

مطالعه تأثیر برهمکنش ژنوتیپ- محیط بر عملکرد قند هیبریدهای چغندر قند (*Beta vulgaris* L.)

سعید صادقزاده حمایتی^{۱*}، علی صارمی‌راد^۱، رحیم محمدیان^۱، علی جلیلیان^۲، جواد رضایی^۳، مستانه شریفی^۴، عادل پدram^۵

- ۱- مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
- ۲- بخش تحقیقات چغندر قند، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران
- ۳- بخش تحقیقات چغندر قند، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
- ۴- بخش تحقیقات چغندر قند، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
- ۵- بخش تحقیقات چغندر قند، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران

* مسئول مکاتبه: s.sadeghzadeh@areeo.ac.ir

DOI: 10.22034/CSRAR.2023.346833.1248

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۲

چکیده

در پژوهش حاضر، نقش برهمکنش ژنوتیپ- محیط بر عملکرد قند هیبریدهای چغندر قند و شناسایی هیبریدهای پایدار تحت مطالعه قرار گرفت. در این راستا، ۱۵ هیبرید و پنج شاهد در چهار محیط ارزیابی گردید. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سال زراعی ۱۴۰۰ انجام شد. نتایج تجزیه واریانس مرکب مؤید تأثیر معنی‌دار اثرات اصلی محیط و ژنوتیپ بر تمامی صفات در سطح احتمال یک درصد بود. برهمکنش میان آن‌ها در سطوح احتمال یک و پنج درصد برای همه صفات به جز درصد قند ناخالص و خالص معنی‌دار بود. تجزیه اثرات ضرب‌پذیر مدل AMMI نشان داد که دو مؤلفه اول به ترتیب در سطوح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار هستند. بای‌پلات میانگین عملکرد و اولین مؤلفه اصلی برهمکنش مؤید برتری ژنوتیپ ۲۰ به دلیل دارا بودن عملکرد قند و پایداری بالا بود. بر اساس روش GGE بای‌پلات محیط‌های کرج، شیراز و میاندوآب از نظر رتبه عملکرد ژنوتیپ‌ها واکنش نسبتاً مشابهی داشتند و در این محیط‌ها ژنوتیپ ۲۰ پایدار بود. واکنش مشهد نسبت به سه محیط دیگر متفاوت بود و در آن ژنوتیپ ۹ پایداری مناسبی داشت. بر اساس شاخص MTSI، چهار ژنوتیپ ۱۸، ۲، ۲۰ و ۱۷ به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار شناخته شدند. به طور کلی در میان هیبریدهای اصلاحی، در رتبه نخست، هیبرید حاصل از تلاقی (7112 × SB36) × S1-960132 (ژنوتیپ ۲) و پس از آن هیبرید به دست آمده از تلاقی S1-970063 × (7112 × SB36) (ژنوتیپ ۹) را می‌توان به‌عنوان هیبریدهای امیدبخش در برنامه‌های ارزیابی نهایی تا معرفی هیبریدهای جدید مورد استفاده قرار داد.

واژه‌های کلیدی: پایدار، مؤلفه، AMMI، GGE بای‌پلات، MTSI

مقدمه

تولید محصول سایه افکنند؛ به این موضوع برهمکنش ژنوتیپ- محیط اطلاق می‌شود. در حقیقت برهمکنش ژنوتیپ- محیط پدیده‌ای است که به پاسخ مختلف ژنوتیپ‌ها در طیف وسیعی از محیط‌ها اشاره دارد (Kang, 2004; Kang, 1997) و در سطح جهانی توسط همه افرادی که در حوزه اصلاح و نگهداری گیاهان زراعی فعالیت دارند، شناخته شده است، زیرا این پدیده برای به‌زادگران گیاهی از حیث آزادسازی ارقام جدید و پر محصول دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. ویژگی‌های کمی نظیر عملکرد که از نظر اقتصادی و زراعی مهم هستند، می‌توانند به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر برهمکنش ژنوتیپ- محیط قرار گیرند و واکنش‌های متفاوتی را ارائه دهند. لذا شناخت حقیقت پدیده

چغندر قند یک محصول بسیار مهم و تخصصی کشاورزی است که صرفاً در صنعت قند مورد استفاده قرار می‌گیرد و سهم عمده‌ای از انرژی مورد نیاز مردم جهان را تأمین می‌نماید (Monteiro et al., 2018; Ribeiro et al., 2016). بنابراین اصلاح این گیاه با هدف بهبود عملکرد قند اهمیت بسزایی دارد. عملکرد شامل اثر اصلی ژنوتیپ، اثر اصلی محیط و برهمکنش ژنوتیپ با محیط است. عملکرد با توجه به ماهیت چندژنی آن، شدیداً تحت تأثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرد و تغییرات بالایی در آن رخ می‌دهد. در واقع هر محیطی ویژگی‌های خاک و شرایط آب و هوایی خاص خود را دارد که می‌تواند بر بهره‌وری

به‌نژادی محصولات مختلف است. با استفاده از GGE بای‌پلات محیط‌های مورد بررسی به چندین گروه محیطی که در آن محیط‌ها از نظر واکنش به ژنوتیپ‌ها نسبتاً مشابه عمل می‌کنند، گروه‌بندی می‌شوند (Makumbi *et al.*, 2015). ویژگی منحصر به فرد GGE بای‌پلات این است که به استناد نمودارهای حاصل می‌توان اظهار نمود که کدام ژنوتیپ در کدام محیط یا زیرگروه از پتانسیل بالاتری برخوردار می‌باشد (Farshadfar *et al.*, 2012).

اخیراً، مبانی نظری شاخص پایداری چندمتغیره^۳ (MTSI) برای انتخاب ژنوتیپ‌های با کارایی بالا و پایدار در آزمایش‌های چندمحیطی بر اساس صفات متعدد با در نظر گرفتن هر دو چارچوب مدل اثر ثابت و اثر تصادفی معرفی شده است (Olivoto *et al.*, 2019). شاخص پایداری MTSI بر اساس فاصله از ژنوتیپ ایده‌آلی که از طریق تجزیه به عامل‌ها برآورد می‌شود، محاسبه می‌گردد (Olivoto *et al.*, 2019). این شاخص امکان انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار را با دیفرانسیل‌گزینش مثبت برای صفاتی که افزایش آن‌ها مدنظر است و دیفرانسیل‌گزینش منفی برای صفاتی که کاهش آن‌ها مدنظر است، فراهم می‌کند. از طرفی این شاخص پایداری می‌تواند برای اصلاح‌کنندگان و کشاورزانی که هدف آن‌ها انتخاب هم‌زمان برای میانگین عملکرد و پایداری با در نظر گرفتن چندین صفت است، مفید باشد؛ به دلیل اینکه فرآیند گزینش منحصر به فردی را فراهم می‌کند که تفسیر آن آسان است و ساختار همبستگی را در بین صفات در نظر می‌گیرد (Olivoto *et al.*, 2019).

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی هیبریدهای اصلاحی از نظر پتانسیل تولید کمی و پایدار با به‌کارگیری روش‌های چندمتغیره اثرات اصلی افزایشی و برهمکنش ضرب‌پذیر (AMMI)، روش گرافیکی GGE بای‌پلات و شاخص پایداری MTSI به مرحله اجرا درآمد.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و جزئیات اجرای آزمایش‌ها

تعداد ۱۵ هیبرید به همراه دو شاهد داخلی سینا و دنا و سه

مذکور این امکان را برای به‌نژادگران فراهم می‌آورد تا بتوانند در ارزیابی و آزادسازی ژنوتیپ‌ها، دقت بیشتری کرده و ژنوتیپ‌هایی را انتخاب نمایند که از نظر تولید محصول مطلوب هستند.

مطالعه جامع برهمکنش ژنوتیپ- محیط نیاز به روش‌های آماری قدرتمندی دارد. روش‌های متفاوتی برای ارزیابی اثر برهمکنش ژنوتیپ و محیط به‌وسیله محققین مختلف ارائه شده است که به‌طور کلی در دو گروه اصلی روش‌های تک‌متغیره و چندمتغیره تقسیم‌بندی می‌شوند. در میان روش‌های چندمتغیره مدل اثرات اصلی جمع‌پذیر و برهمکنش ضرب‌پذیر^۱ (AMMI) و مدل گرافیکی GGE بای‌پلات^۲ از اهمیت بالایی برخوردار هستند. روش AMMI در واقع ترکیبی از مدل تجزیه واریانس و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی است. بخش اول مدل AMMI یعنی بخش جمع‌پذیر از تجزیه واریانس استفاده می‌کند (Gauch, 1992) و بخش دوم که قسمت ضرب‌پذیر مدل AMMI را شامل می‌شود از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به‌منظور تجزیه برهمکنش ژنوتیپ و محیط به یک تا n مؤلفه اصلی استفاده می‌نماید (Gauch and Zobel, 1997). در حقیقت دلیل استفاده گسترده از این مدل قدرت تفکیک بالای اثرات اصلی و برهمکنش ژنوتیپ و محیط و نیز توجه بخش بزرگی از مجموع مربعات برهمکنش می‌باشد (Ebdon and Gauch, 2002).

مدل گرافیکی GGE biplot بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی پیشنهاد گردیده است (Gabriel, 1971; Gauch and Zobel, 1997; Kempton, 1984; Yan *et al.*, 2007). این روش از طریق نمایش گرافیکی برهمکنش ژنوتیپ و محیط به اصلاح‌گر کمک می‌کند تا به‌سادگی پایداری ژنوتیپ‌ها و ترکیب پایداری با عملکرد ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مختلف را بررسی نماید. استفاده از این روش امکان بررسی روابط میان محیط‌ها و شناسایی محیط‌های هدف در برنامه‌های اصلاحی را به‌سادگی میسر می‌سازد (Yan *et al.*, 2001). در واقع مفهوم GGE از اثرات اصلی ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ و محیط گرفته شده است (Yan and Kang, 2002). از کاربردهای مهم GGE بای‌پلات تعیین و گروه‌بندی محیط‌های هدف در برنامه‌های

3- Multi-trait stability index

1- Additive main effect and multiplicative interaction

2- Genotype plus genotype- environment interaction bi-plot

چغندر قند کرج، مشهد، شیراز و میاندوآب کشت شدند. مشخصات کامل مکان‌های اجرای آزمایش اعم از طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا در جدول ۲ ارائه گردیده است.

