

آماده انتشار

پایداری عملکرد لاین‌های امیدبخش نخود (*Cicer arietinum* L.) تحت شرایط دیم

رضا نیک سرشت^۱، سید سعید موسوی^{۲*}، همایون کانونی^۳، محمد سیاری^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، رایانامه: reza.nikseresht@gmail.com

^{۲*} نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، رایانامه: s.moosavi@basu.ac.ir

^۳ دانشیار، بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران، رایانامه: hkanouni@gmail.com

^۴ استاد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، رایانامه: m.sayyari@basu.ac.ir

چکیده

سابقه و هدف: نخود به دلیل داشتن دانه‌های غنی از پروتئین و کربوهیدرات، قابلیت کشت در شرایط نامطلوب محیطی و مزایای اقتصادی زیاد، یکی از منابع غذایی مهم و با ارزش در جهان است. نخود، به‌عنوان دومین حبوبات مهم از نظر سطح زیر کشت، اغلب به‌صورت دیم کشت می‌شود که تحت این شرایط کاشت، کمبود آب مهم‌ترین عامل افت عملکرد این گیاه مهم زراعی است. به‌طور معمول یکی از گام‌های اصلی معرفی رقم، تولید و مقایسه پایداری عملکرد لاین‌های امیدبخش در شرایط مختلف محیطی است. بر این اساس، تحقیق حاضر با استفاده از شاخص‌های مختلف ارزیابی پایداری، جهت شناسایی لاین‌های پایدار با عملکرد مطلوب، انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق، پایداری عملکرد دانه ۱۸ لاین امیدبخش نخود در طی چهار سال و چهار تکرار در هر سال، با استفاده از شاخص‌های مختلف پایداری شامل واریانس درون ژنوتیپی، ضریب تغییرات درون ژنوتیپی، اکووالانس ریک، واریانس پایداری شوکلا، ضریب رگرسیون فینلی و ویلکینسون، روش مثلثی فینلی و ویلکینسون و مدل رگرسیونی ابرهات و راسل ارزیابی شد.

یافته‌ها: طبق نتایج تجزیه واریانس مرکب، برهمکنش ژنوتیپ × سال معنی‌دار شد ($p \leq 0.01$) که این امر بیانگر لزوم تجزیه پایداری عملکرد لاین‌ها بود. با توجه به همبستگی مثبت و معنی‌دار ($r=0.961$)، بین شاخص‌های ضریب رگرسیون فینلی و ویلکینسون و ضریب رگرسیون ابرهات و راسل، این شاخص‌ها به‌عنوان معیار مناسب جهت تفکیک لاین‌های مطلوب و پایدار انتخاب شدند. لاین‌های شماره ۱۸، ۱۷ و ۶ دارای بیش‌ترین و لاین‌های شماره ۱۴، ۱۳ و ۱ به‌ترتیب دارای کم‌ترین میانگین عملکرد دانه بودند. لاین‌های شماره ۱۸ و ۱۷ به‌ترتیب با میانگین عملکرد دانه ۶۶۰ و ۶۵۳ کیلوگرم در هکتار، با عملکرد بالاتر از میانگین عملکرد همه ژنوتیپ‌ها (۵۷۲ کیلوگرم در هکتار)، بیش‌ترین شاخص ژنوتیپی، بیش‌ترین شاخص فنوتیپی مثبت و کم‌ترین ضریب رگرسیون فینلی و ویلکینسون را نشان دادند. میانگین مربعات انحراف از رگرسیون برای لاین‌های ۱۸ و ۱۷ از نظر آماری معنی‌دار نبود. بر این اساس و با توجه به عملکرد، این دو لاین به‌عنوان مطلوب‌ترین و پایدارترین لاین‌ها شناسایی شدند. لاین شماره ۵ نیز با عملکرد دانه کم‌تر از میانگین عملکرد همه ژنوتیپ‌ها، بیش‌ترین ضریب رگرسیون فینلی و ویلکینسون، بیش‌ترین ضریب رگرسیونی ابرهات و راسل را نشان داد. این لاین با ویژگی‌های فوق و با توجه به میانگین مربعات انحراف از رگرسیون به‌عنوان نامطلوب‌ترین لاین از نظر پایداری عملکرد دانه شناسایی شد.

نتیجه‌گیری: با توجه به عملکرد بالا و پایدار در لاین‌های شماره ۱۸ (FLIP09-251C) و ۱۷ (FLIP11-203C)، این دو لاین قابلیت لازم برای استفاده در برنامه‌های به‌نژادی را دارند و شاید بتوان، آن‌ها را به‌عنوان رقم جدید برای شرایط دیم معرفی نمود.

کلمات کلیدی: واریانس درون ژنوتیپی، اکووالانس ریک، واریانس پایداری شوکلا، رگرسیون فینلی و ویلکینسون، مدل ابرهات و راسل

نخود (*Cicer arietinum* L.) گیاهی دیپلوئید ($2n=2x=16$) با ژنومی به نسبت کوچک (۷۴۰ مگا جفت‌باز^۱) از خانواده بقولات^۲ است (۱). این گیاه زراعی با سطح زیرکشت بیش از ۱۴/۸۱ میلیون هکتار و تولید بیش از ۱۸/۰۹ میلیون تن در دنیا، رتبه دوم سطح زیر کشت حبوبات را به خود اختصاص داده است و پیش‌بینی می‌شود که نیاز جهان به آن تا سال ۲۰۵۰ به بیش از این مقدار برسد (۲). این محصول مهم زراعی به‌واسطه‌ی داشتن میزان قابل توجهی از مواد معدنی از جمله کلسیم، فسفر، آهن، منیزیم، پتاسیم، اسیدهای آمینه و ویتامین‌ها، به‌عنوان یک منبع غذایی مهم در تغذیه خانواده‌ها، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، در نظر گرفته می‌شود. دانه‌های نخود دارای ۵۹ درصد کربوهیدرات، ۲۹ درصد پروتئین، ۵ درصد روغن، ۴ درصد خاکستر و ۳ درصد فیبر است (۳). این گیاه مهم زراعی با ترکیبات فوق‌الذکر، یکی از بهترین منابع رفع کمبود پروتئین و کالری در کشورهای در حال توسعه می‌باشد و به‌عنوان مکمل پروتئین غلات در رژیم غذایی جایگزین شده است. هنگامی که ژنوتیپ‌های حساس نخود در معرض تنش خشکی قرار می‌گیرند، کیفیت تغذیه‌ای آن‌ها نیز تحت تأثیر قرار گرفته و منجر به کاهش مواد مغذی آن می‌گردد. گیاه نخود با دامنه بالایی از تحمل به تنش خشکی، یکی از مهم‌ترین حبوبات مناطق خشک و نیمه خشک جهان است که بخش عمده‌ای از سطح زیر کشت آن در جهان و ایران تحت شرایط دیم کشت می‌شود. ایران یکی از مهم‌ترین مراکز تنوع نخود در جنوب غربی آسیا است (۴). مهم‌ترین تهدید اصلی بهره‌وری و تولید محصول در این مناطق، تنش خشکی و مساله کمبود آب است که گاهی اوقات عملکرد آن را تا ۵۰ درصد، کاهش می‌دهد (۵). چون عملکرد دانه، صفتی کمی با وراثت پذیری پایین، دارای کنترل پیچیده چند ژنی، اپیستازی و برهمکنش مکان‌های صفات ژنی^۳ است، لذا به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی قرار می‌گیرد (۵ و ۶). بنابراین پایداری عملکرد ارقام در شرایط مختلف محیطی، به‌عنوان یکی از جنبه‌های بسیار مهم در به‌نژادی گیاهی نخود، همواره مورد توجه به‌نژادگران گیاهی بوده است. علیرغم شناسایی مکانیسم‌های تحمل به خشکی در تعداد زیادی از محصولات زراعی، در برنامه‌های به‌نژادی، برای معرفی ژنوتیپ‌های برتر، عملکرد به‌تنهایی معیار مناسبی برای انتخاب نیست، بلکه پایداری ارقام که تحت تأثیر برهمکنش بین ژنوتیپ با محیط می‌باشد نیز، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۴ و ۷). پاسخ‌های متفاوت ژنوتیپ‌ها از یک محیط به محیط دیگر به‌عنوان برهمکنش ژنوتیپ با محیط شناخته می‌شوند (۸). در نتیجه برهمکنش ژنوتیپ با محیط، واریته‌های یک محصول ممکن

1 Megabase pair (Mbp)

2 Fabaceae

3 QTLs

است عملکرد یکنواختی را در محیط‌های مختلف نشان ندهند (۹ و ۶). مطالعه برهمکنش و پاسخ ژنوتیپ‌ها در شرایط مختلف، ممکن است پتانسیل بهره‌وری و عملکرد آنها را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. برهمکنش بین ژنوتیپ با محیط منجر به بروز تفاوت‌های قابل ملاحظه ژنوتیپ‌ها در محیط‌ها و سال‌های مختلف شده و باعث پیچیدگی ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد آنها می‌گردد (۱۰). همچنین، پیشرفت‌گزینه می‌تواند تحت تأثیر برهمکنش ژنوتیپ با محیط قرار بگیرد و در نتیجه پاسخ به‌گزینه به شدت کاهش یابد. بنابراین، یکی از روش‌های کاهش برهمکنش ژنوتیپ \times محیط، انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار با استفاده از تجزیه پارامترهای پایداری است. پارامترهای مختلف پایداری به محققان این امکان را می‌دهد تا ژنوتیپ‌های پایدار و سازگار را شناسایی و به کشاورزانی که با شرایط متفاوت و غیرقابل پیش‌بینی روبرو هستند، توصیه کنند (۱۱).

