

Selection of kabuli chickpea genotypes using multiple trait-based selection indices (MGIDI and SIIG)

Payam Pezeshkpour^{*1}, Reza Amiri¹, Mahdi Geravandi²

1. Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Khorramabad, Iran

2. Dryland Agricultural Research Institute, AREEO, Kermanshah, Iran

*Corresponding Author Email: P.pezeshkpour@areeo.ac.ir

Abstract

Introduction: Chickpea (*Cicer arietinum* L.) a premier pulse crop that thrives on residual soil moisture, is a rich source of dietary proteins, vitamins, fiber, and minerals. In breeding programs aimed at identifying superior genotypes, careful selection of genotypes is of paramount importance. For traits such as seed yield, indirect selection based on traits that exhibit a strong correlation with yield has proven to be highly effective. Therefore, the primary objective of this study was to identify elite chickpea genotypes with desirable agronomic traits by employing combined selection indices, as well as to compare the performance of these indices with one another. The use of advanced selection indices, such as MGIDI and SIIG, enables more accurate assessment of genotypic performance and facilitates the selection of superior cultivars. To select the most efficient and superior genotypes across multiple traits, various indices were employed, including the Multi-Trait Genotype-Ideotype Distance Index (MGIDI). This innovative method does not require weighting coefficients, prevents issues related to multicollinearity, and provides a clear and independent selection criterion. The objective of this study was to identify promising chickpea genotypes using both the MGIDI and SIIG selection indices.

Materials and Methods: The objective of this study was to select promising chickpea genotypes using the MGIDI and SIIG selection indices. To achieve this goal, 13 selected genotypes along with three check cultivars (Kasra, Yadgar, and the local Biounij landrace) were evaluated at the Sarab Changayi Research Station over two cropping seasons (2023–2025). The experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications. The seeding rate was established at 50 seeds per square meter. Sowing was conducted using a Wintersteiger research drill across four rows, each four meters in length, with a row spacing of 30 cm, covering a total area of 4 m². Prior to harvest, the two outermost rows and 0.5 m from both the beginning and end of the two central rows were excluded. The remaining portion of each plot (0.125 m²) was harvested manually, and seed yield was determined as the primary performance trait. Outlier detection and normality of data distribution were assessed using the Shapiro–Wilk test. Statistical analyses were performed using SAS and R software.

Results: Analysis of variance revealed significant differences among genotypes for all evaluated traits. The highest seed yield was observed in genotypes G9, G5, G12, and G4, with mean yields of 1131, 1108, 1059, and 1048 kg ha⁻¹, respectively. Based on the two-year mean, highly significant positive correlations were observed between seed yield and traits including precipitation use efficiency ($r = 0.96^{**}$), number of seeds per square meter ($r = 0.97^{**}$), and seed yield formation rate ($r = 0.99^{**}$), highlighting the importance of these traits in improving genotype performance. Eleven traits were included in the MGIDI and SIIG models. According to the MGIDI selection index, genotypes G5, G3, and G4 exhibiting the lowest index values and higher seed yields than the check and overall mean were identified as desirable genotypes, while G9 ranked fourth. Evaluation based on the SIIG index also indicated that genotypes G9, G5, G12, and G4, with the highest SIIG values, were among the top-performing genotypes. In the cluster analysis, the genotypes were classified into three distinct groups. The first, second, and third groups contained 11, 4, and 1 genotypes, respectively. The results of the factor analysis led to the identification of four factors with eigenvalues greater than one (3.37, 2.90, 1.93, and 1.88, respectively). Collectively, these four factors accounted for 91.9% of the total variation among the studied traits.

Conclusion : Accordingly, genotypes G5, G9, and G4 are proposed as promising candidates for future cultivar release programs.

Keywords: Cluster analysis, Factor analysis, Heatmap Ideal genotype, Simultaneous selection

Received: 07-11-2025

Accepted: 20-03-2026

Citation: Pezeshkpour, P., Amiri, R., & Geravandi, M. (2026). Selection of kabuli chickpea genotypes using multiple trait-based selection indices (MGIDI and SIIG). *Plant Production and Genetics*, 7(1), 31-44. <https://doi.org/10.22034/plant.2026.144891.1180>

Copyrights:

Copyrights rights for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Plant Production and Genetics. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



تولید و ژنتیک گیاهی

<https://doi.org/10.22034/plant.2026.144891.1180>

گزینش ژنوتیپ‌های نخود کابلی با استفاده از شاخص‌های انتخاب مبتنی بر چندین صفت (SIIG و MGIDI)

پیام پزشکیپور^{۱*}، رضا امیری^۱، مهدی گراوندی^۲

۱. بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران
 ۲. مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران
 *ایمیل نویسنده مسئول: P.pezhshkpour@areeo.ac.ir

چکیده

مقدمه: نخود (*Cicer arietinum* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان بقولات، که توانایی رشد با تکیه بر رطوبت باقیمانده در خاک را دارد، منبعی غنی از پروتئین‌های غذایی، ویتامین‌ها، فیبر و عناصر معدنی به‌شمار می‌رود. برای صفاتی مانند عملکرد دانه، استفاده از انتخاب غیرمستقیم بر اساس صفاتی که همبستگی بالایی با عملکرد دارند، اثربخشی قابل توجهی نشان می‌دهند. از این رو، هدف اصلی این مطالعه، شناسایی ژنوتیپ‌های برتر نخود با صفات زراعی مطلوب از طریق به‌کارگیری شاخص‌های انتخاب ترکیبی و همچنین مقایسه عملکرد این شاخص‌ها با یکدیگر بود. شاخص‌های گزینش SIIG و MGIDI به ارزیابی بهتر ژنوتیپ‌های گیاهی و دستیابی به نتایج دقیق‌تر کمک می‌کند. برای انتخاب بهترین و کارآمدترین ژنوتیپ‌ها در چندین صفت، از شاخص‌های مختلف از جمله، شاخص فاصله ایدئوتیپ ژنوتیپ چند ویژگی (MGIDI) استفاده شد که روشی نوین است که نیاز به ضرایب وزنی ندارد و از مشکل هم‌خطی چندگانه جلوگیری می‌کند و معیار انتخابی واضح و مستقلی ارائه می‌دهد. هدف از این پژوهش گزینش ژنوتیپ‌های امیدبخش نخود با استفاده از شاخص‌های گزینش SIIG و MGIDI بود.

