

بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط و پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های کلزا در مناطق سرد و معتدل سرد ایران

بهرام علیزاده^{۱*}، عباس رضایی‌زاد^۲، محمد یزداندوست همدانی^۳، غلامحسین شیراسماعیلی^۴، فرشاد ناصرقدیمی^۵ و حمیدرضا خادم حمزه^۶

- ۱- دانشیار، بخش تحقیقات دانه‌های روغنی، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج
- ۲- استادیار، بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه
- ۳- استادیار، بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان
- ۴- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان
- ۵- استادیار، بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خوی
- ۶- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۵ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۷)

چکیده

اثر متقابل ژنوتیپ × محیط مسئله‌ای مهم در مطالعه صفات کمی می‌باشد زیرا پایداری عملکرد در محیط‌های مختلف را کاهش می‌دهد و همچنین تفسیر آزمایش‌های ژنتیکی را دشوار و پیش‌بینی‌ها را با مشکل مواجه می‌سازد. در این راستا به منظور تجزیه اثر متقابل ژنوتیپ × محیط و تعیین پایداری عملکرد و سازگاری ژنوتیپ‌های کلزا زمستانه در مناطق سرد و معتدل سرد کشور، تعداد ۹ لاین و ۴ رقم در شش ایستگاه تحقیقاتی (اصفهان، همدان، کرج، کرمانشاه، خوی و زرقان) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به مدت دو سال زراعی (۹۶-۱۳۹۴) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج تجزیه مرکب عملکرد دانه نشان داد که اثرات محیط، ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط معنی‌دار بود. معنی‌دار بودن اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، بیانگر واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف بود و از این رو، امکان تجزیه پایداری ژنوتیپ‌ها وجود داشت. رقم نفیس و لاین BAL-92-1 به ترتیب با عملکرد دانه ۴۰۸۶ و ۳۸۲۹ کیلوگرم در هکتار نسبت به میانگین کل برتر بودند و دارای متوسط رتبه و واریانس رتبه کمتری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها بودند. بر اساس نتایج تجزیه پایداری با روش ابرهارت و راسل، لاین BAL-92-1 با عملکرد بالاتر از میانگین و ضریب رگرسیون نزدیک به یک به عنوان ژنوتیپ با سازگاری عمومی بالا برای تمام مناطق شناخته شد. بر اساس روش گزینش هم‌زمان برای عملکرد و پایداری (YS)، لاین‌های BAL-92-1، HW-92-1، BAL-92-6، BAL-92-11 و رقم نفیس با کمترین مقادیر به عنوان پایدارترین و لاین‌های BAL-92-4، HW-92-2، HW-92-3 و رقم احمدی با بیشترین مقدار آماره مذکور به عنوان ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. همچنین بر اساس شاخص SIIG، لاین‌های BAL-92-1، HW-92-1، BAL-92-6، BAL-92-11 و رقم نفیس با داشتن مقدار SIIG بالا و همچنین عملکرد دانه بالاتر از میانگین به عنوان ژنوتیپ‌های برتر از نظر پایداری و عملکرد دانه شناخته شدند. در مجموع، لاین BAL-92-1 با داشتن عملکرد و پایداری عمومی بالا، لاین برتر این آزمایش بود که برای مطالعات تکمیلی جهت معرفی به عنوان رقم تجاری جدید در مناطق سرد و معتدل سرد ایران انتخاب شد.

واژگان کلیدی: پایداری عمومی، روش ابرهارت و راسل، شاخص SIIG، کلزای زمستانه

* نویسنده مسئول، آدرس پست الکترونیکی: ba.alizadeh@areeo.ac.ir

مقدمه

با توجه به نیاز روزافزون کشور به روغن خوراکی از طریق افزایش تولید محصولات دانه روغنی، لزوم دستیابی به ارقام با پتانسیل تولید عملکرد بالا و سازگار به شرایط محیطی اجتناب ناپذیر است. کلزا یکی از مهم‌ترین گیاهان دانه روغنی می‌باشد که به دلیل سازگاری بالا به آب و هوای اکثر نقاط ایران، سطح زیر کشت آن در حال افزایش می‌باشد (Jafari et al., 2015). از مهم‌ترین ویژگی‌هایی که سبب تمایز این گیاه شده است می‌توان به سازگاری با شرایط آب و هوایی متنوع، دارا بودن ژنوتیپ‌های پاییزه و بهاره، کنترل علف‌های هرز، ارزش تناوبی بالا، عملکرد روغن بالا و تأمین کنجاله و سوخت‌های زیستی اشاره کرد که این ویژگی‌ها باعث شده است که کلزا به عنوان نقطه امیدی برای تأمین روغن خوراکی مورد نیاز کشور به‌شمار می‌آید (Alizadeh et al., 2019).

یکی از مهم‌ترین مشکلات برنامه‌های به‌نژادی برای تولید ارقام با پتانسیل تولید عملکرد بالا و پایدار، وجود برهمکنش ژنوتیپ × محیط می‌باشد. برهمکنش ژنوتیپ × محیط سبب کاهش همبستگی بین ارزش‌های فنوتیپی و ژنوتیپی می‌شود و با تغییر عملکرد نسبی ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف، انتخاب ژنوتیپ‌های مطلوب را پیچیده و با مشکل مواجه می‌کند (Eagles and Frey, 1977; Mahdavi et al., 2020). به‌منظور شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار، آزمایش‌های مقایسه عملکرد تکراردار در چند مکان و در چند سال انجام می‌شود که در این آزمایش‌های علاوه بر معیار عملکرد، میزان پایداری ژنوتیپ‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود و در نهایت ژنوتیپ‌هایی گزینش می‌شوند که عملکرد بالا و برهمکنش ژنوتیپ × محیط کمتری داشته باشند (Ahmadi et al., 2016).

روش‌های متعددی برای بررسی برهمکنش ژنوتیپ × محیط توسط محققان مختلف به‌کار برده شده است. این روش‌ها شامل سه دسته اصلی تک‌متغیره پارامتری، ناپارامتری و چندمتغیره می‌باشند که هر کدام از این روش‌ها

جنبه‌ها و ابعاد خاصی از داده‌های چندمحیطی را مورد ارزیابی قرار می‌دهند (Mohammadi et al., 2018; Vaezi et al., 2019). در میان روش‌های مختلف، روش‌های رگرسیونی که از روش‌های تک‌متغیره پارامتری می‌باشند، به‌عنوان روش‌های مناسب و کارا برای تجزیه و تحلیل برهمکنش ژنوتیپ × محیط توسط محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Becker and Leon, 1988; Wachira et al., 2002; Akbarpour et al., 2012). رگرسیون ابرهات و راسل (Eberhart and Russell, 1966) یکی از پرکاربردترین روش‌های رگرسیونی می‌باشد که جهت تجزیه پایداری ژنوتیپ‌ها در آزمایش‌های چندمحیطی در گیاهان مختلف از جمله گلرنگ (Jamshidmoghaddam and Pourdad, 2013)، کلزا (Jafari et al., 2015)، خلر (Ahmadi et al., 2016)، شنبلیله (Dorrani-Nejad and Mohammadi-Nejad, 2018)، جو (Vaezi et al., 2019)، پنبه (Alishah et al., 2019) و آفتابگردان (Ahmadpour et al., 2019) مورد استفاده قرار گرفته است. ابرهات و راسل (Eberhart and Russell, 1966) از پارامترهای آماری شیب خط رگرسیون و واریانس انحراف از خط رگرسیون برای بررسی برهمکنش ژنوتیپ × محیط و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار استفاده کردند. بر مبنای این روش ژنوتیپی پایدار محسوب می‌شود که دارای میانگین عملکرد بالا، ضریب رگرسیون نزدیک به یک و واریانس انحراف از خط رگرسیون آن کوچک باشد.

کانگ (Kang, 1998) نیز به‌منظور بررسی پایداری ژنوتیپ‌ها، روش گزینش هم‌زمان برای عملکرد و پایداری را پیشنهاد نمودند که در این روش ابتدا ژنوتیپ‌ها بر اساس عملکرد رتبه‌بندی شده و سپس به کمک آماره پایداری شوکلا (Shukla, 1972)، عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌ها باهم تعیین می‌گردد. روش گزینش هم‌زمان برای عملکرد و پایداری در گیاهان مختلف از قبیل عدس (Sabaghnia et al., 2006)، نخود (Ebadi et al., 2008)، یونجه (Movahedi et al., 2010)، کلزا (Pourdad et al., 2014);

آب و هوایی آن مکان در نظر گرفته شد. کشت بر اساس دستورالعمل کشت کلزا در تاریخ‌های توصیه شده انجام شد. عملیات تهیه زمین شامل شخم، دیسک (جهت خرد کردن کلوخه‌ها) و ماله (جهت تسطیح) بود و بر اساس نتایج آزمون خاک اقدام به کوددهی شد. پس از آماده‌سازی زمین بر اساس نتایج آزمون خاک، مقدار پتاسیم و فسفر مورد نیاز به ترتیب از منابع کودی سولفات پتاسیم (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) و سوپرفسفات تریپل (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) قبل از کاشت به زمین داده شد. کود ازته از منبع اوره نیز به صورت سرک در سه مرحله کاشت، شروع ساقه‌رفتن و زمان ظهور اولین غنچه‌های گل به میزان ۱۰۰، ۱۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار مصرف شد. در طول فصل رشد و نمو عملیات زراعی به طور مرتب انجام شد و از سموم سیستمیک دیماکارون (نیم لیتر در هکتار) و اکاتین (یک لیتر در هکتار) برای کنترل شته مومی کلم استفاده شد. در زمان رسیدن فیزیولوژیک، برداشت محصول هر رقم از دو خط میانی با حذف نیم متر از ابتدا و انتهای هر خط کاشت انجام شد و پس از تبدیل، عملکرد دانه در هکتار (کیلوگرم در هکتار) محاسبه گردید.