در تعریف ارائه شده توسط بکر و لئون^۱ (۱۹۸۸) ژنوتیپ پایدار، ژنوتیپی است که فارغ از تغییر در شرایط محیطی، عملکرد ثابت و پایداری داشته باشد (۱۲)، لین، بینز^۲ و همکاران (۱۹۸۶) پارامترهای پایداری را به سه گروه تقسیم کردند، به‌طوری که در گروه I، ژنوتیپی به‌عنوان ژنوتیپ پایدار تعریف می‌شود که واریانس آن در طیف وسیعی از شرایط کم باشد. پارامترهای واریانس درون ژنوتیپی (محیطی)^۳ (S^2_e) و ضریب تغییرات درون ژنوتیپی^۴ (CV_i) در این گروه قرار دارند. از طرفی دیگر، در گروه II ژنوتیپی به‌عنوان ژنوتیپ پایدار تعریف می‌شود که پاسخ آن به شرایط محیطی متفاوت، شبیه به میانگین پاسخ همه ژنوتیپ‌ها در آن محیط‌ها باشد. این نوع پایداری در درجه اول بر اساس تفسیر ضریب رگرسیون، در رگرسیون خطی می‌باشد.

اکووالانس ریک^۵ (W^2_i)، واریانس پایداری شوکلا^۶ (σ^2_{ihs}) و ضریب رگرسیون فینلی و ویلکینسون^۷ (b_i) به‌عنوان پارامترهای پایداری این گروه شناخته شده‌اند. در حالی که در گروه III ژنوتیپی به‌عنوان پایدار تعریف می‌شود که میانگین مربعات باقیمانده از مدل رگرسیون بر روی شاخص محیطی کوچک باشد و این مفهوم برای اولین بار توسط ابرهارت و راسل^۸ در سال ۱۹۶۶ معرفی شد، انحراف از رگرسیون^۹ (S^2_{di}) از پارامترهای پایداری این گروه است (۱۳ و ۱۴). استفاده از ژنوتیپ‌های پایدار و سازگار، منجر به تولید محصول در مکان‌ها و سال‌های مختلف می‌گردد و همچنین استفاده از ژنوتیپ-

1 Becker and Leon

2 Lin and Binns

3 Environment variance

4 Within genotypic coefficient of variance

5 Wricke's ecovalence

6 Shukla's stability variance

7 Finlay, K. and G. Wilkinson

8 Eberhart and Russell

9 Deviation from regression

های پایدار در طرح‌های به‌نژادی و دورگ‌گیری منجر به توسعه ارقام پایدار از نظر فنوتیپی و با حداکثر عملکرد می‌گردد (۶). فصاحت و همکاران (۲۰۱۵) اظهار داشتند که مزیت انتخاب ژنوتیپ‌های برتر با استفاده از پارامترهای پایداری به جای میانگین عملکرد، این است که ژنوتیپ‌های پایدار در محیط‌های مختلف سازگاری بهتری نشان می‌دهند که این امر منجر به کاهش برهمکنش ژنوتیپ با محیط می‌شود. در ضمن تجزیه پایداری بر اساس روش‌های مختلف، حتی زمانی که هیچ برهمکنشی وجود نداشته باشد، می‌تواند منجر به شناسایی بهتر ژنوتیپ‌های پایدار شود. این نتیجه‌گیری بر اهمیت استفاده از تجزیه پایداری در برنامه‌های به‌نژادی تأکید دارد، چرا که ژنوتیپ‌های پایداری که در شرایط مختلف محیطی عملکرد مطلوبی دارند، می‌توانند به طور مؤثری برای بهبود تولید و کاهش ریسک‌ها، انتخاب شوند (۱۵). کانونی و همکاران (۲۰۲۱) با مطالعه پایداری عملکرد ۱۸ لاین امیدبخش نخود تیپ دسی، دو لاین امیدبخش را به‌عنوان لاین‌های پایدار و متناسب برای جایگزینی رقم پیروز معرفی کردند (۱۶). بخشایشی (۲۰۱۲) در بررسی پایداری ۸ رقم گندم، احمدی و همکاران (۲۰۱۳) در تجزیه پایداری ۱۹ لاین کلزا و امیری و همکاران (۲۰۲۳) در ارزیابی پایداری لاین‌های نخود، از شاخص‌های مختلف پایداری، از جمله ضریب رگرسیون فیلی و ویلکینسون و ضریب رگرسیون ابره‌ارت و راسل استفاده کردند (۱۰، ۱۷ و ۷). محمدی و همکاران (۲۰۱۱)، ارزیابی پایداری ۱۸ ژنوتیپ گندم دوروم را در سال اول تا سوم در ایستگاه تحقیقات دیم کرمانشاه و سال چهارم و پنجم را در ایستگاه دیم ایلام و ایستگاه دیم مراغه انجام دادند (۱۸). امیری و همکاران (۲۰۲۳) آزمایش ارزیابی و پایداری عملکرد نخود را در سال اول در دو مکان و در سال دوم و سوم در یک مکان انجام دادند (۷). کریمی‌زاده و همکاران (۲۰۲۲)، بررسی ارزیابی پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های نخود را به مدت سه سال در گنبد، یک سال در خرم‌آباد و دو سال در گچساران و ایلام انجام دادند (۸).

نظر به اینکه هر ساله لاین‌های جدید نخود در ایران و جهان معرفی می‌گردد، مقایسه آنها جهت معرفی لاین‌های برتر در شرایط مختلف ضروری است. تحقیق حاضر با هدف شناسایی مطلوب‌ترین لاین یا لاین‌های امیدبخش با عملکرد بالا و پایدار، در طی چهار سال متوالی از میان ۱۸ لاین امیدبخش و تحت شرایط دیم، با استفاده از شاخص‌های مختلف پایداری، انجام شد.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی، طرح آزمایشی و مراحل آماده‌سازی زمین

در این پژوهش، به منظور ارزیابی پایداری عملکرد و شناسایی لاین‌های برتر، تعداد ۱۸ لاین امیدبخش نخود، طی چهار سال متوالی با استفاده از شاخص‌های مختلف پایداری مورد بررسی قرار گرفتند. کاشت بذور سه سال اول در ایستگاه

تحقیقاتی سارال دیواندره و سال چهارم در ایستگاه تحقیقاتی دزج قروه، (جدول ۲) تحت شرایط دیم انجام شد. آزمایش در هر چهار سال، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا گردید. متفاوت بودن محل اجرای پژوهش در طی سال‌های مختلف، روشی متداول است که در تحقیقات محققین قبلی (۷، ۸ و ۱۸) نیز این وضعیت گزارش شده است. قبل از کاشت، عملیات آماده سازی زمین شامل شخم عمیق پاییزه و تسطیح با روتیواتور انجام شد. میزان کود شیمیایی مورد نیاز، بر اساس آزمایش خاک در سنوات مختلف تعیین و مصرف گردید. عملیات کاشت به صورت دستی صورت گرفت. کرت‌ها به طول ۴ متر، شامل ۴ خط کشت با فاصله بین خطوط ۳۰ سانتی‌متر و فاصله بوته روی هر خط ۱۰ سانتی‌متر بود. پس از برداشت هر کرت به مساحت ۴/۸ متر مربع، کوبیدن و جدا کردن دانه‌ها از غلاف، عملکرد دانه به‌عنوان مهم‌ترین صفت، در هر کرت بر حسب گرم یادداشت شد و به واحد تن در هکتار تبدیل گردید.

جدول ۱- مشخصات و شجره ۱۸ لاین نخود مطالعه شده

Table 1. Characteristics and pedigree of the 18 studied chickpea lines

مبداء Origin	شجره Pedigree	نام لاین Line name	شماره لاین Line No.
ICARDA	X04TH109/X03TH-177XFLIP96-154	FLIP10-352C	1
ICARDA	X04TH115/X03TH-183XFLIP99-34	FLIP10-353C	2
ICARDA	X04TH151/S01020XFLIP95-68	FLIP10-362C	3
ICARDA	X04TH175/FLIP95-51XFLIP97-165	FLIP10-370C	4
ICARDA	X04TH177/FLIP97-90XFLIP97-229	FLIP10-375C	5
ICARDA	X04TH182/FLIP98-137XFLIP97-229	FLIP10-379C	6
ICARDA	X04TH186/ICC 12004XFLIP97-116	FLIP10-381C	7
ICARDA	X04TH206/Leb.Market-1XUC 15	FLIP10-383C	8
ICARDA	X04TH60/X03TH-60XFLIP96-154	FLIP11-25C	9
ICARDA	X04TH112/X03TH-180XFLIP99-48	FLIP11-97C	10
ICARDA	X04TH129/FLIP98-233XFLIP99-48	FLIP11-119C	11
ICARDA	X04TH182/FLIP98-137XFLIP97-229	FLIP11-157C	12
ICARDA	X05TH8/X04TH-127XFLIP97-131	FLIP11-161C	13
ICARDA	X06TH2/X05TH83XFLIP02-84	FLIP11-179C	14
ICARDA	X06TH9/X05TH114XFLIP03-138	FLIP11-182C	15
ICARDA	X06TH113/FLIP03-138XFLIP03-80	FLIP11-187C	16
ICARDA	X06TH120/FLIP03-138XFLIP03-53	FLIP11-203C	17
ICARDA	S01135(30 KR)-13/CIDTN-2015	FLIP09-251C	18

جدول ۲- اطلاعات آب و هوایی و مختصات جغرافیایی محل‌های اجرای آزمایش

Table 2. Weather information and geographical coordinates of the experimental sites

طول و عرض جغرافیایی Longitude & Latitude	بارندگی (میلی‌متر) Rainfall (mm)	ارتفاع از سطح دریا (متر) Altitude (m)	ایستگاه و شهرهای محل اجرای آزمایش Location and cities of experiment	سال زراعی Cropping season
35° 39' N 47° 06' E	205.3	2045	سارال-دیواندره Saral-Divandarreh	1399-1400 2020-2021
35° 39' N 47° 06' E	185.2	2045	سارال-دیواندره Saral-Divandarreh	1400-1401 2021-2022
35° 39' N 47° 06' E	414.8	2045	سارال-دیواندره Saral-Divandarreh	1401-1402 2022-2023
35° 03' N 47° 57' E	297.3	1824	دزج-قروه	1402-1403

شاخص‌های ارزیابی پایداری لاین‌ها

در این تحقیق جهت ارزیابی پایداری لاین‌های پیشرفته از شاخص‌های پایداری بشرح ذیل استفاده شد:

۱- واریانس محیطی: این شاخص توسط رومر^۱ (۱۹۱۷) مطرح شد و مقدار کم‌تر آن بیانگر پایداری بیش‌تر است.

$$S_e^2 = \frac{\sum(Y_{ij} - \bar{Y}_{.i})^2}{q - 1}$$

۲- ضریب تغییرات درون ژنوتیپی فرانسیس و کاننبرگ^۲ (۱۹۷۸): مقدار کم‌تر آن بیانگر پایداری بیش‌تر است.

$$CV_i = \left(\frac{S_e}{\bar{Y}_{.i}} \right) \times 100$$

۳- اکووالانس ریک (۱۹۶۲): مقدار کم‌تر آن بیانگر پایداری بیش‌تر است (۱۹ و ۲۰).

$$W_i^2 = \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{.i} - \bar{Y}_{j.} + \bar{Y}_{..})^2$$

۴- واریانس پایداری شوکلا (۱۹۷۲): مقدار کم‌تر آن بیانگر پایداری بیش‌تر است (۲۱).

$$\sigma_{ihs}^2 = \left[\frac{P}{(q-1)(p-2)} \times W_i^2 \right] - \left[\frac{SS_{GE}}{(q-1)(p-1)(p-2)} \right]$$

$$SS_{GE} = \sum_i W_i^2 = \sum_i \sum_j (Y_{ij} - \bar{Y}_{.i} - \bar{Y}_{j.} + \bar{Y}_{..})^2$$

۵- ضریب رگرسیون فینلی و ویلکینسون: این ضریب، یکی از معیارهای کاربردی ارزیابی پایداری می‌باشد، فینلی و

ویلکینسون شاخص محیط‌زام را به صورت "میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ‌ها در محیط‌زام" ارائه دادند و ضریب رگرسیون را

$$b_i = \frac{\sum(Y_{ij} - \bar{Y}_{.i})(\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..})}{\sum(\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..})^2} \quad \text{به صورت زیر بیان نمودند (۲۲).}$$

1 Romer

2 Francis and Kannenberg

۶- مدل ابرهارت و راسل: دو محقق به نام‌های ابرهارت و راسل در سال ۱۹۶۶ سه معیار همزمان برای ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌ها شامل عملکرد بالا، ضریب خط رگرسیونی برابر ۱ و حداقل میزان انحراف از خط رگرسیون را ارائه دادند (۲۳) و (۲۴).

$$P_i = \bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..} \quad I_{j(er)} = \bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..} \quad B_i = \frac{\sum_{j=1}^q \bar{Y}_{ij} \times I_j}{\sum_{j=1}^q I_j^2}$$

$$S_{di}^2 = \frac{1}{q-2} \left[\sum_i (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{.j} + \bar{Y}_{..})^2 - (b_i - 1)^2 \sum_i (\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..})^2 \right]$$

براساس شاخص‌های فوق، مقدار بیش‌تر شاخص ژنوتیپی ($\bar{Y}_{i.}$) و شاخص فنوتیپی (P_i) و مقدار کم‌تر شاخص‌های واریانس محیطی (S_e^2)، ضریب تغییرات درون ژنوتیپی (CV_i)، اکووالانس ریک (W_i^2)، واریانس پایداری شوکلا (δ_{sh}^2)، ضریب رگرسیون و میانگین مربعات انحراف از رگرسیون ($MS(PDG)$)، به‌عنوان معیار پایداری بیش‌تر، برای ژنوتیپ‌ها لحاظ گردید. به منظور بررسی یکنواختی و متجانس بودن واریانس خطای آزمایش محیط‌های مختلف، قبل از انجام تجزیه واریانس مرکب داده‌ها، آزمون یکنواختی واریانس (آزمون بارتلت) انجام شد. سپس تجزیه آماری داده‌ها با نرم افزارهای SAS، SPSS و Minitab انجام شد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس مرکب داده‌ها

نتایج آزمون بارتلت نشان داد که واریانس خطای آزمایش‌های مختلف همگن می‌باشد ($\chi^2=3/684$ و $P\text{-value}=0/298$) و بنابراین تجزیه واریانس مرکب مجاز بود. نتایج (جدول ۳) نشان داد که اثر سال، اثر ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ \times سال، از نظر آماری معنی‌دار بود. معنی‌دار بودن اثر سال، بیانگر این است که شرایط محیطی سال‌های مختلف، از جمله میزان بارندگی (جدول ۲)، طول روز، کمینه و بیشینه دمای هوا، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا همراه با تغییرات نسبی بوده است و این تغییرات، عملکرد سالیانه ژنوتیپ‌ها را به‌طور متفاوتی تحت تأثیر قرار داده و منجر به تفاوت معنی‌دار بین میانگین عملکرد سال‌های مختلف شده است (۲۴). طبق نتایج (جدول ۳) اثر ژنوتیپ در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. معنی‌دار شدن اثر ژنوتیپ، بیانگر تنوع ژنتیکی و پتانسیل متفاوت لاین‌های مورد مطالعه از نظر عملکرد دانه تحت شرایط این آزمایش بوده است و می‌توان از تنوع موجود در این ژرم‌پلاسما، در برنامه‌های آتی به‌نژادی استفاده کرد (۸). نتایج نشان داد که برهمکنش ژنوتیپ \times سال در سطح ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۳) معنی‌دار

شدن برهمکنش ژنوتیپ با سال بیانگر واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها در سال‌های مختلف می‌باشد. آنچه که از نظر به‌نژادی اهمیت ویژه‌ای دارد و هدف تجزیه مرکب داده‌ها می‌باشد، بررسی معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ با محیط (سال یا مکان) است. معنی‌دار شدن برهمکنش ژنوتیپ × محیط، ارزش و اهمیت انتخاب فنوتیپی را کاهش می‌دهد و ممکن است باعث انتخاب ژنوتیپ‌هایی در یک محیط گردد که در سایر محیط‌ها عملکرد ضعیفی داشته باشند. بر این اساس، در صورت معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ با محیط، جهت انتخاب ژنوتیپ یا ژنوتیپ‌های مطلوب، انجام تجزیه پایداری داده‌ها لازم و ضروری است (۱۷ و ۱۳). طبق نتایج فوق، مبنی بر معنی‌دار شدن برهمکنش ژنوتیپ × سال، در ادامه تجزیه پایداری عملکرد دانه با استفاده از شاخص‌های پایداری پارامتری انجام شد. با توجه به این‌که شاخص‌های پایداری پارامتری به رعایت اصول تجزیه واریانس، وابستگی شدید دارند، در صورتی که این اصول محقق گردد، معیارهای پایداری فنوتیپی توانایی و کارایی مناسبی در ارزیابی و انتخاب ارقام پایدار را دارند، ولی چنانچه اصول فوق رعایت نشود، معیارهای ناپارامتری به‌عنوان راهکار جایگزین پیشنهاد می‌گردد (۲۵ و ۲۶).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس مرکب صفت عملکرد دانه برای ۱۸ لاین نخود در طی چهار سال

Table 3. Results of combined analysis of variance for grain yield of 18 chickpea lines during four years

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات
S.O.V	df	Mean Square
سال Year	3	4.210**
خطای اول First error	12	0.387
ژنوتیپ Genotype	17	0.055**
سال × ژنوتیپ Year × Genotype	51	0.027**
خطای دوم Second error	204	0.012

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۵٪ و ۱٪

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

شاخص‌های ژنوتیپی، واریانس درون ژنوتیپی (محیطی)، ضریب تغییرات درون ژنوتیپی، اکووالانس ریک و واریانس پایداری شوکلا

نتایج نشان داد که لاین‌های شماره ۱۸، ۱۷ و ۶ دارای بیش‌ترین و لاین‌های شماره ۱۴، ۱۳ و ۱ دارای کم‌ترین، میانگین عملکرد دانه (یا کم‌ترین شاخص ژنوتیپی) در طی چهار سال ارزیابی بودند (جدول ۴). نتایج عملکرد دانه لاین‌های ارزیابی شده در سال سوم (جدول ۴)، بیانگر افزایش در عملکرد لاین‌ها است که شاید یکی از دلایل این بهبود عملکرد، افزایش قابل توجه میزان بارندگی‌ها در سال سوم در مقایسه با دیگر سال‌های آزمایش است (جدول ۲). با توجه به کمی بودن صفت

عملکرد دانه، این صفت به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی، از جمله میزان رطوبت خاک، قرار می‌گیرد (۵ و ۶). لذا مهم‌ترین عامل کاهش عملکرد دانه نخود در شرایط دیم، بارندگی محدود و نامنظم است. بر این اساس، علاوه بر میانگین بالای عملکرد دانه، تغییر در پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها به کمک شاخص‌های مختلف، نیز مورد بررسی قرار گرفت (۴ و ۷).

طبق نتایج (جدول ۴)، به‌ترتیب ژنوتیپ‌های شماره ۱۶، ۱۸ و ۱۷ کم‌ترین و ژنوتیپ‌های شماره ۵، ۶ و ۳ بیش‌ترین واریانس درون ژنوتیپی را نشان دادند. بر اساس نتایج فوق، سه لاین اول بیش‌ترین پایداری و سه لاین دوم کم‌ترین پایداری عملکرد دانه را دارند. یکی از معایب شاخص واریانس درون ژنوتیپی (محیطی) این است که ممکن است لاین‌های با عملکرد کم که تغییرات محیطی کمی دارند را به‌عنوان رقم پایدار معرفی نماید، لذا بررسی شاخص‌های دیگر، به منظور حذف همبستگی احتمالی بین میانگین عملکرد و واریانس درون ژنوتیپی، پیشنهاد شده است (۱۷ و ۲۷).

طبق نتایج شاخص ضریب تغییرات درون ژنوتیپی (جدول ۴)، به‌ترتیب ژنوتیپ‌های شماره ۱۸، ۱۷ و ۱۶ کم‌ترین و ژنوتیپ‌های شماره ۵، ۲ و ۳ بیش‌ترین ضریب تغییرات درون ژنوتیپی را نشان دادند. نتایج این شاخص پایداری، تقریباً مشابه نتایج شاخص پایداری واریانس درون گروهی بود. چون این شاخص میزان تغییرات عملکرد هر ژنوتیپ را نسبت به میانگین آن ژنوتیپ محاسبه می‌کند، دارای برتری نسبی به شاخص واریانس درون ژنوتیپی است و لذا این شاخص می‌تواند معیاری مناسب جهت ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌ها باشد (۱۰).

