DOI: 10.22092/spj.2026.374583.1488

"نهال و بذر"
جلد ۴۲، شماره ۲، سال ۱۴۰۵

مقاله پژوهشی

تجزیه برهمکنش ژنوتیپ × محیط و پایداری عملکرد شکر سفید در هیبریدهای امیدبخش چغندرقند

Analysis of Genotype × Environment Interaction and White Sugar Yield Stability in Promising Sugar Beet Hybrids

سعید صادق‌زاده حمایتی[۱*]، سید باقر محمودی[۲]، علی صارمی‌راد[۳]، سعید دارابی[۴]، جمشید سلطانی ایدلیکی[۵]، قاسم پرمون[۶] و کامبیز خوارزمی[۷]

۱- دانشیار، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۲- استاد، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۳- استادیار، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۴- مربی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.
۵- استادیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.
۶- استادیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران.
۷- پژوهشگر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان‌غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۷/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۹/۰۳

چکیده

صادق‌زاده حمایتی، س.، محمودی، س. ب.، صارمی‌راد، ع.، دارابی، س.، سلطانی ایدلیکی، ج.، پرمون، ق. و کامبیز خوارزمی. ۱۴۰۵. تجزیه برهمکنش ژنوتیپ × محیط و پایداری عملکرد شکر سفید در هیبریدهای امیدبخش چغندرقند. **نهال و بذر ۴۲:** ۲۴۳-۲۱۹

برهمکنش ژنوتیپ × محیط از چالش‌های اصلی در گزینش ارقام سازگار و پرمحصول در برنامه‌های به‌نژادی چغندرقند به‌شمار می‌رود. در این پژوهش، برهمکنش ژنوتیپ × محیط و پایداری عملکرد شکر سفید در چهار هیبرید امیدبخش چغندرقند به همراه سه رقم شاهد داخلی (یلدا، زیبا و نیکا) و دو رقم شاهد خارجی (Bifort و BTS2015N) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در دو سال متوالی ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ در پنج ایستگاه تحقیقاتی کرج، شیراز، میاندوآب، کرمانشاه و خوی با روش‌های AMMI و GGE biplot ارزیابی شد. تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر سال، ژنوتیپ، برهمکنش مکان × ژنوتیپ و برهمکنش سال × مکان × ژنوتیپ معنی‌دار بودند. در مدل AMMI، دو مؤلفه اول برهمکنش در مجموع ۸۳/۸۰ درصد از تغییرات برهمکنش را توجیه کردند. هیبریدهای SBSI 244 و SBSI 241 با میانگین ۱۰/۳۸ و ۱۰/۳۳ تن در هکتار شکر سفید و شاخص گزینش مشترک پنج، به ترتیب به‌عنوان هیبریدهای داخلی با عملکرد بالا و پایدار شناسایی شدند. ارقام شاهد خارجی BTS2015N (در میاندوآب)، Bifort (در خوی) و هیبرید SBSI 242 (در کرمانشاه) سازگاری خصوصی بارزی نشان دادند. در تجزیه GGE biplot که ۹۳/۶۲ درصد از کل تغییرات ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط را توجیه کرد، هیبریدهای SBSI 244 و SBSI 241 با عملکرد شکر سفید بیشتر از شاهدهای داخلی و قرارگیری در مجاورت محور افقی مختصات محیط میانگین از پایداری عملکرد بیشتری نیز برخوردار بودند. از این‌رو، این دو هیبرید به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر و واجد سازگاری عمومی شناسایی شدند. با توجه به هم‌سویی نتایج، روش GGE biplot به‌دلیل سهولت تفسیر بصری پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: چغندرقند، شاخص گزینش ژنوتیپ، سازگاری عمومی، سازگاری خصوصی، GGE biplot.

* نگارنده مسئول: s.sadeghzadeh@areeo.ac.ir تلفن: ۰۲۶۳۲۷۰۲۶۱۳

2026© The Authors. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

مقدمه

چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) یکی از راهبردی‌ترین گیاهان زراعی صنعتی و تأمین‌کننده بخش عمده‌ای از قند مصرفی جهان به شمار می‌رود که به دلیل پتانسیل بالای تثبیت کربن و راندمان فتوسنتزی مناسب، جایگاهی ویژه‌ای در نظام‌های کشاورزی پایدار دارد (Panella, 2010; Ptak *et al*., 2022). در سال‌های اخیر، نوسانات بازار شکر، تغییر سیاست‌های کلان کشاورزی و افزایش هزینه‌های تولید سبب بروز چالش‌های متعددی در سطح زیر کشت و پایداری تولید این محصول شده است (Kolář, 2021; Pole, 2022; Eurostat, 2023).

از سوی دیگر، محدودیت‌های محیطی و الزامات زیست‌محیطی در زمینه کاهش نهاده‌های شیمیایی، جهت‌گیری به‌سوی مدیریت پایدار زراعی و معرفی ارقام سازگار را ضروری ساخته است (Gazdík *et al*., 2025; Wolfgang *et al*., 2023). دستیابی به تولید پایدار در زراعت چغندرقند، بیش از هر چیز مستلزم دستیابی به عملکرد مطلوب شکر سفید در گستره وسیعی از شرایط محیطی و اقلیمی است، زیرا عملکرد شکر سفید به‌عنوان محصول نهایی و حاصل تلفیق عملکرد ریشه و راندمان استحصال قند، ارزش اقتصادی اصلی این زراعت را تعیین می‌کند. با این وجود، تولید محصولات ریشه‌ای نظیر چغندرقند در معرض تغییرات شدید عوامل اقلیمی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و مدیریت‌های زراعی قرار داشته و نوسانات عملکرد در اقلیم‌های گوناگون از موانع عمده پیش‌روی بهره‌برداران است (Götze *et al*., 2017; Afshar *et al*., 2019).

تغییرات سالانه درجه حرارت و پراکنش بارش‌ها در کنار ناهمگنی محیط‌های کاشت موجب می‌شود که ارقام مختلف واکنش‌های فیزیولوژیکی و رشدی متفاوتی از خود نشان دهند (Fishkis *et al*., 2024). در برنامه‌های به‌نژادی، ارزیابی ژنوتیپ‌ها صرفاً بر مبنای پتانسیل عملکرد در شرایط کنترل‌شده یا تک‌محیطی کفایت نمی‌کند، چراکه بروز آثار محیطی کنترل‌نشده می‌تواند پاسخ ارقام برتر را دگرگون ساخته و پیشرفت ژنتیکی حاصل از گزینش را کاهش دهد (Kumar *et al*., 2021). از این‌رو، بررسی پایداری عملکرد در آزمایش‌های چندمحیطی به‌عنوان یکی از ارکان اساسی در پژوهش‌های به‌نژادی مطرح است.

پدیده برهمکنش ژنوتیپ × محیط هنگامی رخ می‌دهد که رتبه‌بندی عملکرد ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیط دیگر تغییر یابد یا فاصله عملکردی میان آنها دچار نوسان شود (Yan and Tinker, 2006). این برهمکنش ساختاری پیچیده‌ای دارد و گزینش ارقام دارای عملکرد پایدار و سازگار را برای به‌نژادگران دشوار می‌سازد (Zobel *et al*., 1988). در مناطق خشک و نیمه‌خشک که نوسانات محیطی شدیدتر است، پایداری عملکرد شکر سفید اهمیتی به‌اندازه پتانسیل عملکرد پیدا می‌کند، زیرا یک رقم با پتانسیل عملکرد بالا در صورتی که

فاقد پایداری عملکرد باشد، در فصول نامساعد با افت شدید روبه‌رو خواهد شد (Kumar *et al*., 2021; Wolfgang *et al*., 2023)؛ بنابراین، درک ماهیت، روند و شدت برهمکنش ژنوتیپ × محیط برای طراحی برنامه‌های به‌نژادی و توصیه هدفمند ارقام تجاری ضرورتی انکار ناپذیر است.

وش‌های معمول قادر به تفکیک جزئیات پیچیده برهمکنش ژنوتیپ × محیط نبوده و الگوی واکنش‌های غیرخطی را مشخص نمی‌کنند. به‌منظور رفع این محدودیت، مدل‌های چندمتغیره توسعه یافته‌اند که در این میان مدل AMMI و مدل GGE biplot کارآمدی بالایی نشان داده‌اند (Gauch, 1992, 2013; Yan *et al*., 2007). مدل AMMI با ترکیب تجزیه واریانس متداول برای آثار اصلی و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای بخش باقیمانده، امکان تفکیک ساختار برهمکنش را فراهم می‌آورد. همچنین با استفاده از مؤلفه‌های برهمکنش، شاخص‌هایی نظیر ارزش پایداری AMMI محاسبه می‌شوند که سنجش کمی پایداری فنوتیپی ژنوتیپ‌ها را تسهیل می‌کنند (Purchase *et al*., 2000; Farshadfar, 2008).

در کنار این مدل، روش گرافیکی GGE biplot به‌طور هم‌زمان اثرات ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط را مورد ارزیابی بصری قرار می‌دهد و امکان تمایز ابرمحیط‌ها و شناسایی ارقام برتر در هر محیط را فراهم می‌آورد (Yan and Tinker, 2006; Yan and Wu, 2008). این روش با ترسیم محور مختصات محیط میانگین، قضاوت توأم پیرامون میانگین عملکرد و درجه پایداری ارقام را امکان‌پذیر کرده و ژنوتیپ‌های با عملکرد پایدار و سازگاری عمومی را از ارقام دارای سازگاری خصوصی متمایز می‌سازد (Singh *et al*., 2019). تلفیق این دو روش آماری به پژوهشگران دیدگاهی جامع‌تر برای تفسیر پاسخ ژنوتیپ‌ها در محیط‌های ناهمگن ارائه می‌دهد.