تجزیه و تحلیل آماری: ابتدا آزمون نرمال بودن باقیمانده داده‌ها از طریق آزمون کولموگروف-اسیمروف (Kolmogorov-Smirnov) با استفاده از نرم‌افزار SPSS ver 20 (SPSS Inc, 2010) مورد بررسی قرار گرفتند. سپس آزمون بارتلت به منظور بررسی یکنواختی واریانس محیط‌ها انجام شد و در ادامه تجزیه واریانس مرکب با فرض ثابت بودن اثر ژنوتیپ و تصادفی بودن اثر سال و مکان (محیط) و آزمون F با توجه به امیدریاضی میانگین مربعات منابع تغییرات انجام شد. با توجه به معنی‌دار شدن اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، تجزیه پایداری با استفاده از روش غیرپارامتری میانگین و انحراف معیار رتبه، روش رگرسیونی ابرهارت و راسل (Eberhart and Russell, 1966) و روش گزینش هم‌زمان برای عملکرد و پایداری (Kang, 1988) انجام گردید.

(Mortazavian et al., 2014)، فستوکا (Dehghani et al., 2016)، جو (Khalili and Pour-Aboughadareh, 2016; 2019) و سیب‌زمینی (Vaezi et al., 2017, 2019) به منظور تعیین پایداری ژنوتیپ‌ها استفاده شده است. روش GGE بای‌پلات نیز با استفاده از نمایش گرافیکی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، به به‌نژادگر این امکان را می‌دهد که به‌آسانی پایداری ژنوتیپ‌ها و ترکیب پایداری با عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف را بررسی کرده و با استفاده از این روش می‌توان ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد مناسب را در برنامه‌های به‌نژادی شناسایی کرد (Yan et al., 2001). از روش GGE بای‌پلات در کلزا (Pourdad and Jamshidmoghaddam, 2013)، گلرنگ (Jamshidmoghaddam and Pourdad, 2013)، ذرت (Sserumaga et al., 2016)، سویا (Dalló et al., 2019)، جو (Vaezi et al., 2019) و گندم نان (Gerrish et al., 2019) برای ارزیابی پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها در آزمایش‌های چند محیطی استفاده شده است.

هدف از انجام این پژوهش، شناسایی و معرفی ژنوتیپ‌های پایدار کلزای زمستانه با استفاده از روش‌های مختلف تجزیه پایداری بود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش تعداد ۱۳ لاین و رقم (جدول ۱) در شش ایستگاه تحقیقاتی مناطق سرد و معتدل سرد کشور (اصفهان، همدان، کرج، کرمانشاه، خوی و زرقان) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به مدت دو سال زراعی (۱۳۹۴-۹۶) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نام و برخی مشخصات اقلیمی مناطق اجرای آزمایش و میانگین عملکرد مناطق در جدول ۲ ذکر گردیده است. مشخصات فنی و زراعی دوازده آزمایش (محیط) این طرح در کلیه مناطق یکسان بود و ژنوتیپ‌ها به‌عنوان عامل ثابت در نظر گرفته شدند. هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف پنج‌متری با فاصله بین ردیف‌های ۳۰ سانتیمتر بود. کشت به صورت جوی و پشته و آبیاری نشتی انجام شد. تعداد دفعات آبیاری آزمایش هر مکان با توجه به وضعیت بارندگی و شرایط

جدول ۱- شماره، نام، شجره و مبدأ ژنوتیپ‌های کلزای زمستانه مورد بررسی

Table 1. Genotypic code, name, pedigree and origin of the tested winter rapeseed genotypes

شماره No	کد Code	نام Name	شجره Pedigree	مبدأ Origin
1	G1	HW-92-1	Garou*GK Csenge (S6)	ایران Iran
2	G2	BAL-92-1	SW102*ES Hydromel (S6)	ایران Iran
3	G3	BAL-92-3	ADV3*Anatol(S6)	ایران Iran
4	G4	BAL-92-4	HL2012*SW102 (S6)	ایران Iran
5	G5	BAL-92-6	HL3721*ES Kamilo (S6)	ایران Iran
6	G6	BAL-92-8	Triangle*Modena(S6)	ایران Iran
7	G7	HW-92-2	ADV3*NK.fair(S6)	ایران Iran
8	G8	BAL-92-11	Triangle*ADV1(S6)	ایران Iran
9	G9	HW-92-3	Zlatna*ES Hydromel (S6)	ایران Iran
10	G10	Okapi as control	-	فرانسه France
11	G11	Ahmadi as control	Geronimo × SW0756	ایران Iran
12	G12	Nima as control	Okapi × Modena	ایران Iran
13	G13	Nafis as control	Orient × Modena	ایران Iran

جدول ۲- خصوصیات اقلیمی محیط‌های مورد مطالعه در این تحقیق

Table 2. Agro-climatic characteristics of the environments studied in this research.

کد Code	مکان Location	فصل زراعی Cropping season	طول جغرافیایی (درجه دقیقه) Longitude (E)	عرض جغرافیایی (درجه دقیقه) Latitude (N)	ارتفاع از سطح دریا (متر) Altitude (m)	بارندگی (میلی‌متر) Rainfall (mm)	نوع خاک Soil texture	میانگین عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Mean seed yield (kg.ha ⁻¹)
Esf16	اصفهان Isfahan	2015-2016	51° 40'	32° 35'	1545	122	Silt-clay	3437
Esf17	اصفهان Isfahan	2016-2017				138		3553
Hmd16	همدان Hamedan	2015-2016	48° 40'	35° 12'	1758	241	Sand-loam	4049
Hmd17	همدان Hamedan	2016-2017				230		4698
Krj16	کرج Karaj	2015-2016	50° 54'	35° 56'	1312	239	Loam-clay	4165
Krj17	کرج Karaj	2016-2017				300		1809
Krm16	کرمانشاه Kermanshah	2015-2016	47° 26'	34° 08'	1346	728	Silt-clay	3079
Krm17	کرمانشاه Kermanshah	2016-2017				438		3954
Khy16	خوی Khoy	2015-2016	44° 57'	38° 34'	1103	298	Clay-loam	2955
Khy17	خوی Khoy	2016-2017				281		3531
Zrg16	زرغان Zarghan	2015-2016	52° 42'	29° 47'	1596	305	Clay-loam	4293
Zrg17	زرغان Zarghan	2016-2017				296		3482

به کار رفت. به منظور ادغام روش‌های ناپارامتری و پارامتری از شاخص SIIG (Zali et al., 2015, 2016) استفاده شد. نحوه محاسبه شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG) در ادامه تشریح می‌شود. ابتدا با توجه به تعداد ژنوتیپ‌ها و تعداد شاخص‌ها یا صفات مختلف مورد بررسی، ماتریس داده‌ها به صورت رابطه (۳) تشکیل می‌شود.

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این ماتریس x_{ij} مقدار شاخص (صفت) i ام ($i = 1, 2, \dots, n$) در رابطه با ژنوتیپ j ام ($j = 1, 2, \dots, m$) است. مرحله بعد، تبدیل ماتریس داده‌ها به یک ماتریس نرمال است. از رابطه زیر برای نرمال کردن داده‌ها استفاده می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

ماتریس R به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۵)}$$

پیدا کردن ژنوتیپ ایده‌آل و ژنوتیپ ضعیف: در این مرحله برای هر شاخص یا صفت به طور جداگانه، بهترین و ضعیف‌ترین ژنوتیپ انتخاب می‌شود.

محاسبه فاصله از ژنوتیپ ایده‌آل و ژنوتیپ ضعیف: در این مرحله برای هر آماره یا شاخص، فاصله از ژنوتیپ ایده‌آل و فاصله از ژنوتیپ ضعیف به ترتیب از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند:

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^m (r_{ij} - r_j^+)^2 \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^m (r_{ij} - r_j^-)^2 \quad \text{رابطه (۷)}$$

در این روابط r_{ij} مقدار نرمال شده شاخص (صفت) i ام ($i = 1, 2, \dots, n$) در رابطه با ژنوتیپ j ام ($j = 1, 2, \dots, m$) است. r_j^+ و r_j^- به ترتیب مقدار نرمال شده ژنوتیپ ایده‌آل و ژنوتیپ ضعیف برای هر شاخص (صفت) i ام ($i = 1, 2, \dots, n$)

جهت بررسی پایداری ژنوتیپ‌ها با استفاده از روش غیرپارامتری میانگین و انحراف معیار رتبه، ابتدا رتبه هر ژنوتیپ از نظر میانگین عملکرد در مجموع ژنوتیپ‌های مورد بررسی برای هر آزمایش مشخص گردید و سپس میانگین رتبه و انحراف معیار آن برای تمام مناطق و سال‌ها تعیین گردید. نسبت شاخص عملکرد (YIR) به عنوان معیار دیگری جهت بررسی پایداری ژنوتیپ‌ها استفاده شد. بدین منظور میانگین عملکرد هر ژنوتیپ در تمام محیط‌ها به متوسط کل عملکرد ژنوتیپ‌ها در تمام محیط‌ها تقسیم و به صورت درصد نشان داده شد (Esmailzadeh, Moghaddam et al., 2011).