بر اساس نتایج شاخص پایداری اکووالانس ریک (جدول ۴)، به‌ترتیب ژنوتیپ‌های شماره ۱۴، ۱ و ۱۲ به‌عنوان لاین‌های پایدار، کم‌ترین مقدار و ژنوتیپ شماره ۵، با در نظر گرفتن عملکرد دانه، مقدار بیش‌تری از شاخص اکووالانس را نشان دادند. برای واریانس پایداری شوکلا نیز (جدول ۴)، به‌ترتیب مجدداً ژنوتیپ‌های شماره ۱۴، ۱ و ۱۲ به‌عنوان لاین‌های پایدار، کم‌ترین مقدار و بر همین اساس ژنوتیپ شماره ۵، با در نظر گرفتن عملکرد دانه، مقدار بیش‌تری از این شاخص را نشان دادند. در محاسبه اکووالانس ریک براساس ماهیت فرمول آن، از عملکرد سایر ژنوتیپ‌ها نیز استفاده می‌شود، از این شاخص برای تعیین سهم سال‌ها در برهمکنش نیز استفاده می‌شود و میزان کم‌تر آن سهم کم‌تر را در برهمکنش نشان می‌دهد (۱۸).

نتایج حاصل از بررسی پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها با استفاده از دو شاخص اکووالانس ریک (W_i^2) و واریانس پایداری شوکلا (σ_{ihs}^2) تقریباً مشابه بود. این شباهت نتیجه برای دو شاخص فوق، در بررسی‌های بخشایشی (۲۰۱۲) در گندم، رضائی‌نیا و همکاران (۲۰۲۴) در کنجد و دیگر محققین نیز گزارش شده است. بر اساس تحقیقات گذشته (۱۰، ۲۸ و ۱۳)،

تشابه شاخص‌های یک گروه دور از انتظار نمی‌باشد و با توجه به اینکه لاین‌های پایدار معرفی شده توسط این دو شاخص، میانگین عملکرد قابل توجهی نداشتند، لذا بررسی شاخص‌های دیگر بر اساس نتایج تجزیه همبستگی شاخص‌های پایداری، صورت گرفت (جدول ۷). طبق نتایج کلی شاخص‌های فوق و با توجه به میانگین عملکرد دانه، لاین‌های ۱۸ و ۱۷ به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا و ژنوتیپ ۵، علیرغم عملکرد مطلوب آن، به‌عنوان لاین نامطلوب ناپایدار معرفی شد.

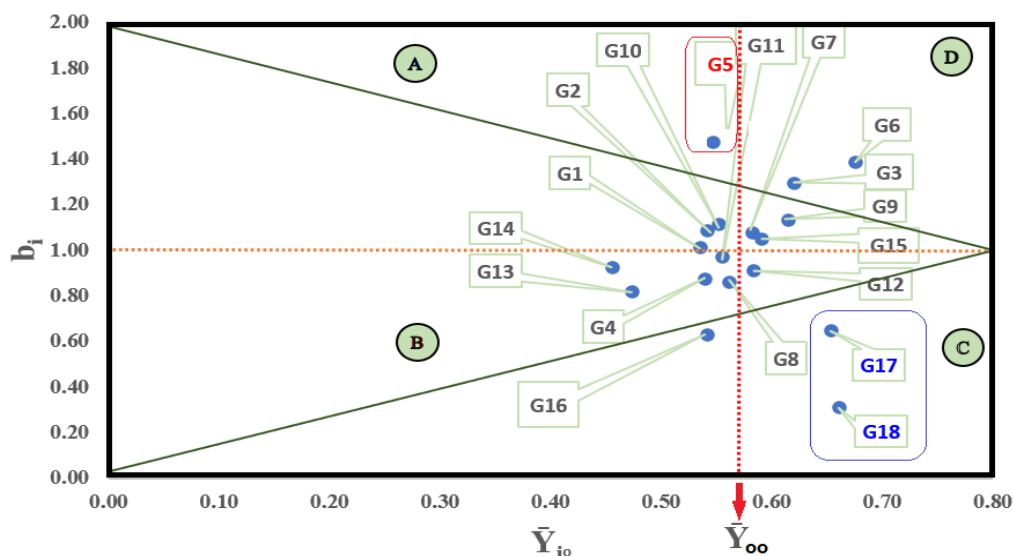
مدل رگرسیونی فینلی و ویلکینسون

طبق نتایج (جدول ۴)، به‌ترتیب ژنوتیپ‌های شماره ۱۸، ۱۶ و ۱۷ کم‌ترین و ژنوتیپ‌های شماره ۵، ۶ و ۳ بیش‌ترین ضریب رگرسیونی فینلی و ویلکینسون (b_i) را نشان دادند. ضریب رگرسیونی فینلی و ویلکینسون، مقدار تغییر در عملکرد هر ژنوتیپ در هر محیط، به‌عنوان متغیر وابسته (Y_{ij})، به‌ازاء یک واحد تغییر در شاخص محیطی هر محیط، به‌عنوان متغیر مستقل (\bar{Y}_j)، را نشان می‌دهد. وقتی مقدار ضریب رگرسیون (b_i) برای ژنوتیپی مثبت و بیش‌تر از ۱ است، یعنی با بهبود شرایط محیطی در سال‌های مطلوب از نظر بارندگی و سایر عوامل محیطی، آن ژنوتیپ پاسخ مثبت خوبی نشان داده و عملکرد خود را افزایش داده است هر چند که ممکن است آن ژنوتیپ پایداری عملکرد خوبی را در شرایط نامطلوب محیطی (سال‌های نامطلوب) نداشته باشد. طبق نتایج (جدول ۴)، لاین‌های شماره ۶، ۳ و ۵ این ویژگی را دارند، که در سال سوم که میزان بارش‌ها مطلوب و در حد ۴۱۴/۸ میلی‌متر بوده است، عملکرد خود را به‌حدود دو برابر افزایش داده‌اند. بنابراین این سه لاین برای شرایط با بارندگی حدود ۴۰۰ میلی‌متر در سال، قابلیت تولید عملکرد دانه تا مرز یک تن در هکتار را دارند.

طبق اظهارات فینلی و ویلکینسون (۱۹۶۳)، مقدار ضریب رگرسیونی برابر با صفر بیش‌ترین میزان پایداری یک ژنوتیپ را نشان می‌دهد ولی داشتن این ویژگی همواره به این مفهوم نیست که آن ژنوتیپ بهترین ژنوتیپ است، بلکه معیار انتخاب، مقدار ضریب رگرسیون متوسط به پایین (کم‌تر از ۱) و عملکرد بالا است. به‌طوری‌که آن‌ها اظهار داشتند که ضریب رگرسیونی برابر و کم‌تر از یک، به مفهوم پایداری متوسط و پایداری بالاتر از متوسط است در حالی‌که ضریب رگرسیونی بیش‌تر از یک، به مفهوم پایداری کم‌تر از متوسط می‌باشد (۲۲).

طبق پیشنهاد فینلی و ویلکینسون، بای‌پلات میانگین عملکرد یک ژنوتیپ در کلیه سال‌ها (\bar{Y}_i یا همان شاخص ژنوتیپی) در مقابل مقدار ضریب رگرسیون محاسبه شده برای هر ژنوتیپ (b_i)، ترسیم شد. بر اساس نتایج، ژنوتیپ‌های ناحیه A و B هر دو عملکرد کم‌تری دارند با این حال، ژنوتیپ‌های ناحیه B به دلیل ضریب رگرسیونی کم‌تر، پایدارتر هستند، در مقابل، ژنوتیپ‌های ناحیه C و D هر دو عملکرد بیش‌تری دارند، تفاوت میان دو گروه اخیر در این است ژنوتیپ‌های ناحیه C در هر

دو شرایط ضعیف و مطلوب، عملکرد بالایی دارند و از پایداری عملکرد بیش‌تری برخوردارند. اما ژنوتیپ‌های ناحیه D چون دارای تغییرات عملکردی بیش‌تری هستند، لذا بالا بودن عملکرد آنها بیش‌تر به دلیل بالا بودن عملکرد در شرایط و سال‌های مطلوب است. مطلوب‌ترین ژنوتیپ‌ها آنهایی هستند که در ناحیه C قرار می‌گیرند. طبق نتایج (شکل ۱)، لاین‌های شماره ۱۸ و ۱۷ به‌عنوان مطلوب‌ترین لاین، در ناحیه C بای‌پلات فیئلی-ویلکینسون قرار گرفتند که علاوه بر داشتن عملکرد بیش‌تر از میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ‌ها در همه سال‌ها (خط عمود مرکزی)، دارای کم‌ترین ضریب رگرسیون ($b \leq 1$) یا به عبارتی پایداری بیش‌تر از متوسط هم بودند. برعکس حالت فوق، نامطلوب‌ترین ناحیه بای‌پلات مربوطه، ناحیه A بود. به‌طوری‌که لاین شماره ۵، به‌عنوان نامطلوب‌ترین لاین، در این ناحیه قرار گرفت (شکل ۱). به‌طور معمول لاین‌های مستقر در ناحیه C به ندرت یافت می‌شود ولی اگر یافت شوند، مطلوب‌ترین ژنوتیپ‌ها هستند. در این تحقیق نیز ژنوتیپ‌های ۱۷ و ۱۸ در این ناحیه قرار گرفتند. ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۷، ۱۵، ۲، ۱۰، ۹، ۳، ۶ و ۵ دارای ضریب رگرسیون بزرگتر از ۱ بودند و از بین آنها فقط ژنوتیپ‌های شماره ۷، ۱۵، ۹، ۳ و ۶ میانگین عملکرد بالاتر از میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ‌ها در همه سال‌ها (۵۷۲ کیلوگرم در هکتار) را نشان دادند (جدول ۴) و به دلیل این‌که ضریب رگرسیون آنها بیش‌تر از ۱ است با بهبود شاخص محیطی، میزان عملکرد آنها به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. ژنوتیپ شماره ۱۶ با وجود داشتن ضریب رگرسیون کم‌تر از ۱ ولی با داشتن متوسط عملکرد کم‌تر، مطلوب نبود و در شکل ۱ نیز در ناحیه B قرار گرفته است. ژنوتیپ‌های شماره ۵ و ۶ دارای بیش‌ترین مقدار ضریب رگرسیونی مثبت بودند، که بیانگر بیش‌ترین ناپایداری در تغییرات عملکرد آنها است و این نشان می‌دهد که این ژنوتیپ‌ها، مطلوب سال‌های با شرایط مساعد محیطی هستند. بدین ترتیب بر اساس پارامترهای مدل فیئلی و ویلکینسون، ژنوتیپ‌های شماره ۱۷ و ۱۸ دارای بیش‌ترین میانگین عملکرد با کم‌ترین ضریب رگرسیون بوده و به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. ضمناً یافته‌های فوق با شکل شماره ۱، یعنی نمودار دو عامل شاخص ژنوتیپی و ضریب رگرسیون مدل فیئلی و ویلکینسون نیز همخوانی داشته و این دو ژنوتیپ در ناحیه C قرار گرفتند.