شاهد خارجی نوودورا (Novodora)، مودکس (Modex)، لوریکت (Loriquet)، مواد ژنتیکی پژوهش حاضر را تشکیل دادند که مشخصات والدی این هیبریدها در جدول ۱ آورده شده است. مواد گیاهی تحت بررسی در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در چهار ایستگاه تحقیقاتی

جدول ۱- مشخصات ژنوتیپ‌های آزمایشی چغندر قند مورد مطالعه

Table 1- Specifications of studied experimental sugar beet genotypes

کد ژنوتیپ	شجره	کد ژنوتیپ	شجره
Genotype code	Pedigree	Genotype code	Pedigree
G1	(7112 * SB36) * S1 - 960104	G11	(7112 * SB36) * S1 - 970073
G2	(7112 * SB36) * S1 - 960132	G12	(7112 * SB36) * S1 - 970092
G3	(7112 * SB36) * S1 - 960151	G13	(7112 * SB36) * S1 - 970096
G4	(7112 * SB36) * S1 - 960156	G14	(7112 * SB36) * S1 - 970118
G5	(7112 * SB36) * S1 - 960163	G15	(428-P.395 * 940171) * 920128
G6	(7112 * SB36) * S1 - 970026	G16	Sina
G7	(7112 * SB36) * S1 - 970027	G17	Dena
G8	(7112 * SB36) * S1 - 970041	G18	Novodoro
G9	(7112 * SB36) * S1 - 970063	G19	Modex
G10	(7112 * SB36) * S1 - 970067	G20	Loriquet

جدول ۲- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های تحقیقاتی اجرای آزمایش

Table 2- Geographical characteristics of the experimental research stations

کد محیط	ایستگاه تحقیقاتی	ارتفاع از سطح دریا	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
Environment code	Research station	Elevation AMSL (m)	Latitude	Longitude
E1	کرج Karaj	1312	35°55'N	50°54'E
E2	مشهد Mashhad	1316	36°30'N	59°37'E
E3	شیراز Shiraz	1484	29°32'N	52°36'E
E4	میاندوآب Miandoab	1296	36°58'N	46°05'E

صورت پذیرفت. مبارزه با علف‌های هرز پهن‌برگ و نازک‌برگ مزارع با وجین دستی انجام گرفت.

اندازه‌گیری صفات

پس از عملیات برداشت و ثبت عملکرد، از ریشه‌های مربوط به هر ژنوتیپ نمونه خمیر تهیه گردید؛ سپس در آزمایشگاه کنترل کیفی ستاد مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند از نظر ویژگی‌های درصد قند ناخالص، نیتروژن مضره و عنصرهای سدیم و پتاسیم به مورد بررسی قرار گرفت (Kunz *et al.*, 2002) و در نهایت از مقادیر به‌دست‌آمده برای این ویژگی‌ها، جهت تخمین درصد قند ملاس، درصد قند خالص،

عملیات آماده‌سازی زمین کشت شامل شخم، دیسک و ایجاد ردیف کاشت بود. هر کرت آزمایشی شامل سه خط به طول هشت متر و فاصله بین ردیف ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. پس از آماده‌سازی بستر کشت با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی هر یک از مناطق اجرای آزمایش، طی دو هفته آخر اردیبهشت ۱۴۰۰ عمل کشت آزمایش در چهار منطقه تحت بررسی با استفاده از دستگاه آبیور انجام شد. در آزمایش هر یک از مناطق، بر روی ردیف‌های کشت تعداد بذر بیشتری قرار داده شد که پس از سبز شدن و در مرحله دو تا چهار برگی تنک گردیدند و به تراکم ۱۲۰۰۰۰ بوته در هکتار رسانده شدند. آبیاری به روش نشستی در هر یک از چهار منطقه تحت بررسی،

اساس روابط ۱ تا ۴ استفاده شد:

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

(Cook and Scott, 1993) (۱)

$$WSC = SC - (MS + 0.6)$$

(Reinfeld *et al.*, 1974) (۲)

$$SY = RY \times SC$$

(۳)

$$WSY = WSC \times RY$$

(Cook and Scott, 1993) (۴)

AMMI و GGE بای‌پلات از نظر این صفت (عملکرد قند خالص) انجام شد. برای انجام تجزیه پایداری به روش AMMI از رابطه ۵ استفاده شد.

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

در رابطه ۵، Y_{ger} عملکرد ژنوتیپ g ام 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 g ام 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 AMMI 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 به‌دست‌آمده از مدل AMMI برای شناسایی ژنوتیپ پایدار نیز به‌قرار روابط ۶ تا ۱۷ استفاده شد.

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

$$AMGE = \sum_{n=1}^N \lambda_n \gamma_{in} \delta_{jn}$$

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

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

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

عملکرد قند ناخالص و در نهایت عملکرد قند خالص به ترتیب بر

در این روابط MS^1 درصد قند ملاس، K^+ پتاسیم برحسب میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه، Na^+ سدیم برحسب میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه، $\alpha \text{ amino } N$ نیتروژن مضربه برحسب میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه، WSC^2 درصد قند خالص، SC^3 درصد قند ناخالص، SY^4 عملکرد قند ناخالص برحسب تن در هکتار، RY^5 عملکرد ریشه برحسب تن در هکتار و WSY^6 عملکرد قند خالص برحسب تن در هکتار می‌باشد.

تجزیه و تحلیل آماری

ابتدا پیش از انجام هرگونه تجزیه و تحلیلی، همگنی واریانس خطاهای آزمایشی با آزمون بارتلت انجام شد. پس از اینکه یکنواختی واریانس خطا در آزمایش‌های مختلف تأیید شد، تجزیه واریانس مرکب روی داده‌های هر یک از صفات صورت گرفت. از آنجایی که عملکرد قند خالص دربرگیرنده مقادیر سایر صفات مورد مطالعه بوده، لذا ویژگی مهم و نهایی محسوب می‌شود؛ بنابراین تجزیه پایداری بر اساس مدل

(Sneller *et al.*, 1997) (۶)

(Sneller *et al.*, 1997) (۷)

(Zobel, 1994) (۸)

(Annicchiarico, 1997) (۹)

(Rao and Prabhakaran, 2005) (۱۰)

4- Sugar yield
5- Root yield
6- White sugar yield

1- Molasses sugar
2- White sugar content
3- Sugar content

$$AV_{AMGE} = \sum_{j=1}^E \sum_{n=1}^{N'} |\lambda_n \gamma_{in} \delta_{jn}| \quad (Zali et al., 2012) (۱۱)$$

$$D_Z = \sum_{n=1}^{N'} \gamma_{in}^2 \quad (Zhang et al., 1998) (۱۲)$$

$$MASI = \sqrt{\sum_{n=1}^{N'} PC_n^2 \times \theta_1^2} \quad (Ajay et al., 2018) (۱۳)$$

$$MASV = \sqrt{\sum_{n=1}^{N'} \left(\frac{SSIPC_n}{SSIPC_{n+1}} \right) \times (PC_n)^2 + (PC_{N'})^2} \quad (Zali et al., 2012) (۱۴)$$

$$Z_a = \sum_{n=1}^{N'} |\theta_n \gamma_{in}| \quad (Zali et al., 2012) (۱۵)$$

$$ASI = \sqrt{[PC_1^2 \times \theta_1^2] + [PC_2^2 \times \theta_2^2]} \quad (Jambhulkar et al., 2014) (۱۶)$$

$$FA = \sum_{n=1}^{N'} \lambda_n^2 \gamma_{in}^2 \quad (Raju, 2002) (۱۷)$$

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

نتایج و بحث

تجزیه واریانس مرکب

به‌منظور بررسی همگن بودن واریانس خطاهای آزمایشی، آزمون بارتلت انجام شد. نتیجه این آزمون مؤید یکنواختی واریانس خطا در آزمایش‌های مختلف بود. لذا با توجه به یکنواخت بودن واریانس خطا در آزمایش‌های مختلف جهت تعیین برهمکنش ژنوتیپ- محیط بر روی داده‌های حاصل از صفات عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص، درصد قند ناخالص، درصد قند خالص، عملکرد قند خالص، سدیم، پتاسیم، نیتروژن مضره و درصد قند ملاس، تجزیه واریانس مرکب انجام شد (جدول ۳). اثر محیط برای تمامی صفات نامبرده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. ژنوتیپ‌های آزمایشی تفاوت معنی‌داری از نظر تمامی صفات مورد مطالعه در سطح احتمال یک درصد نشان دادند. نتایج مربوط به برهمکنش ژنوتیپ- محیط حاکی از معنی‌دار بودن این اثر در سطوح احتمال یک و پنج درصد برای تمام صفات مورد مطالعه به جز درصد قند

تجزیه گرافیکی با روش GGE بای‌پلات بر اساس تجزیه به مقادیر منفرد طبق رابطه ۱۸ انجام شد.

$$(Yan and Kang, 2002) (۱۸)$$

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

در رابطه ۱۸ میانگین ژنوتیپ Y_{ij} در محیط λ_m ، μ میانگین کل ژنوتیپ‌ها، β_j اثر اصلی محیط λ_m و λ_1 و λ_2 ویژه برای اولین و دومین مؤلفه، ξ_{i1} و ξ_{i2} بردارهای ویژه ژنوتیپی و η_{j1} و η_{j2} بردارهای محیطی مؤلفه اول و دوم و ε_{ij} مقدار باقیمانده برای ژنوتیپ λ_m در محیط λ_m هستند. برای تجزیه داده‌ها به روش گرافیکی بای‌پلات از نرم‌افزار R بر اساس پنج الگوی: ۱. بررسی روابط میان محیط‌ها، ۲. رتبه‌بندی محیط‌ها بر اساس محیط ایده‌آل، ۳. تعیین بهترین رقم در هر مکان، ۴. رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس میانگین عملکرد و پایداری و ۵. رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس ژنوتیپ استفاده شد.