در روش ابرهات و راسل (Eberhart and Russell, 1966) به منظور بررسی پایداری ژنوتیپ‌ها از دو پارامتر شیب خط رگرسیون (b_i) و واریانس انحراف از خط رگرسیون (S_{di}^2) با توجه به روابط زیر استفاده شد.

$$b_i = 1 + \frac{\sum_i (X_{ij} - \bar{X}_i - \bar{X}_j + \bar{X}_{..})(\bar{X}_j - \bar{X}_{..})}{\sum_j (\bar{X}_j - \bar{X}_{..})^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$S_{di}^2 = \frac{1}{N-2} \left[\sum_i (X_{ij} - \bar{X}_i - \bar{X}_j + \bar{X}_{..})^2 - (b_i - 2)^2 \sum_j (\bar{X}_j - \bar{X}_{..})^2 \right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه بالا، X_{ij} عملکرد ژنوتیپ i ام در محیط j ام، $\bar{X}_i$ میانگین عملکرد ژنوتیپ i ام، $\bar{X}_j$ میانگین عملکرد محیط j ام، $\bar{X}_{..}$ میانگین کل آزمایش و N تعداد محیط‌ها می‌باشد. جهت بررسی پایداری ژنوتیپ‌ها از طریق روش گزینش هم‌زمان برای عملکرد و پایداری از آماره مجموع رتبه (KR) (Kang, 1988) استفاده گردید. برای محاسبه آماره پایداری مجموع رتبه (KR)، ابتدا با محاسبه واریانس پایداری شوکلا (Shukla, 1972)، به ژنوتیپی که کمترین واریانس پایداری شوکلا را داشت، رتبه یک داده شد و رتبه ژنوتیپ‌های دیگر نیز تعیین گردید و سپس به ژنوتیپ دارای بیشترین عملکرد رتبه یک داده شد و به ترتیب رتبه همه ژنوتیپ‌ها بر اساس عملکرد مشخص شد. این دو رتبه باهم جمع گردید و رتبه حاصل به عنوان معیار مجموع رتبه

n ... همچنین d_i^+ فاصله از ژنوتیپ ایده‌آل و d_i^- فاصله از ژنوتیپ ضعیف است.

محاسبه شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل: در آخرین مرحله شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$SIIG = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$0 \leq SIIG \leq 1$$

مقدار SIIG بین صفر و یک تغییر می‌کند و هرچه گزینه مورد نظر به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک‌تر باشد، مقدار SIIG آن به یک نزدیک‌تر خواهد بود (Zali et al., 2015, 2016). به عبارت دیگر می‌توان از شاخص‌های منفی و مثبت به شکل ترکیبی در این روش استفاده کرد. براساس این روش، بهترین ژنوتیپ، نزدیک‌ترین ژنوتیپ به ژنوتیپ‌های ایده‌آل و دورترین از ژنوتیپ‌های ضعیف است. در اینجا منظور از ژنوتیپ ایده‌آل، ژنوتیپی فرضی است که بیشترین پایداری عملکرد را داشته باشد، در حالی که ژنوتیپ ضعیف، ژنوتیپی فرضی است که کمترین پایداری عملکرد را داشته باشد (Zali et al., 2015, 2016). به طور خلاصه، ژنوتیپ ایده‌آل از مجموع مقادیر ایده‌آل هر یک از آماره‌های پایداری به دست می‌آید، در حالی که ژنوتیپ ضعیف از مجموع مقادیر ضعیف هر یک از آماره‌های پایداری حاصل می‌شود. به عنوان مثال در مورد عملکرد، حداکثر عملکرد یک ژنوتیپ، مقدار ایده‌آل و عملکرد پایین، به عنوان مقدار ضعیف در نظر گرفته می‌شود. همچنین در مورد واریانس پایداری شوکلا، مقدار ایده‌آل برابر کمترین مقدار واریانس پایداری شوکلا برای ژنوتیپ‌ها و مقدار ضعیف برابر با بیشترین مقدار واریانس پایداری شوکلا برای ژنوتیپ‌ها است.

در این مطالعه از نمودار مختصات محیط متوسط (Average Environment Coordinate; AEC) نیز به منظور بررسی هم‌زمان عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌ها استفاده گردید. برای رسم این نمودار از نرم‌افزار گرافیکی GGEbiplot استفاده شد. برای انجام محاسبات از

نرم‌افزارهای آماری SAS ver 9.1 (SAS Inc, 2011)، Minitab ver 14 (MINITAB, 2005) و SPSS ver 19 (SPSS Inc, 2010) استفاده شد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس: قبل از انجام تجزیه واریانس مرکب داده‌ها، آزمون بارتلت به منظور بررسی یکنواختی واریانس محیط‌ها انجام شد (مقدار آماره کای-دو برابر با ۱۳/۵۲ و غیرمعنی‌دار) و نتایج حاکی از این بود که واریانس محیط‌های مختلف یکسان بوده و از این رو امکان تجزیه مرکب داده‌ها وجود داشت. نتایج تجزیه واریانس مرکب صفت عملکرد دانه نشان داد که اثر محیط در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). محاسبه درصد مجموع مربعات سه منبع محیط، ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط به مجموع آن‌ها نشان داد که عمده تغییرات موجود در داده‌ها به وسیله واریانس محیط‌ها توجیه شد (۵۰/۲۶ درصد) و واریانس بین ژنوتیپ‌ها و نیز واریانس اثر متقابل ژنوتیپ × محیط به ترتیب ۲۳/۴۹ و ۴/۶۸ درصد از تغییرات را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۳). با توجه به این که محیط‌های آزمایش طیف وسیعی از عوامل محیطی (ارتفاع از سطح دریا، درجه حرارت، میزان بارندگی و نوع خاک) را دارا هستند، بنابراین اختصاص عمده تغییرات به واریانس محیط‌ها قابل توجیه است. نوساد و همکاران (Nowosad et al., 2016) نیز در کلزا ۶۹/۸۲ درصد تغییرات را به اثر محیط نسبت دادند. همچنین سایر محققان در آزمایش‌های چند محیطی خود در محصولات دیگر از قبیل گلرنگ (Jamshidmoghaddam and Pourdad, 2013)، ذرت (Shiri and Bahrapour, 2015)، یولاف (Safavi and Bahraminejad, 2017)، آفتابگردان (Hemmati et al., 2018)، گندم (Esmaeilzadeh Moghaddam et al., 2018) و جو (Vaezi et al., 2017, 2019) نشان دادند که اثر محیط درصد قابل توجهی از تغییرات موجود در داده‌ها را به خود اختصاص داده است. همچنین نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثر متقابل ژنوتیپ × محیط در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). معنی‌دار

است. نتایج حاصل از میانگین رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها از لحاظ عملکرد دانه به همراه انحراف معیار رتبه‌ها در دوازده محیط (شش منطقه و دو سال) در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که ژنوتیپ‌های G1, G2, G13, G5 و G12 به ترتیب با متوسط عملکرد دانه ۴۰۸۶، ۳۸۲۹، ۳۷۴۹، ۳۶۸۱ و ۳۶۶۴ کیلوگرم در هکتار دارای عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل آزمایش (۳۵۸۴ کیلوگرم در هکتار) بودند. در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، رقم شاهد نفیس و لاین G2 با دارا بودن کمترین میانگین رتبه و انحراف معیار رتبه پایین به عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها از نظر این روش شناخته شدند. از طرفی دیگر ژنوتیپ‌های G11, G4, G7 و G3 با داشتن بالاترین میانگین و انحراف معیار رتبه، از پایداری عملکرد دانه پایینی برخوردار بودند (جدول ۵). شکل ۱ پراکنش ژنوتیپ‌ها را بر اساس میانگین و انحراف معیار رتبه نشان می‌دهد.

نتایج مربوط به نسبت شاخص عملکرد به عنوان معیار ناپارامتری دیگر در جدول ۵ نشان داده شده است. این نسبت بر اساس نتایج دو سال زراعی محاسبه شد و بر مبنای آن ژنوتیپ‌های G13 با داشتن بالاترین نسبت شاخص عملکرد (۱۱۴/۰۲ درصد) پایدارترین ژنوتیپ بود. ژنوتیپ‌های G1, G2, G5, G8 و G13 پس از ژنوتیپ G13 در رتبه‌های بعدی از نظر پایداری قرار گرفتند و ژنوتیپ‌های G11, G4, G7 و G6 به علت داشتن نسبت شاخص عملکرد پایین، به عنوان ژنوتیپ‌های ناپایدار شناخته شدند. نسبت شاخص عملکرد همراه با دو شاخص میانگین و انحراف معیار رتبه که تنها براساس میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها را گروه‌بندی می‌کنند، می‌توانند در گزینش ژنوتیپ‌های پایدار مفید باشند. در مجموع بر مبنای این سه شاخص، ژنوتیپ‌های G13 و G2 به عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند.