شکل ۱- نمودار بای پلات شاخص ژنوتیپی (\bar{Y}_i) در مقابل ضریب رگرسیون فینلی و ویلکینسون (b_i) برای ۱۸ لاین نخود در طی چهار سال
 Figure 1. Bi-plot diagram of genotypic index (\bar{Y}_i) versus Finley and Wilkinson regression coefficient (b_i) for 18 chickpea lines during four years

مدل رگرسیونی ابرهارت و راسل

طبق نتایج (جدول ۵)، به ترتیب ژنوتیپ‌های شماره ۱۶، ۱۷ و ۱۸ کم‌ترین و ژنوتیپ‌های شماره ۵، ۶ و ۳ بیش‌ترین ضریب رگرسیونی ابرهارت و راسل (B_i) را نشان دادند. از طرفی دیگر چون لاین‌های شماره ۱۸، ۱۷ و ۶ دارای بیش‌ترین و لاین‌های شماره ۱۴، ۱۳ و ۱ به ترتیب دارای کم‌ترین میانگین عملکرد دانه (شاخص ژنوتیپی) بودند، بنابراین بر اساس این روش می‌توان لاین‌های ۱۷ و ۱۸ را به عنوان مطلوب‌ترین لاین‌های پایدار با عملکرد بالا و حداقل انحراف از خط رگرسیون معرفی و شناسایی کرد.

مقادیر مثبت و منفی برای شاخص محیطی ($I_{j(er)}$) منعکس کننده شرایط مطلوب و نامطلوب محیطی است. طبق نتایج (جدول ۵)، شرایط محیطی (بارندگی) سال ۳ مطلوب، سال‌های ۲ و ۴ متوسط و سال ۱ نامطلوب می‌باشد. در طی سال‌های مساعد محیطی، ژنوتیپ‌های ۶، ۵، ۳ و ۹ بیش‌ترین عملکرد دانه و ژنوتیپ‌های ۱۶، ۱۳ و ۱۴ کم‌ترین عملکرد را نشان دادند (جدول ۵) که این بیانگر آن است که، چهار لاین ۶، ۵، ۳ و ۹، لاین‌های مناسب برای شرایط مطلوب محیطی هستند و در شرایط دیمی با حدود ۴۰۰ میلی‌متر بارندگی سالانه، این چهار لاین پاسخ مطلوبی را به شرایط محیطی مساعد می‌دهند. این در حالی بود که ژنوتیپ‌های ۱۸ و ۱۷ بیش‌ترین عملکرد و ژنوتیپ‌های ۱۴ و ۵ کم‌ترین عملکرد را در سال‌های نامطلوب نشان دادند. همچنین ژنوتیپ‌های ۱۷ و ۱۸ بیش‌ترین عملکرد و ژنوتیپ‌های ۱۴ و ۱۳ کم‌ترین عملکرد را در سال‌های متوسط از نظر محیطی داشتند.

بر اساس روش ابرهارت و راسل ژنوتیپ‌های پایدار و سازگار ژنوتیپ‌هایی هستند که شیب خط رگرسیون آنها برابر یک، میانگین مربعات انحراف از خط رگرسیون آنها کوچک و غیر معنی‌دار از صفر و میانگین عملکرد آنها، از میانگین کل ژنوتیپ‌های ارزیابی شده بیش‌تر باشد (۲۳ و ۲۴). همچنین مقادیر ضریب رگرسیون ابرهارت و راسل کم‌تر از یک بیانگر مقاومت بیش‌تر به تغییرات محیطی می‌باشد که در چنین شرایطی، پایداری به سال‌های نامساعد محیطی نیز محقق می‌گردد (۲۷ و ۲۸).

نتایج (جدول ۵) نشان داد که لاین‌های شماره ۱۴، ۱۰، ۸، ۶، ۱، ۱۲، ۱۵، ۱۳، ۴، ۱۸، ۳ و ۹ دارای میانگین مربعات انحراف از خط رگرسیون ($MS(PDG)$) کم‌تر از میانگین انحراف همه ژنوتیپ‌ها هستند که این مقدار میانگین مربعات انحراف از خط رگرسیون، با صفر اختلاف معنی‌دار نشان نداد. و از بین آنها، لاین‌های شماره ۱۸، ۱۳، ۸، ۴، ۱۲، ۱۴ و ۱۱ دارای ضریب رگرسیون ابرهارت و راسل (B_i) کم‌تر و مساوی یک ($B_i \leq 1$) بودند و این مقدار ضریب رگرسیون نیز با یک اختلاف معنی‌دار نشان نداد. با توجه به اینکه از میان لاین‌های فوق، شاخص فنوتیپی و شاخص ژنوتیپی، لاین شماره ۱۸ از بقیه و از میانگین کل آزمایش بیش‌تر می‌باشد، به‌عنوان پایدارترین لاین‌ها در نظر گرفته شد. بر همین اساس لاین‌های شماره ۱۶، ۷، ۵، ۱۱، ۲ و ۱۷ دارای میانگین مربعات انحراف از خط رگرسیون ($MS(PDG)$) بیش‌تر از میانگین انحراف همه ژنوتیپ‌ها هستند و از بین آنها، لاین شماره ۵ دارای بیش‌ترین ضریب رگرسیون ابرهارت و راسل (B_i) بوده و به‌عنوان ناپایدارترین شناسایی شد (جدول ۵). رضائی‌نیا و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از این روش، ژنوتیپ‌های پایدار را در بین ۱۰۴ ژرم‌پلاسم کنجد شناسایی کردند (۲۸). شریفی و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از عملکرد بیش‌تر از میانگین، ضریب رگرسیون نزدیک به یک و با در نظر گرفتن واریانس انحراف از خط رگرسیون، ژنوتیپ پایدار را در بین ده ژنوتیپ مختلف برنج شناسایی کردند (۲۹). ابوهگازی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۳ برای تعیین پایداری عملکرد ۲۴ ژنوتیپ عدس تحت طیف وسیعی از محیط‌های متغیر، از اکووالانس ریک و مدل رگرسیون ابرهارت و راسل برای ۶ محیط استفاده کردند (۳۰).

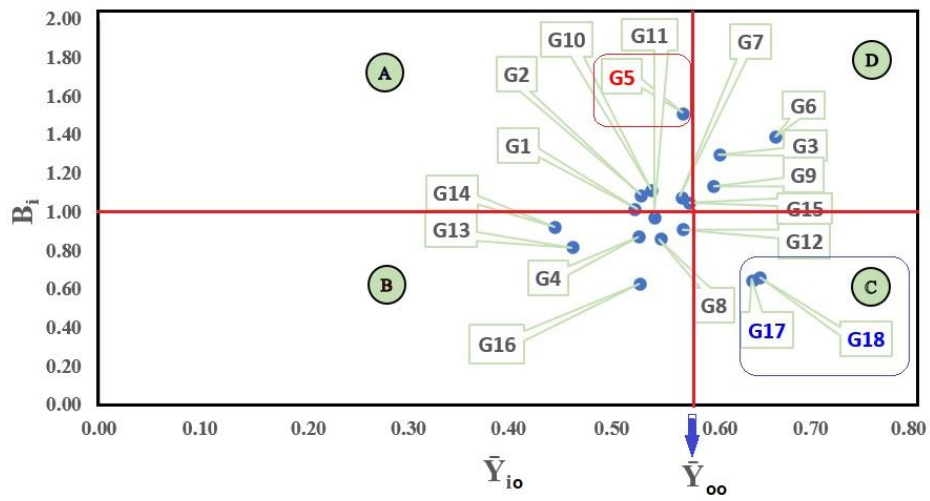
نتایج (جدول ۶) نشان داد که اثر محیط خطی معنی‌دار شد. معنی‌دار بودن محیط خطی به معنی وجود رابطه خطی بین عملکرد ژنوتیپ‌ها در هر محیط، با شاخص محیطی است و بیانگر این نکته می‌باشد که واریانس یا تغییرات عملکرد ژنوتیپ‌ها در بین محیط‌های مختلف، الگوی خطی دارد. از آنجایی که شاخص محیطی وابسته به میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ‌ها در هر محیط است، معنی‌دار بودن محیط خطی نشان می‌دهد که تغییرات شاخص محیطی ابرهارت و راسل ($I_j(er)$) متناسب با

1 Abo-Hegazy

تغییرات میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ‌ها در هر محیط است و بهبود شاخص محیطی (سال‌ها یا مکان‌های مطلوب)، افزایش عملکرد ژنوتیپ‌ها را در پی خواهد داشت (۳۱). در این پژوهش نیز شاخص محیطی سال سوم ($I_{j(er)}=0/356$) که متأثر از میزان بارندگی می‌باشد از بقیه سال‌ها بیش‌تر است و پس از آن شاخص محیطی سال‌های چهارم، دوم و اول به ترتیب قرار گرفته و عملکرد نیز متناسب با بهبود شاخص محیطی افزایش یافته است. همچنین معنی‌دار شدن ژنوتیپ \times محیط خطی نشان دهنده تفاوت در پایداری و شیب خط رگرسیون ژنوتیپ‌ها می‌باشد (۲۸). این در حالی است که معنی‌دار بودن واریانس برهمکنش ژنوتیپ \times محیط خطی نشان دهنده این است که تفاوت‌ها در تظاهر عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط مختلف وجود دارد ولی با واکنش‌های متفاوت، یعنی این که حساسیت خطی ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت است (جدول ۶).

