

Genotype- environment interaction analysis and selection of sugar beet stable genotypes in terms of white sugar yield using AMMI model

Dariush Taleghani^{1*}, Abazar Rajabi², Ali Saremirad³, Shahram Khodadadi⁴

1. Associate Professor of Sugar Beet Seed Institute (SBSI), Agricultural Research Education and Extension, Karaj, Iran.
2. Associate Professor of Sugar Beet Seed Institute (SBSI), Agricultural Research Education and Extension, Karaj, Iran.
3. Sugar Beet Seed Institute (SBSI), Agricultural Research Education and Extension, Karaj, Iran.
4. Expert of Sugar Beet Seed Institute (SBSI), Agricultural Research Education and Extension, Karaj, Iran

Citation: Taleghani, D, Rajabi, A., Saremirad, A., & Khodadadi, Sh. (2023). Genotype- environment interaction analysis and selection of sugar beet stable genotypes in terms of white sugar yield using AMMI model. *Plant Productions*, 46(2), 155-169.

Abstract

Introduction

The methods used to analyze genotype-environment interaction and determine the stability and adaptability of genotypes are continuously evolving to improve the accuracy of evaluating genotypes and studying environmental interaction components. Using a combination of several methods provides a more comprehensive understanding of the genotype-environment interaction from multiple dimensions. In this study, the genotype-environment interaction was investigated using the AMMI method, along with the development of appropriate statistical techniques.

Materials and Methods

For this purpose, 25 sugar beet genotypes, consisting of 18 new hybrids and seven controls, were cultivated in seven environments: Karaj, Mashhad, Shiraz, Miandoab, Kermanshah, Hamadan, and Khoi. The experiment followed a randomized complete block design with four replications during the year 2020. After checking the uniformity of the variance of the experimental errors using Bartlett's test, the stability of the genotypes was analyzed based on the AMMI model. In this study, 12 statistics obtained from the AMMI model, including ASTAB, ASI, ASV, AVAMGE, DA, DZ, EV, FA, MASI, MASV, SIPC_i, and Za, were used to identify stable genotypes. To further investigate the stability of the experimental genotypes, the SIIG index was also estimated, taking into account the criteria provided by each index based on the AMMI model.

* **Corresponding Author:** Dariush Taleghani
E-mail: d.taleghani@areeo.ac.ir

Results and Discussion

The results obtained from Bartlett's test confirmed the homogeneity of the variance of experimental errors in experiments from different regions. Therefore, a combined variance analysis was performed based on the AMMI model. The combined analysis of variance, based on the AMMI model, indicated the significance of the additive effects of the environment and genotype, as well as the multiplicative effect of genotype-environment interaction at the 1% probability level. Analyzing the interaction effects into principal components showed that the first four components were significant at the 1% probability level and explained 93.50% of the variations related to genotype-environment interaction. According to the AMMI1 biplot, hybrids 3 and 9 were recognized as the most stable genotypes due to having a sugar yield higher than the overall average and a low value of the first interaction component. According to the AMMI2 biplot, hybrid 3 and BTS 335 with the Miandoab environment, Lexia and 4 with the Mashhad environment, Lexia with the Hamedan environment, 14 and 15 with the Kermanshah environment, 13 and 17 with the Shiraz environment, 11 with the Karaj environment, and Baloo with the Khoi environment have considerable specific adaptability. Hybrid 9, followed by 6, 2, and 8, had general adaptability. The SIIG index, calculated based on AMMI model statistics, identified 2, 9, 10, and 8 as the most stable genotypes with optimal yield.

Conclusion

Based on the obtained results, the environment and its interaction with the genetic structure of different genotypes have played a significant role in the phenotypic expression of white sugar yield and have caused the genotypes to provide different responses in terms of white sugar yield according to the conditions of different environments. In general, based on the results of the present study, hybrid 9 and then hybrids 6, 2, 8, 7, and 10 had high white sugar yield and yield stability. Generally, real progress in sugar beet breeding will be obtained if the genetic factors controlling the sensitivity of sugar beet genotypes to a variable environment are identified.

Keywords: Adaptability, Additive effect, Biplot, Ideal genotype, Industrial crops, Stability

تجزیه برهمکنش ژنوتیپ- محیط و گزینش ژنوتیپ‌های پایدار چغندر قند از نظر عملکرد شکر سفید با استفاده از مدل AMMI

داریوش طالقانی^{۱*}، اباذر رجیبی^۲، علی صارمی‌راد^۳، شهرام خدادادی^۴

۱. دانشیار مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۲. دانشیار مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۳. مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۴. کارشناس پژوهشی (محقق غیر هیأت علمی) مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

چکیده

روش‌هایی که برای تجزیه برهمکنش ژنوتیپ- محیط و تعیین پایداری و سازگاری ژنوتیپ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، به‌طور مداوم در حال تکامل می‌باشند تا ارزیابی ژنوتیپ‌ها و مطالعه مؤلفه‌های برهمکنش محیطی با دقت بیشتری صورت گیرد. در این مطالعه به بررسی برهمکنش ژنوتیپ- محیط با استفاده از روش AMMI و آماره‌های ارائه‌شده برای آن پرداخته شد. به این منظور، تعداد ۲۵ ژنوتیپ چغندر قند متشکل از ۱۸ هیبرید جدید، سه شاهد داخلی و چهار شاهد خارجی در هفت منطقه کرج، مشهد، شیراز، میاندوآب، کرمانشاه، همدان و خوی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار طی سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ کشت شدند. تجزیه واریانس مرکب مدل AMMI حاکی از معنی‌داری اثرات افزایشی محیط و ژنوتیپ و اثر ضرب‌پذیر ژنوتیپ- محیط در سطح احتمال یک درصد بود. تجزیه اثرات برهمکنش به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که چهار مؤلفه اول در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند و مجموعاً ۹۳/۵۰ درصد از تغییرات مربوط به برهمکنش ژنوتیپ- محیط را تبیین نمودند. طبق بای‌پلات AMMI، هیبریدهای ۳ و ۹ به دلیل داشتن عملکرد شکر بالاتر از میانگین کل و مقدار پایین مؤلفه اول برهمکنش، تحت عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند. بر اساس بای‌پلات AMMI2، هیبرید ۹ و پس از آن ۶، ۲، ۸، ۷ و ۱۰ از سازگاری عمومی بالایی برخوردار بودند. شاخص SIIG محاسبه شده بر اساس آماره‌های مدل AMMI، هیبریدهای ۲، ۹، ۱۰ و ۸ از نظر عملکرد شکر سفید پایدار و پرمحصول بودند. به‌طور کلی، بر اساس نتایج مطالعه حاضر، هیبرید ۹ و پس از آن هیبریدهای ۶، ۲، ۸، ۷ و ۱۰ عملکرد شکر سفید و پایداری عملکرد بالایی داشتند.

کلیدواژه‌ها: اثر افزایشی، بای‌پلات، ژنوتیپ ایده‌آل، پایداری، سازگاری، گیاهان صنعتی

مقدمه

اصلاح‌گران برنامه‌های اصلاحی مختلفی را برای بهبود پتانسیل عملکرد و توسعه ارقام پر محصول چغندر قند اجرا کرده‌اند (Taleghani et al., 2022)؛ زیرا این گیاه یکی از قابل‌توجه‌ترین گیاهان قندی است که حدود ۳۰ درصد (نزدیک به ۴۲ میلیون تن) از نیاز جهانی قند را تأمین می‌کند (FAO, 2018) و پس از نیشکر به‌عنوان دومین گیاه تأمین‌کننده قند جهان شناخته می‌شود (Monteiro et al., 2016; Ribeiro et al., 2018)؛ در این میان روندهای اخیر تغییرات اقلیمی، پایداری و سازگاری عملکرد ارقام اصلاحی را در شرایط مختلف محیطی به چالش می‌کشند (Hall and Richards, 2013; Peng et al., 1999)؛ زیرا ارزش تجاری یک رقم (عملکرد کمی و کیفی) تحت تأثیر شرایط محیطی قرار گرفته و بر اثر پدیده برهمکنش ژنوتیپ- محیط تغییر می‌کند (Kang, 1997). لذا برنامه‌های اصلاحی باید به‌گونه‌ای طراحی شوند تا علاوه بر افزایش پتانسیل کمی و کیفی محصول، ارزش تجاری ارقام را نیز حفظ کنند. در این راستا، مدل‌سازی برهمکنش ژنوتیپ- محیط و کمی‌سازی عملکرد ژنوتیپی و درجه پایداری، روش‌های ضروری برای افزایش کارایی گزینش و ارزیابی سازگاری ژنوتیپ‌ها در آزمایش‌های محیطی هستند (Malosetti et al., 2013).

