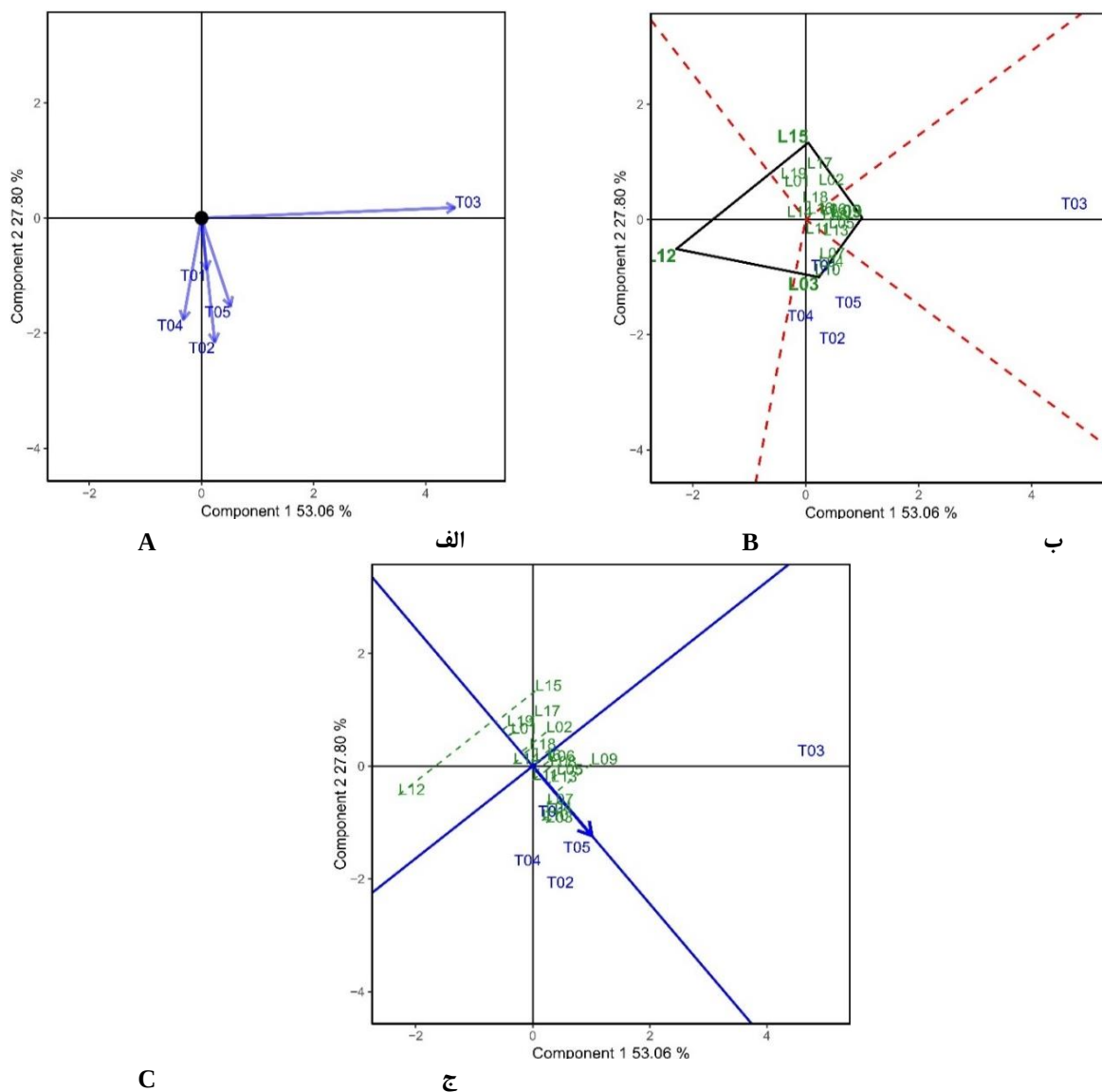
تجزیه گرافیکی ترکیب‌پذیری برای درصد قند

در خصوص درصد قند، دو مؤلفه اصلی اول در مجموع ۸۰/۸۶ درصد از کل تغییرات مربوط به اثرات تلاقی‌های انجام‌شده را پوشش دادند که نشان‌دهنده دقت بالای این روش برای تفسیر

الگوهای ترکیب‌پذیری است. ارزیابی روابط میان تسترها (شکل ۲ الف) الگوی ژنتیکی کاملاً متفاوتی را نسبت به عملکرد ریشه آشکار ساخت. تستر T03 با داشتن بلندترین بردار، بیشترین قدرت تمایز را در میان تمامی تسترها نشان داد. نکته حائز