شاخص پایداری $MTSI$ برای محاسبه میانگین عملکرد و پایداری هم‌زمان صفات عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص، درصد قند ناخالص، عملکرد قند خالص، درصد قند خالص، سدیم، پتاسیم، نیتروژن مضره و درصد قند ملاس بر اساس رابطه ۱۹ (Olivoto et al., 2019) برآورد گردید.

$$MTSI_i = \left[\sum_{j=1}^f (\gamma_{ij} - \gamma_j)^2 \right]^{0.5} \quad (۱۹)$$

ناخالص و خالص بود. معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ-محیط، نیز تغییرات در رتبه نسبی ژنوتیپ‌ها می‌باشد. به دلیل تغییرات زیاد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مورد بررسی و

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب صفات مختلف مورد مطالعه در ژنوتیپ‌های چغندر قند آزمایشی

Table 3- Combined analysis of variance of studied traits in experimental sugar beet genotypes

صفت Trait	منابع تغییر Source of variation				
	محیط Environment (df: 3)	خطا ۱ Error 1 (df: 12)	ژنوتیپ Genotype (df: 19)	برهمکنش ژنوتیپ-محیط Genotype× Environment Interaction (df: 57)	خطا ۲ Error 2 (df: 228)
عملکرد ریشه Root yield	23685.44**	100.05	425.01**	195.37**	56.10
عملکرد قند ناخالص Sugar yield	675.77**	3.89	12.18**	6.01**	2.14
درصد قند ناخالص Sugar content	367.77**	2.56	10.78**	1.63 ^{ns}	1.37
درصد قند خالص White sugar content	341.96**	3.53	19.38**	2.48 ^{ns}	1.85
عملکرد قند خالص White sugar yield	657.69**	2.96	10.31**	4.17**	1.72
سدیم Na ⁺	52.58**	1.24	5.69**	1.19**	0.56
پتاسیم K ⁺	151.11**	0.51	2.83**	0.65**	0.31
نیتروژن مضره Harmful nitrogen	360.58**	1.01	1.14**	0.69**	0.33
قند ملاس Molasses sugar	55.19**	0.30	1.48**	0.22*	0.14

ns, *, **: معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و غیر معنی‌دار.

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

تجزیه AMMI

شد. بر اساس این نتایج (جدول ۴) تنها دو مؤلفه اول برهمکنش معنی‌دار به ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد داشتند. مؤلفه اول ۶۸/۴۰ درصد از تغییرات برهمکنش را توجیه نمود. مؤلفه اصلی دوم توانست ۲۳/۸۰ درصد از تغییرات مربوط به برهمکنش ژنوتیپ-محیط را تبیین نماید؛ این مؤلفه به همراه مؤلفه اول در مجموع ۹۲/۲۰ درصد تغییرات کل برهمکنش ژنوتیپ-محیط را توجیه کردند. مجموع مربعات باقی‌مانده از مدل AMMI (Noise) با پایین‌ترین میانگین مربعات غیر معنی‌دار به دست آمد که نشان‌دهنده دقت قابل ملاحظه این مدل است (Anandan and Eswaran, 2009). در مطالعه‌ای که با استفاده از مدل AMMI انجام شد (Mostafavi and Saremirad, 2021)، بیان گردید که مؤلفه اصلی اول برهمکنش معنی‌دار می‌باشد و حدود ۶۳ درصد از تنوع داده‌ها

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های آزمایش بر اساس مدل AMMI در جدول ۴ ارائه گردیده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده میانگین مربعات برهمکنش ژنوتیپ-محیط عملکرد قند در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. این موضوع حاکی از تنوع میان ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف و مشکلاتی که به‌نژادگران در گزینش و آزادسازی با آن مواجه هستند، می‌باشد. درصد واریانس توجیه‌شده برای برهمکنش ژنوتیپ-محیط برابر با ۸/۴۰ درصد از مجموع مربعات کل بود. در پژوهشی که با استفاده از روش AMMI انجام شد، واریانس توجیه‌شده به‌وسیله برهمکنش ژنوتیپ-محیط برابر با ۷/۸۴ درصد برآورد گردید (Basafa and Taherian, 2016). اثر ضرب‌پذیر مدل AMMI به مؤلفه‌های اصلی برهمکنش تجزیه

مطالعه‌ای، چهار مؤلفه اول مجموعاً ۸۳ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ- محیط را تبیین نمودند (Omrani *et al.*, 2019).

را تبیین می‌نمایند. در مطالعه‌ای دیگر نشان داده شد که پنج مؤلفه اصلی برهمکنش در مجموع ۹۰/۳۰ درصد از مجموع مربعات برهمکنش ژنوتیپ و محیط را توجیه می‌کند (Karimizadeh *et al.*, 2008). بر اساس نتایج حاصل از

جدول ۴- تجزیه واریانس برهمکنش ژنوتیپ- محیط عملکرد قند ژنوتیپ‌های چغندر قند آزمایشی بر اساس مدل AMMI

Table 4- Analysis of variance of genotype- environment interaction of sugar yield of experimental sugar beet genotypes based on AMMI model

منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	واریانس توجیه شده
Source of variation	df	Sum square	Mean square	Sum square explained (%)
اولین مؤلفه برهمکنش IPCA1	21	162.77	7.75**	68.40
دومین مؤلفه برهمکنش IPCA2	19	56.74	2.98*	23.80
باقی‌مانده Noise	17	18.54	1.09 ^{ns}	7.8

*, **, ns: معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و غیر معنی‌دار.

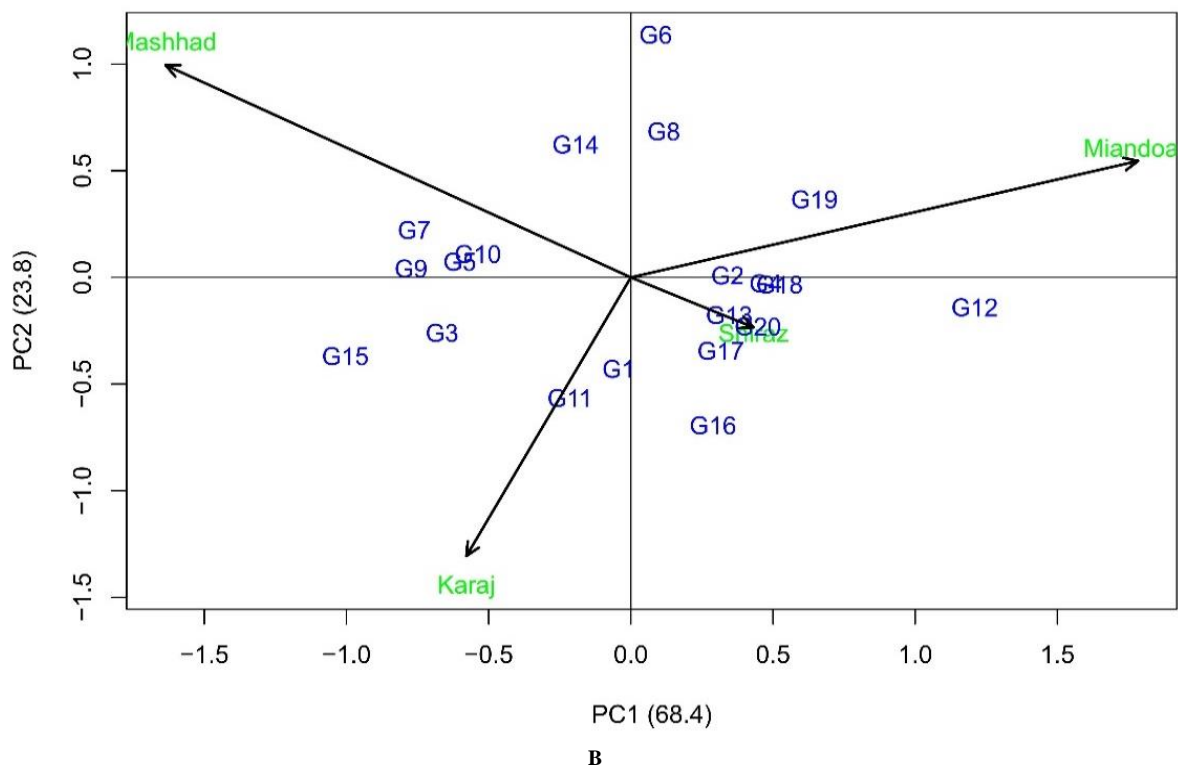
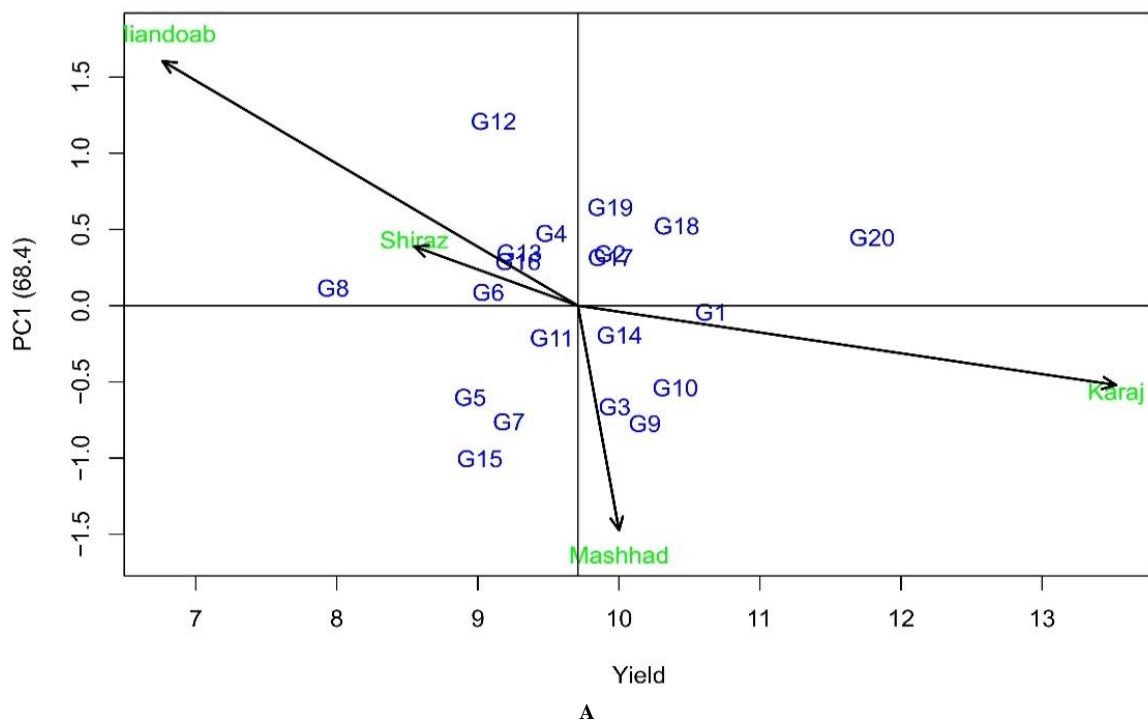
** : Non-significant Significant at 5% and 1% probability levels, respectively *, ns,