مواد و روش‌ها: ۱۳ ژنوتیپ انتخابی به همراه سه رقم شاهد (کسری، یادگار و توده محلی بیونج) در ایستگاه تحقیقات سراب چنگایی به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۲-۱۴۰۴) ارزیابی شدند. پژوهش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، اجرا گردید. میزان بذر مصرفی ۵۰ دانه در مترمربع تعیین شد. کاشت بذر با کارنده تحقیقاتی وینتراشتاگر در چهار خط به طول چهار متر و به فاصله ۳۰ سانتی‌متر بین خطوط (چهار مترمربع) انجام شد. قبل از برداشت، دو خط کناری و نیم متر از ابتدا و انتهای دو خط وسط حذف و مابقی هر کرت (۱/۸ مترمربع) به‌صورت دستی برداشت و صفت عملکرد دانه محاسبه شد. شناسایی داده‌های پرت و نرمال بودن توزیع داده‌ها توسط آزمون شاپیرو-ویلک انجام شد. تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزارهای SAS و R انجام شد.

نتایج: نتایج تجزیه واریانس حاکی از تغییرات معنی‌دار بین ژنوتیپ‌ها برای همه صفات مورد ارزیابی بود. بیشترین عملکرد دانه برای ژنوتیپ‌های G5، G9، G12 و G4 به‌ترتیب با میانگین ۱۱۳۱، ۱۱۰۸، ۱۰۵۹ و ۱۰۴۸ کیلوگرم در هکتار حاصل شد. بر اساس میانگین دو سال آزمایش، همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری بین عملکرد دانه با صفات بهره‌وری از بارش (**۰/۹۶)، تعداد دانه در مترمربع (**۰/۹۷) و سرعت تشکیل عملکرد دانه (**۰/۹۹) مشاهده شد که بیانگر اهمیت این صفات در بهبود عملکرد ژنوتیپ‌ها است. تعداد ۱۱ صفت در مدل‌های SIIG و MGIDI وارد شدند. بر اساس نتایج شاخص گزینش MGIDI، ژنوتیپ‌های G5، G3 و G4 با کمترین مقدار شاخص و عملکرد دانه بالاتر از ارقام شاهد و میانگین کل، به‌عنوان ژنوتیپ‌های مطلوب، انتخاب شدند و ژنوتیپ G9 در رتبه چهارم قرار گرفت. ارزیابی ژنوتیپ‌ها از نظر شاخص SIIG نیز نشان داد که ژنوتیپ‌های G5، G9، G12 و G4 با بیشترین مقدار شاخص SIIG جزو برترین ژنوتیپ‌ها بودند. در تجزیه خوشه‌ای، ژنوتیپ‌ها به سه گروه تقسیم شدند. در اولین، دومین و سومین گروه به‌ترتیب ۱۱، ۴ و ۱ ژنوتیپ قرار گرفت. نتایج مربوط به تجزیه عاملی منجر به شناسایی چهار عامل شد که مقادیر ویژه بیشتر از یک (به‌ترتیب ۳/۳۷، ۲/۹، ۱/۹۳ و ۱/۸۸) داشتند. این چهار عامل در مجموع ۹۱/۹ درصد از تغییرات بین صفات را توجیه نمودند.

نتیجه‌گیری: ژنوتیپ‌های G5، G9 و G4 به‌عنوان ژنوتیپ امیدبخش برای برنامه معرفی رقم پیشنهاد می‌شوند.

کلید واژگان: تجزیه خوشه‌ای، تحلیل عاملی، ژنوتیپ ایده‌آل، گزینش همزمان، نمودار گرمایی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶

منبع: پزشکیپور، پ.، امیری، ر. و گراوندی، م. (۱۴۰۵). گزینش ژنوتیپ‌های نخود کابلی با استفاده از شاخص‌های انتخاب مبتنی بر چندین صفت (SIIG و MGIDI)، مجله تولید و ژنتیک گیاهی، ۷ (۱)، ۴۴-۳۳. <https://doi.org/10.22034/plant.2026.144891.1180>



مقدمه

افزایش عملکرد نخود زراعی (*Cicer arietinum* L.) طی سال‌های اخیر، حاصل مجموعه‌ای از پیشرفت‌های هم‌زمان در پژوهش‌های اصلاح نباتات، مدیریت زراعی و به‌کارگیری فناوری‌های نوین کشاورزی است. در این راستا، برنامه‌های به‌نژادی با تمرکز بر شناسایی و توسعه ژنوتیپ‌هایی با برتری ژنتیکی از نظر صفات عملکردی، سازگاری محیطی و کیفیت تغذیه‌ای نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا کرده‌اند. این دستاوردها زمانی بیشترین تأثیر را داشته‌اند که با مدیریت صحیح مزرعه و استفاده از روش‌های بهبودیافته تولید همراه شده‌اند (Houasli *et al.*, 2021).