در بای پلات چندوجهی (شکل ۲ ب)، این تضاد واکنشی در شناسایی بهترین ترکیب‌ها نیز نمود پیدا کرد. لاین L09 به عنوان بهترین والد در ترکیب با تستر T03 شناسایی شد و در یک بخش مجزا قرار گرفت. در مقابل، لاین L03 بهترین ترکیب‌شونده برای سایر تسترها (T01، T02، T04 و T05) بود. این تفکیک دووجهی در فضای بای پلات، حاکی از وجود ترکیب‌پذیری خصوصی است. با توجه به این که صفت درصد قند معمولاً وراثت‌پذیری عمومی بالایی دارد (Taleghani et al. 2024)،

اهمیت، زاویه بین بردار این تستر با سایر تسترها شامل T01، T02، T04 و T05 بود. این زاویه‌های نزدیک به ۹۰ درجه یا بیشتر (Badu-Apraku and Akinwale 2019)، بیانگر عدم همبستگی یا همبستگی منفی در نحوه رتبه‌بندی لاین‌ها توسط این تسترها است. این زوایا نشان می‌دهد که تستر T03 احتمالاً دارای زمینه ژنتیکی متفاوتی است و مکانیسم‌های ژنتیکی متمایزی را در لاین‌های پدري هدف قرار می‌دهد.



شکل ۲ تجزیه گرافیکی بای پلات برای ترکیب‌پذیری صفت درصد قند در ۱۹ لاین و ۵ تستر چغندر قند. الف) ارزیابی تسترها بر اساس قدرت تمایز و شناسایی گروه‌های هتروتنیک احتمالی، ب) بای پلات چندوجهی برای شناسایی بهترین ترکیب‌های هیبریدی، ج) ارزیابی جامع لاین‌ها بر اساس میانگین عملکرد (ترکیب‌پذیری عمومی) و میزان برهمکنش (ترکیب‌پذیری خصوصی).

Fig. 2 Biplot graphical analysis of combining ability for sugar content in 19 lines and 5 testers of sugar beet. A) Evaluation of testers based on discriminating power for identifying heterotic groups; B) The which-won-where polygon view for identifying the best specific hybrid combinations; C) Comprehensive evaluation of

lines based on mean performance (general combining ability) and interaction effects (specific combining ability).

T03 و گروه دوم شامل T04 و T05 اگرچه ممکن است دقیقاً ۹۰ درجه نباشد، اما به اندازه‌ای است که نشان‌دهنده‌ی استقلال نسبی این دو گروه در رتبه‌بندی لاین‌ها باشد.

بای‌پلات چندوجهی (شکل ۳ ب) برای شناسایی بهترین ترکیب‌های هیبریدی، تسترها را به دو گروه متمایز تقسیم کرد. گروه اول شامل اکثریت تسترها یعنی T01، T02، T04 و T05 بود، در حالی که گروه دوم تنها شامل تستر T03 بود که نشان‌دهنده‌ی رفتار ژنتیکی متفاوت این تستر در ترکیب با لاین‌ها است. لاین‌های L03، L05 و L18 در رأس بخشی قرار گرفتند که شامل گروه بزرگ تسترها (T01، T02، T04 و T05) بود. در مقابل، لاین‌های L10 و L09 در رأس بخشی جای گرفتند که تستر T03 در آن قرار داشت. این واکنش به‌وضوح نشان می‌دهد که هیبریدهای حاصل از تلاقی این لاین‌ها (L03، L05، L18 و L10) با گروه تستری مربوط به خود، بالاترین عملکرد شکر را داشته‌اند. شناسایی این ترکیب‌های خصوصی برتر، اهمیت بالای ترکیب‌پذیری خصوصی را در کنترل ژنتیکی صفت عملکرد شکر در این لاین‌ها نمایان می‌کند. این یافته‌ها با نتایج محققین متعددی همخوانی دارد که بر نقش غالب اثرات ژنی غیر افزایشی (غالبیت و اپیستازی) در وراثت صفات عملکردی چغندرقد تأکید کرده‌اند (Cacic et al. 1999; Doney 1981). به‌طور خاص، این تفکیک لاین‌ها برای تسترهای متفاوت، تأییدکننده‌ی گزارش عباسی و همکاران (Abbasi et al. 2019) است که نشان دادند واریانس غالبیت برای عملکرد ریشه و شکر سهم بیشتری نسبت به واریانس افزایشی دارد.