به طوری که محیط‌های میان‌دو آب و شیراز عملکرد قندی کمتر از میانگین کل داشته و برهمکنش مشابهی نشان دادند. این محیط‌ها با ژنوتیپ‌های شماره ۲۰، ۱۸، ۱۹، ۱۷، ۲، ۴، ۱۳، ۱۶، ۱۲، ۶ و ۸ برهمکنش مثبت و با ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۱۴، ۱۱، ۱۰، ۹، ۳، ۵، ۷ و ۱۵ 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 ۹۲/۲۰ درصد تغییرات مربوط به اثر ضرب‌پذیر توسط این بای‌پلات تبیین می‌شود. 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 ژنوتیپ‌ها با محیط‌های میان‌دو آب، مشهد و کرج سازگاری خصوصی قابل ملاحظه‌ای وجود ندارد، اما در مقابل بین محیط شیراز با ژنوتیپ ۲۰ سازگاری خصوصی بسیار بالایی مشاهده شد. ژنوتیپ‌های ۲، ۴، ۱۸، ۱۳، ۲۰ و ۱۷ به علت این‌که نزدیک به مبدأ مختصات قرار دارند، از سازگاری عمومی برخوردار هستند. هیچ‌یک از محیط‌های تحت مطالعه به جز محیط شیراز دارای مقادیر مؤلفه‌های اول و دوم برهمکنش ژنوتیپ- محیط

به منظور در نظر گرفتن پایداری عملکرد و سازگاری ویژه ژنوتیپ‌ها با مناطق مورد مطالعه، از بای‌پلات عملکرد قند با مؤلفه اصلی اول (شکل A1) و بای‌پلات دو مؤلفه اصلی اول (شکل B1) استفاده شد. بر طبق بای‌پلات میانگین عملکرد قند در مقابل اولین مؤلفه اصلی برهمکنش، ژنوتیپی که از لحاظ عملکرد قند (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، ژنوتیپ شماره ۲۰ و در بین محیط‌ها، محیط کرج به دلیل داشتن عملکرد قند بسیار بالاتر از میانگین و مقدار پایین مؤلفه اول برهمکنش، تحت عنوان پایدارترین ژنوتیپ و محیط شناخته شدند. اگر ژنوتیپ و محیطی از لحاظ مؤلفه اول اصلی برهمکنش هم علامت باشند، دارای برهمکنش مثبت و اگر از لحاظ مؤلفه نامبرده هم علامت نباشند، دارای برهمکنش منفی خواهند بود. محیط‌های کرج و مشهد با عملکرد قندی بیش از میانگین کل دارای برهمکنش مثبت با ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۱۴، ۱۱، ۱۰، ۹، ۳، ۵، ۷ و ۱۵ و برهمکنش منفی با ژنوتیپ‌های شماره ۲۰، ۱۸، ۱۹، ۱۷، ۲، ۴، ۱۳، ۱۶، ۱۲، ۶ و ۸ بودند. محیط‌های شیراز و میان‌دو آب از وضعیتی عکس محیط‌های کرج و مشهد برخوردار بودند؛

نزدیک به صفر (مبدأ مختصات) نبود که مبین این موضوع است که محیط‌ها پتانسیل ایجاد برهمکنش را دارا هستند.



شکل ۱- A: نمودار پراکنش ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مورد آزمایش با استفاده از میانگین عملکرد قند و اولین مؤلفه اصلی برهمکنش بر اساس مدل AMMI1.

B: نمودار پراکنش ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مورد آزمایش بر اساس اولین و دومین مؤلفه اصلی برهمکنش بر اساس مدل AMMI2

Figure 1- A: Scatter plot for genotypes and environments derived from yield mean and first principal component axes based AMMI1 model. B: Scatter plot for genotypes and environments derived from first two interaction principal component axes based AMMI2

جدول ۵- میانگین عملکرد قند و آماره‌های مختلف پایداری AMMI در ژنوتیپ‌های آزمایشی چغندر قند

Table 5- White sugar yield mean and AMMI stability differences parameters in sugar beet experimental genotypes

ژنوتیپ Genotype	میانگین عملکرد قند White sugar yield mean (t. ha ⁻¹)	AMGE	ASI	ASTAB	AVAMGE	DA	DZ	EV	FA	MASI	MASV	SIPC	Za
G1	10.65	-1.11E-16	0.11	0.19	1.48	0.84	0.22	0.02	0.70	0.11	0.45	0.47	0.06
G2	9.94	1.11E-16	0.23	0.12	1.51	0.86	0.13	0.01	0.74	0.23	0.98	0.35	0.09
G3	9.97	-4.44E-16	0.46	0.51	3.12	1.75	0.29	0.04	3.07	0.46	1.92	0.92	0.21
G4	9.52	1.39E-16	0.32	0.23	2.08	1.20	0.19	0.02	1.44	0.32	1.36	0.50	0.13
G5	8.94	-1.11E-16	0.41	0.37	2.61	1.53	0.24	0.03	2.33	0.41	1.73	0.68	0.17
G6	9.07	8.33E-16	0.28	1.30	3.92	2.22	0.59	0.17	4.92	0.28	1.17	1.23	0.16
G7	9.22	-4.44E-16	0.52	0.63	3.22	1.97	0.32	0.05	3.89	0.52	2.20	0.98	0.23
G8	7.97	3.89E-16	0.18	0.48	2.38	1.36	0.36	0.06	1.85	0.18	0.76	0.80	0.12
G9	10.18	-2.22E-16	0.53	0.60	3.40	1.95	0.31	0.05	3.82	0.53	2.22	0.81	0.21
G10	10.40	-1.94E-16	0.37	0.30	2.31	1.38	0.22	0.02	1.89	0.37	1.55	0.65	0.16
G11	9.53	-3.47E-16	0.20	0.36	2.00	1.22	0.30	0.05	1.49	0.20	0.83	0.78	0.13
G12	9.11	3.89E-16	0.83	1.48	5.26	3.07	0.48	0.12	9.40	0.83	3.47	1.35	0.34
G13	9.29	8.33E-17	0.24	0.15	1.52	0.94	0.16	0.01	0.88	0.24	1.01	0.52	0.12
G14	10.00	1.39E-16	0.20	0.43	2.08	1.30	0.33	0.05	1.70	0.20	0.84	0.82	0.13
G15	9.01	-9.44E-16	0.69	1.14	4.70	2.64	0.44	0.10	6.95	0.69	2.90	1.37	0.32
G16	9.28	0.00E+00	0.26	0.56	2.48	1.53	0.38	0.07	2.34	0.26	1.08	0.98	0.16
G17	9.94	1.11E-16	0.23	0.22	1.80	1.04	0.22	0.02	1.08	0.23	0.97	0.66	0.13
G18	10.41	3.05E-16	0.36	0.27	2.29	1.32	0.21	0.02	1.75	0.36	1.50	0.56	0.15
G19	9.94	3.05E-16	0.45	0.55	3.11	1.78	0.32	0.05	3.16	0.45	1.89	1.01	0.22
G20	11.79	5.55E-17	0.31	0.25	1.97	1.21	0.21	0.02	1.47	0.31	1.30	0.68	0.15

AMGE: Sum Across Environments of GEI Modelled by AMMI, ASI: AMMI Stability Index, AMMI Stability Value, ASTAB: AMMI Based Stability Parameter, 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.

دست آمد، حاکی از آن بود که ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۲ و ۱۳ با کمترین مقادیر برای این چهار آماره، پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند. بر اساس SIPC و Za ژنوتیپ‌های شماره ۲ و ۱ با حداقل‌ترین مقادیر به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. با توجه به دو آماره DZ و EV ژنوتیپ‌هایی پایدار هستند که مقادیر کمتری از این آماره‌ها را به خود اختصاص دهند. بر این اساس ژنوتیپ‌های شماره ۲ و ۱۳ به ترتیب پایدارترین و ژنوتیپ‌های شماره ۶ و ۱۲ ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند. نتایج پژوهش حاضر تا حدودی مشابه یافته‌های پیشین بود (Cheloei *et al.*, 2020; Karimizadeh *et al.*, 2016; Rajabi *et al.*, 2023; Sharifi *et al.*, 2017; Taleghani *et al.*, 2023). آن‌ها ادعان داشتند که دقیق‌ترین مدل در تجزیه AMMI با استفاده از دو مؤلفه اصلی اول قابل پیش‌بینی است. با وجود روش‌های مختلف 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

نتایج میانگین عملکرد قند ژنوتیپ‌ها و آماره‌های پایداری مختلف تجزیه AMMI در جدول ۵ قابل‌رؤیت می‌باشد. میانگین عملکرد قند ژنوتیپ‌ها در همه محیط‌ها برابر ۹/۷۱ تن در هکتار برآورد شد. ژنوتیپ شماره ۲۰ بیشترین عملکرد قند را به میزان ۱۱/۷۹ تن در هکتار به خود اختصاص داد. پایین‌ترین میزان عملکرد قند به ژنوتیپ شماره ۸ با مقدار ۷/۹۷ تن در هکتار تعلق داشت. عملکرد قند ژنوتیپ‌های شماره ۱۱، ۴، ۲، ۱۷، ۱۹، ۳ و ۸ به ترتیب با مقادیر ۹/۵۳، ۹/۵۲، ۹/۹۴، ۹/۹۴، ۹/۹۴، ۹/۹۷ و ۹/۹۷ تن در هکتار در محدوده میانگین عملکرد قند همه ژنوتیپ‌ها در تمامی محیط‌ها قرار داشتند (جدول ۵). بر اساس آماره پایداری AMGE، بیشترین پایداری با میزان کمتر این آماره در ژنوتیپ شماره ۱۵ مشاهده شد. بر اساس آماره‌های ASI، MASI و MASV ژنوتیپ شماره ۱ با کمترین مقادیر برای این سه آماره، بیشترین پایداری را داشت. در این میان ژنوتیپ ۱۲ ناپایدارترین ژنوتیپ شناخته شد. نتایجی که با استفاده از آماره‌های ASTAB، AVAMGE، DA و FA به

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 گزارش شده است (Ajay *et al.*, 2020) که با توجه به این ۱۲ آماره پایداری AMMI (به‌خصوص با به‌کارگیری آماره‌های SIPC، MASI و MASV) ژنوتیپ‌های پر محصول را می‌توان شناسایی نمود.

تجزیه گرافیکی GGE بای پلات

جهت شناسایی تنوع بین ژنوتیپ‌ها، محیط‌ها و مطالعه برهمکنش ژنوتیپ-محیط از روش تجزیه گرافیکی بای پلات استفاده شد. نتایج حاصل از روش GGE بای پلات نشان داد که مؤلفه اصلی اول و دوم به ترتیب ۴۸ و ۳۶/۱۶ درصد و در مجموع ۸۴/۱۶ درصد از تغییرات کل موجود در داده‌های عملکرد قند را تبیین می‌نمایند. این موضوع بیانگر اعتبار نسبتاً زیاد نمودار بای پلات حاصل از این مطالعه در تبیین تغییرات G+GE می‌باشد. هنگامی که مجموع مؤلفه‌های اصلی اول و دوم نتواند بیشتر تغییرات موجود در داده‌ها را توجیه کند، نشان‌دهنده ماهیت پیچیده برهمکنش ژنوتیپ-محیط خواهد بود (Yan and Tinker, 2005)، اما این امر به معنای نامعتبر بودن بای پلات نیست (Yan *et al.*, 2007). اظهار شده است زمانی که نمودار بای پلات، حداقل ۶۰ درصد از واریانس داده‌ها را توجیه نماید، می‌توان برای تعیین ابر محیط‌ها از آن استفاده نمود (Yang *et al.*, 2009).