شدن اثر متقابل ژنوتیپ × محیط در این مطالعه نیز نشان‌دهنده این مطلب است که ژنوتیپ‌ها در محیط‌های متفاوت پاسخ‌های متفاوتی نشان داده و به عبارت دیگر اختلاف بین ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیطی دیگر یکسان نیست و پایداری عملکرد دانه و تجزیه برهمکنش ژنوتیپ × محیط باید مورد بررسی قرار گیرد. واکنش ژنوتیپ‌های مختلف معمولاً به دلیل پاسخ متفاوت ژن‌ها و یا قدرت تظاهر متفاوت آن‌ها در محیط‌های مختلف است (Falconer, 1981; Jafari and Farshadfar, 2018).

روش‌های ناپارامتری: در یک برنامه اصلاحی هنگامی که اثر متقابل ژنوتیپ × محیط از نوع غیرمقاطع (Non-crossover) باشد، می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد و تنها بر پایه عملکرد تصمیم گرفت؛ اما اگر اثر متقابل از نوع مقاطع (Crossover interaction) باشد، باید اثر ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط را به طور هم‌زمان در نظر گرفت و نباید فقط اثر ژنوتیپ را در نظر گرفت (Yan and Kang, 2003; Esmaeilzadeh Moghaddam et al., 2018). روش‌های ناپارامتری Kubinger, Hildebrand و Laan-Kroon قابلیت بالایی در تشخیص اثر متقابل غیرمقاطع از مقاطع دارند. روش‌های Hildebrand و Kubinger برای تشخیص وجود اثر متقابل غیرمقاطع و روش Laan-Kroon برای تشخیص اثر متقابل مقاطع کاربرد دارد (Hühn and Léon, 1995). نتایج تجزیه اثر متقابل ژنوتیپ × محیط با استفاده روش‌های ذکر شده در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به معنی‌دار شدن همه آزمون‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که هر دو نوع اثر متقابل (مقاطع و غیرمقاطع) در این پژوهش وجود دارد و پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های کلزا باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

در تحقیق مرتضویان و همکاران (Mortazavian et al., 2014) نیز هر دو نوع اثر متقابل در کلزا گزارش گردیده

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب و تجزیه واریانس به روش ابرهارت و راسل عملکرد دانه ژنوتیپ‌های کلزا

Table 3. Combined analysis of variance and Eberhart and Russell analysis of seed yield for rapeseed genotypes

منبع تغییرات Source of variance	درجه آزادی Df	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean squares	مجموع مربعات کل (درصد) Total sum of squares (%)
تجزیه واریانس مرکب Combined analysis of variance				
محیط Environment (E)	11	244581985.4	22234725.9**	50.26
تکرار درون محیط Replication/E	24	21432554.7	893023.1	
ژنوتیپ Genotype (G)	12	22785819.6	1898818.3**	4.68
G × E	132	114305806	865953.1**	23.49
خطا Error	288	83534091.7	290048.9	
کل Total	467	486640257.4		
تجزیه ابرهارت و راسل Eberhart and Russell analysis				
Total	155	1.27E+08		
G	12	7595273	632939.4**	
E	11	81527328	7411575**	
G × E	132	38101935	288651**	
E + [G × E]	144	1.20E+08	830758.8**	
E [Linear]	1	81527328	81527328**	
G × E [Linear]	12	3888071	324005.9**	
انحراف از رگرسیون Deviation from regression	130	34213865	263183.6**	
G1	10	1476388	147638.8**	
G2	10	2789659	278965.9**	
G3	10	2973422	297342.2**	
G4	10	3809784	380978.4**	
G5	10	2098229	209822.9**	
G6	10	1195936	119593.6**	
G7	10	3573895	357389.5**	
G8	10	1455898	145589.8**	
G9	10	3573792	357379.2**	
G10	10	1687022	168702.2**	
G11	10	3481417	348141.7**	
G12	10	3143153	314315.3**	
G13	10	2955270	295527**	
Error	288	83534092	290048.9	

** : معنی دار در سطح احتمال یک درصد

** : Significant at 0.01 probability level

جدول ۴- آنالیز اثر متقابل ژنوتیپ × محیط با استفاده از آزمون‌های مختلف ناپارامتری برای ۱۳ ژنوتیپ کلزا مورد بررسی در ۱۲ محیط

Table 4. Analysis of genotype × environment interaction using different nonparametric tests on 13 rapeseed genotypes grown in 12 environments.

آماره‌ها Statistics	درجه آزادی DF	آماره کای-دو χ^2 statistic
Hildebrand	132	329.21**
Kubinger	132	276.70**
Laan-Kroon	132	200.42**

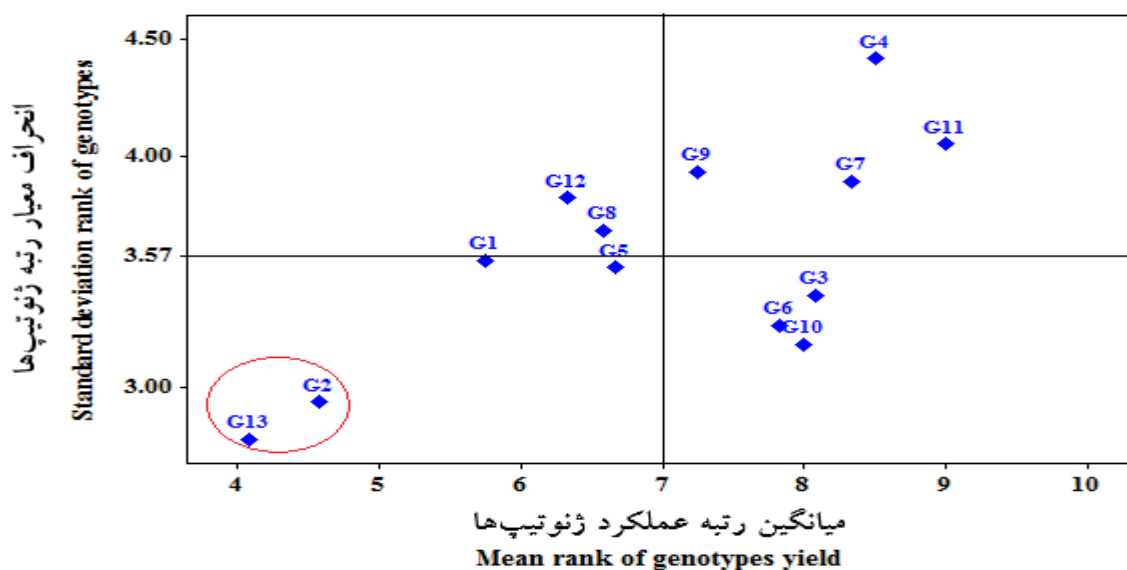
** : معنی دار در سطح احتمال یک درصد

** : Significant at 1% probability level

جدول ۵- میانگین عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)، میانگین و انحراف معیار رتبه عملکرد دانه ژنوتیپ‌های کلزا در شش منطقه طی دو سال زراعی (۹۶-۱۳۹۴).

Table 5. Mean seed yield (kg h⁻¹), mean and standard deviation for rank of seed yield of rapeseed genotypes in six locations during two cropping years (2015-2017).

نسبت شاخص	انحراف معیار رتبه	میانگین رتبه	میانگین عملکرد دانه	نام	کد
عملکرد	عملکرد	عملکرد	(کیلوگرم در هکتار)	ژنوتیپ	ژنوتیپ
Yield index ratio	Standard deviation for rank of yield	Mean rank of yield	Mean seed yield (Kg h ⁻¹)	Genotype name	Genotype code
104.61	3.55	5.75	3749	HW-92-1	G1
106.84	2.94	4.58	3829	BAL-92-1	G2
98.03	3.40	8.08	3513	BAL-92-3	G3
92.34	4.42	8.50	3309	BAL-92-4	G4
102.25	3.52	6.67	3664	BAL-92-6	G5
94.38	3.27	7.83	3382	BAL-92-8	G6
94.17	3.89	8.33	3375	HW-92-2	G7
102.71	3.68	6.58	3681	BAL-92-11	G8
99.79	3.93	7.25	3576	HW-92-3	G9
97.84	3.19	8.00	3506	Okapi	G10
91.09	4.05	9.00	3264	Ahmadi	G11
101.92	3.82	6.33	3652	Nima	G12
114.02	2.78	4.08	4086	Nafis	G13
	3.57	7.00	3584	میانگین کل	Overall mean



شکل ۱- نمودار پراکنش ژنوتیپ‌های کلزا بر اساس میانگین و واریانس رتبه عملکرد دانه در محیط‌های مختلف

Figure 1. Distribution diagram of rapeseed genotypes based on mean and variance of rank on seed yield in different environments.