در پژوهش‌های داخلی پیشین، اهمیت تجزیه چندمتغیره برهمکنش ژنوتیپ × محیط در چغندرقند در شرایط اقلیمی ایران مورد بررسی قرار گرفته است. صادق‌زاده حمایتی و همکاران (Sadeghzadeh Hemayati *et al*., 2022) پایداری عملکرد شکر سفید نه رقم تجاری چغندرقند را در چهار فصل زراعی در شش ایستگاه تحقیقاتی با استفاده از مدل‌های AMMI، BLUP و شاخص WAASBY ارزیابی و ارقام آسیا، شکوفا و آرتا را به‌عنوان ارقام با عملکرد بالا و پایدار تعیین کردند. در مطالعه‌ای دیگر، طالقانی و همکاران (Taleghani *et al*., 2023) واکنش ۱۸ ژنوتیپ چغندرقند را در پنج مکان در دو سال با تلفیق مدل‌های AMMI، BLUP، GGE biplot و شاخص گزینش چندصفتی MTSI بررسی و ضمن تفکیک مناطق آزمایشی به سه ابرمحیط متمایز، هیبرید ۱۵ را به‌عنوان ژنوتیپ ایده‌آل گزینش نمودند. حسنی و همکاران (Hassani *et al*., 2024) نیز با ارزیابی ۲۰ ژنوتیپ مقاوم به ریزومانیا در پنج ایستگاه تحقیقاتی در دو سال زراعی با به‌کارگیری مدل‌های AMMI،

WAASB و GYT، کارآمدی تلفیق صفات کمی و کیفیت را در گزینش ارقام پایدار چغندرقند نشان دادند.

آگاهی از میزان پایداری عملکرد شکر سفید در مواجهه با شرایط محیطی متنوع مناطق کشت چغندرقند، پیش‌نیاز تصمیم‌گیری‌های به‌نژادی و نامگذاری و آزادسازی ارقام تجاری چغندرقند مناسب برای هر منطقه اقلیمی است. بر این اساس، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی الگو و شدت برهمکنش ژنوتیپ × محیط، شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار شکر سفید، و واجد سازگاری عمومی و نیز ارزیابی همگرایی این دو روش چندمتغیره در گزینش نهایی هیبریدهای امیدبخش چغندرقند انجام شد.

مواد و روش‌ها

ایستگاه‌های آزمایشی

این پژوهش در دو سال زراعی متوالی (۱۴۰۳ و ۱۴۰۴) در پنج ایستگاه تحقیقات کشاورزی در اقلیم‌های مختلف کشور شامل کرج، شیراز، میاندوآب، کرمانشاه و خوی به اجرا درآمد. ایستگاه‌های مورد مطالعه از تنوع جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا قابل توجهی برخوردار بودند. مشخصات جغرافیایی شامل موقعیت، عرض و طول جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا برای هر یک از ایستگاه‌های تحقیقاتی در جدول ۱ ارائه شده است. بر این اساس، ترکیب پنج منطقه جغرافیایی در دو فصل زراعی، در مجموع ۱۰ محیط آزمایشی مجزا را برای ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × محیط تشکیل داد.

جدول ۱- مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی محل اجرای آزمایش

Table 1. Geographical coordinates of the research stations for experimental agricultural research stations

Location	مکان	ارتفاع از سطح دریا (متر) Altitude (m)	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude
Karaj, Alborz.	کرج، البرز	1312	35° 55' N	50° 54' E
Shiraz, Fars.	شیراز، فارس	1484	29° 32' N	52° 36' E
Miandoab, West Azerbaijan	میاندوآب، آذربایجان غربی	1296	36° 58' N	46° 05' E
Kermanshah, Kermanshah	کرمانشاه، کرمانشاه	1362	34° 15 'N	46° 48' E
Khoy, West Azerbaijan	خوی، آذربایجان غربی	1136	38° 33' N	44 °57' E

مواد گیاهی و طرح آزمایشی

مواد گیاهی مورد بررسی شامل چهار هیبرید منوژرم امیدبخش حاصل از برنامه‌های به‌نژادی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند به همراه ارقام شاهد تجاری داخلی و خارجی بودند. هیبریدهای آزمایشی شامل SBSI 241، SBSI 242، SBSI 243 و SBSI 244 بودند که همگی دارای والد مادری مشترک بوده و با گرده‌افشانهای پدری متمایز تلاقی داده شده بودند. همچنین به‌منظور مقایسه دقیق عملکرد شکر سفید و

سازگاری، سه رقم شاهد داخلی شامل یلدا، زیبا و نیکا و دو رقم شاهد خارجی شامل Bifort و BTS2015N در همه ایستگاه‌ها کشت شدند (جدول ۲).

آزمایش‌ها در هر ایستگاه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا شدند. هر کرت آزمایشی شامل سه خط کاشت به طول هشت متر با فاصله بین خطوط ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی خطوط پس از مرحله تنک حدود ۱۷ سانتی‌متر بود. عملیات آماده‌سازی زمین، کاشت بذر، تنک‌کردن، وجین علف‌های هرز و آبیاری در هر ایستگاه بر اساس دستورالعمل‌های فنی و نیازهای زراعی منطقه انجام شد و میزان مصرف کودهای شیمیایی نیز مطابق با نتایج آزمون خاک هر ایستگاه بود.

جدول ۲- هیبریدهای منوژرم چغندرقند و ارقام شاهد

Table 2. Sugar beet monogerm hybrids and check cultivars

هیبرید Hybrid	شجره Pedigree ♀	♂	Check	شاهد	Origin of check	منشاء شاهد
SBSI 241	201-9/301-11	S1-980246	Yalda	یلدا	Local check	شاهد داخلی
SBSI 242	201-9/301-11	S1-980282	Ziba	زیبا	Local check	شاهد داخلی
SBSI 243	201-9/301-11	S1-980303	Nika	نیکا	Local check	شاهد داخلی
SBSI 244	201-9/301-11	S1-980309	Bifort	-	Foreign check	شاهد خارجی
-		-	BTS2015N	-	Foreign check	شاهد خارجی

اندازه‌گیری عملکرد شکر سفید

در زمان رسیدگی فیزیولوژیکی، ریشه‌های چغندرقند برداشت و پس از سرزنی، وزن ریشه تعیین شد. سپس، شستشوی ریشه‌ها انجام شد و به‌طور تصادفی از ریشه‌های هر کرت نمونه خمیر تهیه گردید. نمونه‌های خمیر تهیه‌شده در آزمایشگاه تکنولوژی قند ستاد مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند از نظر ویژگی‌های کمی و کیفیت مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور، پس از خارج شدن نمونه‌ها از حالت انجماد، از هر یک از آنها ۲۶ گرم خمیر با ۱۷۷ میلی‌لیتر سو استات سرب (Lead (II) hydroxide acetate) به مدت سه دقیقه در داخل همزن مخلوط گردید. پس از گذراندن محلول از صافی، مایع شفافی حاصل شد که با استفاده از دستگاه بتالایزر (Betalyser) درصد قند ناخالص، نیتروژن آمینه و عنصرهای سدیم و پتاسیم نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (Kunz *et al.*, 2002) و در نهایت از مقادیر به‌دست‌آمده برای این ویژگی‌ها، جهت برآورد عملکرد شکر سفید به ترتیب بر اساس روابط ۱ تا ۴ استفاده شد (Cooke and Scott, 1993; Reinfeld *et al.*, 1974):

رابطه ۱: $$SY = SC \times RY$$

رابطه ۲: $$MS = 0.343(K^{+} + Na^{+}) + 0.094(alpha\ amino\ N) - 0.31$$

رابطه ۳: $$WSC = SC - (MS + 0.6)$$

رابطه ۴: $$WSY = WSC \times RY$$

در این روابط، SY (Sugar yield) عملکرد شکر ناخالص برحسب تن در هکتار، SC (Sugar content) درصد قند ناخالص، RY (Root yield) عملکرد ریشه برحسب تن در هکتار، MS (Molasses sugar content) درصد قند ملاس، K^{+} پتاسیم برحسب میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه، Na^{+} سدیم برحسب میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه، *alpha amino* N نیتروژن آمینه برحسب میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه، WSC (White sugar conten) درصد قند خالص و WSY (White sugar yield) عملکرد شکر سفید برحسب تن در هکتار است.

تجزیه آماری

پیش از انجام تجزیه واریانس مرکب، نرمال بودن داده‌ها با آزمون شاپیرو-ویلک و همگنی واریانس خطای آزمایشی در ۱۰ آزمایش (پنج مکان در دو سال زراعی) با استفاده از آزمون بارتلت (Bartlett, 1937) در سطح احتمال پنج درصد تأیید شد. در مدل تجزیه واریانس مرکب، اثر سال به‌عنوان اثر تصادفی و اثر مکان و اثر ژنوتیپ به‌عنوان اثر ثابت منظور شدند. مقایسه میانگین برهمکنش مکان × ژنوتیپ با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

با توجه به تصادفی بودن سال و تکرارناپذیری ترکیب‌های خاص سال در مکان، به‌منظور تفکیک ساختار برهمکنش ژنوتیپ × محیط و ارزیابی سازگاری محیطی، تجزیه‌های مدل AMMI (Gauch, 1992) و GGE biplot بر پایه میانگین دوساله پنج مکان آزمایشی (با در نظر گرفتن ژنوتیپ‌ها و مکآنها به‌عنوان اثرات ثابت) و با استفاده از بسته metan در نرم‌افزار R اجرا گردید. برای انجام تجزیه پایداری به روش AMMI از رابطه ۵ استفاده شد:

رابطه ۵: $$Y_{ger} = \mu + \alpha_g + \beta_e + \sum_n \lambda_n \alpha_{gn} \gamma_{en} + \rho_{ge} + \varepsilon_{ge}$$

در این رابطه، Y_{ger} عملکرد ژنوتیپ gام در محیط eام در تکرار rام، μ میانگین کل آزمایش، α_g و β_e به‌ترتیب اثرات اصلی ژنوتیپ و محیط، λ_n مقدار ویژه برای محور مؤلفه اصلی nام، α_{gn} بردار ویژه ژنوتیپ برای محور gام از n مؤلفه اصلی برهمکنش، γ_{en} بردار ویژه محیط برای

محور eام از n مؤلفه اصلی برهمکنش، ρ_{ge} مقدار باقی‌مانده و ε_{ge} مربوط به خطا است. با انجام تجزیه واریانس AMMI مقادیر مؤلفه‌های اصلی برای هر ژنوتیپ و محیط به دست آمد و سازگاری عمومی و خصوصی ژنوتیپ‌ها تعیین شد. در این مطالعه از آماره ارزش پایداری به‌دست‌آمده از مدل AMMI برای شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد پایدار بر اساس رابطه ۶ استفاده شد:

$$ASV_i = \sqrt{\left[\frac{SS_{IPCA1}}{SS_{IPCA2}}(IPCA1_i)\right]^2 + (IPCA2_i)^2} \qquad \text{رابطه ۶:}$$

در این رابطه، ASV_i ارزش پایداری AMMI برای ژنوتیپ iام، SS_{IPCA1} مجموع مربعات مؤلفه اصلی اول برهمکنش، SS_{IPCA2} مجموع مربعات مؤلفه اصلی دوم برهمکنش، $IPCA1_i$ امتیاز ژنوتیپ iام در مؤلفه اصلی اول و $IPCA2_i$ امتیاز ژنوتیپ iام در مؤلفه اصلی دوم برهمکنش است.