شکل ۲- A همبستگی و روابط بین محیط‌ها را نمایان می‌سازد. مطالعه همبستگی میان محیط‌های تحت بررسی می‌تواند روابط بین محیط‌ها را معین نموده و در آزمایش‌های آتی از نظر صرف وقت و هزینه مفید باشد. در این نمودار هراندازه زاویه بین بردارهای محیط‌ها کم‌تر باشد، بین محیط‌ها همبستگی بیشتری وجود دارد. در واقع بالا بودن همبستگی بین محیط‌ها به معنای وجود همبستگی بالا بین رتبه ژنوتیپ‌ها در آن محیط‌ها است. به‌طور کلی کسینوس زاویه بین بردارها میزان همبستگی را نمایان می‌کند. اگر زاویه بین بردارها کوچک‌تر از ۹۰ درجه باشد، همبستگی مثبت خواهد بود. زاویه ۹۰ درجه بین بردارها بیانگر عدم وجود همبستگی بین محیط‌ها است و در صورتی که زاویه بین بردارها بزرگ‌تر از ۹۰ درجه باشد، به معنای همبستگی منفی بین محیط‌ها می‌باشد. همان‌طور که

در این نمودار نشان داده شده است، بین مکان‌های مشهد-کرج، کرج-شیراز و شیراز-میان‌دوآب همبستگی نسبی وجود دارد که این نشان‌دهنده پاسخ نسبتاً مشابه ژنوتیپ‌ها در این مکان‌ها است. لذا بین رتبه عملکرد قند این ژنوتیپ‌ها تفاوت چندانی وجود ندارد. مشهد-شیراز و کرج-میان‌دوآب همبستگی تقریباً نزدیک به صفر نشان دادند، به عبارتی ژنوتیپ‌ها در این دو مکان روند عملکردی مستقلی را داشتند. در این مطالعه مکان‌های مورد مطالعه دارای همبستگی بسیار نزدیکی نبودند تا بتوان توصیه کرد که به‌منظور کاهش هزینه‌ها برای تحقیقات آینده از مکانی صرف‌نظر نمود. طول بردار محیط‌ها تقریبی از انحراف معیار درون هر محیط است و نیز به‌عنوان شاخصی جهت تمایز محیط‌ها می‌باشد بدین‌صورت که بردارهای بلندتر از انحراف معیار بالاتر برخوردار هستند و بنابراین قابلیت تمایز بیشتری دارند (Yan and Kang, 2002). یکی از ویژگی‌های مهم هر محیط قابلیت تمایز آن می‌باشد، به‌نحوی که محیط‌های فاقد قابلیت تمایز نمی‌توانند اطلاعات مفیدی در مورد ژنوتیپ‌های استفاده شده در آزمایش ارائه کنند (Yan and Kang, 2002). بررسی بردارهای محیط‌ها حاکی از این بود که مشهد، کرج و میان‌دوآب دارای طول بردارهای بلند و هم‌اندازه هستند که نشان‌دهنده قابلیت تمایز بالای این محیط‌ها است و محیط شیراز به علت دارا بودن طول بردار تقریباً کوتاه‌تر نسبت به سایر محیط‌ها قابلیت تمایز کم‌تری داشت. در نهایت مطالعه بای پلات همبستگی محیط‌ها نشان داد که بیش‌تر محیط‌های مورد آزمایش دارای قابلیت تمایز بالایی بودند و می‌توانند در آزمایش‌های مطالعه برهمکنش ژنوتیپ-محیط ارقام چغندر قند از نظر عملکرد قند، میان ژنوتیپ‌ها تمایز مناسبی ایجاد نمایند.

شکل ۲- B مربوط به نمودار بای پلات چندضلعی می‌باشد که برای شناسایی محیط‌های بزرگ (ابر محیط‌ها) و ژنوتیپ‌های برتر در مکان‌های مختلف رسم شد. در این بای پلات یک چندضلعی مشاهده می‌شود که از اتصال ژنوتیپ‌هایی که حداکثر فاصله را از مبدأ دارند حاصل می‌شود. ژنوتیپ‌های ۱۵، ۸، ۱۲، ۲۰ و ۹ در دورترین فاصله قرار گرفته‌اند و سبب تشکیل چندضلعی شده‌اند. سپس از مبدأ مختصات خطوطی عمود بر اضلاع این چندضلعی رسم می‌گردد و محیط‌های بزرگ مشخص می‌شود (Yan *et al.*, 2007). در بخش‌هایی که محیط‌ها قرار گرفته‌اند و در رأس آن‌ها ژنوتیپ‌ها وجود دارند بدان معنا

تجزیه گرافیکی GGE بای پلات

عملکرد قند پایین‌تر از متوسط در سمت چپ محور قرار می‌گیرند. بنا بر آنچه عنوان شد، ژنوتیپ ۲۰ و پس از آن ژنوتیپ شماره ۱ دارای بیشترین میزان پایداری و عملکرد قند بودند و به‌عنوان بهترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند. ژنوتیپ ۸ دارای کم‌ترین میزان عملکرد قند بود و عنوان ژنوتیپ نامطلوب را به خود اختصاص داد (شکل ۲- C).

شکل ۲- D رتبه‌بندی محیط‌ها را بر اساس محیط ایده‌آل برای چهار محیط مورد بررسی نشان می‌دهد. محیط‌های ایده‌آل بیش‌ترین قابلیت تشخیص و نمایندگی را در بین دیگر محیط‌ها دارند. بر طبق این نمودار بای‌پلات کرج به علت قرار گرفتن در نزدیک‌ترین دایره نسبت به مرکز دایره متحدالمرکز به‌عنوان بهترین محیط شناخته شد و بعد از آن به ترتیب شیراز و میان‌دوآب قرار گرفتند. مشهد به علت اینکه بیش‌ترین فاصله را از مرکز دایره متحدالمرکز داشت به‌عنوان ضعیف‌ترین محیط شناخته شد. محیط ایده‌آل یک نماینده مناسب برای بررسی ژنوتیپ‌ها است. در حقیقت محیط‌های ایده‌آل، نشان‌دهنده ایده‌آل‌ترین الگوی پاسخ ژنوتیپ‌ها می‌باشند (Mostafavi and Saremirad, 2021).

شناسایی ژنوتیپ ایده‌آل فرضی بر اساس مفاهیم پایداری و عملکرد بالا می‌باشد. بر این اساس ژنوتیپی مطلوب می‌باشد که دارای بیش‌ترین میزان عملکرد و حداکثر پایداری باشد و هر ژنوتیپی که نزدیک‌ترین فاصله را از این ژنوتیپ فرضی دارا باشد، به‌عنوان یک ژنوتیپ برتر و ژنوتیپی که دارای بیش‌ترین میزان فاصله از این ژنوتیپ ایده‌آل فرضی باشد، به‌عنوان نامطلوب‌ترین ژنوتیپ شناخته می‌شود (Yan and Kang, 2002). بر اساس این نمودار، ژنوتیپ ۲۰ با توجه به اینکه کم‌ترین فاصله را با ژنوتیپ ایده‌آل فرضی داشت به‌عنوان بهترین ژنوتیپ معرفی شد و ژنوتیپ ۸ به علت اینکه دارای بیش‌ترین فاصله از ژنوتیپ ایده‌آل فرضی بود، تحت عنوان ژنوتیپ نامطلوب نامیده شد.

شاخص پایداری چندمتغیره (MSTI)

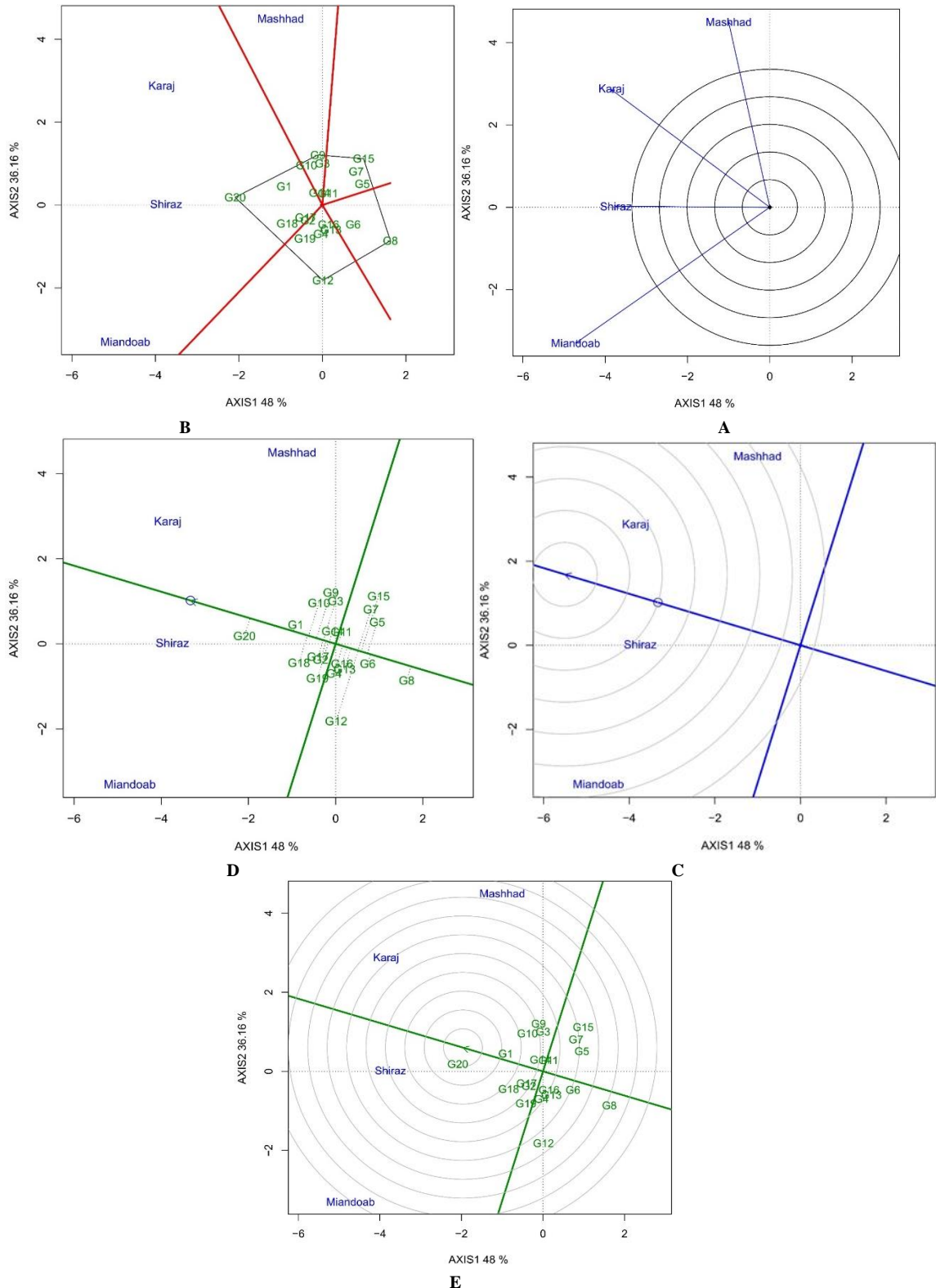
تجزیه به عامل‌ها بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی صورت پذیرفت و تفسیر نتایج پس از چرخش وریماکس انجام شد. در جدول ۶ نتایج تجزیه به عامل‌ها ارائه شده است. عامل‌هایی که مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک داشتند، انتخاب شدند و واریانس هر عامل نیز برحسب درصد که نشان‌دهنده اهمیت آن در تفسیر