روش‌های تجزیه و تحلیل پایداری فنوتیپی به‌طور مداوم در حال تکامل‌اند تا به ارزیابی ژنوتیپ‌ها و مطالعه مؤلفه‌های برهمکنش محیطی دقت بیشتری بخشند. در تجزیه پایداری فنوتیپی محصولات مختلف، اغلب به‌جای وابستگی به یک تجزیه، ترکیبی از چند روش تجزیه و تحلیل پایداری به کار گرفته می‌شود (Mostafavi and Saremirad, 2021; Omrani et al., 2019; Rajabi et al., 2022; Saremirad and Mostafavi, 2021). انتخاب روش صحیح تجزیه پایداری برای به دست آوردن حداکثر برهمکنش ژنوتیپ- محیط بسیار حیاتی است. مدل اثرات اصلی جمع‌پذیر و برهمکنش ضرب‌پذیر^۱ (AMMI) متداول‌ترین مدلی است که تاکنون استفاده شده است (Gauch, 1992). تجزیه و تحلیل AMMI روش کارآمدی برای حذف خطا و آشکار کردن الگوی مناسب داده‌ها است (Yan et al., 2007). این روش ترکیبی از تجزیه واریانس و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی می‌باشد. در مدل AMMI ابتدا با استفاده از تجزیه واریانس معمولی اثرات اصلی

ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها برآورد می‌شود که به آن‌ها اثرات اصلی جمع‌پذیر یا افزایشی گفته می‌شود؛ سپس با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، برهمکنش بین ژنوتیپ با محیط که به اثرات برهمکنش ضرب‌پذیر معروف است، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد (Gauch, 1992). مدل AMMI، ساختار داده‌هایی با ابعاد ماتریسی را به‌وسیله چند بردار مانند میانگین‌های ژنوتیپ و محیط و همچنین مقادیر منفرد برای مؤلفه‌های اصلی برهمکنش به ابعاد کوچک‌تر طبقه‌بندی می‌کند (Gauch and Hugh, 1988). این مدل ابزار بسیار قوی در تجزیه و تفسیر ماتریس‌های بزرگ برهمکنش ژنوتیپ- محیط است، زیرا با استفاده از ایجاد بای‌پلات، استنباط مناسبی در مورد برهمکنش فراهم می‌شود و انتخاب ژنوتیپ‌های با سازگاری مناسب به محیط‌های خاص تسهیل می‌گردد (Zobel et al., 1988).

Taleghani et al., (2023) برهمکنش ژنوتیپ- محیط ۱۸ ژنوتیپ چغندر قند را با استفاده از روش‌های مختلف از جمله AMMI بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که اثرات ژنوتیپ، محیط و برهمکنش ژنوتیپ- محیط برای عملکرد ریشه، عملکرد شکر سفید، عیار قند و ضریب استخراج قند معنی‌دار بود. در پژوهشی دیگر رجبی و همکاران (Rajabi et al., 2022) هیبریدهای چغندر قند را در چهار منطقه به مدت دو سال از نظر پایداری ارزیابی کردند. آن‌ها از مدل AMMI برای تجزیه و تحلیل برهمکنش ژنوتیپ- محیط استفاده کردند و دریافتند که دو مؤلفه اصلی اول، ۶۴/۷۰ درصد از تغییرات کل را تبیین می‌کنند. در مطالعه Hassani et al., (2018) ۴۹ ژنوتیپ چغندر قند با استفاده از مدل AMMI مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مشخص شد که دو مؤلفه اصلی اول ۵۷/۷۴ درصد از تغییرات کل را پوشش می‌دهند. (Mostafavi et al., 2017) ژنوتیپ‌های چغندر قند را با استفاده از مدل AMMI تجزیه کرده و بیان نمودند که ۷۵/۴۰ درصد از تغییرات کل توسط دو مؤلفه اصلی اول تبیین می‌شود.

در مطالعه حاضر، تأثیر برهمکنش ژنوتیپ- محیط بر پتانسیل تولید کمی محتوای قند در مجموعه‌ای از هیبریدهای جدید چغندر قند و نیز تعیین سازگاری آن‌ها با طیف وسیعی از شرایط محیطی متفاوت بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و شرایط آزمایشی

Table 1. Specifications of the experimental sugar beet genotypes

Genotype code	SBSI number	Genotype code	SBSI number
1	35046	14	35059
2	35047	15	35060
3	35048	16	35061
4	35049	17	35062
5	35050	18	35063
6	35051	19	Shokoufa
7	35052	20	Arta
8	35053	21	Sina
9	35054	22	Lexia
10	35055	23	Baloo
11	35056	24	Poseidon
12	35057	25	BTS 335
13	35058	-	-

Table 2. Geographical characteristics of the used research stations

Environment code	Location of the research station	Altitude (m)	Latitude	Longitude
E1	Karaj, Alborz, Iran	1312	35°55'N	50°54'E
E2	Mashhad, Khorasan Razavi, Iran	1316	36°30'N	59°37'E
E3	Shiraz, Fars, Iran	1484	29°32'N	52°36'E
E4	Miandoab, West Azerbaijan, Iran	1296	36°58'N	46°05'E
E5	Kermanshah, Kermanshah, Iran	1351	34°19'N	47°04'E
E6	Hamedan, Hamedan, Iran	1818	34°47'N	48°30'E
E7	Khoy, West Azerbaijan, Iran	1136	38°33'N	44°57'E

تعداد ۱۸ هیبرید جدید چغندر قند به همراه سه شاهد داخلی شکوفا، آرتا و سینا و چهار شاهد خارجی Lexia، Poseidon، Baloo و BTS 335 مواد ژنتیکی پژوهش حاضر را تشکیل دادند (جدول ۱). آزمایش در هفت ایستگاه تحقیقات کشاورزی کرج، مشهد، شیراز، میاندوآب، کرمانشاه، همدان و خوی با طیف وسیعی از شرایط محیطی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در سال زراعی ۱۳۹۹- در جدول ۲ نمایش داده شده است.

در این آزمایش، هر واحد آزمایشی شامل شش خط کاشت به طول ۱۰ متر با فاصله خطوط ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که پس از آماده‌سازی در دهه سوم فروردین ماه عمل کشت آزمایش‌ها انجام شد. کلیه عملیات داشت مطابق روش‌های متداول هر منطقه انجام گرفت. مقادیر آب مصرفی بر اساس میزان تبخیر از طشتک تبخیر کلاس A و با احتساب راندمان ۹۰ درصد محاسبه و به‌طور مساوی در کلیه کرت‌های آزمایشی توزیع شد. مبارزه با علف‌های هرز پهن‌برگ و نازک برگ مزارع با وجین دستی و نیز طی دو مرحله با سموم علف‌کش بتانال پروگرس و سوپرگالانت انجام گرفت. به‌منظور ردیابی و پیشگیری از حمله آفات چغندر قند، مزارع به‌صورت مرتب تحت بازدید قرار گرفت. عملیات برداشت آزمایش‌ها در هر هفت ایستگاه در دهه اول آبان ماه همراه با شمارش و توزین ریشه‌های چهار ردیف میانی با حذف یک متر از ابتدا و انتهای خطوط انجام شد.