ارزیابی نهایی با هدف رتبه‌بندی لاین‌ها (شکل ۳ ج) نشان داد که لاین‌های L03، L05 و L18 با قرارگیری در منتهی‌الیه سمت راست محور افقی و داشتن فاصله کم از محور میانگین، به‌عنوان والدینی با ترکیب‌پذیری عمومی بالا هستند. این ویژگی نشان‌دهنده‌ی تجمع آلل‌های افزایشی مطلوب در این ژنوتیپ‌ها است لذا آن‌ها کاندیداهای ایده‌آلی برای برنامه‌های اصلاح جمعیت و توسعه ژنوتیپ‌های جدید به‌منظور افزایش تدریجی فراوانی ژنی محسوب می‌شوند. در مقابل، لاین‌های L10 و L09

مشاهده چنین سطحی از برهمکنش لاین × تستر، بیانگر اهمیت انتخاب والدین سازگار برای بهره‌برداری حداکثری از پتانسیل ژنتیکی در هیبریدهای قندی است. بر اساس نتایج ارزیابی جامع پتانسیل ژنتیکی لاین‌ها (شکل ۲ ج)، لاین‌های L03، L10، L04 و L07 با قرارگیری در منتهی‌الیه سمت راست محور میانگین عملکرد، بالاترین میانگین را در ترکیب با تمامی تسترها نشان دادند.

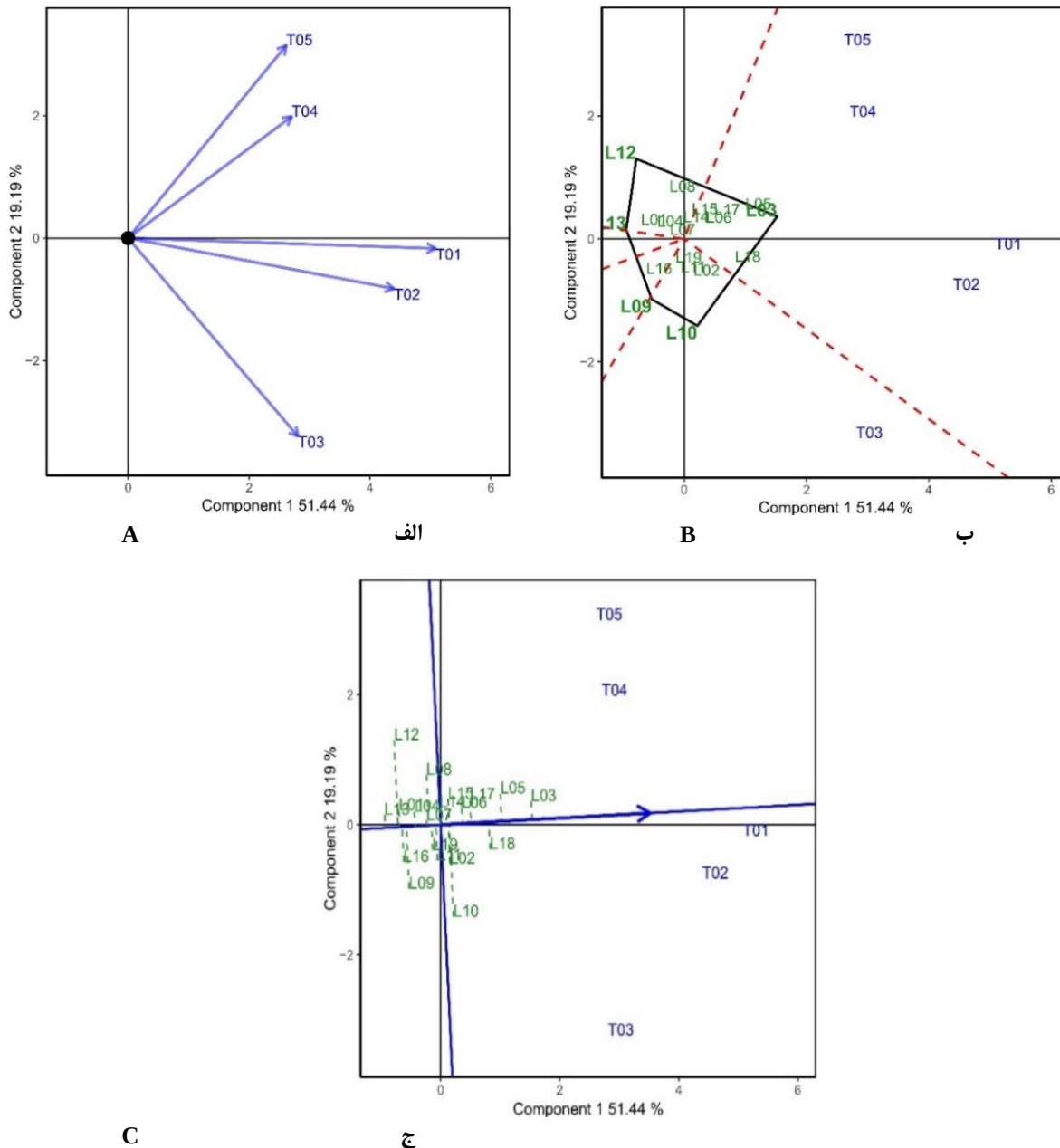
نزدیکی این لاین‌ها به محور افقی، بیانگر واریانس ترکیب‌پذیری خصوصی پایین و پایداری عملکرد آن‌ها در ترکیب‌های مختلف است. این ویژگی نشان می‌دهد که لاین‌های مذکور دارای تجمع بالایی از آلل‌های افزایشی مطلوب برای صفت قند هستند و کاندیداهای ایده‌آلی به‌عنوان والدین پایدار در برنامه‌های اصلاحی محسوب می‌شوند. در مقابل، لاین L09 رفتار ژنتیکی متفاوتی را بروز داد. این لاین باوجود داشتن میانگین عملکرد مطلوب، فاصله عمودی زیادی از محور میانگین داشت که نشان‌دهنده‌ی ترکیب‌پذیری خصوصی بالا است. اگرچه ممکن است چنین لاین‌هایی به دلیل عدم پایداری، والد ضعیفی تلقی شوند اما در تولید هیبرید تجاری، این ناپایداری در واقع نشان‌دهنده‌ی پتانسیل بالا در یک ترکیب خاص است. همان‌طور که در بای‌پلات چندوجهی دیده شد، پتانسیل بالای L09 صرفاً در تلاقی با تستر T03 ظاهر می‌شود؛ بنابراین، این لاین یک منبع ارزشمند برای تولید هیبرید است، در حالی که لاین‌هایی مثل L03 برای اصلاح جمعیت مناسب‌ترند.