میانگین مربعات انحراف از خط رگرسیون بیانگر سهم هر ژنوتیپ و سال است و معنی‌دار شدن میانگین مربعات انحراف از محیط و ژنوتیپ در محیط خطی نشان می‌دهد که تظاهر ژنوتیپ‌های مختلف به‌طور معنی‌داری از واکنش خطی سال‌ها نوسان دارد و بیانگر این نکته می‌باشد که عملکرد برخی ژنوتیپ‌ها کاملاً در اطراف خط رگرسیون قرار ندارند. به عبارتی واکنش یک ژنوتیپ در طول تغییرات خطی با محیط دارای نوسان‌های زیادی می‌باشد. علت آن، وجود واریانس انحراف برخی ژنوتیپ‌ها از خط رگرسیون است. بر این اساس در این پژوهش نیز لاین‌های شماره ۱۶، ۷، ۵، ۱۱، ۲ و ۱۷ دارای میانگین مربعات انحراف از خط رگرسیون ($MS(PDG)$) بیش‌تر از میانگین انحراف همه ژنوتیپ‌ها هستند که از دلایل آن می‌توان به وجود تنوع ژنتیکی در لاین‌های فوق و تفاوت در میزان بارندگی سال‌های اجرای پژوهش اشاره نمود. نظیر چنین واکنش‌هایی در مورد بسیاری از گیاهان زراعی نیز گزارش شده است (۳۱).

نتایج بای‌پلات بر اساس ضریب رگرسیونی ابره‌ارت و راسل (شکل ۲)، نیز نشان داد که دو لاین شماره ۱۸ و ۱۷ مطلوب‌ترین لاین‌های با عملکرد بالا و پایدار هستند که در ناحیه C بای‌پلات مستقر شدند، در حالی که لاین شماره ۵ به‌عنوان نامطلوب‌ترین لاین شناسایی و در ناحیه A قرار دارد.



شکل ۲- نمودار بای پلات شاخص ژنوتیپی (\bar{Y}_{i}) در مقابل ضریب رگرسیون ابرهارت و راسل (B_i) برای ۱۸ لاین نخود در طی چهار سال

Figure 2. Bi-plot diagram of genotypic index (\bar{Y}_{i}) versus Eberhart and Russell regression coefficient (B_i) for 18 chickpea lines during four years

جدول ۵- مقایسه مقادیر عملکرد دانه، شاخص‌های ژنوتیپی و فنوتیپی، اجزای مدل رگرسیون ابرهارت و راسل و رتبه‌بندی ۱۸ لاین نخود طی چهار سال

Table 5. Comparison of grain yield values, genotypic and phenotypic indices, components of the Eberhart and Russell regression model, and ranking of 18 chickpea lines during four years

رتبه ژنوتیپ برای ضریب رگرسیونی ابرهارت-راسل	ضریب رگرسیونی ابرهارت-راسل	رتبه ژنوتیپ برای میانگین مربعات انحراف کل	میانگین مربعات انحراف کل	مجموع مربعات مربعات انحراف کل	مجموع مربعات ژنوتیپ در محیط خطی	رتبه ژنوتیپ برای شاخص فنوتیپی	شاخص فنوتیپی	رتبه ژنوتیپ برای شاخص ژنوتیپی	شاخص ژنوتیپی (تن در هکتار)	عملکرد (تن در هکتار) در سال ۲	عملکرد (تن در هکتار) در سال ۳	عملکرد (تن در هکتار) در سال ۲	عملکرد (تن در هکتار) در سال ۱	شماره لاین
Ranks of B_i	B_i	Ranks of $MS_{(PDG)}$	$MS_{(PDG)}$	$SS_{(PDG)}$	$SS_{(LGE)}$	Ranks of P_i	P_i	Ranks of \bar{Y}_i	\bar{Y}_i (t ha ⁻¹)	Yield of Y_4 (t ha ⁻¹)	Yield of Y_3 (t ha ⁻¹)	Yield of Y_2 (t ha ⁻¹)	Yield of Y_1 (t ha ⁻¹)	Line No.
10	1.023	5	0.001	0.002	0.180	3	-0.037	3	0.536	0.409	0.905	0.435	0.394	G ₁
13	1.100	17	0.012	0.024	0.208	6	-0.030	6	0.542	0.560	0.929	0.332	0.346	G ₂
16	1.309	11	0.004	0.008	0.295	15	0.048	15	0.620	0.428	1.091	0.539	0.423	G ₃
6	0.881	9	0.002	0.004	0.134	4	-0.033	4	0.539	0.406	0.858	0.476	0.418	G ₄
17	1.373	15	0.010	0.021	0.325	10	-0.007	10	0.565	0.559	1.045	0.357	0.298	G ₅
18	1.402	4	0.001	0.002	0.339	18	0.104	18	0.676	0.571	1.176	0.502	0.454	G ₆
12	1.089	14	0.007	0.015	0.204	11	0.010	11	0.582	0.390	0.973	0.551	0.414	G ₇
5	0.871	3	0.001	0.002	0.131	9	-0.011	9	0.561	0.456	0.876	0.469	0.444	G ₈
15	1.146	12	0.004	0.009	0.226	14	0.042	14	0.614	0.474	1.017	0.581	0.385	G ₉
14	1.125	2	0.001	0.001	0.218	7	-0.020	7	0.552	0.424	0.956	0.443	0.385	G ₁₀
9	0.982	16	0.011	0.022	0.166	8	-0.017	8	0.555	0.574	0.902	0.355	0.388	G ₁₁
7	0.920	6	0.001	0.002	0.146	12	0.011	12	0.583	0.540	0.906	0.482	0.406	G ₁₂
4	0.825	8	0.002	0.004	0.117	2	-0.099	2	0.473	0.438	0.768	0.345	0.344	G ₁₃
8	0.933	1	0.001	0.001	0.150	1	-0.117	1	0.455	0.375	0.784	0.387	0.276	G ₁₄
11	1.060	7	0.001	0.003	0.194	13	0.018	13	0.590	0.456	0.968	0.524	0.412	G ₁₅
1	0.636	13	0.007	0.013	0.070	5	-0.031	5	0.541	0.536	0.753	0.530	0.346	G ₁₆
2	0.653	18	0.016	0.031	0.074	16	0.081	16	0.653	0.473	0.886	0.717	0.535	G ₁₇
3	0.671	10	0.004	0.008	0.078	17	0.088	17	0.660	0.611	0.907	0.525	0.599	G ₁₈
									0.572	0.482	0.928	0.475	0.404	\bar{Y}_j
										8.679	16.699	8.547	7.269	Y_j
										-0.091	0.356	-0.098	-0.169	$I_{j(er)}$

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس برای عملکرد دانه در مدل ابرهارت و راسل

Table 6. Results of analysis of variance for grain yield in Eberhart and Russell's model

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات
S.O.V	df	MS
سال Year	3	1.052**
ژنوتیپ Genotype	17	0.014**
سال×ژنوتیپ Y×G	51	0.007**
سال+(ژنوتیپ×سال) Year +(G×Y)	54	0.065**
محیط خطی Linear environment	1	3.156**
ژنوتیپ×محیط خطی G× Linear environment	17	0.010**
انحراف از محیط و ژنوتیپ در محیط خطی Deviation from environment and genotype in linear environment	36	0.005**
انحراف از رگرسیون خطی برای ژنوتیپ‌ها Deviation from linear regression for genotypes		
G1	2	0.001
G2	2	0.012
G3	2	0.004
G4	2	0.002
G5	2	0.010
G6	2	0.001
G7	2	0.007
G8	2	0.001
G9	2	0.004
G10	2	0.001
G11	2	0.011
G12	2	0.001
G13	2	0.002
G14	2	0.001
G15	2	0.001
G16	2	0.007
G17	2	0.016
G18	2	0.004

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۵٪ و ۱٪

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

همبستگی شاخص‌های مختلف پایداری

به منظور انتخاب شاخص‌های مناسب‌تر جهت تفکیک لاین‌های مطلوب پایدار، تجزیه همبستگی شاخص‌های مختلف پایداری صورت گرفت. طبق نتایج (جدول ۷)، همبستگی بین شاخص‌های پایداری ژنوتیپی و فنوتیپی، واریانس درون ژنوتیپی با ضریب تغییرات درون ژنوتیپی (گروه ۱) و همبستگی بین اکووالانس ریک با شاخص پایداری شوکلا (گروه ۲)، مثبت و معنی‌دار شد. با توجه به این‌که این شاخص‌ها در گروه‌های مشترک قرار دارند لذا این ارتباط دور از انتظار نمی‌باشد (۱۰ و ۱۳). همبستگی بین ضریب رگرسیون فینلی و ویلکینسون با واریانس درون ژنوتیپی و ضریب تغییرات درون ژنوتیپی

مثبت و معنی دار شد. طبق پیشنهاد شریفی و همکاران (۲۰۲۱)، شاخص‌هایی که همبستگی بالایی با یکدیگر دارند را می‌توان در بررسی‌های تکمیلی حذف و صرفاً نتایج یکی از آن‌ها را گزارش نمود (۲۹). همبستگی بین ضریب رگرسیون فیلی و ویلکینسون و ضریب رگرسیون ابرهات و راسل مثبت و معنی دار بود (جدول ۷). با توجه به این‌که این دو شاخص در دو گروه جداگانه قرار دارند، می‌توان از آنها برای بررسی تکمیلی وضعیت پایداری عملکرد لاین‌ها استفاده کرد. ضمناً همبستگی بین واریانس درون ژنوتیپی و ضریب رگرسیون ابرهات و راسل نیز مثبت و معنی دار بود که به دلیل حذف همبستگی بین میانگین عملکرد و واریانس درون ژنوتیپی، که ممکن است لاین‌های با عملکرد کم که تغییرات درون ژنوتیپی کمی دارند را به‌عنوان رقم پایدار معرفی نماید، در نظر گرفته نشد (۱۷).