برداشت محصول و یادداشت‌برداری صفات

پس از شستشوی ریشه‌ها، به‌طور تصادفی با استفاده از دستگاه خودکار ونما^۱ (ساخت کشور هلند) از ریشه‌های هر کرت آزمایشی نمونه خمیر تهیه گردید و در آزمایشگاه کنترل کیفی ستاد مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند، از نظر ویژگی‌های کیفی مورد بررسی قرار گرفتند.

ژنوتیپ‌های پایدار بر اساس روابط ۳ تا ۱۴ با فراخوانی بسته agricolae در نرم‌افزار R استفاده شد.

رابطه ۳ (Rao and Prabhakaran, 2005):

$$ASTAB = \sum_{n=1}^{N'} \lambda_n \gamma_{in}^2$$

رابطه ۴ (Jambhulkar et al., 2014):

$$ASI = \sqrt{[PC_1^2 \times \theta_1^2] + [PC_2^2 \times \theta_2^2]}$$

رابطه ۵ (Purchase, 1997):

$$ASV = \sqrt{\left[\frac{SSIPCA1}{SSIPCA2} (IPCA1_{score}) \right]^2 + (IPC2_{score})^2}$$

رابطه ۶ (Zali et al., 2012):

$$AV_{AMGE} = \sum_{j=1}^E \sum_{n=1}^{N'} |\lambda_n \gamma_{in} \delta_{jn}|$$

رابطه ۷ (Annicchiarico, 1997):

$$DA = \sqrt{\sum_{n=1}^N (\lambda_n \gamma_{in})^2}$$

رابطه ۸ (Zhang et al., 1998):

$$D_Z = \sum_{n=1}^{N'} \gamma_{in}^2$$

رابطه ۹ (Zobel, 1994):

$$EV = \sum_{n=1}^N \frac{\gamma_{in}^2}{n}$$

رابطه ۱۰ (Raju, 2002):

$$FA = \sum_{n=1}^{N'} \lambda_n^2 \gamma_{in}^2$$

رابطه ۱۱ (Ajay et al., 2018):

$$MASI = \sqrt{\sum_{n=1}^{N'} PC_n^2 \times \theta_1^2}$$

رابطه ۱۲ (Zali et al., 2012):

$$MASV = \sqrt{\sum_{n=1}^{N'} \left(\frac{SSIPC_n}{SSIPC_{n+1}} \right) \times (PC_n)^2 + (PC_{N'})^2}$$

رابطه ۱۳ (Sneller et al., 1997):

$$SIPC_i = \sum_{n=1}^N |\lambda_n^{0.5} \gamma|$$

به این منظور نمونه‌های خمیر ریشه تهیه شده پس از خارج شدن از حالت انجماد (۲۰- درجه سانتی‌گراد)، از هر یک ۲۶ گرم خمیر با ۱۷۷ میلی‌لیتر سو استات سرب^۱ به مدت سه دقیقه در داخل همزن مخلوط گردید. پس از گذراندن محلول از صافی، مایع شفاف حاصل شد که از آن در دستگاه بتالایزر^۲ (سیستم خودکار تجزیه کیفیت چغندر قند، ساخت کشور آلمان) برای اندازه‌گیری ویژگی‌های کیفی شامل درصد قند ناخالص، نیتروژن مضره و عنصرهای سدیم و پتاسیم استفاده شد (Kunz et al., 2002). در نهایت از مقادیر به دست آمده برای این ویژگی‌ها، جهت تخمین عملکرد شکر سفید بر اساس رابطه ۱ استفاده شد:

رابطه ۱ (Cook and Scott, 1993):

$$WSY = WSC \times RY$$

در این رابطه WSY عملکرد شکر سفید بر حسب تن در هکتار، WSC درصد قند خالص بر حسب گرم قند در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه چغندر قند و RY عملکرد ریشه بر حسب تن در هکتار می‌باشد.

تجزیه و تحلیل آماری

پس از بررسی یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی با آزمون بارتلت (Bartlett, 1937)، تجزیه پایداری ژنوتیپ‌های آزمایشی بر اساس مدل AMMI برای صفت عملکرد شکر سفید با استفاده از رابطه ۲ صورت پذیرفت.

رابطه ۲:

$$Y_{ger} = \mu + \alpha_g + \beta_e + \sum_n \lambda_n \alpha_{gn} \gamma_{en} + \rho_{ge} + \epsilon_{ge}$$

در این رابطه، Y_{ger} عملکرد ژنوتیپ گام در محیط e ام در تکرار r ام است، μ میانگین کل آزمایش، α_g و β_e به ترتیب اثرات اصلی ژنوتیپ و محیط، λ_n مقدار ویژه برای محور مؤلفه اصلی n ام، α_{gn} بردار ویژه ژنوتیپ برای محور گام از n مؤلفه اصلی برهمکنش، γ_{en} بردار ویژه محیط برای محور e ام از n مؤلفه اصلی برهمکنش، ρ_{ge} مقدار باقی‌مانده و ϵ_{ge} مربوط به خطا می‌باشد (Gauch, 1992). با انجام تجزیه واریانس امی با استفاده از نرم‌افزار R، مقادیر مؤلفه‌های اصلی برای هر ژنوتیپ و محیط به دست آمد و با رسم بای‌پلات‌های آن‌ها، سازگاری عمومی و خصوصی ژنوتیپ‌ها تعیین گردید. طی این مطالعه از ۱۲ آماره به دست آمده از مدل AMMI نیز برای شناسایی

1. Lead (II) hydroxide acetate
2. Betalyser

رابطه ۱۴ (Zali et al., 2012):

$$Z_a = \sum_{n=1}^{N'} |\theta_n \gamma_{in}|$$

در این روابط، N' تعداد محورهای مؤلفه‌های اصلی معنی‌دار برهمکنش ژنوتیپ-محیط، λ_n مقدار منفرد برای محور مؤلفه اصلی و λ_n^2 مقدار ویژه آن، γ_{in} مقدار بردار ویژه برای ژنوتیپ i ام، δ_{jn} مقدار بردار ویژه برای ژنوتیپ j ام، PC_1 ، PC_2 ، PC_n امتیازهای مربوط به مؤلفه اول، دوم و n ام و θ_1 ، θ_2 ، θ_n درصد واریانس توجیه شده به‌وسیله مؤلفه‌های اول، دوم و n ام می‌باشد.

به‌منظور بررسی بهتر و کارآمدتر پایداری ژنوتیپ‌های آزمایشی با در نظر داشتن معیارهای ارائه‌شده توسط تک‌تک شاخص‌های مبتنی بر مدل AMMI، شاخص SIIG با استفاده از نرم‌افزار Excel برای آماره‌های هر یک از مدل‌های مذکور برآورد گردید. به این منظور ابتدا داده‌های اصلی بر اساس رابطه ۱۵ نرمال شدند.

رابطه ۱۵:

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum X_{ij}^2}}$$

پس از نرمال کردن داده‌ها، بهترین ژنوتیپ از نظر هر شاخص به‌عنوان ژنوتیپ ایده‌آل و ضعیف‌ترین ژنوتیپ به‌عنوان ژنوتیپ غیر ایده‌آل تعیین شد. در مرحله بعد به بررسی فاصله هر ژنوتیپ از ژنوتیپ ایده‌آل (d_i^+) و نیز ژنوتیپ غیر ایده‌آل (d_i^-) بر اساس روابط ۱۶ و ۱۷ پرداخته شد.

رابطه ۱۶:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^g (r_{ij} - r_i^+)^2}$$

رابطه ۱۷:

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^g (r_{ij} - r_i^-)^2}$$

در این روابط r_{ij} مقدار نرمال‌شده شاخص i ام برای ژنوتیپ j ام، r_i^+ و r_i^- به ترتیب مقدار نرمال‌شده ژنوتیپ‌های ایده‌آل و غیر ایده‌آل برای شاخص i ام می‌باشد. با حصول فواصل هر ژنوتیپ از ژنوتیپ ایده‌آل و غیر ایده‌آل، شاخص SIIG برای هر ژنوتیپ طبق رابطه ۱۸ محاسبه شد.