تجزیه گرافیکی ترکیب‌پذیری برای عملکرد شکر

عملکرد شکر به‌عنوان مهم‌ترین صفت اقتصادی، برآیندی از عملکرد ریشه و عیار قند است. تجزیه بای‌پلات نشان داد که دو مؤلفه اصلی اول ۷۰/۶۳ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توجیه می‌کنند. اگرچه این مقدار کمتر از دو صفت اجزای عملکرد است اما همچنان برای تفسیر معتبر روابط ژنتیکی کافی است. بررسی بردار تسترها (شکل ۳ الف) نشان داد که تستر T01 دارای بلندترین بردار و در نتیجه بیشترین قدرت تمایز است. در خصوص روابط میان تسترها، زاویه بین گروه اول شامل T01، T02 و

صفت عملکرد شکر در این لاین‌ها که هم شامل اثرات افزایشی و هم غیر افزایشی است، پیچیدگی وراثت این صفت را تأیید می‌کند (Mirzaei and Saremirad 2023; Taleghani et al. 2024).

رفتاری متفاوت بروز دادند. این لاین‌ها با وجود میانگین عملکرد بالا، فاصله عمودی زیادی از محور میانگین داشتند که نشان‌دهنده ترکیب‌پذیری خصوصی بالا است. این امر تأیید می‌کند که عملکرد بالای آن‌ها ناشی از برهمکنش مثبت با گروه خاصی از تسترها است. این موضوع در ماهیت کنترل ژنتیکی