برای مصورسازی الگوهای سازگاری ژنوتیپ‌ها و طبقه‌بندی محیط‌ها، روش GGE biplot بر اساس رابطه ۷ به کار برده شد (Yan and Tinker, 2006; Yan and Wu, 2008):

$$Y_{ij} - \mu - \beta_j = \lambda_1\xi_{i1}\eta_{j1} + \lambda_2\xi_{i2}\eta_{j2} + \varepsilon_{ij} \qquad \text{رابطه ۷:}$$

در این رابطه، Y_{ij} میانگین عملکرد ژنوتیپ iام در محیط jام، μ میانگین کل آزمایش، β_j اثر اصلی محیط jام (به‌طوری که مجموع $\mu + \beta_j$ برابر با میانگین عملکرد محیط jام است)، λ_1 و λ_2 مقادیر منفرد مؤلفه اصلی اول و دوم، ξ_{i1} و ξ_{i2} بردارهای ویژه ژنوتیپ iام برای مؤلفه اول و دوم، η_{j1} و η_{j2} بردارهای ویژه محیط jام برای مؤلفه اول و دوم و ε_{ij} باقیمانده مدل برای ژنوتیپ iام در محیط jام می‌باشد. با بهره‌گیری از نمودار چندضلعی بای‌پلات، ارقام مستقر در رأس‌های چندضلعی به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر در بخش‌های مربوطه تعیین شدند و امکان تفکیک محیط‌ها به ابرمحیط‌های محتمل فراهم آمد. همچنین با استفاده از نمودار میانگین در برابر پایداری و ترسیم محور مختصات محیط میانگین، عملکرد متوسط ژنوتیپ‌ها در امتداد محور افقی و درجه ناپایداری آنها بر مبنای طول خطوط عمود بر این محور مورد سنجش قرار گرفت تا ارقام با عملکرد بالا و پایداری مطلوب شناسایی شوند.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس مرکب و مقایسه میانگین

تجزیه واریانس مرکب داده‌ها برای عملکرد شکر سفید نشان داد که اثر اصلی سال و ژنوتیپ، و برهمکنش سال × مکان، ژنوتیپ × سال و ژنوتیپ × مکان و همچنین برهمکنش سه‌گانه

ژنوتیپ × سال × مکان در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد معنی‌دار بودند (جدول ۳). معنی‌دار شدن برهمکنش ژنوتیپ × مکان در سطح احتمال پنج درصد مؤید واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها نسبت به ویژگی‌های اقلیمی و خاک ایستگاه‌های تحقیقاتی محل اجرای آزمایش بود.

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب عملکرد شکر سفید ژنوتیپ‌های چغندرقند در دو فصل زراعی ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴

Table 3. Combined analysis of variance for white sugar yield of sugar beet genotypes in 2024 and 2025 cropping seasons

S.O.V.	منبع تغییرات	درجه آزادی d.f.	میانگین مربعات Mean squares
Year (Y)	سال	1	121.72**
Location (L)	مکان	4	267.04
Y × L	سال × مکان	4	126.27**
Error 1	خطای ۱	30	5.05
Genotype (G)	ژنوتیپ	8	103.23**
G × Y	ژنوتیپ × سال	8	5.24*
G × L	ژنوتیپ × مکان	32	14.22*
G × Y × L	ژنوتیپ × سال × مکان	32	6.66**
Error 2	خطای ۲	240	2.40

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

* and **: Significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

علاوه بر این، معنی‌دار شدن برهمکنش سه‌گانه در سطح احتمال یک درصد نشان داد که پاسخ ژنوتیپ‌ها به شرایط هر منطقه در دو سال زراعی نیز ثابت نبود و تحت تأثیر نوسانات سالانه قرار داشت. از آنجا که سال به‌عنوان یک عامل تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی در مدل آماری محسوب می‌شود و ترکیب‌های خاص سال و مکان در شرایط زراعی آینده تکرارپذیر نیستند، مقایسه میانگین برهمکنش‌های دربرگیرنده سال فاقد ارزش کاربردی در برنامه‌های بهنژادی برای انتخاب، نامگذاری و آزادسازی ارقام جدید است. بر همین اساس و با توجه به معنی‌دار شدن برهمکنش ژنوتیپ × مکان ، مقایسه میانگین‌ها بر پایه ترکیب‌های ثابت ژنوتیپ × مکان متمرکز شد.

مقایسه میانگین‌های برهمکنش ژنوتیپ × مکان طیف گسترده‌ای از واکنش‌های ژنوتیپی شامل سازگاری عمومی و سازگاری خصوصی را در میان مواد بررسی‌شده آشکار ساخت (جدول ۴). در ایستگاه میاندوآب، رقم شاهد خارجی BTS2015N با ۱۶/۱۳ تن در هکتار بیشترین عملکرد شکر سفید را داشت و تفاوت معنی‌داری با ژنوتیپ‌های داخلی در همین ایستگاه نشان داد، ولی عملکرد شکر سفید همین رقم در ایستگاه شیراز با کاهش حدود ۳۲ درصد بالغ بر ۱۰/۹۶ تن در هکتار بود که نشان‌دهنده حساسیت آن به شرایط آب و هوایی و خاک و در این مکان بود (جدول ۴).

جدول ۴- مقایسه میانگین برهمکنش ژنوتیپ × مکان برای عملکرد شکر سفید (تن در هکتار) در ژنوتیپ‌های چغندرقند در دو فصل زراعی

Table 4. Mean comparison of genotype × location interaction for white sugar yield (t ha^{-1}) in sugar beet genotypes in two cropping seasons

Genotype	ژنوتیپ	کرج Karaj	شیراز Shiraz	میاندوآب Miandoab	کرمانشاه Kermanshah	خوی Khoy
SBSI 241	-	9.88	8.49	8.25	12.64	12.40
SBSI 242	-	8.41	8.48	6.51	14.57	11.65
SBSI 243	-	8.65	8.48	7.11	12.15	10.72
SBSI 244	-	9.56	8.40	8.72	13.29	11.91
Yalda	یلدا	8.77	8.11	6.51	12.19	11.40
Ziba	زیبا	11.15	8.48	6.26	12.59	10.82
Nika	نیکا	7.40	8.95	5.30	9.85	7.79
Bifort	-	11.86	9.25	11.15	13.49	14.39
BTS2015N	-	12.77	10.96	16.13	14.93	13.33
LSD 5%				2.628		

رقم شاهد خارجی Bifort نیز الگوی بارزی از سازگاری خصوصی را به اقلیم‌های سردسیر شمال‌غرب و غرب کشور نشان داد، به‌گونه‌ای که در ایستگاه خوی با تولید ۱۴/۳۹ تن در هکتار شکر سفید رتبه نخست منطقه را به خود اختصاص داد و در کرمانشاه (۱۳/۴۹ تن در هکتار) نیز عملکرد شکر سفید آن بالایی بود، در حالی که در ایستگاه شیراز عملکرد شکر سفید آن به ۹/۲۵ تن در هکتار کاهش یافت (جدول ۴). رتبه‌های بالا برای عملکرد شکر سفید این دو رقم شاهد در ایستگاه‌های میاندوآب، کرمانشاه و خوی در غرب کشور بیانگر ظرفیت ژنتیکی بالای آنها در بهره‌برداری از شرایط بهینه اقلیمی و مدیریت زراعی ایستگاه‌های مذکور است. از این‌رو، این ارقام از منظر به‌نژادی واجد سازگاری خصوصی برای بهره‌برداری هدفمند در مناطق مستعد و سردسیر محسوب می‌شوند.

در میان هیبریدهای امیدبخش داخلی، هیبرید SBSI 242 نمونه برجسته‌ای از سازگاری خصوصی در محیط‌های مساعد نشان داد. این هیبرید در ایستگاه کرمانشاه با میانگین ۱۴/۵۷ تن در هکتار نه تنها از شاهدهای تجاری داخلی پیشی گرفت، بلکه هم‌سطح با رقم شاهد BTS2015N (۱۴/۹۳ تن در هکتار) بود و پس از آن بیشترین عملکرد شکر سفید را در ایستگاه خوی (۱۱/۶۵ تن در هکتار) تولید کرد (جدول ۴). با این حال، کاهش شدید عملکرد این هیبرید در ایستگاه میاندوآب (۶/۵۱ تن در هکتار) تأیید می‌کند که SBSI 242 تنها برای اقلیم‌هایی با شرایط رشد مشابه کرمانشاه و خوی سازگاری خصوصی دارد و توصیه آن به مناطق دیگر با خطر کاهش محصول همراه خواهد بود.