رابطه ۱۸:

$$SIIG = \frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)}$$

نتایج و بحث

تجزیه اثرات اصلی جمع‌پذیر و برهمکنش ضرب‌پذیر (AMMI)

نتایج به‌دست‌آمده از آزمون بارتلت، تجانس واریانس خط‌های آزمایشی را در آزمایش مناطق مختلف تأیید کرد. لذا تجزیه واریانس مرکب بر اساس مدل AMMI انجام شد. این نتایج حاکی از معنی‌داری اثرات افزایشی محیط و ژنوتیپ و اثر ضرب‌پذیر ژنوتیپ-محیط در سطح احتمال یک درصد بود (جدول ۳). معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ-محیط نشان می‌دهد که تغییر محیط، تغییر در رتبه ژنوتیپ‌ها را به همراه داشته است و سبب شده است که عملکرد شکر سفید ژنوتیپ‌های آزمایشی از محیطی به محیط دیگر متفاوت باشد که تأییدکننده غیر قابل اجتناب بودن برهمکنش ژنوتیپ-محیط در تحقیقات کشاورزی است (Sabaghnia et al., 2010; Yan and Kang, 2002)، بنابراین باید توسط محققین این حوزه مورد توجه قرار گیرد تا با انتخاب ژنوتیپ مناسب برای محیط‌های هدف، نتایج مطلوبی در پیشرفت تحقیقات حوزه کشاورزی حاصل شود.

با توجه به اثر معنی‌دار برهمکنش ژنوتیپ-محیط، تجزیه اثرات ضرب‌پذیر انجام شد تا ژنوتیپ‌های پایدار بر اساس مدل امی شناسایی گردند. مدل امی با دو مؤلفه اصلی برهمکنش ژنوتیپ-محیط معنی‌دار بهترین مدل پیش‌بینی شده است (Annicchiarico et al., 2006; Zobel et al., 1988). بر اساس نتایج (جدول ۳) به‌دست‌آمده، چهار مؤلفه اول در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند و مجموعاً ۹۳/۵۰ درصد از تغییرات مربوط به برهمکنش ژنوتیپ-محیط را تبیین نمودند. مجموع مربعات باقی‌مانده از مدل امی با پایین‌ترین میانگین مربعات غیر معنی‌دار بود که نشان‌دهنده دقت قابل ملاحظه این مدل است (Anandan and Eswaran, 2009).

صادق‌زاده حمایتی و همکاران (Sadeghzadeh Hemayati et al., 2022) در مطالعه خود بر روی چغندر قند نشان دادند که هفت مؤلفه اول مجموعاً ۹۵/۵۰ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ-محیط را تبیین می‌کند. طالقانی و صارمی‌راد (Taleghani and Saremirad, 2022) سهم مؤلفه اصلی اول و دوم برهمکنش ژنوتیپ-محیط ژنوتیپ‌های چغندر قند را به ترتیب ۲۸/۰۸ درصد و ۲۰/۶۷ درصد برآورد نمودند که این دو مؤلفه توانستند در مجموع ۴۸/۷۵ درصد تغییرات برهمکنش ژنوتیپ-محیط را به خود اختصاص دهند.

Table 3. Combined analysis of variance of white sugar yield of sugar beet genotypes based on the AMMI model

Source of variation	df	Sum of square	Mean of square	Proportion
Environment	6	6086.71	1014.45**	-
Error 1	21	175.81	8.37	-
Genotype	24	1085.72	45.24**	-
Genotype- environment interaction	144	1486.05	10.32**	-
Interaction principal component 1	29	644.01	22.21**	43.30
Interaction principal component 2	27	414.91	15.37**	27.90
Interaction principal component 3	25	186.22	7.45**	12.50
Interaction principal component 4	23	144.31	6.27**	9.70
Noise	40	96.6	2.41 ^{ns}	6.50
Error 2	504	1161.30	2.30	-
Coefficient of variation (%)			14.52	

*, ** and ns: Significant at 5% and 1% probability levels and non-significant, respectively

اصلی اول (شکل B۱) استفاده شد. بر طبق بای پلات میانگین عملکرد شکر سفید در مقابل اولین مؤلفه اصلی برهمکنش، ژنوتیپی که از لحاظ عملکرد شکر (محور افقی) میزان بیشتر و از نظر مؤلفه اول برهمکنش ژنوتیپ- محیط (محور عمودی) مقدار پایینی (نزدیک به صفر) داشته باشد، ژنوتیپ مطلوب‌تری خواهد بود. بر این اساس در میان ژنوتیپ‌ها، هیبریدهای ۳ و ۹ به دلیل داشتن عملکرد شکر بالاتر از میانگین کل و مقدار پایین مؤلفه اول برهمکنش، تحت عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند.

در مطالعه‌ای که با استفاده از مدل امی انجام شد، مؤلفه اصلی اول برهمکنش معنی‌دار گردید و حدود ۶۳ درصد از تنوع داده‌ها را تبیین کرد (Mostafavi and Saremirad, 2021). در مطالعه رجیبی و همکاران (Rajabi et al., 2022) شش مؤلفه اول برهمکنش ژنوتیپ- محیط تأثیر معنی‌داری داشتند و در مجموع ۹۸/۸۰ درصد تغییرات کل برهمکنش ژنوتیپ- محیط ژنوتیپ‌های چغندر قند را توجیه کردند. به‌منظور در نظر گرفتن پایداری عملکرد و سازگاری خصوصی ژنوتیپ‌ها با مناطق مورد مطالعه، از بای پلات عملکرد شکر سفید با مؤلفه اصلی اول (شکل A۱) و بای پلات دو مؤلفه

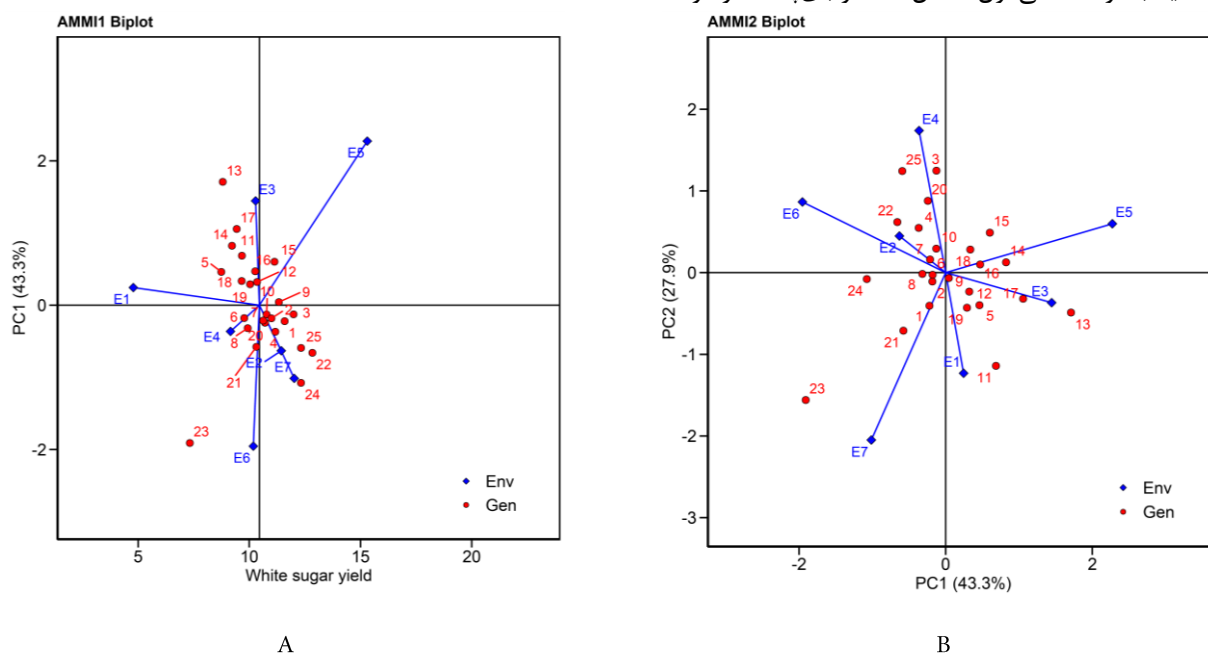


Figure 1. A: Biplot of white sugar yield with first interaction principal component (AMMI1) and B: biplot of first and second interaction principal component (AMMI2). Red dots represent genotypes and blue dots represent environments.