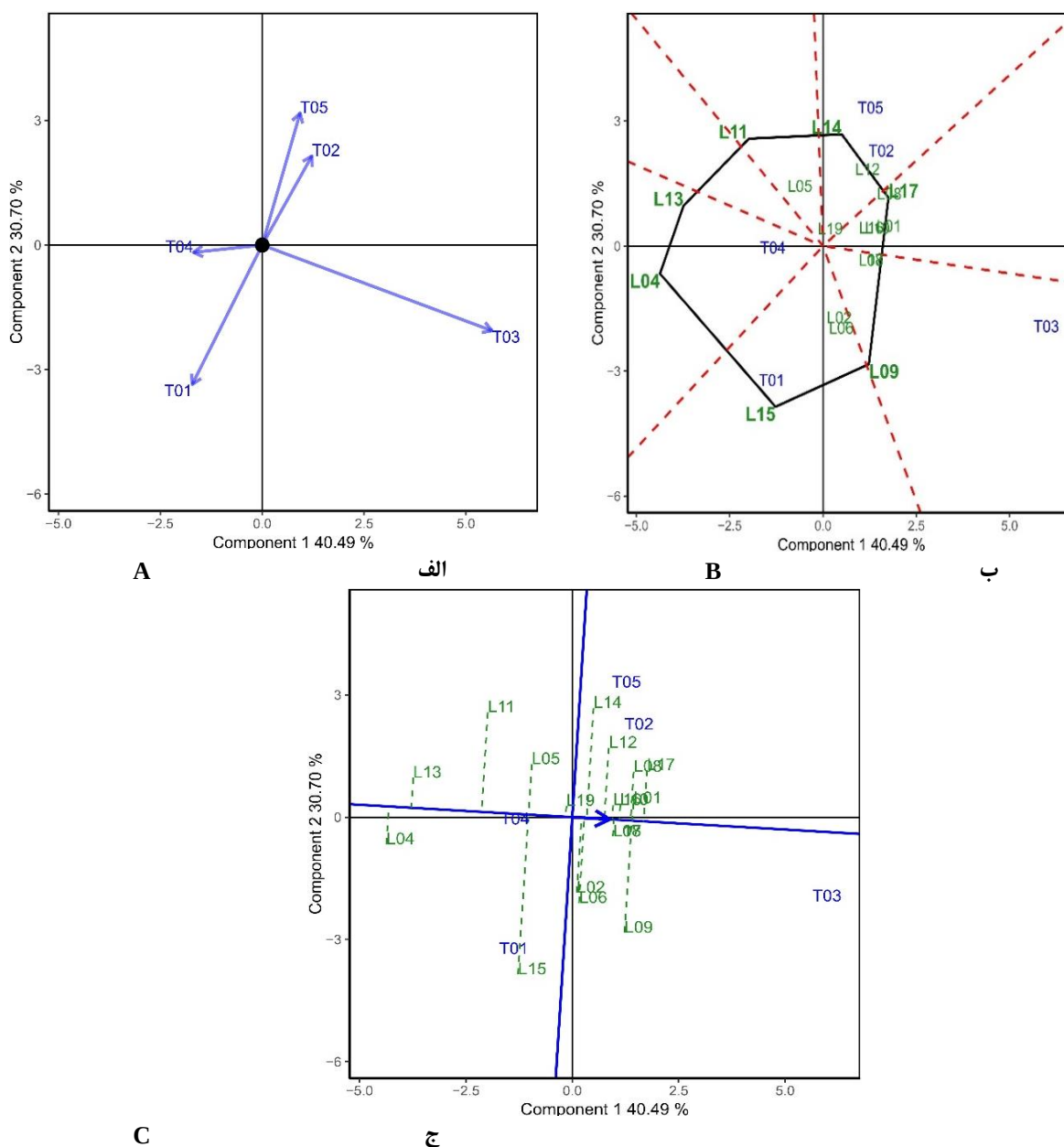
شکل ۳ تجزیه گرافیکی بای پلات برای ترکیب‌پذیری صفت عملکرد شکر در ۱۹ لاین و ۵ تستر چغندر قند. الف) ارزیابی تسترها بر اساس قدرت تمایز و شناسایی گروه‌های هتروتیک احتمالی؛ ب) بای پلات چندوجهی برای شناسایی بهترین ترکیب‌های هیبریدی؛ ج) ارزیابی جامع لاین‌ها بر اساس میانگین عملکرد (ترکیب‌پذیری عمومی) و میزان برهمکنش (ترکیب‌پذیری خصوصی).

Fig. 3 Biplot graphical analysis of combining ability for sugar yield in 19 lines and 5 testers of sugar beet. A) Evaluation of testers based on discriminating power for identifying heterotic groups; B) The which-won-where polygon view for identifying the best specific hybrid combinations; C) Comprehensive evaluation of lines based on mean performance (general combining ability) and interaction effects (specific combining ability).

نشان داد، تستر T03 با داشتن بلندترین بردار، قوی‌ترین ابزار برای غربالگری لاین‌ها بود اما مهم‌تر از آن، همبستگی منفی بین تستر T03 و گروه تسترهای T01 و T04 بود. این تضاد نشان می‌دهد که مکانیسم ژنتیکی یا الگوی توارث مقاومت در تستر T03 با سایر تسترها متفاوت است.