با این وجود، فرآیند اصلاح و بهبود گیاهان زراعی ماهیتی پیچیده، زمان‌بر و چندبعدی دارد و مستلزم ارزیابی دقیق ژنوتیپ‌ها بر پایه مجموعه‌ای از صفات کمی و کیفی است. تصمیم‌گیری در چنین فرآیندی معمولاً نیازمند تحلیل هم‌زمان چندین ویژگی مرتبط با عملکرد، پایداری و سازگاری گیاه است که این امر، انتخاب ژنوتیپ‌های برتر را با چالش‌های قابل توجهی مواجه می‌سازد (Debnath *et al.*, 2024). به‌طور کلی، اصلاح نباتات به‌عنوان یکی از ارکان اساسی تأمین امنیت غذایی، ارتقای کیفیت تغذیه‌ای محصولات و افزایش تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود. در این میان، انتخاب ژنوتیپ مناسب، مرحله‌ای کلیدی در برنامه‌های به‌نژادی به شمار می‌رود، زیرا هدف آن شناسایی ارقامی است که بتوانند ترکیبی مطلوب از عملکرد بالا و سایر صفات مورد نظر اصلاح‌گران را به‌طور هم‌زمان ارائه دهند. با این حال، ماهیت چندصفته‌ای این انتخاب، به‌دلیل وجود همبستگی میان صفات و لزوم ایجاد تعادل میان اهداف گاه متعارض اصلاح نباتات، فرآیند گزینش را به امری دشوار و تحلیلی تبدیل می‌کند. به‌طور کلی، شاخص‌های انتخاب خطی کلاسیک مانند شاخص اسمیت - هیزل برای رتبه‌بندی و شناسایی ژنوتیپ‌ها بر اساس چندین صفت استفاده می‌شود، اما این شاخص محدودیت‌هایی مانند ضرایب وزنی دلخواه و هم‌راستایی چندگانه را شامل می‌شود (Ceron-Rojas & Crossa, 2022). در نتیجه، لازم است تکنیک‌های جدید و متعددی توسعه یابند که بتوانند از داده‌های متغیرهای

سازگاری و کیفیت آن‌ها استفاده کنند. یکی از این روش‌ها، شاخص فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ چند صفتی^۱ (MGIDI) است که یک تکنیک قوی برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر بر اساس چندین صفت مختلف است (Olivoto & Nardino, 2020). این شاخص، یک شاخص انتخاب چندمتغیره است که اطلاعات مربوط به صفات مختلف را در یک ارزش جمع و ژنوتیپ‌ها را بر اساس فاصله آن‌ها از یک ژنوتیپ ایده‌آل رتبه‌بندی می‌کند (Olivoto & Nardino, 2021). یک ژنوتیپ فرضی با بهترین ارزش‌های ممکن برای هر صفت، به‌عنوان ژنوتیپ ایده‌آل نامیده می‌شود. به هر صفت، بسته به ارزش آن صفت یا نزدیکی آن به ژنوتیپ‌های برتری که کمترین فاصله را از ژنوتیپ ایده‌آل دارند، وزنی اختصاص داده می‌شود. در شاخص MGIDI، به‌منظور مدیریت همبستگی میان صفات و کاهش پیچیدگی داده‌ها، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی بهره گرفته می‌شود. این رویکرد با تبدیل متغیرهای همبسته به مجموعه‌ای از عوامل مستقل، امکان کاهش بُعد داده‌ها را فراهم می‌سازد. در نتیجه، صفات مختلف در قالب عامل‌هایی تجمیع می‌شوند که هر یک بیانگر جنبه‌ای متمایز از ساختار داده‌ها هستند. به‌کارگیری این عوامل، مبنایی کارآمد برای ارزیابی و تمایز ژنوتیپ‌ها بر اساس مجموعه‌ای از صفات فراهم کرده و اثر هم‌راستایی چندگانه را به حداقل می‌رساند. شاخص MGIDI به به‌نژادگران این امکان را می‌دهد که معیارهای انتخاب جامعی مانند وزن‌دهی به ژنوتیپ‌ها و نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌ها را بررسی نمایند (Olivoto & Nardino, 2020). این شاخص، چشم‌اندازهایی را در بهبود و اصلاح محصول در زمینه‌های مختلف از جمله سازوکارهای پاسخ به خشکی، ارزش غذایی و بهره‌وری، عملکرد بالا، زودرسی، و تحمل به تنش‌ها نشان داده است (Debnath *et al.*, 2024). شاخص MGIDI توسط برخی از محققان برای انتخاب ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و برای ارزیابی بیشتر بر اساس صفات مختلف در نخود استفاده شده است (Abderemane *et al.*, 2023; Bagheri *et al.*, 2024; Baidani *et al.*, 2025). مطالعه جامع، شاخص چندصفتی MGIDI به‌منظور شناسایی ژنوتیپ‌های برتر نخود سازگار با سامانه کشاورزی بدون شخم به کار گرفته شد. در این پژوهش، از میان ۲۲۲ ژنوتیپ نخود، تعداد ۹ ژنوتیپ امیدبخش بر اساس ارزیابی

¹ Multi-trait genotype- ideotype distance index

مستقیم سهم خواهند بود. از شاخص SIIG در گیاهان زراعی عدس (Pezeshkpour *et al.*, 2023)، کلزای زمستانه Esmaeili *et al.*, (Mehripour *et al.*, 2024) و کاملینا (2022) به منظور شناسایی ژنوتیپ‌های برتر از نظر عملکرد و سایر صفات زراعی استفاده شده است. هدف از انجام این تحقیق گزینش ژنوتیپ‌های امیدبخش نخود بر اساس عملکرد دانه و سایر صفات زراعی با استفاده از شاخص‌های گزینشی MGIDI و SIIG بود.