هکتار به خود اختصاص دادند. پایین‌ترین میزان عملکرد شکر به رقم Baloo با میانگین ۷/۳۲ تن در هکتار تعلق داشت. عملکرد شکر رقم شاهد سینا و هیبریدهای ۱۲ و ۱۶ به ترتیب با مقادیر ۱۰/۳۱، ۱۰/۳۴ و ۱۰/۲۶ تن در هکتار در محدوده میانگین عملکرد شکر همه ژنوتیپ‌ها در تمامی محیط‌ها قرار داشت. نتایجی که با استفاده از آماره‌های ASTAB، AVAMGE، DA، DZ، EV، FA و SIPC به دست آمد، حاکی از آن بود که هیبریدهای ۸، ۲ و ۱۰ با کمترین مقادیر برای این آماره‌ها، پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند. بر اساس آماره‌های نامبرده، رقم شاهد Baloo و هیبرید ۱۳ با بالاترین مقادیر به‌عنوان ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. بر اساس آماره‌های ASI، ASV و MASI، هیبریدهای ۹، ۶، ۲ و ۱۰ با کمترین مقادیر برای این سه آماره، بیشترین پایداری را داشتند. در این میان، رقم شاهد Baloo و هیبرید ۱۳ ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها شناخته شد. بر اساس آماره‌های پایداری MASV و Za، بیشترین پایداری با میزان کمتر این آماره‌ها در هیبریدهای ۲، ۸ و ۹ مشاهده شد. نتایج پژوهش حاضر تا حدودی مشابه یافته‌های (Sharifi et al., 2017)، (Karimizadeh et al., 2020)، (Cheloei et al., 2016) و (Rajabi et al., 2022) بود. آن‌ها اذعان داشتند که دقیق‌ترین مدل در تجزیه AMMI با استفاده از دو مؤلفه اصلی اول قابل پیش‌بینی است. با وجود روش‌های مختلف تجزیه پایداری، مدل AMMI اطلاعات مفیدی را برای دستیابی به نتایج دقیق ارائه می‌کند (Mostafavi and Saremirad, 2021; Sharifi et al., 2017). بر اساس نتایج حاصل از مطالعه حاضر، اکثریت ژنوتیپ‌های پایدار بر اساس آماره‌های مختلف پایداری AMMI از عملکرد قند متوسطی در حدود میانگین کل برخوردار بودند. این در حالی است که (Ajay et al., 2020) گزارش کردند که با توجه به این ۱۲ آماره پایداری AMMI (به‌خصوص با به‌کارگیری آماره‌های SIPC، MASI و MASV)، ژنوتیپ‌های پر محصول را می‌توان شناسایی نمود.

شاخص SIIG با هدف ارزیابی کلی پایداری ژنوتیپ‌های آزمایشی از نظر آماره‌های مختلف تجزیه AMMI و شناسایی ساده‌تر ژنوتیپ‌های پایدار استفاده شد. شاخص SIIG به‌طور هم‌زمان عملکرد شکر سفید و تمامی ۱۲ آماره حاصل از مدل AMMI را مدنظر قرار داده و ژنوتیپ پایدار ایده‌آل را مشخص می‌کند.

اگر ژنوتیپ و محیطی از لحاظ مؤلفه اصلی اول برهمکنش هم علامت باشند، دارای برهمکنش مثبت و اگر از لحاظ مؤلفه نامبرده هم علامت نباشند، دارای برهمکنش منفی خواهند بود. محیط‌های کرمانشاه، شیراز و کرج دارای برهمکنش مثبت با هیبریدهای ۱۳، ۱۷، ۱۴، ۱۱، ۱۵، ۱۶، ۵، ۱۲، ۱۸، ۹ و رقم شاهد شکوفا و برهمکنش منفی با ارقام شاهد Baloo، Poseidon، سینا، Lexia و BTS 335 و هیبریدهای ۴، ۲۰، ۸، ۶، ۷، ۱۰، ۲ و ۳ بودند.

محیط‌های مشهد، میاندوآب، همدان و خوی از وضعیتی عکس محیط‌های کرمانشاه، شیراز و کرج برخوردار بودند؛ به‌طوری که محیط‌های مشهد، میاندوآب، همدان و خوی برهمکنش مشابهی نشان دادند. این محیط‌ها با ارقام شاهد Baloo، Poseidon، سینا، Lexia و BTS 335 و هیبریدهای ۴، ۲۰، ۸، ۱، ۶، ۷، ۱۰، ۲ و ۳ برهمکنش مثبت و با هیبریدهای ۱۳، ۱۷، ۱۴، ۱۱، ۱۵، ۱۶، ۵، ۱۲، ۱۸، ۹ و رقم شاهد شکوفا برهمکنش منفی داشتند. در شکل B1 بای‌پلات مقادیر مؤلفه‌های اصلی اول و دوم برهمکنش ژنوتیپ-محیط برای ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها به نمایش گذاشته شده است. مجموعاً ۷۱/۳۰ درصد تغییرات مربوط به اثر ضرب‌پذیر توسط این بای‌پلات تبیین شد. بر اساس این نمودار ژنوتیپ‌هایی که در مجاورت یک مکان قرار داشته باشند، سازگاری خصوصی با آن محیط دارند و ژنوتیپ‌هایی که نزدیک به مبدأ مختصات باشند، از سازگاری عمومی برخوردارند. بنا بر آنچه بیان شد، همان‌گونه که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، میان ژنوتیپ‌های آزمایشی، هیبرید ۳ و رقم شاهد BTS335 با محیط میاندوآب، رقم شاهد Lexia و هیبرید ۴ با محیط مشهد، رقم شاهد Lexia با محیط همدان، هیبریدهای ۱۴ و ۱۵ با محیط کرمانشاه، هیبریدهای ۱۳ و ۱۷ با محیط شیراز، هیبرید ۱۱ با محیط کرج و رقم شاهد Baloo با محیط خوی سازگاری خصوصی قابل ملاحظه‌ای وجود دارند. هیبرید ۹ و پس از آن ۶، ۲، ۸، ۷ و ۱۰ به علت این‌که نزدیک به مبدأ مختصات قرار دارند، از سازگاری عمومی برخوردار هستند.