تجزیه گرافیکی مقاومت به بیماری ریزومانی

به‌منظور بررسی دقیق ساختار ژنتیکی مقاومت به بیماری ریزومانی، داده‌های شدت بیماری مورد تجزیه گرافیکی قرار گرفتند. دو مؤلفه اصلی اول در مجموع ۷۱/۱۹ درصد از کل تغییرات را تبیین کردند. ارزیابی روابط بین تسترها (شکل ۴ الف)



شکل ۴ تجزیه گرافیکی بای‌پلات برای ترکیب‌پذیری صفت مقاومت به بیماری ریزومانی در ۱۹ لاین و ۵ تستر چغندرقد. الف) ارزیابی تسترها بر اساس قدرت تمایز و شناسایی گروه‌های هتروژیک احتمالی؛ ب) بای‌پلات چندوجهی برای شناسایی بهترین ترکیب‌های هیبریدی مقاوم؛ ج) ارزیابی جامع لاین‌ها بر اساس میانگین سطح مقاومت (ترکیب‌پذیری عمومی) و میزان برهمکنش (ترکیب‌پذیری خصوصی).

Fig. 4 Biplot graphical analysis of combining ability for Rhizomania resistance in 19 lines and 5 testers of sugar beet. A) Evaluation of testers based on discriminating power for identifying heterotic groups; B) The which-won-where polygon view for identifying the best resistance hybrid combinations; C) Comprehensive evaluation of lines based on mean resistance level (general combining ability) and interaction effects (specific combining ability).

این یافته احتمالاً بیانگر وجود ژن مقاومت در این تسترها است که موجب شده لاین‌های پدری واکنش‌های متضادی در ترکیب با آن‌ها نشان دهند. این نتیجه با گزارش‌هایی که بر وراثت مقاومت به بیماری‌ها تأکید دارند (Rajabi *et al.* 2023; Saremirad *et al.* 2021)، کاملاً همخوانی دارد.

در بای‌پلات چندوجهی (شکل ۴ ب)، این فرضیه به صورت عملی تأیید شد. لاین L09 به عنوان بهترین والد در ترکیب با تستر T03 شناسایی شد، در حالی که لاین L14 بهترین عملکرد (بیشترین مقاومت) را در ترکیب با تسترهای گروه مقابل (T02 و T05) داشت. تفکیک کامل بهترین لاین‌ها برای تسترهای مختلف، گواهی بر اهمیت حیاتی ترکیب‌پذیری خصوصی در بهبود مقاومت است. ارزیابی جامع لاین‌ها بر اساس مختصات تستر متوسط (شکل ۴ ج) نشان داد که لاین‌های L01، L16، L17 و L10 در منتهی‌الیه سمت راست محور میانگین قرار گرفته‌اند. این لاین‌ها با داشتن کمترین میزان آلودگی (بیشترین مقاومت) در ترکیب با تمامی تسترها و قرارگیری در نزدیکی محور افقی، به عنوان منابعی با ترکیب‌پذیری عمومی بالا شناسایی شدند. از منظر ژنتیکی، این پایداری در مقاومت می‌تواند نشان‌دهنده‌ی حضور آلل‌های اصلی مقاومت مانند هموزیگوت بودن برای ژن‌های *Rz* و همچنین تجمع ژن‌های فرعی با اثرات جزئی مطلوب در زمینه ژنتیکی این لاین‌ها باشد. در مقابل، لاین‌های L09، L14، L13، L04 و L15 اگرچه در بای‌پلات چندوجهی به عنوان بهترین ترکیب‌شونده‌ها برای تسترهای خاص شناسایی شدند اما در ارزیابی جامع، فاصله عمودی زیادی از محور پایداری داشتند. این امر تأیید می‌کند که مقاومت آن‌ها تحت تأثیر زمینه ژنتیکی تستر قرار دارد. برای مثال، لاین L15 بهترین عملکرد را صرفاً با تستر T01 (شکل ۴ ب) نشان داد. این نتیجه اثبات می‌کند که حتی در صفاتی با توارث تک ژنی مانند مقاومت به ریزومانیا، برهمکنش لاین × تستر می‌تواند سطح نهایی بروز بیماری را تغییر دهد؛ بنابراین، لاین‌هایی مانند L18 و L01 برای انتقال پایداری مقاومت به جمعیت‌ها و لاین‌هایی مانند L09 و L14 برای تولید هیبریدهای مقاوم در ترکیب با تسترهای مشخص، پیشنهاد می‌شوند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با به‌کارگیری رویکرد تجزیه گرافیکی بر روی داده‌های حاصل از طرح لاین × تستر انجام شد. نتایج به‌وضوح نشان داد که کنترل ژنتیکی صفات عملکرد ریشه، درصد قند ناخالص و عملکرد شکر تابعی از هر دو نوع اثر افزایشی و غیر افزایشی ژن‌ها است اما سهم و الگوی این اثرها بسته به نوع صفت متفاوت است. در خصوص صفات عملکردی، شناسایی گروه‌های هتروژیک متمایز بین تسترها و لاین‌ها، امکان برنامه‌ریزی برای تلاقی‌ها را فراهم می‌سازد. لاین‌های L03 و L05 با دارا بودن ترکیب‌پذیری عمومی بالا برای عملکرد شکر، کاندیداهای مناسبی برای برنامه‌های اصلاح جمعیت هستند. در مقابل، لاین L09 به دلیل ترکیب‌پذیری خصوصی بالا، پتانسیل مناسبی برای بهره‌برداری از هتروزیس دارد. در زمینه مقاومت به ریزومانیا، لاین‌های L09 در تلاقی با تستر T03، L14 در تلاقی با تسترهای T02 و T05، L13 در تلاقی با تستر T04 و L15 در تلاقی با تستر T01 به عنوان بهترین منابع مقاومت بودند. شناسایی لاین‌های پایدار مانند L18 در کنار لاین‌های دارای سازگاری خصوصی مانند L14، استفاده از منابع پایدار برای تثبیت مقاومت و استفاده از منابع اختصاصی برای دستیابی به سطوح بالای مقاومت از طریق هر می کردن ژن‌ها را پیشنهاد می‌دهد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