شاخص‌های میانگین و انحراف معیار رتبه و شاخص نسبت عملکرد جهت تعیین پایداری ژنوتیپ‌ها توسط محققان دیگری گزارش شده است (Esmailzadeh Moghaddam et al., 2010; Esmailzadeh Moghaddam et al., 2011; Jafari et al., 2015).

مهم‌ترین محدودیت این شاخص‌ها این است که امکان گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر مبنای سازگاری عمومی و خصوصی وجود ندارد ولی به دلیل سادگی محاسبه، در آزمایش‌های چندمحیطی می‌توان با استفاده از این شاخص‌ها ژنوتیپ‌های پایدار را گزینش کرد. استفاده از

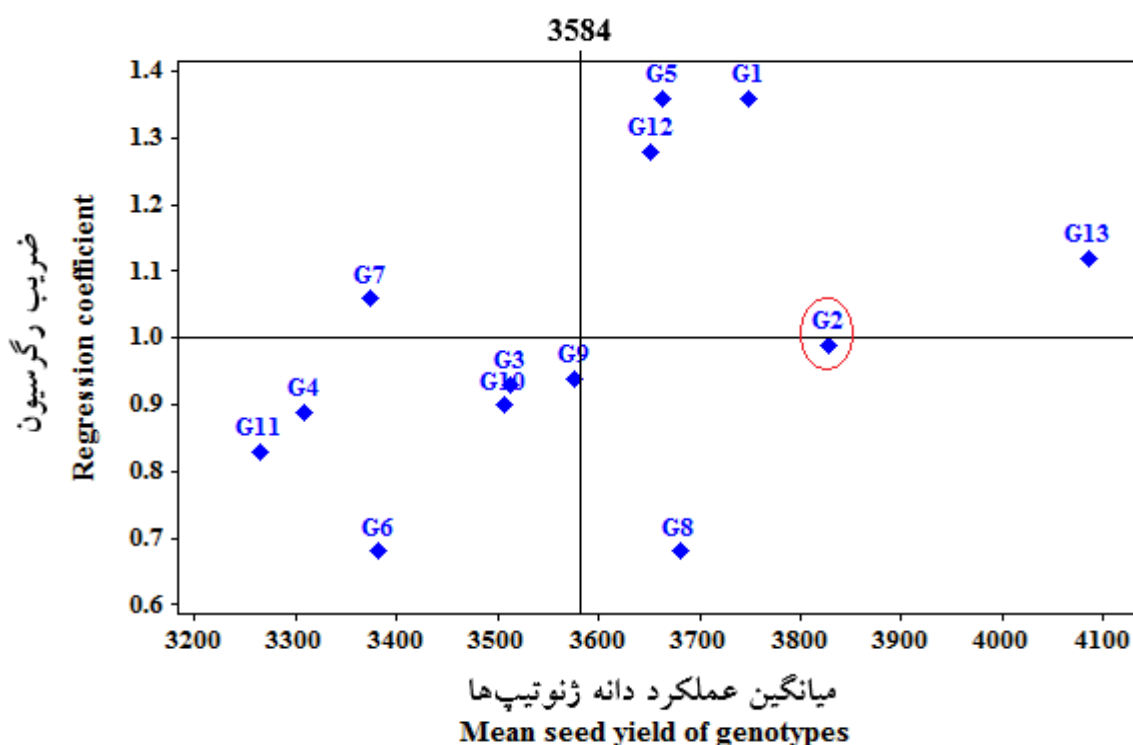
روش‌های پارامتری: نتایج تجزیه واریانس به روش ابرهات و راسل (Eberhart and Russell, 1966) در جدول ۳ نمایش داده شده است. نتایج نشان داد که اثرات ژنوتیپ، محیط (خطی)، ژنوتیپ × محیط (خطی) و انحراف از رگرسیون معنی‌دار بود. معنی‌دار شدن اثر ژنوتیپ نشان‌دهنده این مطلب است که تنوع ژنتیکی وسیعی در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه وجود داشت. معنی‌دار شدن میانگین مربعات مربوط به محیط (خطی) بیانگر این موضوع می‌باشد که بین عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در هر محیط با شاخص محیطی رابطه خطی وجود دارد، به گونه‌ای که با افزایش شاخص محیطی (بهبود شرایط کشت)، عملکرد ژنوتیپ‌ها نیز افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به معنی‌دار شدن اثر متقابل ژنوتیپ × محیط (خطی)، می‌توان نتیجه گرفت که شیب‌خط رگرسیونی ژنوتیپ‌ها یکسان نبوده و ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در محیط‌های مختلف پاسخ‌های متفاوتی را نشان داده‌اند. معنی‌دار شدن میانگین مربعات انحرافات از خط رگرسیونی (انحراف مرکب) نیز نشان‌دهنده پراکندگی زیاد نقاط مربوط به عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در اطراف خط رگرسیون قرار می‌باشد و به بیان دیگر می‌توان گفت که واکنش یک ژنوتیپ در طول تغییرات خطی با محیط ممکن است دارای تغییرات زیادی باشد (Jafari et al., 2015).

بر مبنای روش تجزیه پایداری رگرسیونی ابرهات و راسل (Eberhart and Russell, 1966) سه معیار عملکرد بالا، ضریب رگرسیونی برابر با یک و واریانس انحراف از خط رگرسیون غیرمعنی‌دار نشان‌دهنده پایداری یک ژنوتیپ می‌باشند. با توجه به معنی‌دار بودن انحراف از خط رگرسیون برای همه ژنوتیپ‌ها (جدول ۳)، از دو معیار دیگر ابرهات و راسل (عملکرد بالا و ضریب رگرسیونی برابر یک) جهت تعیین میزان پایداری ژنوتیپ‌ها استفاده شد. معیارهای پایداری بر مبنای روش ابرهات و راسل در جدول ۶ ارائه شده است. همچنین موقعیت ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از نظر عملکرد دانه و ضریب رگرسیون در شکل ۲ نمایش داده شده

است. طبق تعریف ژنوتیپ‌هایی که دارای ضریب رگرسیون یک یا نزدیک به یک باشند و همچنین عملکرد آن‌ها از میانگین کل آزمایش بیشتر باشد، به‌عنوان ژنوتیپ‌های با سازگاری عمومی بالا برای تمام مناطق مورد بررسی شناخته می‌شوند. ژنوتیپ‌های با ضریب رگرسیون بالاتر از یک دارای سازگاری خصوصی به محیط‌های مطلوب و ژنوتیپ‌های با ضریب رگرسیون کمتر از یک دارای سازگاری خصوصی به محیط‌های نامطلوب می‌باشند (Dorrani, Nejad and Mohammadi-Nejad, 2018). با توجه به نتایج جدول ۶ و شکل ۲ مشاهده می‌شود که در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، ژنوتیپ G2 با داشتن عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل آزمایش و ضریب رگرسیون معادل یک (۰/۹۹) به‌عنوان ژنوتیپی با سازگاری عمومی بالا برای تمام مناطق شناخته شد. ژنوتیپ‌های با سازگاری عمومی به دلیل اینکه از سازگاری و درجه تحمل بیشتری در مقابل تغییرات محیطی برخوردارند، در میانگینی از شرایط محیطی، عملکرد رضایت‌بخشی را تولید می‌کنند؛ بنابراین ژنوتیپ G2 با میانگین عملکرد دانه ۳۸۲۹ کیلوگرم در هکتار بهترین سازگاری عمومی را در تمام مناطق مورد مطالعه داشت و می‌تواند به‌عنوان ژنوتیپ برتر و امیدبخش در مطالعات تکمیلی و در نهایت برای کشت در مناطق سرد و معتدل سرد کشور توصیه شود. ارقام شاهد نفیس و نیما و لاین‌های G1 و G5 با ضریب رگرسیون بالاتر از یک و عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل آزمایش به‌عنوان ژنوتیپ‌هایی با سازگاری خصوصی به محیط‌های مساعد یا مطلوب شناسایی شدند. همچنین ژنوتیپ‌های G6، G11، G4، G10 و G3 با ضریب رگرسیون کمتر از یک و عملکرد دانه پایین‌تر از میانگین کل آزمایش به‌عنوان ژنوتیپ‌هایی با سازگاری خصوصی به محیط‌های نامساعد یا نامطلوب شناسایی شدند (جدول ۶). استفاده از ژنوتیپ‌هایی با سازگاری عمومی و خصوصی در سیستم‌های زراعی می‌تواند آثار منفی اثرات ژنوتیپ × محیط را خنثی کند و از این طریق می‌توان از شرایط آب و هوایی متفاوت استفاده کرد (Farshadfar and Sutka, 2006).