جدول ۷- نتایج تجزیه همبستگی شاخص‌های مختلف پایداری

Table 7. Results of correlation analysis between stability parameters

B_i	$MS_{(PDG)}$	P_i	b_i	S^2_{sh}	$W^2_i\%$	W^2_i	CV_i	Se^2	Y_i	\bar{Y}_i			
									1	1**	Y_i	جمع ژنوتیپ در همه سال‌ها	
									1	0.276	0.278	Se^2	واریانس درون ژنوتیپی
							1	0.872**	-0.208	-0.205	CV_i	ضریب تغییرات درون ژنوتیپی	
						1	0.081	0.364	0.439	0.44	W^2_i	اکووالانس ریک	
					1	1**	0.078	0.361	0.439	0.44	$W^2_i\%$	درصد اکووالانس ریک	
				1	0.999**	0.999**	0.06	0.345	0.44	0.44	S^2_{sh}	واریانس شوکلا	
			1	0.089	0.107	0.111	0.921**	0.931**	0.06	0.062	b_i	ضریب رگرسیون فیلی و ویلکینسون	
		1	0.061	0.441	0.441	0.441	-0.207	0.277	1**	1**	P_i	شاخص فنوتیپی	
	1	0.222	-0.062	0.756**	0.759**	0.761**	-0.035	0.078	0.219	0.22	$MS_{(PDG)}$	میانگین مربعات انحراف از رگرسیون	
1	-0.086	0.198	0.961**	0.145	0.162	0.164	0.905**	0.979**	0.197	0.199	B_i	ضریب رگرسیون ابرهات و راسل	

* و **: به ترتیب معنی دار در سطوح احتمال ۵٪ و ۱٪

* and **: significant at the 5% and 1% probability levels,

گزینش همزمان برای پایداری به کمک صفات دیگر

اخیراً توجه محققان به پایداری میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها و گزینش همزمان برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر، معطوف شده است. در این راستا، بسیاری از محققان روش انتخاب همزمان را پیشنهاد کرده‌اند (۳۲، ۱۱، ۳۳ و ۱۷). در این روش ابتدا ژنوتیپ‌ها بر اساس عملکرد رتبه‌بندی و سپس به کمک یکی دیگر از صفات اقتصادی و شاخص‌های پایداری، ارزیابی می‌شوند (۱۰). گزینش لاین‌ها از لحاظ سایر صفات در کنار پایداری عملکرد دانه می‌تواند نتایج قابل اطمینان‌تری را ارائه نماید. در زراعت نخود، وزن صد دانه و ارتفاع بوته، بعد از عملکرد دانه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. از سوی دیگر در شرایط تنش خشکی، ارتفاع به شدت تحت تاثیر قرار گرفته و کاهش می‌یابد. لذا با توجه به نتایج (جدول ۸) ملاحظه می‌گردد که وزن صد دانه لاین شماره ۱۸ برابر متوسط وزن صد دانه لاین‌های آزمایش است و با دارا بودن بیش‌ترین ارتفاع بوته،

درکنار صفت عملکرد بالای دانه و پایداری آن، این لاین قابلیت مناسبی برای برداشت مکانیزه به منظور کاهش هزینه‌های تولید را نیز دارا می‌باشد. مفیدیان و همکاران (۲۰۰۹) به منظور تعیین پایداری عملکرد و بررسی برهمکنش ژنوتیپ با محیط، ۱۷ اکوتیپ یونجه را در ده ایستگاه تحقیقاتی مناطق سردسیر در دو سال زراعی ارزیابی و با استفاده از پارامترهای پایداری پارامتری، پایدارترین اکوتیپ را برای عملکرد علوفه خشک و علوفه تر شناسایی کردند (۳۴). احمدی و همکاران (۲۰۱۳) درصد روغن را در کنار پایداری و عملکرد بالا برای ۱۹ لاین کلزا ارزیابی کردند و ارقام و لاین‌های پایدار با عملکرد و میزان روغن بالا را معرفی کردند (۱۷).

جدول ۸- میانگین عملکرد دانه، وزن صد دانه و ارتفاع بوته برای ۱۸ لاین نخود در طی چهار سال

Table 8. Mean of grain yield, 100-grain weight and plant height for 18 chickpea lines during four years

شماره ژنوتیپ	میانگین عملکرد ۴ سال (تن در هکتار)	وزن صد دانه (گرم)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)
Genotype No.	Yield of \bar{Y}_i (t ha ⁻¹)	100 - grain weight (g)	Plant height (cm)
1	0.536	32.014	25.344
2	0.542	32.044	25.133
3	0.620	30.809	24.586
4	0.539	31.548	24.258
5	0.565	34.374	26.602
6	0.676	31.866	25.531
7	0.582	29.676	24.305
8	0.561	33.476	24.102
9	0.614	30.548	23.375
10	0.552	32.912	25.234
11	0.555	33.395	25.148
12	0.583	31.939	25.398
13	0.473	36.093	27.195
14	0.455	32.684	25.258
15	0.590	34.329	25.266
16	0.541	33.941	25.453
17	0.653	31.706	23.977
18	0.660	32.496	27.953
\bar{Y}_{ij}	0.572	32.547	25.229

نتیجه‌گیری

بر اساس میانگین عملکرد دانه و شاخص‌های پایداری گروه اول، یعنی واریانس درون ژنوتیپی و ضریب تغییرات درون ژنوتیپی، لاین‌های شماره ۱۸ و ۱۷ به‌عنوان پایدارترین و مطلوب‌ترین لاین‌ها شناسایی شدند. بر اساس شاخص‌های پایداری گروه دوم، یعنی واریانس پایداری شوکلا و اکووالانس ریک، لاین‌های شماره ۱۴، ۱ و ۱۲ به‌عنوان لاین‌های پایدار شناسایی شدند ولی عملکرد قابل توجهی نداشتند. بر اساس میانگین عملکرد دانه و شاخص‌های فیئلی و ویلکینسون و ابرهات و راسل، لاین‌های شماره ۱۸ و ۱۷ به‌عنوان پایدارترین و مطلوب‌ترین لاین‌ها معرفی شدند.

نتایج متفاوت ارزیابی در شاخص‌های مختلف توسط محققین دیگر (۳۰، ۱۷ و ۱۴) نیز گزارش شده است. نتایج حاصل از شاخص‌های بررسی شده در جدول ۹ خلاصه شده است بر اساس اغلب شاخص‌های مورد بررسی در این پژوهش شامل، شاخص‌های ژنوتیپی، فنوتیپی، واریانس درون ژنوتیپی، ضریب تغییرات درون ژنوتیپی و پارامترهای مدنظر شاخص‌های فینلی و ویلکینسون و ابرهارت و راسل، لاین‌های شماره ۱۸ و ۱۷ به‌عنوان پایدارترین و مطلوب‌ترین و لاین شماره ۵، به‌عنوان نامطلوب‌ترین لاین معرفی شدند. لذا طبق نتایج کلی، از دو لاین ۱۷ و ۱۸ می‌توان جهت برنامه‌های آتی به‌نژادی نخود استفاده و با ارزیابی‌های بیش‌تر و چند محیطه، شاید بتوان آن‌ها را به‌عنوان رقم جدید برای شرایط دیم معرفی کرد.

جدول ۹- اطلاعات بدست آمده از شاخص‌های پایداری مربوط به عملکرد دانه ۱۸ لاین نخود در طی چهار سال

Table 9. Information obtained from the values of stability parameters for grain yield of 18 chickpea lines during four years

لاین با بیش‌ترین مقدار Line with maximum value	لاین با کم‌ترین مقدار Line with minimum value	نوع شاخص پایداری Type of stability parameters
6,17,18	1,13,14	شاخص ژنوتیپی Genotypic index (\bar{Y}_i)
6,17,18	1,13,14	شاخص فنوتیپی Phenotypic index (P_i)
3,6,5	17,18,16	واریانس درون ژنوتیپی Environment variance (Se^2)
3,2,5	16,17,18	ضریب تغییرات درون ژنوتیپی Within genotypic coefficient of variance (CV_i)
5	12,1,14	اکووالانس ریک Wricke's ecovalence (W^2_i)
5	12,1,14	واریانس پایداری شوکلا Shukla's stability variance (S^2_{sh})
3,6,5	17,16,18	ضریب رگرسیون فینلی و ویلکینسون Finley and Wilkinson's regression coefficient (b_i)
5	17,18	پارامترهای مدل فینلی-ویلکینسون (شاخص ژنوتیپی و ضریب رگرسیون) Parameters of the Finley-Wilkinson model (\bar{Y}_i and b_i)
3,6,5	18,17,16	ضریب رگرسیون ابرهارت و راسل Eberhart and Russell's regression coefficient (B_i)
5	18	پارامترهای مدل ابرهارت-راسل (ضریب رگرسیون، میانگین مربعات انحراف از خط رگرسیون و شاخص فنوتیپی) Parameters of the Eberhart-Russell model (B_i , $MS_{(PDG)}$, P_i)

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از کسانی که در تهیه مواد گیاهی و همچنین از کارکنان ایستگاه تحقیقاتی سارال تشکر و قدردانی به عمل می‌

آید.

References

1. Saberi Mahmoodabaadi, S., Vessal, S. R., Bagheri, A. R., & Shafaroudi, S. M. (2020). Determination of genetic variation of drought tolerant chickpea genotypes using SSR and CAPS markers. *Crop Biotechnology*, 10(1), 1-13. (In Persian).
2. FAOSTAT, (2023). <https://www.fao.org/faostat>.