در نقطه مقابل، هیبریدهای امیدبخش SBSI 244 و SBSI 241 عملکرد شکر سفید متعادل‌تر و

پایدارتر را در ایستگاه‌ها مورد مطالعه داشتند. در ایستگاه‌های کرمانشاه و خوی، این دو هیبرید با تولید حدود ۱۱/۹۱ تا ۱۳/۲۹ تن در هکتار شکر سفید برتر بودند و از شاهدهای داخلی یلدا، زیبا و نیکا پیشی گرفتند (جدول ۴). همچنین در شرایط ایستگاه میاندوآب که عملکرد شکر سفید اغلب ارقام داخلی نظیر نیکا (۵/۳۰ تن در هکتار) و زیبا (۶/۲۶ تن در هکتار) به شدت کاهش یافت، هیبریدهای SBSI 244 (۸/۷۲ تن در هکتار) و SBSI 241 (۸/۲۵ تن در هکتار) به‌ترتیب بالاترین عملکرد شکر سفید در میان ژنوتیپ‌های داخلی را حفظ کردند. در ایستگاه کرج رقم شاهد زیبا (۱۱/۱۵ تن در هکتار) و در ایستگاه شیراز رقم نیکا (۸/۹۵ تن در هکتار) در بین شاهدهای داخلی عملکرد شکر سفید قابل توجهی نشان دادند، اما نوسان شدید عملکرد آنها در سایر ایستگاه‌ها مانع از سازگاری عمومی آنها شد (جدول ۴).

با توجه به معنی‌دار شدن برهمکنش‌های دوگانه و سه‌گانه و دشواری تفکیک هم‌زمان پتانسیل عملکرد و پایداری آن از طریق جدول مقایسه میانگین‌ها به‌تنهایی، ساختار برهمکنش و الگوی پایداری عملکرد شکر سفید ژنوتیپ‌ها با بهره‌گیری از مدل‌های چندمتغیره AMMI و GGE biplot مورد واکاوی دقیق‌تر قرار گرفت.

تجزیه پایداری بر اساس مدل AMMI

تجزیه واریانس با استفاده از مدل AMMI بر اساس میانگین پنج مکان در دوسال نشان داد که اثر اصلی محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند (جدول ۵). از مجموع مربعات کل، محیط با اختصاص ۳۵/۵۲ درصد بیشترین سهم را در ایجاد تغییرات فنوتیپی داشت و پس از آن ژنوتیپ با ۳۰/۸۸ درصد و برهمکنش ژنوتیپ × محیط با ۱۶ درصد در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. بالا بودن سهم واریانس محیطی بیانگر تنوع شرایط آب و هوایی و خاک ایستگاه‌های تحقیقاتی مورد آزمایش بود. معنی‌دار شدن برهمکنش ژنوتیپ × محیط نیز حاکی از واکنش متفاوت ژنوتیپ‌های چغندرقند مورد مطالعه در مواجهه با شرایط متغیر محیطی و تغییر در رتبه‌بندی آنها در ایستگاه‌های تحقیقاتی مختلف بود. این نتایج با یافته‌های صادق‌زاده حمایتی و همکاران (Sadeghzadeh Hemayati *et al*., 2022) و طالقانی و همکاران (Taleghani *et al*., 2023; Taleghani *et al*., 2026) در بررسی ارقام تجاری چغندرقند مطابقت دارد که در مطالعات آنها نیز بخش عمده‌ای از نوسانات عملکرد شکر به محیط و برهمکنش ژنوتیپ × محیط نسبت داده شد.

تجزیه اثر برهمکنش ژنوتیپ × محیط به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که دو مؤلفه نخست در سطح احتمال یک درصد و مؤلفه سوم در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شدند، در حالی که سایر مؤلفه‌ها فاقد معنی‌داری آماری بودند و در قالب باقیمانده برهمکنش تجمیع شدند (جدول ۵). مؤلفه اصلی اول برهمکنش به‌تنهایی ۶۲/۳۰ درصد و مؤلفه اصلی دوم ۲۱/۴۰ درصد از واریانس برهمکنش را تبیین کردند. بدین ترتیب، دو مؤلفه اول در مجموع ۸۳/۸۰ درصد از تغییرات

جدول ۵- تجزیه واریانس با استفاده از مدل AMMI برای عملکرد شکر سفید ژنوتیپ‌های چغندرقند بر اساس میانگین پنج مکان در دو فصل زراعی

Table 5. Analysis of variance using the AMMI model for white sugar yield of sugar beet genotypes based on the means of five experimental station in across two cropping seasons

S.O.V.	منبع تغییرات	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares	واریانس تبیین‌شده (٪) Explained (%)	واریانس تجمعی (٪) Cumulative (%)
Environment (E)	محیط	4	126.37**	-	-
Error 1	خطای ۱	15	6.07	-	-
Genotype (G)	ژنوتیپ	8	54.93**	-	-
G × E	ژنوتیپ × محیط	32	7.12**	-	-
$IPCA_1$	مؤلفه اصلی اول	11	12.90**	62.30	62.30
$IPCA_2$	مؤلفه اصلی دوم	9	5.42**	21.40	83.80
$IPCA_3$	مؤلفه اصلی سوم	7	3.84*	11.80	95.60
Interaction residual	باقیمانده برهمکنش	5	2.02	4.40	100.00
Error 2	خطای ۲	120	1.74	-	-

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

* and **: Significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

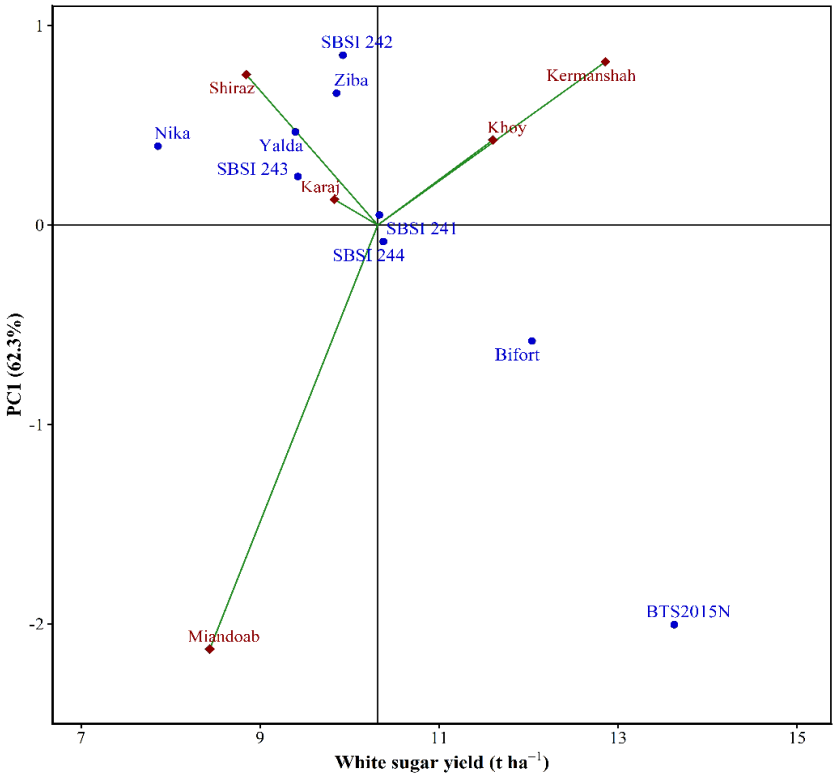
برهمکنش را توضیح دادند که با احتساب مؤلفه سوم، این میزان به ۹۵/۶۰ درصد رسید (جدول ۵). عدم معنی‌دار شدن باقیمانده برهمکنش با ۴/۴۰ درصد واریانس، نشان‌دهنده دقت و برازش مناسب مدل AMMI در تفکیک الگوهای ساختاریافته برهمکنش از خطای تصادفی بود. توجیه بیش ازچهارپنجم از واریانس برهمکنش ژنوتیپ × محیط توسط دو مؤلفه اول، نتایج را از دیدگاه آماری کاملاً معتبر می‌کند. این یافته با نتایج حسنی و همکاران (Hassani *et al.*, 2024) و طالقانی و همکاران (Taleghani *et al.*, 2026) از نظر توجیه بخش بیشتر تغییرات برهمکنش ژنوتیپ × محیط توسط دو مؤلفه اول همخوانی دارد.

میانگین عملکرد شکر سفید ژنوتیپ‌ها در گستره پنج محیط آزمایشی بین ۷/۸۶ تن در هکتار در رقم نیکا تا ۱۳/۶۳ تن در هکتار در رقم BTS2015N متغیر بود (جدول ۶ و شکل ۱). در میان ژنوتیپ‌های داخلی، هیبرید SBSI 244 با ۱۰/۳۸ تن در هکتار و هیبرید SBSI 241 با ۱۰/۳۳ تن در هکتار به ترتیب بیشترین عملکرد شکر سفید را به خود اختصاص دادند و از شاهدهای تجاری داخلی شامل زیبا با ۹/۸۵ تن در هکتار، یلدا با ۹/۳۹ تن در هکتار و نیکا با ۷/۸۶ تن در هکتار برتر بودند (جدول ۶).