جدول ۶- برآورد پارامترهای پایداری به روش ابره‌ارت و راسل و شاخص مجموع رتبه برای ژنوتیپ‌های کلزا
Table 6. Estimation of stability parameters using Eberhart and Russell method and rank sum index for rapeseed genotypes

کد ژنوتیپ Genotype code	میانگین عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Mean seed yield (Kg.h ⁻¹)	ضریب رگرسیون Regression coefficient	انحراف از رگرسیون Deviation from regression	واریانس پایداری شوکلای Shukla stability variance	معیار پایداری عملکرد Yield-stability Statistic
G1	3749	1.36	147638.8	219898.0	7
G2	3829	0.99	278965.9	273588.2	7
G3	3513	0.93	297342.2	296803.3	15
G4	3309	0.89	380978.4	391986.5	25
G5	3664	1.36	209822.9	285896.3	11
G6	3382	0.68	119593.6	172600.4	12
G7	3375	1.06	357389.5	359942.0	20
G8	3681	0.68	145589.8	198883.8	7
G9	3576	0.94	357379.2	360478.9	17
G10	3506	0.90	168702.2	161231.1	10
G11	3264	0.83	348141.7	367347.6	25
G12	3652	1.28	314315.3	362467.4	17
G13	4086	1.12	295527.0	301339.7	9



شکل ۲- نمودار پراکنش ژنوتیپ‌های کلزا بر اساس عملکرد دانه و ضریب رگرسیون

Figure 2. Distribution diagram of rapeseed genotypes based on seed yield and regression coefficient

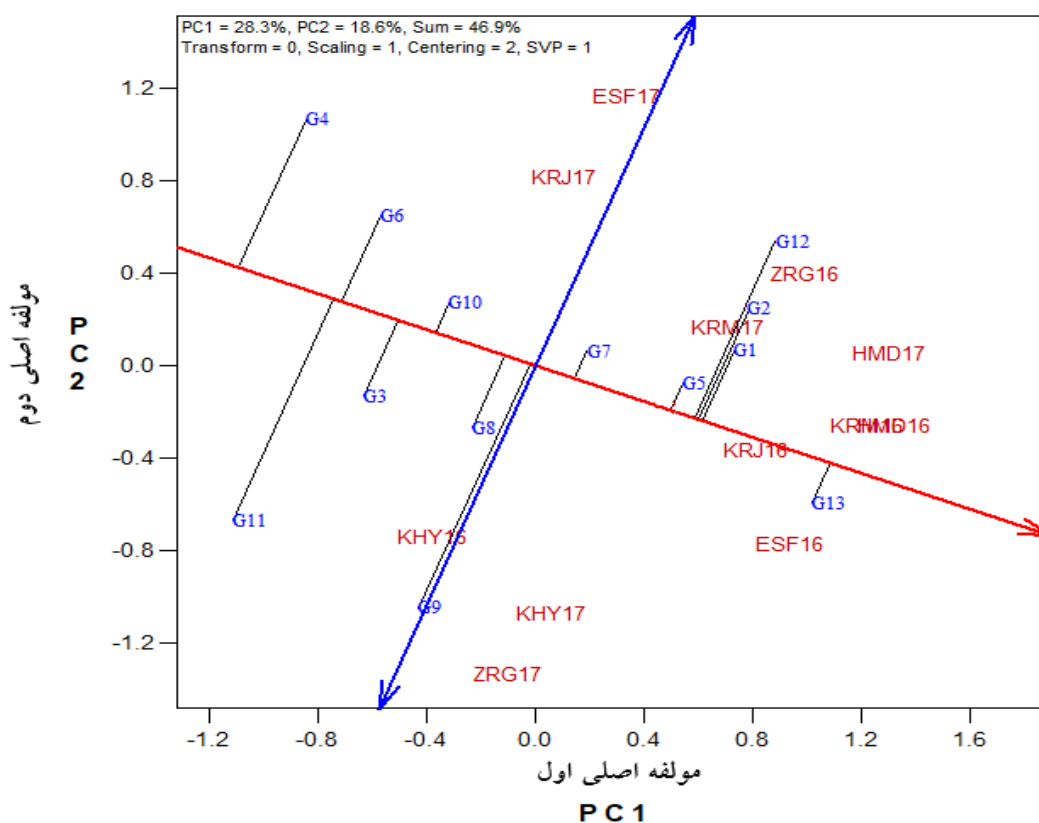
ژنوتیپ‌ها شناخته می‌شوند. بر اساس این معیار، لاین‌های G1، G2 و G8 و رقم شاهد نفیس با کمترین مقادیر به‌عنوان پایدارترین و ژنوتیپ‌های G4، G7، G9 و G11 با بیشترین مقدار آماره مذکور به‌عنوان ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند (جدول ۶).

روش گزینش هم‌زمان برای عملکرد و پایداری (YS_i):
روش گزینش هم‌زمان برای عملکرد و پایداری (YS_i) به‌عنوان معیار دیگری جهت تعیین پایداری ژنوتیپ‌ها توسط کانگ (Kang, 1988) ارائه شده است. بر این اساس ژنوتیپ‌های با کمترین مقدار YS_i به‌عنوان پایدارترین

جدول ۷- شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده آل کلزا بر مبنای روش های تجزیه پایداری ناپارامتری و پارامتری و فواصل از ژنوتیپ مطلوب (d^+)، ژنوتیپ نامطلوب (d^-) و عملکرد دانه

Table 7. Selection index of ideal rapeseed genotype based on non-parametric and parametric methods and distance from ideal genotype (d^+), non-ideal genotype (d^-) and seed yield

نام ژنوتیپ Genotype's name	d^+	d^-	شاخص SIIG SIIG index	عملکرد دانه Seed yield
G1	0.113	0.494	0.813	3749
G2	0.218	0.428	0.662	3829
G3	0.336	0.246	0.423	3513
G4	0.539	0.060	0.100	3309
G5	0.206	0.390	0.655	3664
G6	0.266	0.419	0.611	3382
G7	0.440	0.151	0.255	3375
G8	0.228	0.457	0.667	3681
G9	0.404	0.186	0.316	3576
G10	0.222	0.424	0.656	3506
G11	0.521	0.063	0.108	3264
G12	0.350	0.259	0.425	3652
G13	0.231	0.417	0.643	4086
Mean	میانگین		0.487	3584



شکل ۳- نمایش بای پلات برای گزینش همزمان عملکرد و پایداری در ژنوتیپ های کلزا

Figure 3. Biplot view for simultaneous selection of yield and stability in rapeseed genotypes

است. این بدان معنا که ژنوتیپ پایدار عملکرد غیرقابل تغییری در میان محیط ها دارد. این جنبه از پایداری در کشاورزی مطلوب نمی باشد. در حالی که بسیاری از

بیکر (Becker, 1981) دو نوع پایداری ژنوتیپی را تعریف کرده است. پایداری در مفهوم زیستی (بیولوژیک) به ژنوتیپی اشاره دارد که واریانس آن در میان محیط ها صفر

لاینها از بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی به کار می‌رود. با استفاده از روش SIIG می‌توان آماره‌های مختلف را به صورت یک شاخص واحد درآورد و انتخاب ژنوتیپ‌های برتر را مطمئن‌تر و دقیق‌تر انجام داد. با توجه به نتایج، ژنوتیپ‌های G1, G2, G5, G8 و رقم شاهد نفیس با داشتن مقدار SIIG بالا و همچنین عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل، جزء ژنوتیپ‌های برتر از نظر عملکرد دانه و پایداری بودند (جدول ۷). از طرفی دیگر ژنوتیپ‌های G4, G7, G11 و G9 با مقدار SIIG پایین و همچنین عملکرد دانه کمتر از میانگین کل، به عنوان ژنوتیپ‌های ناپایدار شناسایی شدند (جدول ۷). شاخص SIIG به منظور انتخاب ارقام و لاین‌های پایدار از نظر آماره‌های مختلف پایداری در گندم دوروم (Najafi Mirak et al., 2018) نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

روش GGEBiplot: در این مطالعه از نمودار مختصات محیط متوسط (Average Environment Coordinate; AEC) به منظور بررسی هم‌زمان عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌ها استفاده گردید (شکل ۳). به این نمودار بای‌پلات میانگین در مقابل پایداری نیز گفته می‌شود (Yan et al., 2007). این نمودار دارای دو محور افقی و عمودی است. ژنوتیپ‌ها در طول محور افقی AEC (محوری که با دایره و فلش مشخص شده است) براساس عملکرد رتبه‌بندی می‌شوند و جهت پیکان نشان‌دهنده میانگین عملکرد بالاتر است. همچنین محور افقی AEC بیانگر پایداری می‌باشد و هر ژنوتیپی که به این محور نزدیک باشد، پایدارتر است (Yan et al., 2000). نتایج نشان داد که رقم شاهد نفیس و لاین‌های G1, G5 و G2 دارای پایداری بالایی بودند که میانگین عملکرد آن‌ها نیز از میانگین عملکرد کل بالاتر بود (جدول ۵). ژنوتیپ G12 با وجود این که دارای میانگین عملکرد آن از میانگین عملکرد کل بیشتر بود (جدول ۵) ولی به دلیل داشتن فاصله زیاد از محور افقی AEC پایداری کمی برخوردار بود (شکل ۳). از نمودار مختصات محیط متوسط AEC به منظور شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار

به‌نژادگران مفهوم دینامیک (زراعی) پایداری را جهت گزینش ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد بالا در شرایط محیطی مختلف ترجیح می‌دهند. بر طبق این مفهوم پایداری، یک پاسخ پیش‌بینی‌پذیر به عوامل محیطی وجود دارد یا به عبارت دیگر ژنوتیپ‌های گزینش شده دارای پتانسیل پاسخ به بهبود شرایط محیطی می‌باشند. در این آزمایش به نظر می‌رسد که معیار پایداری گزینش هم‌زمان برای عملکرد و پایداری (YS_i) بیشتر از مفهوم دینامیک (زراعی) پایداری بهره می‌برد و ژنوتیپ‌های پایدار (G1, G2, G8 و G13) انتخاب شده توسط این پارامتر از عملکرد بالایی نیز برخوردار می‌باشند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که معیار YS_i دارای مفهوم دینامیک (زراعی) پایداری می‌باشد و معیار مناسبی برای گزینش ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار در ژنوتیپ‌های کلزای زمستانه می‌باشد. سایر محققان در گیاهان مختلف از قبیل عدس (Sabaghnia et al., 2006)، نخود (Ebadi et al., 2008)، یونجه (Movahedi et al., 2010)، کلزا (Pourdad et al., 2014; Mortazavian et al., 2014)، فستوکا (Dehghani et al., 2016)، جو (Vaezi et al., 2019) و سیب‌زمینی (Moghaddaszadeh et al., 2018) معیار پایداری YS_i را دارای مفهوم دینامیک (زراعی) پایداری معرفی کردند.

شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG): در این تحقیق به منظور انتخاب بهترین ژنوتیپ‌ها از نظر ثبات عملکرد در محیط‌های مختلف، علاوه بر استفاده از تک‌تک آماره‌های تجزیه پایداری ناپارامتری و پارامتری، از شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG) نیز استفاده شد و همه آماره‌های تجزیه پایداری ناپارامتری و پارامتری ادغام شدند و تبدیل به یک شاخص واحد یعنی SIIG شدند (جدول ۷). شاخص SIIG برگرفته از مدل TOPSIS (The technique for order of preference by similarity to ideal solution) یا اولویت‌بندی براساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل است که نخستین بار توسط ونگ و یون (Hwang and Yoon, 1981) به عنوان یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره، معرفی شد. شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG) یک مدل گزینش‌گر بوده و به منظور انتخاب ایده‌آل‌ترین ارقام و

و G12 نیز بیشترین سازگاری خصوصی را به محیط‌های مساعد و ژنوتیپ‌های G6، G11، G4، G10 و G3 بیشترین سازگاری خصوصی را با محیط‌های نامساعد نشان دادند. همچنین نتایج نشان داد که معیار گزینش هم‌زمان برای عملکرد و پایداری (YSi) و شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG) با میانگین عملکرد دانه و مفهوم دینامیک پایداری رابطه داشته و استفاده از این معیارها جهت گزینش ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا در کلزای زمستانه مناسب می‌باشد.

و پرمحصول در ذرت (Setimela et al., 2007) و گندم نان (Jafari and Farshadfar, 2018) نیز استفاده شده است. در مجموع بر مبنای روش‌های تجزیه پایداری استفاده شده در این آزمایش، ژنوتیپ G2 با عملکرد بالاتر از متوسط کل (۳۸۲۹ کیلوگرم در هکتار) و پایداری عمومی بالا، لاین برتر این آزمایش بود که برای مراحل بعدی تحقیقات یعنی آزمایش‌های تحقیقی ترویجی و کشت در شرایط زارعین جهت معرفی به‌عنوان رقم تجاری جدید در مناطق سرد و معتدل سرد کشور انتخاب شد. ژنوتیپ‌های G13، G1، G5

References

- Ahmadi, J., Vaezi, B. and Pour-Aboughadareh, A. (2016). Evaluation of forage yield stability of advanced lines of grass pea (*Lathyrus sativa* L.) by parametric and non-parametric methods. *Journal of Crop Breeding*, **8**: 149-159 (In Persian).
- Ahmadpour, S., Darvishzadeh, R., Sofalian, O. and Hatamzadeh, H. (2019). Evaluation of yield stability of sunflower inbred lines under salt stress conditions. *Journal of Crop Breeding*, **11**: 1-10 (In Persian).
- Akbarpour, O., Dehghani, H. and Sorkhi-Lalehloo, B. (2012). Study of grain yield stability of barley (*Hordeum vulgare* L.) promising lines in cold regions of Iran using regression methods. *Iranian Journal of Crop Sciences*, **14**: 155-170 (In Persian).
- Alishah, O., MahmoodJanloo, H., Hekmat, M.H., Naderi Arefi, A., Sidmasoomi, S.Y. and Talat, F. (2019). Investigation of genotype × environment interaction and yield stability of hopeful cotton (*G. hirsutum* L.) genotypes. *Journal of Crop Breeding*, **11**: 226-236 (In Persian).
- Alizadeh, B., Yazdandust Hamedani, M., Rezaei Zad, A., Azizinia, S., Khiyavi, M., Shirani Rad, A.H., Javidfar, F., Pasban Eslam, B., Mostafavi Rad, M., Shariati, F., Rahmanpour Ozan, S., Alem Khumaram, M.H., Majd Nasiri, B., Amiri Oghan, A. and Zareei Siahbidi, A. (2019). Nima, new winter oilseed rape variety for cultivation in the cold and moderately cold regions of Iran. *Research Achievements for Field and Horticulture Crops*, **8**: 61-76 (In Persian).
- Becker, H. and Leon, J. (1988). Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding*, **101**: 1-23.
- Becker, H.C. (1981). Correlation among some statistical measures of phenotypic stability. *Euphytica*, **30**: 835-884.
- Dalló, S.C., Zdziarski, A.D., Woyann, L.G., Milioli, A.S., Zanella, R., Conte, J. and Benin, G. (2019). Across year and year-by-year GGE biplot analysis to evaluate soybean performance and stability in multi-environment trials. *Euphytica*, **215**: 113.
- Dehghani, M.R., Majidi, M.M., Mirlohi, A. and Saeidi, G. (2016). Integrating parametric and non-parametric measures to investigate genotype × environment interactions in tall fescue. *Euphytica*, **208**: 583-596.
- Dorrani-Nejad, M. and Mohammadi-Nejad, G. (2018). Stability analysis for seed yield in different fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) ecotypes using Eberhart-Russel regression and different univariate statistics methods. *Journal of Crop Breeding*, **10**: 19-27 (In Persian).
- Eagles, H. and Frey, K.J. (1977). Repeatability of the stability-variance parameter in oats 1. *Crop Science*, **17**: 253-256 (In Persian).
- Ebadi, A., Sabaghpour, S.H., Dehghani, H. and Kamrani, M. (2008). Non-parametric measures of phenotypic stability in chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.). *Euphytica*, **162**: 221-229.
- Eberhart, S.T. and Russell, W. (1966). Stability parameters for comparing varieties 1. *Crop Science*, **6**: 36-40.

- Esmailzadeh Moghaddam, M., Tahmasebi, S., Lotf Ali Ayeneh, G.A., Akbari Moghadam, H., Mahmoudi, M., Sayyahfar, M., Tabib Ghaffari, S.M. and Zali, H.** (2018). Yield stability evaluation of bread wheat promising lines using multivariate methods. *Cereal Research*, **8**: 333-344 (In Persian).
- Esmailzadeh Moghaddam, M., Zakizadeh, M., Akbari, M.H., Abedini, E.M., Sayahfar, M., Nikzad, A., Tabib, G.S. and Lotfi, A.G.** (2011). Genotype $\times$ environment interaction and stability of grain yield of bread wheat genotypes in dry and warm areas of Iran. *Seed and Plant Improvement Journal*, **27**: 257-273 (In Persian).
- Esmailzadeh Moghaddam, M., Zakizadeh, M., Akbari, M.H., Abedini, E.M., Sayahfar, M., Nikzad, A., Tabib, G.S. and Aeineh, A.** (2010). Study of grain yield stability and genotype–environment interaction in 20 bread wheat lines in warm and dry areas of south of Iran. *Electronic Journal of Crop Production*, **3**: 179-200 (In Persian).
- Falconer, D.S.** (1981). Introduction to quantitative genetics. 2nd Ed, Longman, London, UK.
- Farshadfar, E. and Sutka, J.** (2006). Biplot analysis of genotype-environment interaction in durum wheat using the AMMI model. *Acta Agronomica Hungarica*, **54**: 459-467.
- Gerrish, B.J., Ibrahim, A.M., Rudd, J.C., Neely, C. and Subramanian, N.K.** (2019). Identifying mega-environments for hard red winter wheat (*Triticum aestivum* L.) production in Texas. *Euphytica*, **215**: 129.
- Hemmati, I., Pourdad, S.S. and Choukan, R.** (2018). Studying the genotype $\times$ environment interaction under different conditions of moisture stress using graphical GGE biplot analysis in synthetic varieties of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences*, **11**: 471-480 (In Persian).
- Hühn, M. and Léon, J.** (1995). Nonparametric analysis of cultivar performance trials: experimental results and comparison of different procedures based on ranks. *Agronomy Journal*, **87**: 627-632.
- Hwang, C.L. and Yoon, K.** (1981). *Multiple Attributes Decision Making Methods and Applications*. Springer, Berlin Heidelberg, DE.
- Jafari, M., Asghari, Z.R., Alizadeh, B., Sofalian, O. and Zare, N.** (2015). Study of seed yield stability in winter rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes using Eberhart and Russell's method. *Iranian Journal of Field Crop Science*, **45**: 585-592 (In Persian).
- Jafari, T. and Farshadfar, E.** (2018). Stability analysis of bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) by GGE biplot. *Cereal Research*, **8**: 199-208 (In Persian).
- Jamshidmoghaddam, M. and Pourdad, S.S.** (2013). Genotype $\times$ environment interactions for seed yield in rainfed winter safflower (*Carthamus tinctorius* L.) multi-environment trials in Iran. *Euphytica*, **190**: 357-369.
- Kang, M.** (1988). A rank-sum method for selecting high-yielding, stable corn genotypes. *Cereal Research Communication*, **16**: 113-115.
- Khalili, M. and Pour-Aboughadareh, A.** (2016). Parametric and non-parametric measures for evaluating yield stability and adaptability in barley doubled haploid lines. *Journal of Agricultural Science and Technology*, **18**: 789-803.
- Mahdavi, A.M., Babaeian Jelodar, N., Farshadfar, E. and Bagheri, N.** (2020). Evaluation of stability and adaption of bread wheat genotypes using univariate statistics parameters and AMMI. *Plant Genetic Researches*, **7(1)**: 19-32 (In Persian).
- MINITAB, INC.** (2005). *Minitab User's Guide, Vers. 14*. Minitab Inc, Harrisburg, Pennsylvania, USA
- Moghaddaszadeh, M., Asghari Zakaria, R., Hassanpanah, D. and Zare, N.** (2018). Non-parametric stability analysis of tuber yield in potato (*Solanum tuberosum* L.) genotype. *Journal of Crop Breeding*, **28**: 50-63 (In Persian).
- Mohammadi, M., Karimizadeh, R., Hosseinpour, T., Ghogh, H., Shahbazi, K. and Sharifi, P.** (2018). Use of parametric and non-parametric methods for genotype $\times$ environment interaction analysis in bread wheat genotypes. *Plant Genetic Researches*, **4**: 75-88 (In Persian).
- Mortazavian, S., Nikkhah, H., Hassani, F., Sharif, A.H.M., Taheri, M. and Mahlooji, M.** (2014). GGE biplot and AMMI analysis of yield performance of barley genotypes across different environments in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, **16**: 609-622.