مواد و روش‌ها

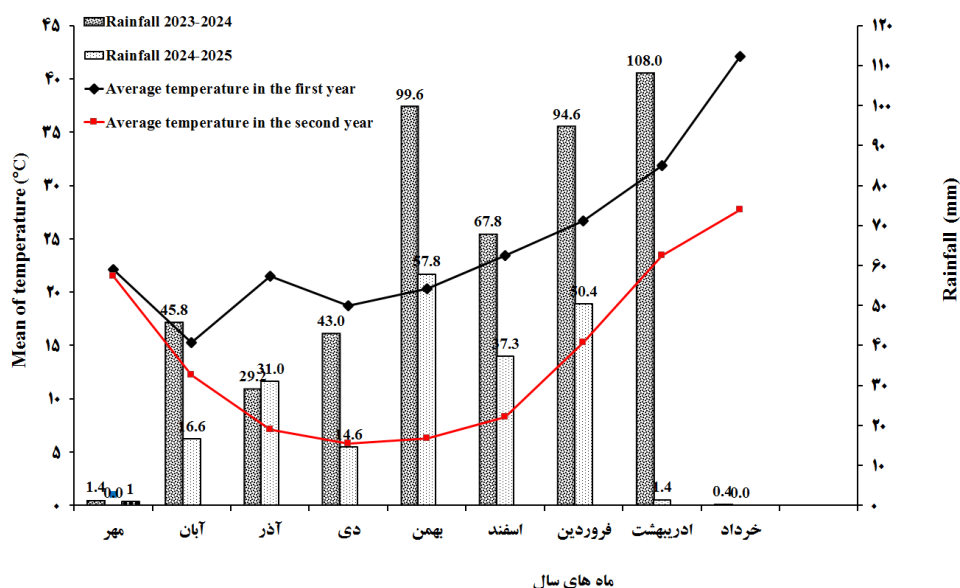
در این پژوهش، ۱۳ ژنوتیپ پیشرفته نخود کابلی (جدول ۱) همراه با سه رقم شاهد شامل کسری، یادگار و توده محلی بیونج در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار، در ایستگاه تحقیقات کشاورزی سراب چنگائی خرم‌آباد به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۲-۱۴۰۴) مورد ارزیابی قرار گرفتند. تاریخ کاشت بسته به وضعیت بارندگی مؤثر در هر سال، از نیمه دوم آذر ماه انجام شد. زمین مورد کشت تحت تناوب غلات - حبوبات دیم بود. برای تهیه زمین در هر مکان، از گاوآهن چپزل مرکب برای شخم زدن استفاده شد و سپس با دیسک زدن، کلوخ شکنی انجام شد. اطلاعات هواشناسی در شکل ۱ آورده شده است. در سال‌های زراعی اول و دوم اجرای آزمایش مجموع بارندگی در طول دوره رشد گیاه نخود، به ترتیب ۴۸۹/۸ و ۲۰۹/۱ میلی‌متر بود (شکل ۱). بر اساس نتایج آزمون خاک، ۷۵ تا ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفات آمونیوم و ۳۵ تا ۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره، به هنگام عملیات تهیه زمین، به‌طور یکنواخت با خاک مخلوط گردید. به‌منظور جلوگیری از بروز بیماری‌های قارچی، بذرها ارقام و ژنوتیپ‌های آزمایش قبل از کاشت با قارچ‌کش کاربوکسین تیرام به نسبت دو در هزار ضدعفونی شدند. میزان بذر مصرفی ۵۰ دانه در مترمربع تعیین شد. کاشت بذرها با کارنده تحقیقاتی وینتراشتاگر در چهار خط به طول چهار متر و به فاصله ۳۰ سانتی‌متر بین خطوط (چهار مترمربع) انجام شد. مبارزه با علف‌های هرز با استفاده از کولتیواتور دستی در دو مرحله در طول دوره رشد رویشی انجام شد. قبل از برداشت، دو خط کناری و نیم متر از ابتدا و انتهای دو خط وسط حذف و مابقی هر کرت (۱/۸ مترمربع) به‌صورت دستی برداشت و صفت عملکرد دانه محاسبه شد.