ارزیابی بای‌پلات AMMI1 (شکل ۱) و AMMI2 (شکل ۲) نشان داد که هیبریدهای SBSI 241 و SBSI 244 با استقرار در نزدیکی مبدأ مختصات، کمترین حساسیت را نسبت به نوسانات محیطی نشان دادند. در مقابل، رقم BTS2015N با بیشترین امتیاز در مؤلفه اول (۲-)، رقم نیکا با بیشترین امتیاز در مؤلفه دوم (۱/۵۱) و هیبرید SBSI 242 (با امتیازهای ۰/۸۵ و ۰/۵۰-)

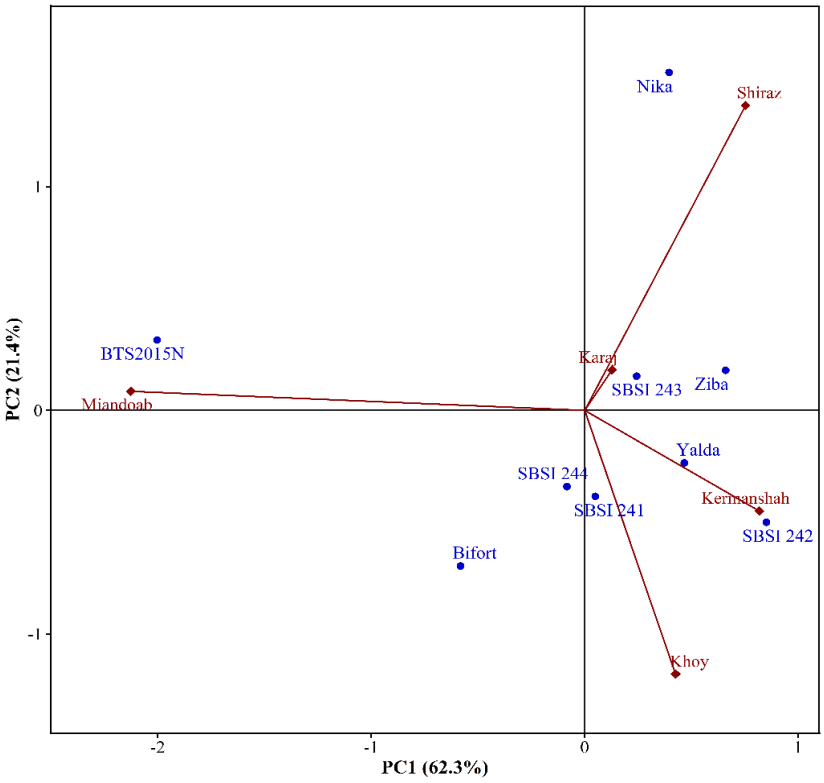
بیشترین فاصله را از مبدأ مختصات داشتند که نشان‌دهنده واکنش بالای به شرایط محیطی و نقش زیاد آنها در ایجاد برهمکنش بود (شکل ۲). بر اساس مدل AMMI، ژنوتیپ‌هایی که مقادیر مؤلفه برهمکنش آنها نزدیک به صفر است دارای عملکرد پایدار در محیط‌های مختلف هستند، در حالی که امتیاز بالا حاکی از ناپایداری یا سازگاری خصوصی است (Gauch, 1992; Gauch, 2013).

محاسبه ارزش پایداری AMMI (AMMI stability value) امکان رتبه‌بندی دقیق پایداری عملکرد شکر سفید ژنوتیپ‌ها را فراهم ساخت. بر این اساس، هیبریدهای SBSI 241 و SBSI 244 به ترتیب با کمترین مقادیر عددی این شاخص (۰/۴۱ و ۰/۴۲) رتبه‌های اول و دوم پایداری عملکرد را به دست آوردند و به ترتیب پایدارترین ژنوتیپ‌های آزمایش از نظر عملکرد شکر سفید شناخته شدند (جدول ۶). پس از آن، هیبرید SBSI 243 (۰/۷۲) و رقم شاهد یلدا (۱/۳۸) در جایگاه‌های سوم و چهارم قرار گرفتند. رقم شاهد خارجی Bifort (۱/۸۳) با حذف نوسانات سالانه



شکل ۱- بای‌پلات (AMMI1) عملکرد شکر سفید در برابر مؤلفه اصلی اول برهمکنش ژنوتیپ × محیط برای ژنوتیپ‌های چغندرقند با استفاده از میانگین پنج مکان آزمایشی در دو فصل زراعی

Fig. 1. Biplot (AMMI1) of white sugar yield versus the first principal component of genotype × environment interaction sugar beet genotypes using means of five experimental locations in two cropping seasons



شکل ۲- بای‌پلات (AMMI2) مؤلفه اصلی اول در برابر مؤلفه اصلی دوم برهمکنش ژنوتیپ × محیط برای ژنوتیپ‌های چغندرقند با استفاده از میانگین عملکرد شکر سفید پنج مکان آزمایشی در دو فصل زراعی

Fig. 2. Biplot (AMMI2) of IPCA1 versus IPCA2 of genotype × environment interaction for sugar beet genotypes using means of five experimental locations in two cropping seasons

در رتبه پنجم پایداری عملکرد شکر سفید جای گرفت، و پس از آن ارقام نیکا (۱/۹۰) و زیبا (۱/۹۳) قرار داشتند، در حالی که هیبرید SBSI 242 (۲/۵۳) و رقم BTS2015N (۵/۸۴) به دلیل برهمکنش بالای محیطی، در رتبه‌های هشتم و نهم پایداری قرار گرفتند.

تلفیق رتبه‌های پایداری و عملکرد شکر سفید در قالب شاخص گزینش ژنوتیپ نشان داد که هر دو هیبرید SBSI 244 و SBSI 241 به‌طور مشترک با کسب کمترین مقدار این شاخص (۵)، مطلوب‌ترین تعادل را میان عملکرد بالا و پایداری عملکرد برقرار کردند. در میان شاهدهای خارجی، رقم Bifort با شاخص گزینش ۷ عملکرد شکر سفید و ثبات محیطی قابل قبولی نشان داد، اما رقم BTS2015N با وجود رتبه نخست عملکرد، به دلیل ناپایداری عملکرد به شاخص گزینش ۱۰ تنزل یافت.

این امر نشان می‌دهد که اتکای صرف به میانگین عملکرد در آزمایش‌های چندمحیطی برای توصیه عمومی گمراه‌کننده است و در برنامه‌های به‌نژادی، انتخاب ژنوتیپ‌هایی نظیر هیبریدهای SBSI 244 و SBSI 241 که

دارای عملکرد و پایداری عملکرد بالا هستند، خطر تولید را به حداقل می‌رساند، رویکردی که در مطالعات صادق‌زاده حمایتی و همکاران (Sadeghzadeh Hemayati *et al.*, 2022) و فرشادفر (Farshadfar, 2008) نیز بر آن تأکید شده است.

جدول ۶- مقادیر ارزش پایداری AMMI، رتبه‌بندی عملکرد، رتبه‌بندی پایداری و شاخص گزینش ژنوتیپ برای ژنوتیپ‌های چغند قند

Table 6. AMMI stability value, yield ranking, stability ranking, and genotype selection index for sugar beet genotypes

Genotype	ژنوتیپ	میانگین عملکرد شکر سفید (تن در هکتار) Mean white sugar yield (t ha^{-1})	رتبه عملکرد Rank yield	ارزش پایداری AMMI AMMI stability value	رتبه پایداری Rank stability	شاخص گزینش ژنوتیپ Genotype selection index
SBSI 241	-	10.33	4	0.41	1	5
SBSI 242	-	9.92	5	2.53	8	13
SBSI 243	-	9.42	7	0.72	3	10
SBSI 244	-	10.38	3	0.42	2	5
Yalda	یلدا	9.39	8	1.38	4	12
Ziba	زیبا	9.85	6	1.93	7	13
Nika	نیکا	7.86	9	1.90	6	15
Bifort	-	12.04	2	1.83	5	7
BTS2015N	-	13.63	1	5.84	9	10

میانگین عملکرد شکر سفید در مکآنهای آزمایشی از ۸/۴۴ تن در هکتار در میاندوآب تا ۱۲/۸۶ تن در هکتار در کرمانشاه متغیر بود (جدول ۷). ایستگاه‌های کرمانشاه (۱۲/۸۶ تن در هکتار) و خوی (۱۱/۶۰ تن در هکتار) به‌عنوان مناطق مساعد با بالاترین ظرفیت تولید شناسایی شدند، در حالی که ایستگاه‌های شیراز (۸/۸۴ تن در هکتار) و میاندوآب (۸/۴۴ تن در هکتار) دارای شرایط محدودکننده تولید ناشی از وقوع تنش گرمایی و محدودیت‌های آبیاری در مرحله توسعه ریشه بودند.

بررسی چهار ژنوتیپ برتر چغندر قند مورد مطالعه در هر محیط نشان داد که ارقام شاهد BTS2015N و Bifort در هر پنج مکان آزمایشی در جمع سه ژنوتیپ نخست قرار داشتند، به‌طوری که BTS2015N در ایستگاه‌های میاندوآب (۱۶/۱۳ تن در هکتار)، کرمانشاه (۱۴/۹۴ تن در هکتار)، کرج (۱۲/۷۷ تن در هکتار) و شیراز (۱۰/۹۶ تن در هکتار) رتبه اول و Bifort در ایستگاه خوی (۱۴/۳۹ تن در هکتار) رتبه نخست را کسب کرد (جدول ۷). در میان هیبریدهای جدید داخلی، هیبرید SBSI 241 در چهار مکان (خوی، کرج، شیراز و میاندوآب) و هیبرید SBSI 244 در سه مکان (کرمانشاه، خوی و میاندوآب) در جمع چهار ژنوتیپ برتر جای گرفتند.

جدول ۷- چهار ژنوتیپ برتر چغندر قند از نظر میانگین عملکرد شکر سفید (تن در هکتار) در هر یک از محیط‌های آزمایشی در دو فصل زراعی بر اساس مدل AMMI

Table 7. The four top sugar beet genotypes in each experimental environments in two cropping seasonsbased on white sugar yield (t ha^{-1}) and AMMI model

محیط Environment		میانگین عملکرد شکر سفید Mean white sugar yield	رتبه اول Rank 1	رتبه دوم Rank 2	رتبه سوم Rank 3	رتبه چهارم Rank 4
Kermanshah	کرمانشاه	12.86	BTS2015N (14.94)	SBSI 242 (14.57)	Bifort (13.53)	SBSI 244 (13.29)
Khoy	خوی	11.60	Bifort (14.39)	BTS2015N (13.33)	SBSI 241 (12.40)	SBSI 244 (11.91)
Karaj	کرج	9.83	BTS2015N (12.77)	Bifort (11.86)	Ziba/ زیبا (11.15)	SBSI 241 (9.88)
Shiraz	شیراز	8.84	BTS2015N (10.96)	Bifort (9.25)	Nika/ نیکا (8.95)	SBSI 241 (8.49)
Miandoab	میاندوآب	8.44	BTS2015N (16.13)	Bifort (11.15)	SBSI 244 (8.72)	SBSI 241 (8.25)

اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده میانگین عملکرد شکر سفید (تن در هکتار) ژنوتیپ در محیط مربوطه می‌باشد.