- Movahedi, Z., Dehghani, H. and Mofidian, M.** (2010). A study of yield stability in cold region ecotypes of alfalfa (*Medicago sativa* L.) through non-parametric measures. *Iranian Journal of Field Crop Science*, **40**: 103-111 (In Persian).
- Najafi Mirak, T., Dastfal, M., Andarzian, B., Farzadi, H., Bahari, M. and Zali, H.** (2018). Assessment of non-parametric methods in selection of stable genotypes of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum). *Iranian Journal of Crop Sciences*, **20**: 126-138 (In Persian).
- Nowosad, K., Liersch, A., Poplawska, W. and Bocianowski, J.** (2016). Genotype by environment interaction for seed yield in rapeseed (*Brassica napus* L.) using additive main effects and multiplicative interaction model. *Euphytica*, **208**: 187-194.
- Pourdad, S., Moghaddam, M., Faraji, A. and Naraki, H.** (2014). Study on different non-parametric stability methods on seed yield of spring rapeseed varieties and hybrids. *Iranian Journal of Field Crop Science*, **44**: 539-548 (In Persian).
- Pourdad, S.S. and Jamshidmoghaddam, M.** (2013). Study on genotype × environment interaction through GGE biplot for seed yield in spring rapeseed (*Brassica Napus* L.) in rain-fed condition. *Journal of Crop Breeding*, **5**: 1-13 (In Persian).
- Sabaghnia, N., Dehghani, H. and Sabaghpour, S.H.** (2006). Nonparametric methods for interpreting genotype × environment interaction of lentil genotypes. *Crop Science*, **46**: 1100-1106.
- Safavi, S. and Bahraminejad, S.** (2017). The evaluation of genotype × environment interactions for grain yield of oat genotypes using AMMI model. *Journal of Crop Breeding*, **922**: 125-132 (In Persian).
- SAS Inc.** (2011). *Base SAS 9.1 Procedures Guide*. SAS Institute Inc, Cary, North Carolina, USA.
- Setimela, P., Vivek, B., Bänziger, M., Crossa, J. and Maiden, F.** (2007). Evaluation of early to medium maturing open pollinated maize varieties in SADC region using GGE biplot based on the SREG model. *Field Crops Research*, **103**: 161-169.
- Shiri, M.R. and Bahrampour, T.** (2015). Genotype × environment interaction analysis using GGE biplot in grain maize (*Zea mays* L.) hybrids under different irrigation conditions. *Cereal Research*, **5**: 83-94 (In Persian).
- Shukla, G.** (1972). Some statistical aspects of partitioning genotype environmental components of variability. *Heredity*, **29**: 237-245 (In Persian).
- SPSS Inc.** (2010). *SPSS 20. Users Guided*. IBM Corp, Chicago, USA.
- Sserumaga, J.P., Oikeh, S.O., Mugo, S., Asea, G., Otim, M., Beyene, Y., Abalo, G. and Kikafunda, J.** (2016). Genotype by environment interactions and agronomic performance of doubled haploids testcross maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Euphytica*, **207**: 353-365.
- Vaezi, B., Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Armion, M., Mehraban, A., Hossein-Pour, T. and Dorii, M.** (2017). GGE biplot and AMMI analysis of barley yield performance in Iran. *Cereal Research Communications*, **45**: 500-511.
- Vaezi, B., Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Mehraban, A., Hossein-Pour, T., Koohkan, E., Ghasemi, S., Moradkhani, H. and Siddique, K.H.** (2019). Integrating different stability models to investigate genotype × environment interactions and identify stable and high-yielding barley genotypes. *Euphytica*, **215**: 63.
- Wachira, F., Ng'etich, W., Omolo, J. and Mamati, G.** (2002). Genotype × environment interactions for tea yields. *Euphytica*, **127**: 289-297.
- Yan, W. and Kang, M.S.** (2003). *GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists and agronomists*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- 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**: 656-663.
- Yan, W., Hunt, L., Sheng, Q. and Szlavnic, Z.** (2000). Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*, **40**: 597-605.
- 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**: 643-653.

- Zali, H., Hasanloo, T., Sofalian, O., Asghari, A. and Zeinalabedini, M.** (2016). Appropriate strategies for selection of drought tolerant genotypes in canola. *Journal of Crop Breeding*, **8(20)**: 77-90 (In Persian).
- Zali, H., Sofalian, O., Hasanloo, T., Asgharii, A. and Hoseini, S.M.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(2)**: 703-711.

Investigation of Genotype × Environment Interaction and Seed Yield Stability of Rapeseed Genotypes in Cold and Mild Cold Regions of Iran

Bahram Alizadeh^{1,*}, Abbas Rezaizad², Mohammad Yazdandoost Hamedani³, Gholamhossein Shiresmaeili⁴, Farshad Nasserghadimi⁵ and Hamid Reza Khademhamzeh⁶

- 1- Associate Professor, Oil Crops Research Department, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
- 2- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Kermanshah, Iran
- 3- Assistant Professor, Seed and Plant Improvement Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Hamedan, Iran
- 4- Assistant Professor, Horticulture Crops Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran
- 5- Assistant Professor, Seed and Plant Improvement Research Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Khoy, Iran
- 6- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

(Received: July 5, 2020 – Accepted: March 7, 2021)

Abstract

The genotype × environment interaction is a major challenge in the study of quantitative characters because it reduces yield stability in different environments and also it complicates the interpretation of genetic experiments and makes predictions difficult. In this regard to analysis of genotype × environment interaction and determine the yield stability of winter rapeseed genotypes in cold and mild cold regions of the country, 9 lines and 4 cultivars were evaluated in a randomized complete block design with three replications in six experimental field stations (Isfahan, Hamedan, Karaj, Kermanshah, Khoy and Zarghan) during 2015–2017 growing seasons. Results of combined analysis of variance indicated that the effects of environments, genotypes and genotype × environment interaction were significant, suggesting that the genotypes responded differently in the studied environment conditions. So, there was the possibility of stability analysis. The Nafis cultivar and BAL-92-1 line with seed yields 4086 and 3829 kg.h⁻¹, respectively, were better than overall mean and had lower ranks and rank variance than others. According to the results of stability analysis using Eberhart and Russel method, the BAL-92-1 line with higher seed yield than overall mean and regression coefficient equal one ($b_i=1$) was identified as the genotype with high general stability for all regions. Based on the simultaneous selection method for yield and stability (YSi), the lines of HW-92-1, BAL-92-1, HW-92-1 and Nafis cultivar with the lowest values were stable, whereas lines BAL-92-4, HW-92-2, HW-92-3 and Ahmadi cultivar with highest values were unstable. Also, based on the SIIG index, the lines of HW-92-1, BAL-92-1, BAL-92-6, BAL-92-11 and Nafis cultivar with having high SIIG value as well as higher seed yield that total average were recognized as superior genotypes from the point of stability and seed yield. Finally, BAL-92-1 line with high yield and broad adaptability was selected as superior line for supplementary studies to introduce the new commercial cultivar in cold and mild cold regions of Iran.

Keywords: Broad adaptability, Eberhart and Russel method, SIIG index, Winter rapeseed

* Corresponding Author, E-mail: ba.alizadeh@areeo.ac.ir