می‌باشد که این ژنوتیپ‌ها در آن محیط‌ها از عملکرد قند خوبی برخوردار هستند به عبارتی بهترین ژنوتیپ‌ها برای این محیط‌ها می‌باشند. بر این اساس در محیط مشهد ژنوتیپ‌ها ۹ و در محیط‌های مورد مطالعه کرج، شیراز و میان‌دوآب ژنوتیپ شماره ۲۰ بهترین ژنوتیپ است. سایر ژنوتیپ‌ها (۱۵، ۸ و ۱۲) در بخش‌هایی قرار گرفته‌اند که هیچ محیطی در آن وجود ندارد؛ یعنی برای کشت در هیچ‌یک از مناطق مورد بررسی مطلوب نیست و جز ارقام ضعیف در بیشتر مناطق مورد پژوهش هستند. ژنوتیپ‌های شماره ۱۱ و ۱۴ که در نزدیک مرکز بای‌پلات قرار گرفته‌اند، دارای عملکرد قند متوسط در تمام محیط‌ها است. بر اساس این بای‌پلات محیط‌های مورد آزمایش در دو محیط بزرگ قرار گرفتند، به‌طوری که مشهد در اولین محیط بزرگ و سه محیط کرج، شیراز و میلندوآب در دومین محیط بزرگ حضور یافتند. لذا با توجه به این نتیجه می‌توان بیان نمود، به دلیل این‌که سه محیط تحت بررسی کرج، شیراز و میان‌دوآب اثرات مشابهی داشتند در تحقیقات آتی در زمینه پایداری و سازگاری چغندر قند از نظر عملکرد قند بهتر است یکی از محیط‌های تحت بررسی استفاده شود و بجای دو محیط دیگر دامنه مطالعات را به مناطق مختلف دیگری گسترش داد.

برای مطالعه هم‌زمان پایداری و عملکرد ژنوتیپ‌ها از نمودار بای‌پلات مختصات محیط متوسط (Average Environment Coordinate) (Yan and Kang, 2002) که نام دیگر آن نمودار بای‌پلات میانگین در مقابل پایداری است، می‌توان بهره برد (Yan et al., 2007). نمودار بای‌پلات مختصات محیط متوسط در روش GGE بای‌پلات، از روش‌های مفید در تجزیه پایداری به شمار می‌رود (Kaya et al., 2006; Mostafavi, 2021; Saremirad and Mostafavi, 2021). برای بررسی هم‌زمان پایداری و عملکرد قند ژنوتیپ‌ها از این نمودار بای‌پلات استفاده گردید. در این نمودار محور افقی که دارای یک فلش می‌باشد و از دایره کوچکی که نمایانگر میانگین محیط‌ها است و هم‌چنین از مبدأ مختصات عبور می‌کند، نمایش‌دهنده پایداری است و هر ژنوتیپی که به این محور نزدیک‌تر باشد، پایداری است (Yan et al., 2000). محوری که تنها با خط مشخص شده است، نشانگر متوسط عملکرد قند ژنوتیپ‌ها است؛ ژنوتیپ‌های دارای عملکرد قند بالاتر از متوسط در سمت راست محور و ژنوتیپ‌های دارای

مطلوبی در تمامی صفات شدند (جدول ۷). در میان صفات، به‌جز عملکرد ریشه سایر صفات از دیفرانسیل‌گزی‌نش و بازده‌گزی‌نش مناسبی برخوردار بودند. از سوی دیگر، ژنوتیپ شماره ۱۵ بیشترین مقدار شاخص پایداری MTSI را به خود اختصاص داد و ژنوتیپ نامطلوبی از نظر صفات مورد مطالعه بود. در شکل B۳ نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌های انتخابی بر اساس سهم هر عامل در شاخص پایداری MTSI ارائه شده است. بر اساس این نمودار کمترین سهم توجیه شده توسط یک عامل (نزدیک به لبه خارجی) نشان‌دهنده نزدیک بودن صفات درون آن عامل به حالت ایده‌آل پایدار است. خط‌چین نشان‌دهنده ارزش نظری است، در صورتی که همه عوامل به یک اندازه نقش داشته باشند. با توجه به این‌که هر ژنوتیپ برای عامل‌هایی که سهم کمتری در آن‌ها دارد از لحاظ صفات درون آن عامل به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک‌تر است، ژنوتیپ‌های شماره ۲۰، ۲ و ۱۷ که کمترین مقدار را در عامل اول داشتند، برای صفات عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص که بیشترین ضرایب عاملی را در این عامل داشتند، به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک هستند. ژنوتیپ ایده‌آل با توجه به صفات قرار گرفته در هر عامل و اهدافی که برای بهبود آن صفات مدنظر است، تعریف می‌شود. در عامل مذکور (عامل اول) ژنوتیپ ایده‌آل ژنوتیپی است که باعث افزایش صفات عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص می‌شود. ژنوتیپ ۱۸ کمترین سهم عامل دوم را به خود اختصاص داد؛ در نتیجه این ژنوتیپ از لحاظ صفات درصد قند ناخالص، درصد قند خالص و مقادیر سدیم بسیار نزدیک به ژنوتیپ ایده‌آل بود. به بیان بهتر این ژنوتیپ مقادیر سدیم پایین همراه با درصد قند ناخالص و خالص بالایی را دارد. ژنوتیپ‌های شماره ۲۰، ۱۷، ۱۸ و ۲ در ارتباط با عامل سوم از قدرت بالایی برخوردار بودند. به بیان بهتر مقادیر پتاسیم، نیتروژن مضره و درصد قند ملاس پایین و پایداری را داشتند. در ارزیابی عملکرد و سایر صفات زراعی در مجموعه‌ای از ژنوتیپ‌های برنج از شاخص پایداری MTSI استفاده شد (Sharifi et al., 2021) و نشان داده شد که این شاخص به‌خوبی قادر به شناسایی ژنوتیپ‌های برتر از نظر عملکرد، پایداری عملکرد و سایر صفات زراعی بود. این نتایج با یافته‌های به‌دست‌آمده از این مطالعه در رابطه با کارایی شاخص پایداری MTSI در شناسایی ژنوتیپ‌های برتر مطابقت داشت.

تغییرات کلی داده‌ها است، بیان شد. در این تجزیه سه عامل مستقل از هم در مجموع ۷۵/۷۰ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه نمودند. عامل اول ۳۳/۷۰ درصد از کل واریانس داده‌ها را توجیه و دارای مقدار ویژه برابر با ۳/۰۳ بود. این عامل دارای ضرایب عاملی بزرگ و مثبت برای صفات عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص بود. عامل دوم با مقادیر ویژه ۲/۳۷ و توجیه ۲۶/۳۰ درصد از واریانس تغییرات، شامل ضرایب عاملی بزرگ و منفی برای صفات درصد قند ناخالص، درصد قند خالص و سدیم بود. عامل سوم ۱۵/۷۰ درصد از تغییرات داده‌ها و ۱/۴۲ از مقادیر ویژه را شامل شد و ضرایب عاملی بزرگ و منفی برای صفات پتاسیم و درصد قند ملاس و بزرگ و مثبت برای صفت نیتروژن مضره را در بر داشت. شاخص پایدار MTSI ژنوتیپ‌های مورد مطالعه بر پایه نمرات عاملی سه عامل مذکور محاسبه شد. طبق این شاخص هر چه ژنوتیپی مقدار کمتری از این شاخص را دارا باشد، فاصله کمتری از ژنوتیپ ایده‌آل داشته و قرابت بیشتری با ژنوتیپ ایده‌آل پایدار دارد. از سوی دیگر هرچه مقدار شاخص پایداری MTSI برای ژنوتیپی بیشتر باشد، به این معنی است که فاصله آن از ژنوتیپ ایده‌آل پایدار بیشتر است و نباید انتخاب شود. در شکل A۳ ژنوتیپ‌های آزمایشی از بیشترین مقدار تا کمترین مقدار شاخص پایداری MTSI رتبه‌بندی شده‌اند؛ به طوری که ژنوتیپ دارای بیشترین مقدار شاخص مذکور در مرکز و ژنوتیپ دارای کمترین مقدار شاخص مذکور در خارجی‌ترین مدار قرار گرفته است. بر این اساس با اعمال فشار گزی‌نشی ۲۰ درصد، ژنوتیپ شماره ۱۸ در رتبه نخست و ژنوتیپ‌های ۲، ۲۰ و ۱۷ در رتبه‌های بعدی ایده‌آل‌ترین ژنوتیپ‌های پایدار از نظر تمامی صفات مورد مطالعه قرار گرفتند. مقایسه ارزش صفات در ژنوتیپ‌های منتخب بر اساس شاخص پایداری MTSI با ارزش صفات در همه ژنوتیپ‌های آزمایشی نشان داد که میانگین ارزش صفات عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص، عملکرد قند خالص، درصد قند ناخالص و درصد قند خالص در ژنوتیپ‌های منتخب افزایش یافته است. این افزایش ارزش صفات در جهت اهداف مدنظر قرار داشتند. اهدافی که در صفات سدیم، پتاسیم، نیتروژن مضره و درصد قند ملاس دنبال می‌شود، کاهش ارزش آن‌ها است که ژنوتیپ‌های منتخب از نظر این صفات کاهش نشان دادند. به‌طور کلی ژنوتیپ‌های انتخابی سبب ایجاد دیفرانسیل‌گزی‌نش