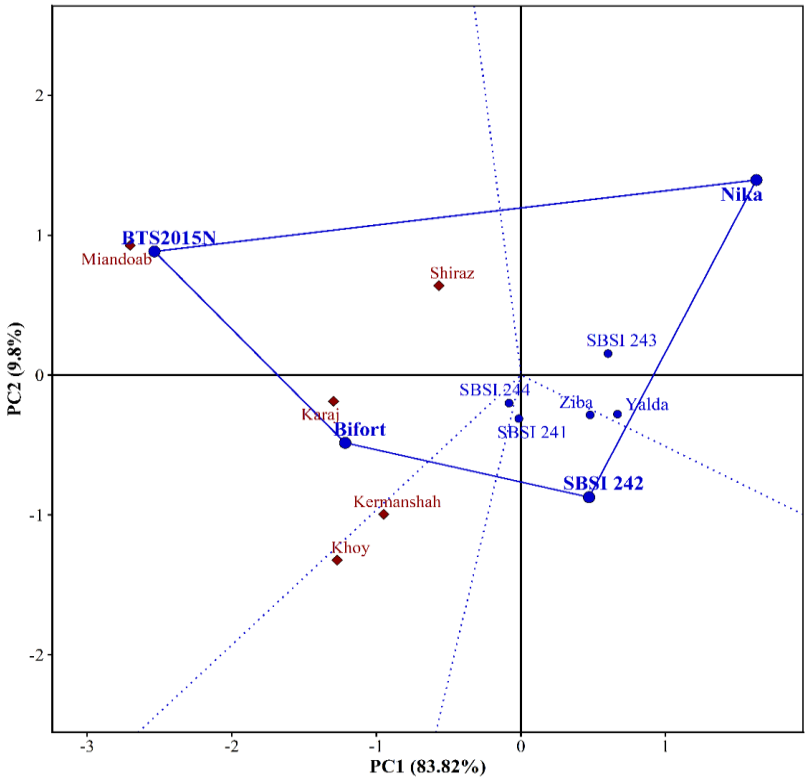
Values in parentheses indicate the mean white sugar yield (t ha^{-1}) of the genotype in the respective environment.

علاوه بر این، در ایستگاه کرمانشاه، هیبرید SBSI 242 با عملکرد ۱۴/۵۷ تن در هکتار شکر سفید پس از BTS2015N در جایگاه دوم قرار گرفت و از رقم Bifort و تمامی شاهدهای داخلی پیشی گرفت. حضور مستمر هیبریدهای SBSI 244 و SBSI 241 در رتبه‌های برتر مناطق مختلف، مؤید سازگاری عمومی بالای این ژنوتیپ‌ها با طیف متنوعی از شرایط محیطی کشور است. از سوی دیگر، بای‌پلات AMMI2 (شکل ۲) روابط سازگاری خصوصی ژنوتیپ‌ها را به‌روشنی تبیین کرد. استقرار مستقیم هیبرید SBSI 242 در مجاورت بردار ایستگاه کرمانشاه مؤید سازگاری خصوصی موفق این هیبرید به اقلیم غرب کشور است. همچنین هم‌جهتی قوی رقم BTS2015N با بردار میاندوآب، هم‌راستایی رقم Bifort با ایستگاه خوی و نزدیکی رقم نیکا به بردار شیراز (رتبه سوم با ۸/۹۵ تن در هکتار)، همگی بیانگر سازگاری خصوصی این ارقام با شرایط محیطی ایستگاه‌های مذکور است، در حالی که ایستگاه کرج با کوتاه‌ترین بردار محیطی، کمترین سهم را در تفکیک برهمکنش ایفا کرد.

تجزیه پایداری بر اساس مدل GGE biplot

نمودار چندضلعی GGE biplot، بر مبنای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ترسیم شد (شکل ۳). دو مؤلفه اول در مجموع ۹۳/۶۲ درصد از کل تغییرات ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط را توجیه کردند که سهم مؤلفه اول ۸۳/۸۲ درصد و سهم مؤلفه دوم ۹/۸۰ درصد بود. بالاتر بودن سهم تبیین‌شده توسط دو مؤلفه اول در مدل GGE

biplot نسبت به مدل AMMI (۸۳/۸۰ درصد)، ناشی از تفاوت ماهیت ماتریس داده‌ها در این دو مدل بود. در مدل AMMI تجزیه به مقادیر منفرد صرفاً بر روی باقیمانده برهمکنش ژنوتیپ × محیط اجرا می‌شود، در حالی که در مدل GGE biplot، این تجزیه بر مجموع اثر اصلی ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط (G + GE) صورت می‌گیرد و بخش عمده‌ای از واریانس ژنوتیپی توسط مؤلفه اول جذب می‌گردد (Yan *et al.*, 2007). علاوه بر تبیین بالای تغییرات، انطباق دقیق موقعیت و رتبه‌بندی ارقام در بای‌پلات با مقادیر واقعی عملکرد (جدول ۴ و جدول ۷)، مؤید اعتبار و دقت بالای مدل در انعکاس واکنش فنوتیپی ارقام است.



شکل ۳- نمودار چندضلعی GGE biplot برای شناسایی ابرمحیط‌ها و ژنوتیپ‌های برتر چغندرقند از نظر عملکرد شکر سفید بر اساس میانگین پنج مکان آزمایشی در دو فصل زراعی

Fig. 3. Polygon view of the GGE biplot for identifying mega-environments and winning sugar beet genotypes for white sugar yield based on means of five experimental locations in two ccropping seasons

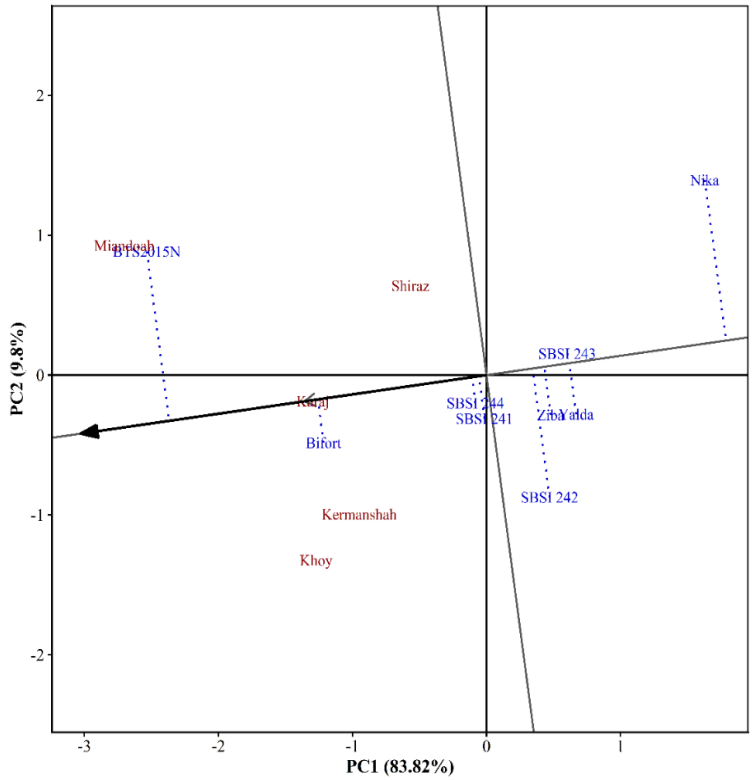
نمودار چندضلعی GGE biplot با اتصال دورترین ژنوتیپ‌ها از مبدأ مختصات شامل BTS2015N، Bifort، SBSI 242 و نیکا تشکیل شد و خطوط عمود بر اضلاع، فضای بای‌پلات را

به بخش‌های مجزا تقسیم کردند. ژنوتیپ‌های مستقر در رئوس چندضلعی، ارقامی هستند که در محیط‌های واقع در آن بخش بالاترین عملکرد شکر سفید یا بیشترین واکنش‌پذیری را نشان داده‌اند. محیط‌های آزمایشی در این چندضلعی به دو ابرمحیط متمایز تفکیک شدند. ایستگاه‌های خوی و کرمانشاه در بخشی (محدوده میان خطوط عمود بر اضلاع BTS2015N–Bifort و Bifort–SBSI 242) قرار گرفتند که از نظر هندسی متعلق به رأس مشترک این دو ضلع یعنی رقم Bifort است، این امر پتانسیل بالای عملکرد سفید این رقم در اقلیم‌های شمال‌غرب و غرب کشور به‌ویژه کسب رتبه نخست در خوی (۱۴/۳۹ تن در هکتار) را بازتاب می‌دهد (جدول ۷).

محیط‌های میاندوآب، شیراز و کرج در بخش متعلق به رقم BTS2015N واقع شدند که دقیقاً منطبق بر رتبه اول این رقم در هر سه ایستگاه مذکور بود. هیبرید SBSI 242 و رقم شاهد نیکا در رئوسی مستقر شدند که هیچ محیطی در آن بخش قرار نگرفت. این وضعیت بیانگر آن است که این دو ژنوتیپ در مقیاس ابرمحیطی به‌عنوان ژنوتیپ برنده برتری نداشت (Yan *et al.*, 2007)، هرچند همان‌گونه که در جداول ۴ و ۷ مشاهده شد، هیبرید SBSI 242 در کرمانشاه و رقم نیکا در شیراز عملکرد شکر سفید بالا و سازگاری خصوصی قابل توجهی نشان دادند. هیبریدهای SBSI 244 و SBSI 241 که در بخش‌های درونی چندضلعی و نزدیک به مرکز تجمع یافته‌اند، واکنش‌های شدید به محیط‌های خاص نشان ندادند و دارای سازگاری عمومی در گستره محیط‌های مورد مطالعه بودند (شکل ۴).

نمودار میانگین در برابر پایداری GGE biplot با استفاده از محور مختصات محیط میانگین (Average Environment Coordination = AEC)، ارزیابی هم‌زمان عملکرد شکر سفید و پایداری عملکرد ارقام را به تصویر کشید (شکل ۴). خط اریب که از مبدأ مختصات گذشته و با علامت پیکان مشخص شده، محور میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها را نشان می‌دهد و جهت پیکان به سمت افزایش عملکرد شکر سفید است. خط عمود بر این محور در مبدأ مختصات، ژنوتیپ‌ها را بر مبنای میانگین کل عملکرد (۱۰/۳۱ تن در هکتار) تفکیک می‌کند. بر این اساس، ارقام شاهد خارجی BTS2015N و Bifort و هیبریدهای امیدبخش SBSI 244 و SBSI 241 با استقرار در سمت چپ این خط (در جهت پیکان)، عملکردهایی بالاتر از میانگین کل آزمایش نشان دادند. در حالی که هیبرید SBSI 242 و ارقام شاهد داخلی (زیبا، یلدا و نیکا) به همراه هیبرید SBSI 243 در سمت راست خط عمودی واقع شده‌اند و عملکرد شکر سفید آنها کمتر از میانگین کل بود (شکل ۴).