آماره‌های پایداری مختلف تجزیه AMMI محاسبه شد و به همراه میانگین عملکرد شکر سفید در جدول ۴ ارائه گردید. میانگین عملکرد شکر ژنوتیپ‌ها در همه محیط‌ها برابر ۱۰/۳۰ تن در هکتار برآورد شد. ارقام شاهد Lexia، BTS 335، Poseidon و هیبرید ۳ بیشترین عملکرد شکر سفید را به ترتیب به میزان ۱۲/۸۳، ۱۲/۳۲، ۱۲/۳۲ و ۱۱/۹۹ تن در

Table 4. Results of white sugar yield mean and AMMI model parameters along with their ranking in experimental sugar beet genotypes

Genotype	WSY		ASTAB		ASI		ASV		AVAMGE		DA	
	V	R	V	R	V	R	V	R	V	R	V	R
1	11.59	5	1.21	15	0.15	7	0.53	7	5.46	11	2.93	12
2	11.00	9	0.18	2	0.08	3	0.30	3	2.56	1	1.15	1
3	11.99	4	2.02	21	0.35	18	1.26	18	10.48	20	4.35	19
4	11.17	7	1.36	17	0.22	12	0.79	12	7.00	15	3.22	14
5	8.74	24	0.90	12	0.23	13	0.82	13	5.81	12	2.74	11
6	9.77	18	0.42	8	0.08	2	0.28	2	3.64	5	1.74	6
7	10.62	12	0.65	9	0.10	5	0.37	5	4.95	9	2.11	9
8	9.93	17	0.16	1	0.14	6	0.49	6	3.07	2	1.31	2
9	11.33	6	0.32	5	0.03	1	0.09	1	3.26	4	1.44	4
10	10.78	10	0.23	3	0.10	4	0.35	4	3.10	3	1.39	3
11	9.67	19	2.40	22	0.44	21	1.56	21	11.59	23	4.85	23
12	10.35	13	0.30	4	0.15	8	0.55	8	3.82	6	1.66	5
13	8.81	23	4.04	24	0.75	24	2.70	24	15.90	24	6.69	24
14	9.22	22	2.79	23	0.36	19	1.28	19	10.59	21	4.75	22
15	11.13	8	1.22	16	0.29	15	1.05	15	7.49	17	3.34	16
16	10.27	15	0.34	6	0.21	11	0.74	11	4.36	8	1.89	8
17	9.43	21	1.42	18	0.47	22	1.67	22	8.50	18	4.05	18
18	9.66	20	0.38	7	0.17	9	0.59	9	4.10	7	1.86	7
19	10.04	16	0.80	10	0.17	10	0.62	10	5.22	10	2.49	10
20	10.71	11	0.89	11	0.27	14	0.96	14	6.91	14	3.00	13
21	10.32	14	1.00	13	0.32	16	1.14	16	6.83	13	3.24	15
22	12.84	1	1.19	14	0.33	17	1.20	17	7.20	16	3.46	17
23	7.33	25	7.52	25	0.93	25	3.35	25	20.25	25	8.99	25
24	12.32	3	1.95	19	0.47	23	1.67	23	10.09	19	4.47	20
25	12.33	2	2.00	20	0.43	20	1.55	20	10.98	22	4.56	21

WSY: White sugar yield, ASTAB: AMMI Based Stability Parameter, ASI: AMMI Stability Index, ASV: AMMI Stability Value, AVAMGE: Sum Across Environments of Absolute Value of GEI Modelled by AMMI, DA: Annicchiarico's D Parameter, DZ: Zhang's D Parameter, EV: Averages of the Squared Eigenvector Values, FA: Stability Measure Based on Fitted AMMI Model, MASI: Modified AMMI Stability Index, MASV: Modified AMMI Stability Value, SIPC: Sums of the Absolute Value of the IPC Scores, Za: Absolute Value of the Relative Contribution of IPCAs to the Interaction, V: Value, R: Ranking.

Table 4. Continuation

Genotype	DZ		EV		FA		MASI		MASV		SIPC		Za	
	V	R	V	R	V	R	V	R	V	R	V	R	V	R
1	0.42	17	0.04	17	8.60	12	0.18	9	1.47	12	2.03	16	0.12	12
2	0.16	2	0.01	2	1.33	1	0.09	2	0.52	1	0.67	2	0.05	2
3	0.47	21	0.06	21	18.91	19	0.36	18	2.89	21	2.32	20	0.17	18
4	0.44	18	0.05	18	10.36	14	0.24	13	1.66	13	2.03	17	0.14	14
5	0.35	13	0.03	13	7.53	11	0.24	12	1.36	11	1.70	12	0.13	13
6	0.24	8	0.01	8	3.03	6	0.11	4	0.84	7	0.94	5	0.06	4
7	0.32	10	0.02	10	4.43	9	0.13	5	0.96	8	1.42	9	0.08	8
8	0.13	1	0.00	1	1.71	2	0.14	6	0.59	2	0.65	1	0.05	3
9	0.22	7	0.01	7	2.06	4	0.07	1	0.67	3	0.89	4	0.05	1
10	0.17	3	0.01	3	1.94	3	0.11	3	0.82	4	0.79	3	0.06	5
11	0.51	22	0.06	22	23.48	23	0.45	21	2.94	23	2.71	22	0.22	23
12	0.19	4	0.01	4	2.75	5	0.16	7	0.83	5	1.08	7	0.08	6
13	0.63	24	0.10	24	44.80	24	0.76	24	3.02	24	3.34	24	0.30	24
14	0.61	23	0.09	23	22.56	22	0.40	19	2.19	20	2.95	23	0.20	22
15	0.38	16	0.04	16	11.14	16	0.31	15	1.73	14	2.18	18	0.16	16
16	0.19	5	0.01	5	3.58	8	0.21	11	0.84	6	1.00	6	0.08	7
17	0.36	15	0.03	15	16.43	18	0.47	22	1.85	15	1.97	15	0.18	19
18	0.21	6	0.01	6	3.47	7	0.17	8	0.97	9	1.20	8	0.09	9
19	0.33	12	0.03	12	6.21	10	0.19	10	1.30	10	1.67	11	0.11	10
20	0.30	9	0.02	9	9.01	13	0.27	14	2.02	19	1.46	10	0.12	11
21	0.32	11	0.02	11	10.49	15	0.32	16	1.89	17	1.75	13	0.15	15
22	0.36	14	0.03	14	11.98	17	0.34	17	1.89	16	1.94	14	0.17	17
23	0.86	25	0.19	25	80.73	25	0.95	25	4.81	25	5.02	25	0.44	25
24	0.46	20	0.05	20	20.01	20	0.48	23	2.01	18	2.34	21	0.19	20
25	0.44	19	0.05	19	20.83	21	0.43	20	2.94	22	2.20	19	0.20	21

WSY: White sugar yield, ASTAB: AMMI Based Stability Parameter, ASI: AMMI Stability Index, ASV: AMMI Stability Value, AVAMGE: Sum Across Environments of Absolute Value of GEI Modelled by AMMI, DA: Annicchiarico's D Parameter, DZ: Zhang's D Parameter, EV: Averages of the Squared Eigenvector Values, FA: Stability Measure Based on Fitted AMMI Model, MASI: Modified AMMI Stability Index, MASV: Modified AMMI Stability Value, SIPC: Sums of the Absolute Value of the IPC Scores, Za: Absolute Value of the Relative Contribution of IPCAs to the Interaction, V: Value, R: Ranking.

ایده‌آل، کمترین فاصله از ژنوتیپ غیر ایده‌آل و کمترین مقدار SIIG را به خود اختصاص داد؛ بنابراین به‌عنوان ناپایدارترین ژنوتیپ با عملکرد نامناسب شناخته شد. شاخص SIIG اولین بار برای گزینش ژنوتیپ ایده‌آل بر اساس نتایج آماره‌های پارامتری و ناپارامتری به‌منظور ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌های کلزا به کار برده شد و بر پایه اطلاعات به‌دست‌آمده، ژنوتیپ پایدار مشخص گردید (Zali et al., 2015). پس از مطالعه مذکور، شاخص SIIG در مطالعه‌های مختلف برای شناسایی ژنوتیپ‌های ایده‌آل به کار گرفته شد. از این شاخص برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر در تجزیه پایداری گندم دوروم (Najafi Mirak et al., 2018)، ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی در گندم نان (Yaghutipoor et al., 2017)، عدس (Amiri et al., 2021) و چغندرقد (Taleghani et al., 2022)، ژنوتیپ‌های متحمل به تنش فلزات سنگین در گندم دوروم (Ramzi et al., 2018) و ژنوتیپ‌های متحمل به تنش سرمایی در کلزا (Abdollahi Hesar et al., 2021) استفاده شده است. در مجموع با توجه به نتایج پژوهش حاضر و نتایج مطالعات مذکور می‌توان بیان نمود که به‌کارگیری شاخص SIIG باعث می‌شود تا با ادغام آماره‌های مختلف و رتبه‌بندی ژرم‌پلاسم آزمایشی، گزینش ژنوتیپ‌های مطلوب تسهیل شده و به شکل کارآمدتری انجام شود.