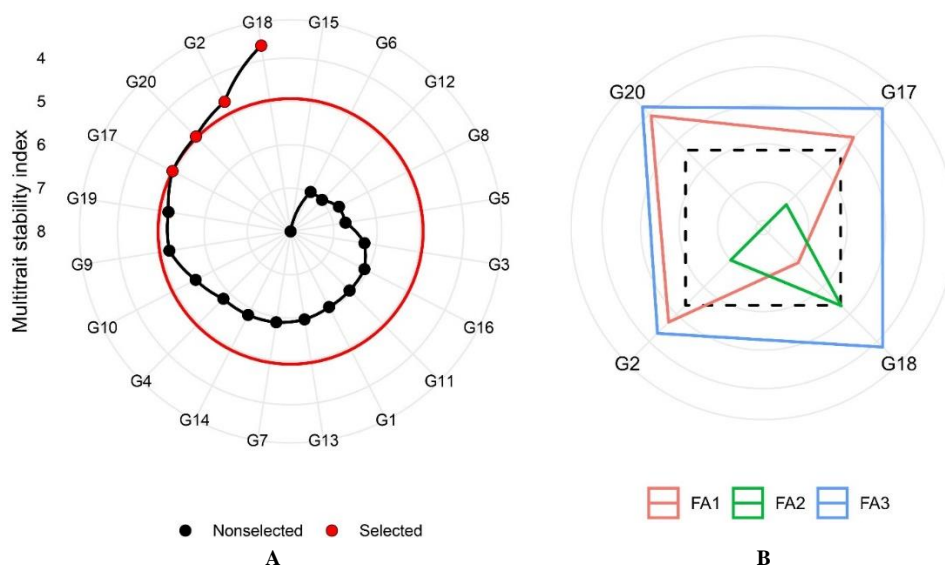
شکل ۲- A: نمودار بای پلات بررسی روابط بین محیطها، B: نمودار بای پلات چندضلعی جهت تعیین ارقام مناسب در هر محیط، C: نمودار بای پلات جهت رتبه بندی ژنوتیپها بر اساس میانگین عملکرد قند و پایداری، D: نمودار رتبه بندی محیطها بر اساس محیط ایده آل و E: نمودار رتبه بندی ژنوتیپها بر اساس ژنوتیپ ایده آل

Figure 2- A: Biplot examine the relationship between the environments, B: Polygons of GGE biplot method for determine the appropriate cultivars in every environment, C: Biplot graph for ranking cultivars based on the average sugar yield and stability, D: Ranking biplot environments based on hypothetical ideal environment, and E: Ranking biplot genotypes based on hypothetical ideal genotype

جدول ۶- مقادیر ویژه، واریانس نسبی و تجمعی و نیز ضرایب عاملی پس از چرخش وریماکس در تجزیه به عامل‌ها بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

Table 6- Eigenvalues, relative and cumulative variance as well as factor coefficients after varimax rotation in factor analysis based on principal component analysis

صفات Traits	عامل‌ها Factors		
	اول First	دوم Second	سوم Third
عملکرد ریشه Root yield	0.89	0.31	-0.03
عملکرد قند ناخالص Sugar yield	0.98	0.03	-0.04
درصد قند ناخالص Sugar content	-0.13	-0.92	-0.03
درصد قند خالص White sugar content	-0.08	-0.95	-0.04
عملکرد قند خالص White sugar yield	0.94	-0.11	-0.06
سدیم Na ⁺	0.01	-0.71	0.19
پتاسیم K ⁺	0.16	0.03	-0.73
نیتروژن مضره Harmful nitrogen	0.18	-0.25	0.75
درصد قند ملاس Molasses sugar	0.15	-0.38	-0.53
مقدار ویژه Eigen value	3.03	2.37	1.42
واریانس نسبی Relative Variance (%)	33.70	26.30	15.70
واریانس تجمعی Cumulative variance (%)	33.70	60.00	75.70



شکل ۳- A: رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های آزمایشی به صورت صعودی بر اساس شاخص پایداری MTSI و B: نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌های منتخب به عنوان نسبت هر عامل در شاخص پایداری MTSI

Figure 3- A: Ranking of experimental genotypes in ascending order based on MTSI index and B: Strengths and weaknesses of selected genotypes as the ratio of each factor in the calculated MTSI index

جدول ۷- پیش‌بینی دیفرانسیل‌گزینش و بازده‌گزینش برای صفات مؤثر بر اساس شاخص پایداری MSTI

Table 7- Prediction of selection differential and selection gain for effective traits based on MSTI index

عامل‌ها Factors	صفات Traits	واحد Unit	هدف Goal	میانگین کل Xo	میانگین انتخابی Xs	دیفرانسیل گزینش SD	درصد دیفرانسیل گزینش SD percent	بازده گزینش SG	درصد بازده گزینش SG percent
1	عملکرد ریشه Root yield	t. ha ⁻¹	افزایش Increase	65.70	67.19	1.49	2.27	0.80	1.23
1	عملکرد قند ناخالص Sugar yield	t. ha ⁻¹	افزایش Increase	11.92	12.61	0.69	5.78	0.34	2.93
1	عملکرد قند خالص White sugar yield	t. ha ⁻¹	افزایش Increase	9.70	10.52	0.81	8.34	0.48	4.96
2	درصد قند ناخالص Sugar content	Percent	افزایش Increase	18.31	18.98	0.67	3.67	0.57	3.11
2	درصد قند خالص White sugar content	Percent	افزایش Increase	14.81	15.75	0.94	6.39	0.82	5.57
2	سدیم Na ⁺	meq.100 g ⁻¹	کاهش Decrease	2.98	2.53	-0.44	-14.89	-0.35	-11.77
3	پتاسیم K ⁺	meq.100 g ⁻¹	کاهش Decrease	5.51	5.23	-0.28	-5.16	-0.21	-3.97
3	نیتروزن مضره Harmful nitrogen	meq.100 g ⁻¹	کاهش Decrease	3.13	2.88	-0.25	-8.01	-0.09	-3.12
3	درصد قند ملاس Molasses sugar	Percent	کاهش Decrease	2.90	2.62	-0.27	-9.42	-0.23	-7.97

Xo: original value; Xs: selected value; SD: selection differential; SD perc: selection differential in percentage; SG: selection gain; SG perc: selection gain in percentage.

نتیجه‌گیری کلی

پایین بر سایر ارقام ارجحیت دارند. نتایج نشان داد که ژنوتیپ‌های ۱۸، ۲، ۲۰ و ۱۷ بهترین ژنوتیپ‌ها در ترکیب صفات مختلف بودند و می‌توانند در برنامه‌های اصلاحی مورد توجه قرار گیرند. به‌طور کلی در میان هیبریدهای اصلاحی، در رتبه نخست، هیبرید حاصل از تلاقی $S1 \times (7112 \times SB36)$ (ژنوتیپ ۹60132) و پس از آن هیبرید به‌دست‌آمده از تلاقی $S1 - 970063 \times (7112 \times SB36)$ (ژنوتیپ ۹) را می‌توان به‌عنوان هیبریدهای امیدبخش در برنامه‌های ارزیابی نهایی تا معرفی هیبریدهای جدید مورد استفاده قرار داد.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده محیط و برهمکنش آن با ساختار ژنتیکی ژنوتیپ‌های مختلف، نقش بسزایی را بر بیان فنوتیپی صفات به‌جز درصد قند ناخالص و خالص داشته است و سبب شده است تا ژنوتیپ‌ها با توجه به شرایط محیط‌های مختلف پاسخ‌های متفاوتی ارائه نمایند. در مجموع، ژنوتیپ ۲۰ به لحاظ مقادیر عملکرد قند و پایداری عملکرد بالا به‌عنوان ژنوتیپ پایدار با عملکرد بالا شناخته شد. در برنامه‌های اصلاحی چغندر قند، ارقام با عملکرد ریشه و درصد قند بالا و ناخالصی‌های

References

- Ajay, B., Aravind, J. and 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. and Kona, P. 2020. Evaluation of genotype× environment interaction and yield stability analysis in peanut under phosphorus stress condition using stability parameters of AMMI model. *Agricultural Research, 9*(4), PP.477-486. doi: **10.1007/s40003-020-00458-3**
- Anandan, A. and Eswaran, R. 2009. Genotype by environment interactions of rice (*Oryza sativa* L.) hybrids in the east coast saline region of Tamil Nadu. 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*(1), PP.53-62. doi: **10.1023/a:1002954824178**
- Basafa, M. and Taherian, M. 2016. Analysis of stability and adaptability of forage yield among silage corn hybrids. *Journal of Crop Breeding, 8*(19), PP.185-191 [In Persian]. dor: **20.1001.1.22286128.1395.8.19.5.0**
- Cheloei, G., Ranjbar, G.A., Babaeian Jelodar, N., Bagheri, N. and 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*(1), PP.70-83. doi: **2020.13219.1271ijgpb1**
- Cook, D. and Scott, R. 1993. *The sugar beet crop: science into practice*. Champan and Hall Press.
- Ebdon, J. and Gauch, H. 2002. Additive main effect and multiplicative interaction analysis of national turfgrass performance trials: I. Interpretation of genotype× environment interaction. *Crop Science, 42*(2), PP.489-496. doi: **10.2135/cropsci2002.4890**
- Farshadfar, E., Mohammadi, R., Aghaee, M. and Vaisi, Z. 2012. GGE biplot analysis of genotype x environment interaction in wheat-barley disomic addition lines. *Australian Journal of Crop Science, 6*(6), PP.1074-1079. doi: **10.3316/informit.734352271996269**
- Gabriel, K.R. 1971. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika, 58*(3), PP.453-467. doi: **10.1093/biomet/58.3.453**
- Gauch, H. 1992. *Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs*. Elsevier Science Publishers.
- Gauch, H.G. and Zobel, R.W. 1997. Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science, 37*(2), PP.311-326. doi: **10.2135/cropsci1997.0011183x003700020002x**
- Jambhulkar, N., Bose, L. and Singh, O. 2014. AMMI stability index for stability analysis. *Central Rice Research Institute, Cuttack, Orissa, 35*, PP.15-15.
- Kang, M. 2004. *Breeding: genotype by environment interaction*. In 'Encyclopedia of plant and crop science'. (Ed. RM Goodman). Marcel Dekker: New York.
- Kang, M.S. 1997. Using genotype-by-environment interaction for crop cultivar development. *Advances in agronomy, 62*(1), PP.199-252. doi: **10.1016/s0065-2113(08)60569-6**
- Karimizadeh, R., Asghari, A., Chinipardaz, R., Sofalian, O. and Ghaffari, A. 2016. Determining yield stability and model selection by AMMI method in rain-fed durum wheat genotypes. *Turkish Journal of Field Crops, 21*(2),