میزان پایداری عملکرد شکر سفید ژنوتیپ‌ها در این نمودار بر اساس طول خطوط عمود بر محور افقی سنجیده می‌شود، به‌طوری که فاصله عمودی کمتر نشان‌دهنده پایداری بیشتر است (Yan and Tinker, 2006). بررسی موقعیت ارقام نشان داد که هیبریدهای منوژرم SBSI 244



شکل ۴- نمودار GGE biplot میانگین عملکرد شکر سفید در برابر پایداری عملکرد بر اساس محور مختصات محیط میانگین برای ژنوتیپ‌های چغندرقند بر اساس میانگین پنج مکان آزمایشی در دو فصل زراعی

Fig. 4. GGE biplot of mean white sugar yield versus yield stability based on the average environment coordination (AEC) axis for sugar beet genotypes based on means of five experimental locations in two cropping seasons

و SBSI 241 دارای کوتاه‌ترین تصویر عمودی بر محور مختصات محیط میانگین بوده و عملاً مماس بر محور افقی قرار گرفتند. این موقعیت، حاکی از حداقل بودن انحراف فنوتیپی و پایداری بسیار بالای این دو هیبرید در مواجهه با تغییرات محیطی است. در نقطه مقابل، رقم BTS2015N با وجود بیشترین میانگین عملکرد به همراه رقم شاهد نیکا و هیبرید SBSI 242 به دلیل داشتن فواصل عمودی قابل توجه از محور افقی، ناپایداری عملکرد بالایی را نشان دادند، در حالی که رقم Bifort دارای انحراف عمودی متوسطی از محور پایداری بود.

بر اساس الگوهای گزینشی، ژنوتیپ ایده‌آل ترکیبی از بالاترین پتانسیل عملکرد و کمترین فاصله از محور پایداری است (Kang, 2004). اگرچه ارقام خارجی به دلیل ظرفیت ژنتیکی بالا در رأس عملکرد شکر سفید قرار داشتند، اما واکنش آنها به محیط‌های خاص (مانند میاندوآب و خوی) نشان‌دهنده سازگاری خصوصی این ارقام بود و توصیه کشت آنها باید به مناطق هم اقلیم و مستعد محدود شود. در مقابل،

هیبریدهای امیدبخش SBSI 244 و SBSI 241 با تلفیق عملکرد شکر سفید برتر نسبت به شاهدهای داخلی و پایداری عملکرد بالا، نزدیک‌ترین واکنش را به مفهوم ژنوتیپ مطلوب در شرایط اکولوژیک ایران نشان دادند. هم‌خوانی این یافته‌ها با گزارش‌های صادق‌زاده حمایتی و همکاران (Sadeghzadeh Hemayati *et al*., 2022 و طالقانی و همکاران (Taleghani *et al*., 2026) مؤید کارایی گزینش هیبریدهای منوژرم بر پایه تعادل میان عملکرد شکر سفید و پایداری عملکرد آنها بود.

در ارزیابی واکنش هیبریدهای امیدبخش چغندرقند در ایستگاه‌های تحقیقاتی در مناطق مختلف کشور، نتایج این پژوهش برتری دو هیبرید منوژرم جدید SBSI 244 و SBSI 241 را در مقایسه با ارقام شاهد داخلی (زیبا، یلدا و نیکا) به اثبات رساند. همگرایی نتایج حاصل از دو مدل چندمتغیره AMMI و GGE biplot نشان داد که هر دو روش، هیبریدهای SBSI 244 و SBSI 241 را به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌های آزمایشی شناسایی کردند، به‌طوری‌که در مدل AMMI بر اساس شاخص گزینش همزمان به‌طور مشترک رتبه نخست را کسب کردند و در GGE biplot نیز با حداقل انحراف از محور مختصات محیط میانگین، در پایدارترین موقعیت از نظر عملکرد شکر سفید قرار گرفتند. با توجه به همسویی کامل نتایج این دو روش آماری در شناسایی ژنوتیپ‌های برتر، به‌کارگیری روش GGE biplot به دلیل تلفیق اثر ژنوتیپ و برهمکنش زنوتیپ × محیط در یک فضای بصری واحد و سهولت تفسیر هم‌زمان ابرمحیط‌ها، عملکرد و پایداری بدون نیاز به محاسبات شاخص‌های تکمیلی، به‌عنوان روشی ساده‌تر و کارآمدتر برای گزینش‌های معمول در برنامه‌های به‌نژادی چغندرقند پیشنهاد می‌شود.

ارزیابی واکنش ارقام شاهد خارجی (BTS2015N و Bifort) و هیبرید SBSI 242 نشان داد که این ژنوتیپ‌ها الگوی برجسته‌ای از سازگاری خصوصی را بروز دادند. به‌طوری‌که رقم BTS2015N در ابرمحیط میاندوآب، شیراز و کرج (به‌ویژه میاندوآب با ۱۶/۱۳ تن در هکتار)، رقم Bifort در ایستگاه خوی (۱۴/۳۹ تن در هکتار) و هیبرید داخلی SBSI 242 در کرمانشاه (۱۴/۵۷ تن در هکتار) عملکردهای بالایی داشتند و در صورت توصیه هدفمند در همین مناطق مستعد، پتانسیل تولید بالایی دارند. در مقابل، هیبریدهای امیدبخش SBSI 244 و SBSI 241 به دلیل تلفیق موفق عملکرد شکر سفید بیشتر از میانگین کل و پایداری عملکرد مناسب، واجد سازگاری عمومی بالا در گستره وسیعی از اقلیم‌های چغندرکاری کشور شناخته شدند و می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های مناسب جهت نامگذاری و آزادسازی به چغندرکاران و جایگزینی ارقام تجاری موجود مدنظر قرار گیرند.

سپاسگزاری

نگارندگان بدین‌وسیله از پشتیبانی و مساعدت مدیریت محترم، اعضای هیئت علمی و

کارشناسان فنی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند و همچنین از همکاری کارکنان ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی کرج، شیراز، میاندوآب، کرمانشاه و خوی که با فراهم‌سازی بسترهای زراعی، آزمایشگاهی و مساعدت در اجرای دقیق آزمایش‌های مزرعه‌ای و ارزیابی‌های ویژگی‌های کیفیت، زمینه موفقیت این پژوهش را میسر نمودند، سپاسگزاری می کنند.

عدم تعارض منافع

نگارندگان اعلام می‌دارند که هیچگونه تعارض منافعی با سایر اشخاص حقیقی/حقوقی ندارند.

References

Afshar, R.K., Nilahyane, A., Chen, C., He, H., Stevens, B.W. and Iversen, W.M. 2019. Impact of conservation tillage and nitrogen on sugar beet yield and quality. *Soil & Tillage Research, 191*, pp.216–223. DOI: 10.1016/j.still.2019.03.017

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), pp.268–282. DOI: 10.1098/rspa.1937.0109

Cooke, D.A. and Scott, R.K. 1993. *The sugar beet crop: science into practice*. Chapman & Hall Press, London. 675 pp.

Eurostat. 2023. Sugar prices increased by 61% in the EU over one year. European Commission. Available online at: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20230428-2

Farshadfar, E. 2008. Incorporation of AMMI stability value and grain yield in a single non-parametric index (GSI) in bread wheat. *Pakistan Journal of Biological Sciences, 11*(14), pp.1791–1796. DOI: 10.3923/pjbs.2008.1791.1796

Fishkis, O., Weller, J., Lehmhus, J., Pöllinger, F., Strassemeyer, J. and Koch, H.J. 2024. Ecological and economic evaluation of conventional and new weed control techniques in row crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 360*, e108786. DOI: 10.1016/j.agee.2023.108786

Gauch, H.G. 1992. *Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam. 278 pp.

Gauch, H.G. 2013. A simple protocol for AMMI analysis of yield trials. *Crop Science, 53*(5), pp.1860–1869. DOI: 10.2135/cropsci2013.04.0241

Gazdík, Z., Koprna, R., Lojková, L. and Cerkal, R. 2025. Overview of techniques for

sustainable sugar beet production. *International Journal of Plant Production, 19*(4), pp.619–625. DOI: 10.1007/s42106-025-00354-2.

Götze, P., Rücknagel, J., Wensch-Dorendorf, M., Märländer, B. and Christen, O. 2017. Crop rotation effects on yield, technological quality and yield stability of sugar beet after 45 trial years. *European Journal of Agronomy, 82*, pp.50–59. DOI: 10.1016/j.eja.2016.10.003

Hassani, M., Mahmoudi, S.B., Saremirad, A. and 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*, e23111. DOI: 10.1038/s41598-023-51061-9

Kang, M.S. 2004. Breeding: genotype by environment interaction. Pp.218–221. In: Goodman, R.M. (ed.), *Encyclopedia of Plant and Crop Science*. Marcel Dekker, New York.

Kolář, M. 2021. What are expectations for 2021/2022 sugar sales? *Listy Cukrovarnicke a Reparske, 137*, pp.5–6.

Kumar, A., Chand, P., Thapa, R.S. and Singh, T. 2021. Assessment of stability performance and GXE interaction for yield and its attributing characters in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Electronic Journal of Plant Breeding, 12*(1), pp.235–241. DOI: 10.37992/2021.1201.036

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

Panella, L. 2010. Sugar beet as an energy crop. *Sugar Tech, 12*(3), pp.288–293. DOI: 10.1007/s12355-010-0041-5

Ptak, M., Skowrońska, A., Pińkowska, H. and Krzywonos, M. 2022. Sugar beet pulp in the context of developing the concept of circular bioeconomy. *Energies, 15*(1), e175. DOI: 10.3390/en15010175

Pole, Y. 2022. European Union: Sugar semi-annual report. United States Department of Agriculture (USDA), Foreign Agricultural Service, Report No. E42022-0061. 14 pp.