در واقع این شاخص نتایج حاصل از بررسی عملکرد شکر و همه آماره‌ها را باهم در نظر گرفته و تبدیل به یک شاخص واحد می‌کند. لذا بررسی ژنوتیپ‌ها و گزینش ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد شکر مناسب به‌راحتی انجام می‌شود. در شکل ۲ مقادیر شاخص SIIG برای هر ژنوتیپ و گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس مقادیر شاخص SIIG آورده شده است. مقدار شاخص SIIG بین صفر و یک متغیر است. هر اندازه مقدار این شاخص برای ژنوتیپ‌هایی به سمت یک میل کند، نشان‌دهنده فاصله زیاد آن از ژنوتیپ غیر ایده‌آل (ژنوتیپ ناپایدار با عملکرد شکر نامناسب) و فاصله کم آن با ژنوتیپ ایده‌آل (ژنوتیپ پایدار با عملکرد شکر مناسب) می‌باشد، بنابراین آن ژنوتیپ‌ها از پایداری و عملکرد شکر بالایی برخوردار خواهند بود. در مقابل ژنوتیپ‌هایی که مقدار SIIG آن نزدیک به صفر باشد، جز ضعیف‌ترین ژنوتیپ‌ها در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس هیبریدهای ۲، ۹، ۱۰ و ۸ کم‌ترین فاصله را از ژنوتیپ ایده‌آل و بیشترین فاصله را از ژنوتیپ غیر ایده‌آل دارند، لذا بر همین اساس این ژنوتیپ‌ها با بیشترین مقدار SIIG پایدارترین ژنوتیپ‌های با عملکرد مطلوب معرفی شدند. پس از هیبریدهای نامبرده، هیبریدهای ۶، ۱۲، ۱۸، ۱۶ و ۷ به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار داشتند و جزو ژنوتیپ‌های مطلوب دسته‌بندی شدند. رقم Baloo بیشترین فاصله از ژنوتیپ

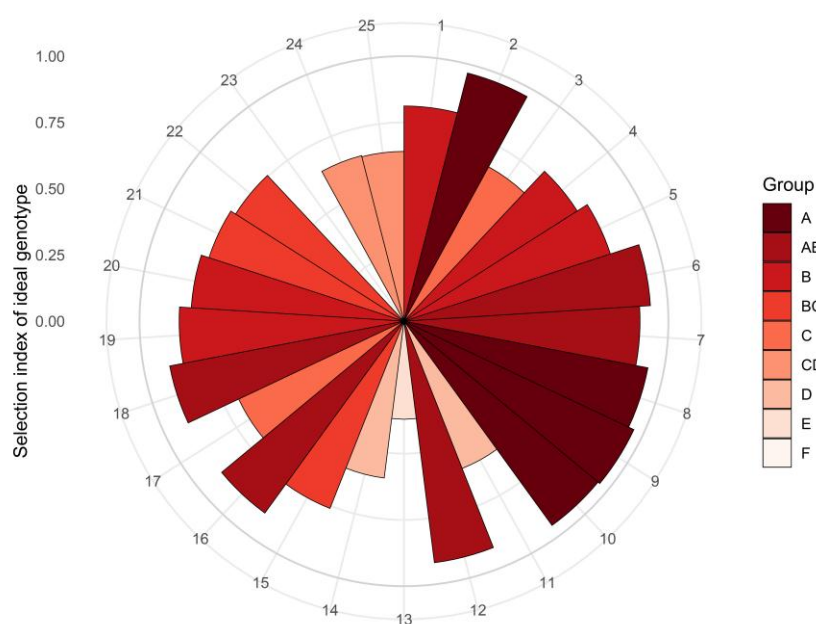


Figure 2. Mean comparison of experimental sugar beet genotypes in terms of selection index of ideal genotype (SIIG) obtained from AMMI model parameters. The colors indicate the grouping of genotypes based on the selection index of ideal genotype (SIIG).

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده محیط و برهمکنش آن با ساختار ژنتیکی ژنوتیپ‌های مختلف، نقش بسزایی را بر بیان فنوتیپی عملکرد شکر سفید داشته است و سبب شده است تا ژنوتیپ‌ها با توجه به شرایط محیط‌های مختلف پاسخ‌های متفاوتی را از نظر عملکرد شکر سفید ارائه نمایند. در مجموع هیبرید ۹ و پس از آن هیبریدهای ۶، ۲، ۸، ۷ و ۱۰ به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد شکر سفید مناسب شناخته شدند. هیبرید ۳ و رقم BTS 335 با محیط میاندوآب، رقم

Lexia و هیبرید ۴ با محیط مشهد، رقم Lexia با محیط همدان، هیبریدهای ۱۴ و ۱۵ با محیط کرمانشاه، هیبریدهای ۱۳ و ۱۷ با محیط شیراز، هیبرید ۱۱ با محیط کرج و رقم Baloo با محیط خوی سازگاری خصوصی نشان داد. به‌طور کلی، در صورتی که عوامل ژنتیکی کنترل‌کننده حساسیت ژنوتیپ‌های چغندر قند به شرایط متغیر محیطی شناسایی شوند، پیشرفت واقعی در اصلاح ارقام چغندر قند به‌دست خواهد آمد.

References

- Abdollahi Hesar, A., Sofalian, O., Alizadeh, B., Asghari, A., & Zali, H. (2021). Investigation of Frost Stress Tolerance in Some Promising Rapeseed Genotypes. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31, 271-288.
- Ajay, B., Aravind, J., & Abdul Fiyaz, R. (2018). Ammistability: additive main effects and multiplicative interaction model stability parameters. *R Package Version*, 11.
- Ajay, B., Bera, S., Singh, A., Kumar, N., Gangadhar, K., & Kona, P. (2020). Evaluation of genotype \times environment interaction and yield stability analysis in peanut under phosphorus stress condition using stability parameters of AMMI model. *Agricultural Research*, 9, 477-486.
- Amiri, R., Pezeshkpour, P., & Karami, I. (2021). Identification of Lentil Desirable Genotypes Using Multivariate Statistical Methods and Selection Index of Ideal Genotype under Rainfed Conditions. *Journal of Crop Breeding*, 13, 140-151.
- Anandan, A., & Eswaran, R. (2009). Genotype by environment interactions of rice (*Oryza sativa* L.) hybrids in the east coast saline region of Tamil Nadu. In "the Proceeding of 2nd Interaction Rice Congress".
- Annicchiarico, P. (1997). Joint regression vs AMMI analysis of genotype-environment interactions for cereals in Italy. *Euphytica*, 94, 53-62.
- Annicchiarico, P., Russi, L., Piano, E., & Veronesi, F. (2006). Cultivar adaptation across Italian locations in four turfgrass species. *Crop Science*, 46, 264-272.
- Bartlett, M.S. (1937). Properties of sufficiency and statistical tests. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences*, 160, 268-282.
- Cheloei, G., Ranjbar, G.A., Babaeian Jelodar, N., Bagheri, N., & Noori, M.Z. (2020). Using AMMI model and its parameters for yield stability analysis of rice (*Oryza sativa* L.) advanced mutant genotypes of Tarrom-Mahalli. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 9, 70-83.
- Cook, D., & Scott, R. (1993). The sugar beet crop: science into practice, Champan and Hall Press, New York, USA.
- FAO. (2018). Food and agriculture organization. World Food and Agriculture- Statistical Pocketbook, FAO, Rome, Italy.
- Gauch, H. 1992. Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs, Elsevier Science Publishers
- Gauch, J.R., & Hugh, G. (1988.) Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics*, 705-715.