همزمان مجموعه‌ای از صفات مورفولوژیک، فنولوژیک و فیزیولوژیک انتخاب گردید (Abderemane *et al.*, 2023). تحلیل MGIDI با در بر گرفتن ۱۵ ویژگی کلیدی، امکان غربال‌گری دقیق و یکپارچه ژنوتیپ‌ها را فراهم ساخت. نتایج نشان داد که این شاخص با تلفیق مؤثر صفات متعدد، ابزار کارآمدی برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل و پربازده در شرایط کشاورزی حفاظتی بوده و دقت تصمیم‌گیری اصلاحی را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد. باقری و همکاران (Bagheri *et al.*, 2024) برای گزینش ژنوتیپ‌های برتر نخود دسی، تعداد ۴۱۶ ژنوتیپ همراه با دو رقم شاهد کاکا و پیروز را با استفاده از شاخص MGIDI ارزیابی نمودند. بر اساس نتایج شاخص MGIDI، تعداد ۶۲ ژنوتیپ به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌ها نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها و ارقام شاهد انتخاب شدند. در ارزیابی پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های بادام زمینی از شاخص‌های MGIDI و SIIG استفاده و بر مبنای این شاخص‌ها، دو ژنوتیپ به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌ها انتخاب شدند (Fadakar Navrood *et al.*, 2023). محققان برای گزینش اکوتیپ‌های جفجفک بر اساس صفات زراعی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری از دو شاخص انتخاب MGIDI و SIIG استفاده نمودند و برآورد این دو شاخص انتخاب نشان داد که اکوتیپ E6 با داشتن بیشترین مقدار SIIG و کمترین مقدار MGIDI در رژیم‌های مختلف رطوبتی، متحمل‌ترین بود (Solat Petloo *et al.*, 2022). برای انتخاب ارقام مطلوب با ویژگی‌های خاص استفاده از یک صفت به‌تنهایی ممکن است منجر به نتایج مطلوبی نباشد، بر همین اساس شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل^۱ (SIIG) معرفی شد (Zali *et al.*, 2015) از این شاخص می‌توان برای رتبه‌بندی و مقایسه بهتر لاین‌های مختلف و همچنین تعیین فواصل بین لاین‌ها، گروه‌بندی و در نهایت انتخاب بهترین لاین‌ها استفاده نمود. از ویژگی‌های روش SIIG این است که برای محاسبه آن می‌توان از شاخص‌های مختلف، صفات مورفولوژیک، صفات فیزیولوژیک و ... استفاده نمود و کارایی انتخاب را افزایش داد. یکی از مزایای استفاده از شاخص‌های انتخاب بر اساس چندین صفت مانند MGIDI و SIIG، در نظر گرفتن تمام صفات اندازه‌گیری شده و اثرهای آن در انتخاب ژنوتیپ‌ها است. به عبارت دیگر، در این روش‌ها صفات مختلف در انتخاب ژنوتیپ‌ها به‌طور

¹ Selection index of ideal genotype

جدول ۱- شجره ژنوتیپ‌های نخود و ارقام شاهد

کد	شجره	منشاء	کد	شجره	منشاء
G1	FLIP14-10C	ICARDA	G9	FLIP99-66C × FLIP03-134C	IDKKER-2013-IRAN
G2	FLIP14-70C	ICARDA	G10	FLIP12-61C	ICARDA
G3	FLIP14-72C	ICARDA	G11	FLIP11-31C	ICARDA
G4	FLIP14-83C	ICARDA	G12	FLIP11-53C	ICARDA
G5	FLIP14-88C	ICARDA	G13	TRN-15	IRAN
G6	ADEL/FLIP98-55C-K4-400	IRAN	G14	Kasra (X03TH28-88-K14)	IRAN
G7	AZAD/X03TH148-88K1-K2-400	IRAN	G15	Yadegar (X03TH134-88-K15)	IRAN
G8	X03TH148-88K1/FLIP98-55C-K2-400	IRAN	G16	Bivanij	IRAN



شکل ۱- میانگین بارندگی و میانگین دمای ماهانه در سال‌های اجرای آزمایش

روز تا رسیدگی و بر حسب (کیلوگرم در هکتار در روز) اندازه‌گیری شد. شاخص بهره‌وری از بارش^۱ از تقسیم عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار بر میزان بارندگی در طول دوره رشد گیاه بر حسب میلی‌متر محاسبه گردید (Oweis & Hachum, 2003). نقش دما، تبخیر و تعرق در بهره‌وری از بارش بسیار مهم است، زیرا این عوامل تعیین می‌کنند چه مقدار از بارش برای رشد گیاه و تأمین رطوبت خاک قابل استفاده باشد.

صفات عملکرد دانه، وزن صد دانه، ارتفاع بوته، تعداد روز تا گلدهی، تعداد روز تا رسیدگی، دوره پر شدن دانه، سرعت پر شدن دانه، بهره‌وری از بارش (میزان عملکرد دانه تولید شده به ازای هر میلی‌متر بارندگی در طول دوره رویش)، سرعت تشکیل عملکرد دانه در محیط‌های مختلف برای هر ژنوتیپ اندازه‌گیری شد. تعداد روز تا رسیدگی، از تاریخ کاشت تا رسیدگی دانه در ۹۰ درصد بوته‌های هر کرت با استفاده از دسکریپتور عدس ثبت گردید (IBPGR, 1993). فاصله زمانی بین گلدهی تا رسیدن فیزیولوژیک به‌عنوان طول دوره پر شدن دانه در نظر گرفته شد. از حاصل تقسیم میانگین وزن تک دانه بر طول دوره پر شدن دانه، میانگین سرعت پر شدن دانه به میلی‌گرم دانه در روز، به‌دست آمد. سرعت تشکیل عملکرد دانه از تقسیم عملکرد دانه بر تعداد

¹ Rain water productivity

شاخص SIIG

به منظور انتخاب ژنوتیپ‌های برتر با استفاده از صفات مورد مطالعه، از روش SIIG و بر اساس روش زالی و همکاران (Zali et al., 2015) استفاده شد. مقدار SIIG (شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل است) بین صفر تا یک متغیر است؛ ژنوتیپ نزدیک به ژنوتیپ ایده‌آل، مقدار SIIG به عدد یک نزدیک‌تر خواهد بود. در این تحقیق، فرض بر این بود که ژنوتیپ‌های با عملکرد دانه، وزن صد دانه، ارتفاع بوته، طول دوره پرشدن دانه، سرعت پرشدن دانه، بهره‌وری از بارش و سرعت تشکیل عملکرد دانه بالا و زودرس انتخاب شوند. بنابراین محاسبات شاخص SIIG بر اساس این فرضیات انجام شد. برای سایر شاخص‌ها نیز بجز صفات تعداد روز تا ۵۰ درصد گلدهی و رسیدگی برای بقیه صفات مقادیر بالا در انتخاب ژنوتیپ‌های مطلوب مد نظر بود.