Purchase, J.L., Hatting, H. and Van Deventer, C.S. 2000. Genotype × environment interaction of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in South Africa: II. Stability analysis of yield performance. *South African Journal of Plant and Soil, 17*(3), pp.101–107. DOI: 10.1080/02571862.2000.10634878

Reinfeld, E., Emmerich, A., Baumgarten, G., Winner, C. and Beiss, U. 1974. Zur Voraussage des Melassezuckers aus Rübenanalysen. *Zucker, 27*, pp.2–15.

Sadeghzadeh Hemayati, S., Saremirad, A., Hosseinpour, M., Jalilian, A., Ahmadi, M.,

Azizi, H., Hamidi, H., Hamdi, F. and 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), pp.339–364 (in Persian). DOI: 10.22092/spj.2023.362024.1305

Singh, C., Gupta, A., Gupta, V., Kumar, P., Sendhil, R., Tyagi, B., Singh, G. and Sharma, I. 2019. Genotype x environment interaction analysis of multi-environment wheat trials in India using AMMI and GGE biplot models. *Crop Breeding and Applied Biotechnology, 19*(3), pp.309–318. DOI: 10.1590/1984-70332019v19n3a43

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

Taleghani, D., Ahmadi, M., Darabi, S., Azizi, H., Mansouri, H., Saremirad, A. and Nadali, F. 2026. Pattern analysis of genotype-by-environment interaction and yield stability in promising sugar beet hybrids by additive main effects and multiplicative interaction and genotype-by-environment biplot models. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 54*, e70213. DOI: 10.1002/nzc2.70213

Wolfgang, A., Temme, N., Tilcher, R. and Berg, G. 2023. Understanding the sugar beet holobiont for sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology, 14*, 1151052. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1151052

Yan, W. and Kang, M.S. 2002. *GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists*. CRC Press, Boca Raton. 288 pp. DOI: 10.1201/9781420040371

Yan, W. and Tinker, N.A. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Canadian Journal of Plant Science, 86*(3), pp.623–645. DOI: 10.4141/P05-169

Yan, W., Kang, M. S., Ma, B., Woods, S. and Cornelius, P. L. 2007. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science, 47*(2), pp.643–653. DOI: 10.2135/cropsci2006.06.0374

Yan, W. and Wu, H. 2008. Application of GGE biplot analysis to evaluate Genotype (G), Environment (E), and G×E interaction on *Pinus radiata*: a case study. *New Zealand Journal of Forestry Science, 38*(1), pp.132–142.

Zobel, R.W., Wright, M.J. and Gauch Jr., H.G. 1988. Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal, 80*(3), pp.388–393. DOI: 10.2134/agronj1988.00021962008000030002x

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22092/spj.2026.374583.1488

Analysis of Genotype × Environment Interaction and White Sugar Yield Stability in Promising Sugar Beet Hybrids

S. Sadeghzadeh Hemayati[1*], S. B. Mahmoudi[2], A. Saremirad[3], S. Darabi[4], J. Soltani Idliki[5], Gh. Parmoun[6] and K. Kharazmi[7]

1. Associate Professor, Sugar Beet Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.
2. Professor, Sugar Beet Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.
3. Assistant Professor, Sugar Beet Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.
4. Researcher, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Shiraz, Iran.
5. Assistant Professor, Khorasan-e-Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Mashhad, Iran.
6. Assistant Professor, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kermanshah, Iran.
7. Researcher, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Urmia, Iran.

ABSTRACT

Sadeghzadeh Hemayati, S., Mahmoudi, S. B., Saremirad, A., Darabi, S., Soltani Idliki, J., Parmoun, Gh. and Kharazmi, K. 2026. Analysis of genotype × environment interaction and white sugar yield stability in promising sugar beet hybrids**.** *Seed and Plant, 41,* pp.219-243 (in Persian).

This study was carried out to evaluate white sugar yield stability and adaptability of four promising sugar beet hybrids together with three local checks (cv. Yalda, cv. Ziba, and cv. Nika) and two foreign checks (cv. Bifort and cv. BTS2015N) check cultivars using randomized complete block design with four replications across five Iranian agricultural research stations (Karaj, Shiraz, Miandoab, Kermanshah, and Khoy) in 2024 and 2025 cropping seasons. Additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) and GGE biplot models were used for stability analyses. Combined analysis of variance revealed significant genotype × location and three-way interactions, thus, mean grain yield of five locations and two cropping seasons were used for stability analyses. In AMMI, IPCA1 and IPCA2 expalined 83.80% of interaction variance. Among domestic entries, SBSI 244 (10.38 t ha^{-1}) and SBSI 241 (10.33 t ha^{-1}) had the highest white sugare yield and shared the top genotype selection index (GSI = 5). However, cv. BTS2015N (in Miandoab), cv. Bifort (in Khoy), and SBSI 242 hybrid (in Kermanshah) showed specific adaptation. GGE biplot explained 93.62% of G+GE variation, confirming SBSI 244 and SBSI 241 as widely adapted hybrids; owing to result convergence, GGE biplot is suggested for simpler visual interpretation.

Keywords: Sugar beet, genotype selection index, wide adaptation, specific adaptation, GGE biplot.

Introduction

Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) is a strategic industrial crop and its economic success depends on high and sustainable white sugar yield (WSY). However, multi-environment performances of sugar beet cultivars is heavily confounded by genotype × environment interaction (GEI), impeding successful selection in sugar beet breeding programs. Previous studies have evaluated white sugar stability of commercial sugar beet cultivars using AMMI and GGE biplot models (Sadeghzadeh Hemayati *et al*., 2022; Taleghani *et al*., 2023). However, comprehensive simultaneous evaluations of both the dynamic stability and wide adaptability of newly monogerm sugar beet hybrids, developed by the national sugarbeet breeding program, across different agro-ecological zones remain scarce. Most of the previous studies either lacked representative multi-environmental trials or relied exclusively on single stability models. Therefore, this study aimed to evaluate the pattern and magnitude of GEI for WSY in promising monogerm sugar beet hybrids across five distinct agro-ecological zones of Iran in two consecutive cropping seasons, and to determine the convergence and efficiency of AMMI and GGE biplot models for selecting superior hybrids with wide adaptation and high yield potential.

Materials and Methods

To analyse white sugar yield stability and wide adaptation of sugar beet promising hybrids, developed by the national sugarbeet breeding program, field trials were carried using four promising monogerm sugar beet hybrids (SBSI 241, SBSI 242, SBSI 243, and SBSI 244) together with three local checks (cv. Yalda, cv. Ziba, and cv. Nika) and two foreign checks (cv. Bifort and cv. BTS2015N). The experimental design was randomized complete block design with four replications across five agricultura research stations; Karaj, Shiraz, Miandoab, Kermanshah, and Khoy, in 2024 and 2025 cropping seasons.

White sugar yield was determined from root yield, and technological impurities (K, Na, and alpha-amino N) measured via a Betalyser. After verifying residual normality and error variance homogeneity using Bartlett's test, combined analysis of variance was performed as a mixed-model (year random, location and genotype fixed), the least significant differences (LSD) test was used to compare genotype × location interaction means. Since year × location cinteraction are non-repeatable, two year-location means were used for AMMI and GGE biplot analyses.

MMI analysis partitioned interaction variance into interaction principal component axes (IPCAs) to construct AMMI1 and AMMI2 biplots, AMMI stability value (ASV), and genotype selection index (GSI). GGE biplot analysis was performed via the metan package in R to generate polygon and average environment coordination (AEC) views.

Results and Discussion

Combined analysis of variance revealed significant effects for year, genotype, year × location, genotype × location ($P < 0.05$), and three-way interaction ($P < 0.01$). In AMMI anaylsis across five locations, IPCA1 and IPCA2 explained 62.30% and 21.40% (83.80%)

of interaction variance, leaving a non-significant residual (4.40%). Mean WSY of evaluated sugar beet genotypes ranged from 7.86 t ha^{-1} (cv. Nika) to 13.63 t ha^{-1} (cv. BTS2015N).

Hybrids SBSI 244 (10.38 t ha^{-1}) and SBSI 241 (10.33 t ha^{-1}) outyielded all local checks, jointly achieved the top GSI (GSI = 5, ASV = 0.41 and 0.42), and clustered near the AMMI2 origin. GGE biplot analysis explained 93.62% of G+GE variation, exceeding AMMI modle estimate, because PC1 absorbs genetic main effects (Yan *et al*., 2007). In the AEC view, SBSI 244 and SBSI 241 hybrids showed minimal projections, confirming wide adaptation.

AMMI2 and GGE biplot polygon views, however, delineated specific adaptations; cv. BTS2015N in Miandoab (16.13 t ha^{-1}), cv. Bifort in Khoy (14.39 t ha^{-1}), and SBSI 242 hybrids in Kermanshah (14.57 t ha^{-1}). Unlike the three mega-environments delineated by Taleghani *et al*. (2023) across seven stations, our five locations formed two mega-environments, though similarly confirming genotype-specific adaptation (Sadeghzadeh Hemayati *et al*., 2022).

Using AMMI2 and GGE biplot models led to identical selections. However, based on the results of this study, GGE biplot is suggested as a simpler, visually integrated tool for use in the national sugar beet breeding programs.

References

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), pp.268–282. DOI: 10.1098/rspa.1937.0109

Sadeghzadeh Hemayati, S., Saremirad, A., Hosseinpour, M., Jalilian, A., Ahmadi, M., Azizi, H., Hamidi, H., Hamdi, F. and 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), pp.339–364 (In Persian). DOI: 10.22092/spj.2023.362024.1305

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

Yan, W., Kang, M. S., Ma, B., Woods, S. and Cornelius, P.L. 2007. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science, 47*(2), pp.643–653. DOI: 10.2135/cropsci2006.06.0374

*Corresponding author: s.sadeghzadeh@areeo.ac.ir Tel.: +982632702613

Received: 09 October 2026
Accepted: 24 November 2026

2026© The Authors. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.