- Hall, A.J., & Richards, R.A. (2013). Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. *Field Crops Research*, 143, 18-33.
- Hassani, M., Heidari, B., Dadkhodaie, A., & Stevanato, P. (2018). Genotype by environment interaction components underlying variations in root, sugar and white sugar yield in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Euphytica*, 214, 1-21.
- Jambhulkar, N., Bose, L., & Singh, O. (2014). AMMI stability index for stability analysis. *Central Rice Research Institute, Cuttack, Orissa*, 35, 15-15.
- Kang, M.S. (1997). Using genotype-by-environment interaction for crop cultivar development. *Advances in agronomy*, 62, 199-252.
- Karimizadeh, R., Asghari, A., Chinipardaz, R., Sofalian, O., & Ghaffari, A. (2016). Determining yield stability and model selection by AMMI method in rain-fed durum wheat genotypes. *Turkish Journal of Field Crops*, 21, 174-183.
- Kunz, M., Martin, D., & Puke, H. (2002). Precision of beet analyses in Germany explained for polarization. *Zuckerindustrie*, 127, 13-21.
- Malosetti, M., Ribaut, J.-M., & van Eeuwijk, F.A. (2013). The statistical analysis of multi-environment data: modeling genotype-by-environment interaction and its genetic basis. *Frontiers in Physiology*, 4, 44.
- Monteiro, F., Frese, L., Castro, S., Duarte, M.C., Paulo, O.S., Loureiro, J., & Romeiras, M.M. (2018). Genetic and genomic tools to assist sugar beet improvement: the value of the crop wild relatives. *Frontiers in plant science*, 9, 74-85.
- Mostafavi, K., Rajabi, A., & Orazizadeh, M.R. (2017). Genotype- environment interaction pattern analysis for sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivars yield using AMMI multivariate method. *Journal of Sugar Beet*, 33, 135-147.
- Mostafavi, K., & Saremirad, A. (2021). Genotype - Environment Interaction Study in Corn Genotypes Using additive main effects and multiplicative interaction method and GGE- biplot Method. *Journal of Crop Production*, 14, 1-12.
- Najafi Mirak, T., Dastfal, M., Andarzian, B., Farzadi, H., Bahari, M., & Zali, H. (2018). Evaluation of durum wheat cultivars and promising lines for yield and yield stability in warm and dry areas using AMMI model and GGE biplot. *Journal of Crop Breeding*, 10, 1-12.
- Omrani, S., Omrani, A., Afshari, M., Saremirad, A., Bardehji, S., & Foroozesh, P. (2019). Application of Additive Main Effects and Multiplicative Interaction and Biplot Graphical Analysis Multivariate Methods to Study of Genotype-Environment Interaction on Safflower Genotypes Grain Yield. *Journal of Crop Breeding* 11, 153-163.
- Peng, S., Cassman, K.G., Virmani, S., Sheehy, J., & Khush, G. (1999). Yield potential trends of tropical rice since the release of IR8 and the challenge of increasing rice yield potential. *Crop Science*, 39, 1552-1559.
- Purchase, J.L. (1997). Parametric analysis to describe genotype x environment interaction and yield stability in winter wheat, University of the Free State.
- Rajabi, A., Ahmadi, M., Bazrafshan, M., Hassani, M., & Saremirad, A. (2022). Evaluation of resistance and determination of stability of different sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genotypes in rhizomania-infected conditions. *Food Science & Nutrition*, 11, 1403-1414.
- Raju, B. (2002). A study on AMMI model and its biplots. *Indian Society of Agricultural Statistics (India)*, 55, 297-322.
- Ramzi, E., Asghari, A., Khomari, S., & Mohammaddoust e Chamanabad, H. (2018). Investigation of durum wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum* Desf) lines for tolerance to aluminum stress condition. *Journal of Crop Breeding*, 10, 63-72.
- Rao, A., & Prabhakaran, V. (2005). Use of AMMI in Simultaneous Selection of Genotypes for Yield and Stability. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics*, 59, 76-82.

- Ribeiro, I.C., Pinheiro, C., Ribeiro, C.M., Veloso, M.M., Simoes-Costa, M.C., Evaristo, I., Paulo, O.S., & Ricardo, C.P. (2016). Genetic diversity and physiological performance of Portuguese wild beet (*Beta vulgaris* spp. *maritima*) from three contrasting habitats. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1293.
- Sabaghnia, N., Dehghani, H., Alizadeh, B., & Mohghaddam, M. (2010). Genetic analysis of oil yield, seed yield, and yield components in rapeseed using additive main effects and multiplicative interaction biplots. *Agronomy Journal*, 102, 1361-1368.
- Sadeghzadeh Hemayati, S., Saremirad, A., Hosseinpour, M., Jalilian, A., Ahmadi, M., Azizi, H., Hamidi, H., Hamdi, F., & Matloubi Aghdam, F. (2022). Evaluation of white sugar yield stability of some commercially released sugar beet cultivars in Iran from 2011-2020. *Seed and Plant Journal*, 38, 339-364.
- Saremirad, A., & Mostafavi, K. (2021). Using AMMI and Biplot Graphical Analysis Multivariate Methods to Evaluate the Effect of Genotype-Environment Interaction in Cotton Genotypes. *Iranian Journal of Cotton Researches*, 8, 127-144.
- Sharifi, P., Aminpanah, H., Erfani, R., Mohaddesi, A., & Abbasian, A. (2017). Evaluation of genotype× environment interaction in rice based on AMMI model in Iran. *Rice Science*, 24, 173-180.
- Sneller, C., Kilgore-Norquest, L., & Dombek, D. (1997). Repeatability of yield stability statistics in soybean. *Crop science*, 37, 383-390.
- Taleghani, D., Rajabi, A., Sadeghzadeh Hemayati, S., & Saremirad, A. (2022). Improvement and selection for drought-tolerant sugar beet (*Beta vulgaris* L.) pollinator lines. *Results in Engineering*, 13, 100367.
- Taleghani, D., Rajabi, A., Saremirad, A., & Fasahat, P. (2023). Stability analysis and selection of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genotypes using AMMI, BLUP, GGE biplot and MTSL. *Scientific Reports*, 13, 10019.
- Taleghani, D., & Saremirad, A. (2022). Investigation of genotype-environment interaction effect on sugar yield and determination of stability of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) hybrids. *Journal of Crop Breeding*, 14, 103-118.
- Yaghutipoor, A., Farshadfar, E., & Saeedi, M. (2017). Investigation of bread wheat genotypes for drought tolerance using suitable combination method. *Journal of Environmental Stresses in Crop Sciences*, 10, 247-256.
- Yan, W., & Kang, M.S. (2002). GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists, CRC press.
- Yan, W., Kang, M.S., Ma, B., Woods, S., & Cornelius, P.L. (2007). GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science*, 47, 643-653.
- Zali, H., Farshadfar, E., Sabaghpour, S.H., & Karimizadeh, R. (2012). Evaluation of genotype× environment interaction in chickpea using measures of stability from AMMI model. *Annals of Biological Research*, 3, 3126-3136.
- Zali, H., Sofalian, O., Hasanloo, T., Asgharii, A., & Hoseini, S.M. (2015). Appraising of drought tolerance relying on stability analysis indices in canola genotypes simultaneously, using selection index of ideal genotype (SIIG) technique: Introduction of new method. *Biological Forum-An International Journal*, 7, 425-436.
- Zhang, Z., Cheng, L., & Zhonghuai, X. (1998). Analysis of variety stability based on AMMI model. *Zuo wu xue bao*, 24, 304-309.
- Zobel, R. (1994). Stress resistance and root systems. In "Proceedings of the Workshop on Adaptation of Plants to Soil Stress. Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln", pp. 80-99
- Zobel, R.W., Wright, M.J., & Gauch Jr, H.G. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal*, 80, 388-393.