3. Tiwari, P.N., Tiwari, Sh., Sapre, S., Tripathi, N., Payasi, D. K., Singh, M., Thakur, S., Sharma, M., Tiwari, S., & Tripathi, M .K. (2023). Prioritization of physio-biochemical selection indices and yield-attributing traits toward the acquisition of drought tolerance in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Plants*, 12, 3175.
4. Ganjeali, A., Porsa, H., & Bagheri, A. (2011). Assessment of Iranian chickpea (*Cicer arietinum* L.) germplasms for drought tolerance. *Agricultural Water Management*, 98(9), 1477-1484.
5. Cattivelli, L., Rizza, F., R., Badeck, F.W., Mazzucotelli, E., Mastrangelo, A.M., Francia, E., Mare, C., Tondelli, A., & Stanca, A. M. (2008). Drought tolerance improvement in crop plants: an integrated view from breeding to genomics. *Field Crops Research*, 105, 1-14.
6. Naveed, M., Shafiq, M., Rafiq, Ch. M., Naeem, M. K., & Amin, M. (2016). Grain yield stability of newly evolved desi chickpea strains under rain-fed conditions. *The Journal of Animal & Plant Sciences*, 26(2), 481-486.
7. Amiri, S., Arminian, A., & Hosseinian Khoshrou, H. (2023). Evaluation of compatibility and stability of grain yield and evaluation of some agronomic characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes in rain-fed conditions. *Journal of Crop Breeding*, 15(45), 219-233. (In Persian).
8. Karimizadeh, R., Pezeshkpour, P., Mirzaee, A., Barzali, M., Keshavarzi, K., & Sharifi, P. (2022). Evaluation of seed yield stability of chickpea genotypes using GGE bi-plot method. *Journal of Crop Production and Processing*, 11 (4), 81-92. (In Persian).
9. Adugna, W., & Labuschagne, M. T. (2003). Parametric and nonparametric measures of phenotypic stability in linseed (*Linum usitatissimum* L.). *Euphytica*, 129, 211-218.
10. Bakhshayeshi Geshlagh, M. (2012). Study on grain yield stability of some bread wheat cultivars using different stability indices in cold climate of kurdestan. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 10(1), 170-178. (In Persian).
11. Mohammadi, R., & Mahmoodi, K .N. (2008). Stability analysis of grain yield in barley (*Hordeum vulgare* L.). *International Journal of Plant Breeding*, 2(2), 74-78.
12. Becker, H. C., & Leon, J. (1988). Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding*, 101, 1-23.
13. Lin, C. S., Binns, M. R., & Lefkovitch, L. P. (1986). Stability analysis: where do we stand? *Crop Science*, 26(5), 894-900.
14. Farshadfar, E., Mahtabi, E., & Jowkar, M. M. (2013). Assessment of parametric stability statistics for selecting stable chickpea genotypes. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(21), 2568-2575.
15. Fasahat, P., Rajabi, A., Mahmoudi, S.B., Abdollahian Noghab, M., & Mohseni Rad, J. (2015). An overview on the use of stability parameters in plant breeding. *Biom Biostat Int J*, 2(5), 1-11.
16. Kanouni, H., Sadeghzadeh Ahari, D., Saeid, A., Shobeiri, S. S., Mahdieh, M., Haji Hasani, M., Sotoudeh-Maram, K., & Beheshti Danalou, M. (2020). Investigation of grain yield stability of desi type chickpea across different environments and introducing promising lines. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(1), 295-312. (In Persian).
17. Ahmadi, J., Vaezi, B., & Naraki, H. (2013). Analysis of canola stability in rain-fed conditions and comparison of stable genotypes selection methods using stability indices. *The Plant Production*, 36(2), 13-22. (In Persian).
18. Mohammadi, R., Sadeghzadeh, D., Armion, M., & Ahmadi, M. M. (2011). Analysis of stability and adaptability of grain yield in durum wheat genotypes. *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi)*, 91, 70-78. (In Persian).
19. Wricke, G. (1962). Uber eine Methode zur Erfassung der okologischen Streubreite in Feldversuchen. *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung. Journal of Plant Breeding*, 47, 92-96.
20. Balcha, Alemayehu. (2020). Genotype by environment interaction for grain yield and association among stability parameters in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *American Journal of Plant Sciences*, 11, 1-10.
21. Shukla, G. K. (1972). Some statistical aspects of partitioning genotype environmental components of variability. *Heredity*, 29(2), 237-245.
22. Finlay, K. W., & Wilkinson, G. N. (1963). The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Crop and Pasture Science*, 14(6), 742-754.
23. Eberhart, S. A., & Russell, W. A. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, 6(1), 36-40.

24. Mohammadi, M., Sharifi, P., & Karimizadehet, R. (2015). Stability analysis of seed yield of safflower genotypes (*Carthamus tinctorius* L.). *Journal of Crop Breeding*, 7(16), 104-114. (In Persian).
25. Huehn, M. (1990). Non-parametric measures of phenotypic stability: Part 1: Theory. *Euphytica*, 47, 189-194.
26. Zali, H., Farshadfar, E., & Sabaghpour, S.H. (2011). Non-parametric analysis of phenotypic stability in chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes in Iran. *Crop Breeding Journal*, 1(1), 85-96.
27. Tarinejad, A. R. (2017). Investigating the compatibility of bread wheat genotypes using Eberhart-Russell, simultaneous selection, bi-plot and non-parametric ranking methods. *Cereal Research*, 6(4), 451-464. (In Persian).
28. Rezaei Nia, M., Mahdi Nezhad, N., Ebrahimi, F., Aien, A., Fakhri, B. A., & Emamjomeh, A. A. (2024). Investigation of compatibility of internal and external sesame germplasm. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions*, 6(2), 313-327. (In Persian).
29. Sharifi, P., Erfani, A. R., Mohaddesi, A., Abbasian, A., Aminpanah, H., Yousefi, M. M., & Saeedi, M. (2021). Stability analysis of grain yield of some of rice genotypes by parametric and nonparametric uni-variate methods. *Journal of Crop Breeding*, 13(3), 85-106. (In Persian).
30. Abo-Hegazy, S. R. E., Selim, T., & Ashrie, A. A. M. (2013). Genotype \times environment interaction and stability analysis for yield and its components in lentil. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 5(5), 85-90.
31. Jafari, M., Asghari Zakarya, R., Alizadeh, B., Sofalyan, O., & Zare, N. (2015). Study of seed yield stability in winter rapeseed (*Brassica napus*) genotypes using Eberhart and Russell's method. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 45(4), 585-592. (In Persian).
32. Kang, M. S., & Pham. H. N. (1991). Simultaneous selection for high yielding and stable crop genotypes. *Agronomy Journal*, 83(1), 161-165.
33. Mohammadi, M., Karimizadeh, R., Hosseinpour, T., Kalateharabi, M., Khanzadehe, H., Sabaghnia, N., Mohammadi, P., & Hasanpour Hosnih, M. (2012). Analysis of genotype, environment and genotype \times environment interaction in bread wheat in warm rain-fed areas of Iran. *Crop Breeding Journal*, 2(1), 63-70.
34. Mofidian, M. A., Movahedi, Z., & Dehghani, H. (2009). Yield stability analysis for superior alfalfa ecotypes from cold regions in Iran-using univariate methods. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 11(2), 162-173. (In Persian).

Yield stability of promising chickpea (*Cicer arietinum* L.) lines under rain-fed conditions

Reza Nikseresht¹, Sayyed Saeed Moosavi^{2*}, Homayoun Kanouni³, Mohammad Sayyari⁴

¹ Ph.D. Student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: reza.nikseresht@gmail.com

^{2*} Corresponding Author, Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: s.moosavi@basu.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Field and Horticultural Crops Research, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran. Email: hkanouni@gmail.com

⁴ Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: m.sayyari@basu.ac.ir

Abstract

Background and objectives: Chickpea is one of the most important and valuable food sources in the world due to its protein and carbohydrate-rich seeds, ability to be cultivated in adverse environmental conditions, and high economic benefits. Chickpea, as the second most important legume in terms of cultivated area, is often cultivated under rain-fed conditions, and under these planting conditions, water shortage is the most important factor in yield loss of this important crop. Usually, one of the main steps in introducing a variety is to produce and compare the performance stability of promising lines under different environmental conditions. Accordingly, the present research was conducted using various stability assessment indices to identify stable lines with desirable performance.

Materials and methods: In this study, the yield stability of 18 promising chickpea lines during four years with four repetitions in each year using various stability indices, including within genotype variance, within genotypic coefficient of variance, Wricke's ecovalence, Shukla's stability variance, Finley and Wilkinson's regression coefficient, Finley and Wilkinson triangular method, Eberhart and Russell's regression model were evaluated.

Results: According to the results of the combined analysis of variance, the genotype \times environment interaction was significant ($p \leq 0.01$). This indicated the necessity of analyzing yield stability in the lines. Due to the positive and significant correlation ($r=0.961$) between the Finley and Wilkinson regression coefficient and the Eberhart and Russell regression coefficient, these indices were selected as appropriate criteria for distinguishing desirable and stable lines. Lines No. 18, 17 and 6 recorded the highest average grain yield, whereas lines 14, 13 and 1 exhibited the lowest, respectively. Lines 18 and 17 with average grain yield of 660 and 653 kg ha⁻¹, respectively with higher yield than the overall yield of all genotypes (572 kg ha⁻¹), showed the highest genotypic index, the highest positive phenotypic index, and the lowest Finley and Wilkinson regression coefficient. The mean square deviation from the regression for lines 18 and 17 was not statistically significant. Accordingly, and with regard to grain yield, these two lines were identified as the most desirable and the most stable lines. Line No. 5 also with lower yield than the average yield of all genotypes, showed the highest Finley and Wilkinson regression coefficient and the highest Eberhart and Russell regression coefficient. This line with the above characteristics and considering the mean square deviation from the regression was identified as the least desirable line in terms of grain yield stability.

Conclusion: Given the high and stable yield of the lines 18 (FLIP09-251C) and 17 (FLIP11-203C), These two lines demonstrated the necessary capability for use in breeding programs and may be considered new varieties adapted to rain-fed conditions.

Keywords: Within genotype variance, Wricke's ecovalence, Shukla's stability variance, Finley and Wilkinson regression, Eberhart and Russell model