- PP.174-183. doi: 10.17557/tjfc.17390
- Karimizadeh, R., Dehghani, H. and Dehghanpour, Z. 2008. Use of AMMI method for estimating genotype-environment interaction in early maturing corn hybrids. *Seed and Plant Journal*, 23(4), PP.531-546 [In Persian]. doi: 10.22092/spij.2017.110766
- Kaya, Y., Akçura, M. and Taner, S. 2006. GGE-biplot analysis of multi-environment yield trials in bread wheat. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 30(5), PP.325-337.
- Kempton, R. 1984. The use of biplots in interpreting variety by environment interactions. *The Journal of Agricultural Science*, 103(1), PP.123-135. doi: 10.1017/s0021859600043392
- Kunz, M., Martin, D. and Puke, H. 2002. Precision of beet analyses in Germany explained for polarization. *Zuckerindustrie*, 127(1), PP.13-21.
- Makumbi, D., Diallo, A., Kanampiu, F., Mugo, S. and Karaya, H. 2015. Agronomic performance and genotype x environment interaction of herbicide-resistant maize varieties in Eastern Africa. *Crop Science*, 55, PP.540-555. doi: 10.2135/cropsci2014.08.0593
- Monteiro, F., Frese, L., Castro, S., Duarte, M.C., Paulo, O.S., Loureiro, J. and 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, PP.74-85. doi: 10.3389/fpls.2018.00074/full
- Mostafavi, K. and 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(3), PP.1-12 [In Persian]. doi: 10.22069/ejcp.2022.17527.2293
- Olivoto, T., Lúcio, A.D.C., da Silva, J.A.G., Sari, B.G. and Diel, M.I. 2019. Mean performance and stability in multi-environment trials II: Selection based on multiple traits. *Agronomy Journal*, 111(6), PP.2961-2969. doi: 10.2134/agronj2019.03.0221
- Omrani, S., Omrani, A., Afshari, M., Saremirad, A., Bardehji, S. and 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(31), PP.153-163 [In Persian]. doi: 10.29252/jcb.11.31.153
- Rajabi, A., Ahmadi, M., Bazrafshan, M., Hassani, M. and Saremirad, A. 2023. Evaluation of resistance and determination of stability of different sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genotypes in rhizomania-infected conditions. *Food Science & Nutrition*, 11(3), PP.1403-1414. doi: 10.1002/fsn3.3180
- Raju, B. 2002. A study on AMMI model and its biplots. *Indian Society of Agricultural Statistics (India)*, 55, PP.297-322.
- Rao, A. and Prabhakaran, V. 2005. Use of AMMI in simultaneous selection of genotypes for yield and stability. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics*, 59, PP.76-82.
- Reinfeld, E., Emmerich, G., Baumgarten, C., Winner and Beiss, U. 1974. *Zur voraussage des melassez zuckersaus ruben analysen zucker*. Chapman & Hall, World Crop Series.
- Ribeiro, I.C., Pinheiro, C., Ribeiro, C.M., Veloso, M.M., Simoes-Costa, M.C., Evaristo, I., Paulo, O.S. and

- Ricardo, C.P. 2016. Genetic diversity and physiological performance of Portuguese wild beet (*Beta vulgaris* spp. *maritima*) from three contrasting habitats. *Frontiers in plant science*, 7(1), PP.1293-1299. **doi: 10.3389/fpls.2016.01293/full**
- Saremirad, A. and Mostafavi, K. 2021. Using AMMI and biplot graphical analysis multivariate methods to evaluate the effect of genotype-environment interaction in cotton genotypes. *Iranian Journal of Cotton Researches*, 8(2), PP.127-144 [In Persian]. **doi: 10.22092/ijcr.2021.353002.1163**
- Sharifi, P., Abbasian, A. and Mohaddesi, A. 2021. Evaluation the mean performance and stability of rice genotypes by combining features of AMMI and BLUP techniques and selection based on multiple traits. *Plant Genetic Researches*, 7(2), PP.163-180 [In Persian]. **doi: 10.52547/pgr.7.2.13**
- Sharifi, P., Aminpanah, H., Erfani, R., Mohaddesi, A. and Abbasian, A. 2017. Evaluation of genotype× environment interaction in rice based on AMMI model in Iran. *Rice Science*, 24(3), PP.173-180. **doi: 10.1016/j.rsci.2017.02.001**
- Sneller, C., Kilgore-Norquest, L. and Dombek, D. 1997. Repeatability of yield stability statistics in soybean. *Crop Science*, 37(2), PP.383-390. **doi: 10.2135/cropsci1997.0011183x003700020013x**
- 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(1), PP.1-14. **doi: 10.1038/s41598-023-37217-7**
- Yan, W., Cornelius, P.L., Crossa, J. and Hunt, L. 2001. Two types of GGE biplots for analyzing multi-environment trial data. *Crop Science*, 41(3), PP.656-663. **doi: 10.2135/cropsci2001.413656x**
- Yan, W., Hunt, L.A., Sheng, Q. and Szlavnic, Z. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*, 40(3), PP.597-605. **doi: 10.2135/cropsci2000.403597x**
- Yan, W. and 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. 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 Tinker, N.A. 2005. An integrated biplot analysis system for displaying, interpreting, and exploring genotype× environment interaction. *Crop Science*, 45(3), PP.1004-1016. **doi: 10.2135/cropsci2004.0076**
- Yang, R.C., Crossa, J., Cornelius, P.L. and Burgueño, J. 2009. Biplot analysis of genotype× environment interaction: Proceed with caution. *Crop Science*, 49(5), PP.1564-1576. **doi: 10.2135/cropsci2008.11.0665**
- Zali, H., Farshadfar, E., Sabaghpour, S.H. and Karimizadeh, R. 2012. Evaluation of genotype× environment interaction in chickpea using measures of stability from AMMI model. *Annals of Biological Research*, 3(7), PP.3126-3136.
- Zhang, Z., Cheng, L. and Zhonghuai, X. 1998. Analysis of variety stability based on AMMI model. *Zuo wu xue bao*, 24(3), PP.304-309.
- Zobel, R. 1994. Stress resistance and root systems. Proceedings of the Workshop on Adaptation of Plants to Soil Stress. Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln.

Study of genotype-environment interaction effect on sugar yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) hybrids

Saeed Sadeghzadeh Hemayati^{1*}, Ali Saremirad¹, Rahim Mohammadian¹, Ali Jalilian², Javad Rezaei³, Mastaneh Sharifi⁴, Adel Pedram⁵

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

² Agriculture and Natural Resources Research and Education Center in Kermanshah Province, Kermanshah, Iran

³ Agriculture and Natural Resources Research and Education Center in Khorasan Razavi Province, Khorasan Razavi, Iran

⁴ Agriculture and Natural Resources Research and Education Center in Fars Province, Fars, Iran

⁵ Agriculture and Natural Resources Research and Education Center in Azarbaijan Province, Azarbaijan, Iran

*Corresponding Author: s.sadeghzadeh@areeo.ac.ir

Received: 12 June 2022

Accepted: 26 August 2022

DOI: 10.22034/CSRAR.2023.346833.1248

Abstract

Introduction: Genotype-environment interaction is one of the most important limiting factors in breeding programs. A comprehensive study of genotype-environment interaction requires powerful statistical methods. Different methods for evaluating the interaction effect of genotype-environment have been proposed by different researchers. Therefore, in the present study, the role of this phenomenon on the sugar yield of sugar beet hybrids and the identification of stable hybrids were studied based on the AMMI, GGE bi-plot, and MTSI stability index methods.

Materials and Methods: For this study, a total of 20 sugar beet genotypes were utilized, comprising 15 recently developed hybrids and five control cultivars (Sina, Dena, Novodora, Modex and Lorique). Phenotypic assessments of experimental genotypes were conducted in 2021 crop year at four agricultural research stations located in Karaj, Mashhad, Shiraz and Miandoab. These selected sites differed in terms of altitude, latitude and longitude, atmospheric temperature and precipitation, and physical and chemical characteristics of soil. The experiments at each research station were carried out using a randomized complete block design with four replications. Each genotype was planted in a separate plot, consisting of three cultivation rows with a length of eight m and a distance of 50 cm interrow. Throughout the growing season, weed control, irrigation, fertilizer application, and other field management activities were performed based on the recommendations of experts. Additionally, regular monitoring and prevention of pests and diseases specific to sugar beet were conducted at each research station. Stability analysis methods of AMMI, GGE bi-plot, and MTSI stability index were used to analyze the genotype-environment interaction.

Results and Discussion: The results of a combined analysis of variance confirmed the significant effects of environment and genotype on all traits at a one percent probability level. The interaction between them was significant at one and five percent probability levels for all traits except the sugar content and white sugar content. Analysis of the multiplicative effect of the AMMI model showed that the first two components are significant at the one and five percent probability levels, respectively, and together explain 92.20 percent of the interaction variations. The bi-plot of mean yield and the first principal component of the interaction confirmed the superiority of genotype no. 20 due to its high sugar yield and stability. The results obtained from the GGE bi-plot method showed that the first and second components together explain 84.16% of the variations in total sugar yield. According to the GGE bi-plot, Karaj, Shiraz, and Miandoab had a relatively similar reaction in terms of genotype yield rank and in these environments, genotype no. 20 was stable. The reaction of the Mashhad environment was different from the other three environments and in that genotype no. 9 had suitable stability. Based on the results of the MTSI index, four genotypes of 18, 2, 20, and 17 were identified as stable genotypes. In general, the selected genotypes based on the MTSI caused a

favorable selection differential in all traits. Among the traits, except root yield, other traits had good selection differential and selection gain. On the other hand, genotype no. 15 had the highest value of MTSI stability index and was unfavorable genotype in terms of studied traits.

Conclusion: In general, among breeding hybrids, in the first the hybrid obtained from crossing of (7112 × SB36) × S1- 960132 (genotype no. 2) and then the hybrid obtained from crossing of (7112 × SB36) × S1- 970063 (genotype no. 9) can be used as promising hybrids in final evaluation programs until the introduction of new hybrids. The studied sites were not very closely correlated to be suggested that a site be abandoned to reduce costs for future research; In contrast, most of the tested environments had a high differentiation capability and could make a good distinction among genotypes in terms of sugar yield in genotype-environment interaction studies of sugar beet cultivars.

Keywords: AMMI, Component, GGE biplot, MTSI, Stability