سپاسگزاری

نگارندگان از مدیریت و کارکنان مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند و ایستگاه‌های تحقیقاتی تابعه به دلیل همکاری و حمایت ارزشمند در طول اجرای این مطالعه تشکر و قدردانی می‌کنند.

References

منابع مورد استفاده

- Abbasi Z, Arzani A, Majidi MM, Rajabi A, Jalali A. Genetic analysis of sugar yield and physiological traits in sugar beet under salinity stress conditions. *Euphytica*. 2019; 215: 1–12. **Doi:** <https://doi.org/10.1007/s10681-019-2422-5>
- Badu-Apraku B, Akinwale RO. Biplot analysis of line× tester data of maize (*Zea mays* L.) inbred lines under stress and nonstress environments. *Cereal Research Communications*. 2019; 47(3): 518–30.
- Cacic N, Kovacev L, Mezei S, Sklenar P, Nagl N. Mode of inheritance and combining abilities for some sugar beet traits (*Beta vulgaris* L.). *Zbornik radova-Naucni institut za ratarstvo i povrtarstvo*. 1999; 31: 173–82.
- Darvishzadeh R, Bernousi I, Kiani SP, Dechamp-Guillaume G, Sarrafi A. Use of GGE biplot methodology and Griffing's diallel method for genetic analysis of partial resistance to phoma black stem disease in sunflower. *Acta Agriculture Scandinavica Section B–Soil and Plant Science*. 2009; 59(6): 485–90.
- Doney DL. Seedling physiology and sugar beet yield. *Journal of the American Society of Sugar Beet Technologists*. 1981; 21(2): 163–78.
- Ghotbi V, Azizi F, Zamani MJ, Rozbehani A. Biplot and heterosis analysis in half-diallel crosses from second selfing generation of alfalfa. *Journal of Crop Breeding*. 2018; 10(27): 104–14.
- Kahriman F, Egesel CO, Orhun GE, Alaca B, Avci F. Comparison of graphical analyses for maize genetic experiments: Application of biplots and polar plot to line× tester design. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2016; 76(3): 285–94.
- Kempthorne O. An introduction to genetic statistics. John Wiley and Sons Inc., New York, USA. 1957.
- Kunz M, Martin D, Puke H. Precision of beet analyses in Germany explained for polarization. *Zuckerindustrie*. 2002; 127(1): 13–21.
- Luterbacher M, Asher M, Beyer W, Mandolino G, Scholten O, Frese L, Biancardi E, Stevanato P, Mechelke W, Slyvchenko O. Sources of resistance to diseases of sugar beet in related *Beta* germplasm: II. Soil-borne diseases. *Euphytica*. 2005; 141(1): 49–63.
- Mahmudi SB, Abbasi Z. Evaluation combining ability of sugar beet breeding lines for qualitative and quantitative traits and resistant to rhizomania disease. *Journal of Crop Breeding*. 2018; 9(24): 112–18. **Doi:** <https://doi.org/10.29252/jcb.9.24.112>
- Mirzaei MR, Saremirad A. Estimation of gene action and genetic parameters of some characteristics related to sugar beet (*Beta vulgaris* L.) seed germination by line× tester analysis. *Journal of Crop Production*. 2023; 16(4): 67–92. **Doi:** <https://doi.org/10.22069/ejcp.2024.21403.2578>
- Mostafavi K, Choukan R, Taeb M, Majidi HE, Bihanta MR. Heterotic grouping of Iranian maize inbred lines based on yield-specific combining ability in diallel crosses and GGE biplot. *Journal of Research Agriculture Science*. 2012; 8(2): 113–25.
- Oerke EC. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*. 2006; 144(1): 31–43. **DOI:** <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>