شاخص MGIDI

این شاخص بر اساس اطلاعات صفات مورد بررسی محاسبه می‌شود (Olivoto & Nardino, 2020). مراحل محاسبه آن به صورت زیر است:

۱- تغییر مقیاس صفات: X_{ij} یک جدول دو طرفه با i ردیف (ژنوتیپ) و j ستون (صفت) می‌باشد. مقدار تغییر مقیاس یافته برای ردیف i و ستون j به صورت رابطه ۱ محاسبه شد.

$$rX_{ij} = \frac{\eta_{nj} - \varphi_{nj}}{\eta_{0j} - \varphi_{0j}} \times (\theta_{ij} - \eta_{0j}) + \eta_{nj} \quad (1)$$

η_{0j} و φ_{0j} به ترتیب مقادیر اصلی حداقل و حداکثر برای صفت j پس از تغییر مقیاس هستند و θ_{ij} مقدار اصلی برای صفت j از ژنوتیپ i است. برای تغییر مقیاس، مقادیر φ_{nj} و η_{nj} به صورت زیر محاسبه شدند: برای صفاتی که در آن‌ها مقدار بالا مورد نظر است، φ_{nj} برابر با صفر و η_{nj} برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شد، در حالی که برای صفاتی که در آن‌ها مقدار پایین مورد نظر بود، φ_{nj} برابر با ۱۰۰ و η_{nj} برابر با صفر در نظر گرفته شد.

۲- تجزیه به عامل‌ها: در مرحله بعد، تحلیل عاملی (FA) برای محاسبه کاهش ابعاد داده‌ها و ساختار روابط انجام شد. این تحلیل بر اساس رابطه ۲ انجام شد:

$$F = Z(A^T R^{-1})^T \quad (2)$$

که در آن F یک ماتریس $g \times f$ با مقادیر عامل‌ها است. Z یک ماتریس $g \times p$ با میانگین استاندارد شده (تغییر مقیاس یافته) است. A یک ماتریس $p \times f$ از بارگذاری متعارف است و R یک ماتریس همبستگی $p \times p$ بین صفات است. علاوه بر این، g ، f و p به ترتیب تعداد ژنوتیپ‌ها، عامل‌های باقیمانده (عامل‌هایی که مقدار ویژه آن‌ها از یک بیشتر است) و شاخص‌های محاسبه شده را نشان می‌دهند.

۳- تعریف ایدئوتیپ: طبق تعریف رابطه ۱، ایدئوتیپ دارای بالاترین مقدار متغیر مقیاس (۱۰۰) برای همه صفات مورد بررسی است. بنابراین ایدئوتیپ را می‌توان با یک بردار $I [1 \times p]$ تعریف کرد؛ به طوری که I برابر ۱۰۰، ۱۰۰، ...، ۱۰۰ باشد. نمرات I نیز بر اساس رابطه ۲ تخمین زده شدند.

۴- محاسبه شاخص MGIDI: در مرحله آخر، فاصله اقلیدوسی بین نمرات ژنوتیپ‌ها و ایدئوتیپ به عنوان شاخص MGIDI با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد:

$$\text{MGIDI} = \sum_{i=1}^f [(\gamma_{ij} - \gamma_j)^2]^{0.5} \quad (3)$$

رابطه ۳ γ_{ij} امتیاز i امین ژنوتیپ در فاکتور j ام است ($i=1, 2, \dots, f$) که t و f به ترتیب تعداد ژنوتیپ‌ها و عامل‌ها است، γ_j نمره j ام فاکتور j ام است. ژنوتیپ‌های با کمترین مقدار MGIDI به ایدئوتیپ نزدیک‌تر هستند. دیفرانسیل‌گزی‌ش برای همه صفات با در نظر گرفتن شدت گزی‌ش ۱۵ درصد انجام شد.

برای محاسبه سود گزی‌ش^۳ (SG) از رابطه ۴ استفاده شد که در آن، \bar{X} = میانگین ژنوتیپ‌های گزی‌ش شده، \bar{X}_0 = میانگین جمعیت اولیه و h^2 = وراثت‌پذیری عمومی.

$$\text{SG} (\%) = \frac{(\bar{X}_s - \bar{X}_0) \times h^2}{\bar{X}_0} \quad (4)$$

تجزیه خوشه‌ای به روش وارد و بر اساس فاصله اقلیدوسی انجام شد. از فرمول $(\sqrt{n/2})$ که در آن n تعداد افراد را مشخص می‌کند (Mekonnen et al., 2014) برای تعیین تعداد گروه‌های ایجاد شده توسط خط برش استفاده شد. قبل از تجزیه واریانس داده‌ها، شناسایی داده‌های پرت و نرمال بودن توزیع داده‌ها توسط آزمون شاپیرو-ویلک انجام شد. بعد از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها و یکنواخت بودن واریانس خطای آزمایشی، تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم افزار آماری R انجام شد. آزمون بارتلت انجام گردید و اثر سال تصادفی و اثر ژنوتیپ ثابت

¹ Rescaling

² Canonical loadings

³ Selection gain

(جدول ۲). معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ \times سال بیانگر واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها در سال‌های اجرای آزمایش می‌باشد. در بین صفات مورد ارزیابی، عملکرد دانه، تعداد دانه در مترمربع، بهره‌وری از بارش و سرعت تشکیل عملکرد دانه، دارای ضریب تغییرات بیشتری بودند که نشان‌دهنده اثرگذاری بیشتر سال بر عملکرد دانه، تعداد دانه در مترمربع، بهره‌وری از بارش و سرعت تشکیل عملکرد دانه است. مطالعات قبلی، اثر کم محیط بر صفات فنولوژیک و اثر بیشتر آن را بر عملکرد دانه گزارش داده‌اند (Hasan & Deb, 2017; Karimizadeh *et al.*, 2021; Sellami *et al.*, 2021)

در نظر گرفته شد. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها به روش LSD در سطح احتمال پنج درصد، به کمک نرم‌افزار SAS انجام شد. برای محاسبه شاخص SIIG از محیط اکسل، برای تجزیه خوشه‌ای از نرم‌افزار Minitab 19، برای محاسبه شاخص MGIDI (استفاده از بسته تجزیه آزمایش‌های چند محیطی (Metan)، تجزیه عاملی و تجزیه همبستگی به روش پیرسون از نرم‌افزار R (استفاده از بسته تجزیه Ggally) استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که برای همه صفات اثر سال، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ \times سال معنی‌دار بود

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب صفات مختلف ارزیابی شده ژنوتیپ‌های نخود طی دو سال زراعی

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییرات
عملکرد دانه	تعداد دانه در مترمربع	وزن صد دانه	ارتفاع بوته		
۲۴۵۷۳۶۷۹/۵**	۲۱۶۱۲۵۱/۸۸**	۱۹۵/۷۹۵۹**	۳۱۶۴۶/۳۴۰**	۱	سال
۵۸۶۲۹/۸	۴۳۲۲/۹۱	۴۶/۹۵۴۱	۳۸/۲۸۱	۴	تکرار (سال)
۳۲۲۲۳۴/۱**	۳۳۰۲۹/۵۶**	۲۸/۱۶۹۳**	۱۵۲/۸۴۳**	۱۵	ژنوتیپ
۲۹۵۷۵۳/۴**	۲۸۰۳۰/۸۹**	۱۱/۹۲۶۱**	۱۰۸/۹۴۳**	۱۵	ژنوتیپ \times سال
۳۲۳۹۲/۳	۳۰۰۴/۳۴	۰/۵۱۰۶	۴/۶۸۱۳	۹۰	خطا
۲۰/۸	۲۰/۵۲	۲/۲۵	۴/۲۱	-	ضریب تغییرات (%)

** بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

ادامه جدول ۲

میانگین مربعات				تعداد روز تا رسیدگی	تعداد روز تا گلدهی	درجه آزادی	منابع تغییرات
بهره‌وری از بارش	سرعت تشکیل عملکرد دانه	سرعت پرشدن دانه	دوره پرشدن دانه				
۲۸/۴۰۱**	۶۹۵/۴۶**	۱۷۷/۴۸**	۶۲۴۰/۳**	۸۱۰۳/۳۷**	۱۲۱/۵۰**	۱	سال
۰/۳۵۰	۱/۸۳	۵/۹۶	۵/۰	۰/۱۵۶۳	۳/۶۶	۴	تکرار (سال)
۱/۸۰۲**	۱۰/۲۴**	۲/۶۳**	۱۰ ns	۵/۷۷۵*	۹/۱۸**	۱۵	ژنوتیپ
۱/۵۴۳**	۹/۴۹**	۱/۵۰**	۲۰/۰**	۱۰/۵۷۵**	۶/۱۰**	۱۵	ژنوتیپ \times سال
۰/۲۲۱	۱/۰۴	۰/۳۳	۶/۰	۲/۶۲۳	۲/۰۶	۹۰	خطا
۲۰/۹	۲۰/۸۴	۶/۸۹	۶/۳۳	۰/۹۴	۱/۰۸	-	ضریب تغییرات (%)

ns. * و **: به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد است.

بین ۳۶ تا ۳۷۷ دانه متغیر بود (جدول ۳). ژنوتیپ‌های G5 و G9 با عملکرد دانه بالا، از تعداد دانه در مترمربع بالایی (۳۴۰-۳۲۰ دانه) برخوردار بودند. از نظر ارتفاع بوته ژنوتیپ‌های G14 و G9 به ترتیب با ارتفاع بوته ۶۰ و ۵۷ سانتی‌متر بلندترین ژنوتیپ‌ها بودند. تعداد روز تا رسیدگی ژنوتیپ‌ها ۱۷۰ تا ۱۷۴ روز بود (Gaur *et al.*, 2012).

میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها بین ۱۱۵/۳ تا ۱۱۳۱/۹ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۳). بیشترین عملکرد دانه مربوط به ژنوتیپ G9 به میزان ۱۱۳۱/۹ کیلوگرم در هکتار بوده که پس از آن ژنوتیپ‌های G5، G12 و G4 با میانگین عملکرد دانه ۱۰۵۹، ۱۱۰۸ و ۱۰۴۸ کیلوگرم در هکتار در مراتب بعدی قرار گرفتند. تعداد دانه در مترمربع ژنوتیپ‌ها

میلی‌گرم در روز متغیر بود. ژنوتیپ‌های G11، G9 و G4 به ترتیب با ۴۲، ۴۱ و ۴۱ روز دارای بالاترین دوره پرشدن دانه نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها بودند. بیشترین سرعت تشکیل دانه مربوط به ژنوتیپ‌های G9، G5، G12 و G4 بود (جدول ۳). ژنوتیپ‌های G5، G12 و G9 به ترتیب با ۳/۱، ۲/۹ و ۲/۷ کیلوگرم بر میلی‌متر، بیشترین بهره‌وری از بارش را داشتند.