- Orazizade M, Motahar SS, Mesbah M. Genetic parameters of resistance to agent of leaf spot (*cercospora beticola*) of sugar beet. *Journal of Sugar beet*. 2002; 18: 15–27. (In Persian with English abstract).
- Rajabi A, Ahmadi M, Bazrafshan M, Hassani M, Saremirad A. Evaluation of resistance and determination of stability of different sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genotypes in rhizomania-infected conditions. *Food Science and Nutrition*. 2023; 11(3): 1403–14. **Doi:** <https://doi.org/10.1002/fsn3.3180>
- Ruswandi D, Supriatna J, Waluyo B, Makkulawu AT, Suryadi E, Chindy ZU, Ruswandi S. GGE biplot analysis for combining ability of grain yield and early maturity in maize mutant in Indonesia. *Asian Journal of Crop Science*. 2015; 7(3): 160–73. **DOI:** <https://doi.org/10.3923/ajcs.2015.160.173>
- Sadeghzadeh-Ahari D, Sharifi P, Karimizadeh R, Mohammadi M. Biplot analysis of diallel crosses for yield and some morphological traits in durum wheat. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding*. 2014; 3(2): 28–40. (In Persian with English abstract).
- Saremirad A, Abbasi S, Mostafai. Study of genetic structure of grain yield and some agro-morphological characteristics in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) using diallel analysis and GGE biplot method. *Journal of Crop Breeding*. 2021; 13(39): 130–39. **DOI:** <https://doi.org/10.52547/jcb.13.39.130K>
- Saremirad A, Bihanta MR, Malihipour A, Mostafavi K, Alipour H. Genome-wide association study in diverse Iranian wheat germplasms detected several putative genomic regions associated with stem rust resistance. *Food Science and Nutrition*. 2021; 9(3): 1357–74. **DOI:** <https://doi.org/10.1002/fsn3.208>
- Saremirad A, Mostafavi K. Genetic analysis of important agronomic traits in some of barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars under normal and drought stress conditions. *Cereal Research*. 2018; 8(3): 397–408. **Doi:** <https://doi.org/10.22124/c.2018.10345.1393>
- Sharifi P. Graphic analysis of salinity tolerance traits of rice (*Oryza sativa* L.) using biplot method. *Cereal Research Communications*. 2012; 40(3): 342–50.
- Sharifi P. Genotype plus genotype by environment interaction (GGE) biplot analysis of nutrient quality traits in rice (*Oryza sativa* L.). *Philippine Journal of Crop Science*. 2013; 38(2): 9–20.
- Sharifi P, Motlagh MRS. Biplot analysis of diallel crosses for cold tolerance in rice at the germination stage. *Crop and Pasture Science*. 2011; 62(2): 169–76.
- Sprague GF, Tatum LA. General vs. specific combining ability in single crosses of corn. *Journal of the American Society of Agronomy*. 1942; 34: 923–32.
- Taleghani D, Rajabi A, Saremirad A, Darabi S. 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*. 2024; 15(48): 201–12. **Doi:** <https://doi.org/10.22069/ejcp.2024.21403.2578>
- Yan W, Hunt L. Biplot analysis of diallel data. *Crop Science*. 2002; 42(1): 21–30. **Doi:** <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.2100a>
- Yan W, Kang MS. GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. CRC press, Boca Raton, FL. 2002. **Doi:** <https://doi.org/10.1201/9781420040371>