ژنوتیپ‌های G9، G5، G12 و G4 با عملکرد دانه بالا و ۱۷۲ روز تا رسیدگی، جزو ژنوتیپ‌های متوسط‌ترس بودند. ژنوتیپ‌های G13 و G11 با ۱۷۴ روز تا رسیدگی، ژنوتیپ‌های دارای دوره رسیدگی طولانی‌تر در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌های مورد ارزیابی بودند. بررسی سرعت پرشدن دانه ژنوتیپ‌ها نشان داد که این صفت بین ۷/۳۸ - ۹/۴۸

جدول ۳- میانگین صفات ارزیابی شده و شاخص SIIG در ژنوتیپ‌های نخود کابلی مورد مطالعه

ژنوتیپ	عملکرد دانه (kg ha ⁻¹)	تعداد دانه در مترمربع	وزن صد دانه (g)	ارتفاع بوته (cm)	روز تا گلدهی	روز تا رسیدگی	دوره پرشدن دانه (day)	سرعت پرشدن دانه (mg day ⁻¹)	سرعت تشکیل عملکرد دانه (kg ha ⁻¹ day ⁻¹)	بهره‌وری از بارش (kg mm ⁻¹)	SIIG
G1	۸۹۵	۲۱۰/۳۵	۳۴/۵۴	۵۱	۱۳۳	۱۷۰	۳۷/۵	۹/۴۸	۵/۱۲	۲/۳۴	۰/۸۳۶
G2	۸۸۶/۲	۲۵۰/۱۴	۳۰/۴۲	۵۴	۱۳۲	۱۷۱	۳۹	۸/۰۷	۵/۰۲	۲/۲۱	۰/۸۲۳
G3	۹۱۱/۵	۲۵۶/۶۵	۳۴/۱۵	۴۸	۱۳۲	۱۷۲	۳۹/۵	۹/۰۴	۵/۱۴	۲/۱۷	۰/۸۲۹
G4	۱۰۴۸/۱	۳۶/۴۳	۳۱/۳۷	۴۷	۱۳۰	۱۷۱	۴۱	۷/۸۴	۵/۹۳	۲/۳۷	۰/۸۴۴
G5	۱۱۰۸	۳۳۹/۸۷	۳۳/۱۲	۴۹/۵	۱۳۲	۱۷۲	۳۹/۵	۸/۵۵	۶/۳۶	۳/۱۰	۰/۹۰۷
G6	۹۳۱/۴	۳۲۰/۰۹	۳۰/۵۲	۵۱/۵	۱۳۲	۱۷۲	۳۹/۵	۷/۸۷	۵/۲۵	۲/۳۴	۰/۸۴۶
G7	۸۹۵/۶	۲۶۵/۵	۳۰/۱۲	۵۱/۵	۱۳۴	۱۷۳	۳۸/۵	۸/۱۸	۵/۰۷	۲/۴۷	۰/۸۲۳
G8	۸۸۴/۵	۲۴۵/۸۳	۳۰/۰۵	۵۳	۱۳۳	۱۷۲	۳۹	۸/۱۵	۴/۹۴	۲/۲۱	۰/۸۱۵
G9	۱۱۳۱/۹	۳۲۰/۳۲	۲۹/۶۴	۵۷	۱۳۱	۱۷۲	۴۱	۷/۳۸	۶/۴۱	۲/۷۸	۰/۹۰۸
G10	۷۸۰/۶	۲۸۳/۳۹	۲۸/۰۳	۵۰/۵	۱۳۲	۱۷۱	۳۹	۷/۴۳	۴/۴۰	۱/۹۳	۰/۷۴۹
G11	۷۶۹/۴	۲۴۲/۲۶	۳۱/۴۹	۵۰/۵	۱۳۱	۱۷۴	۴۲/۵	۷/۷۱	۴/۳۳	۲/۱۰	۰/۷۵۷
G12	۱۰۵۸/۸	۲۸۵/۲۳	۳۱/۷۶	۵۲/۵	۱۳۵	۱۷۲	۳۷/۵	۸/۷	۶/۰۱	۲/۸۷	۰/۹۰۱
G13	۷۷۸/۴	۲۹۳/۸۲	۳۶/۴۱	۵۴/۵	۱۳۴	۱۷۴	۴۰	۹/۲۶	۴/۴۰	۲/۲۰	۰/۸۰۱
G14	۸۳۷/۸	۲۸۴/۰۹	۳۱/۸۷	۶۰	۱۳۴	۱۷۳	۳۹	۸/۵۷	۴/۷۲	۲/۲۱	۰/۸۲۴
G15	۷۷۲/۷	۳۷۷/۲۱	۳۱/۵۶	۵۵	۱۳۳	۱۷۳	۴۰	۸/۶۳	۴/۳۶	۲/۱۵	۰/۸۰۳
G16	۱۱۵/۳	۲۶۳/۱	۳۴/۲۰	۳۷	۱۳۲	۱۷۱	۳۹/۵	۹/۲۹	۰/۷۲	۰/۵۵	۰/۴۲۲
حداکثر	۱۱۳۱/۹	۳۷۷/۲۱	۳۶/۴	۶۰	۱۳۵	۱۷۴	۴۲/۵	۹/۴۸	۶/۴۱	۳/۱۰	-
حداقل	۱۱۵/۳	۲۶۳/۱	۲۸/۰۳	۳۷	۱۳۰	۱۷۰	۳۷/۵	۷/۳۸	۰/۷۲	۰/۵۵	-
میانگین	۸۶۲/۸	۰/۳۲	۳۱/۸	۵۱/۴۱	۱۳۲	۱۷۲	۳۹/۵	۸/۳۸	۸/۳۸	۲/۲۵	-
LSD 5%	۲۰۷/۹	۰/۰۱	۰/۸۳	۲/۵	۱/۶۶	۱/۸۷	۲/۸۹	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۵۴	-
LSD 1%	۲۷۶/۴	۳۶/۴۳	۱/۱	۳/۳۲	۲/۲۰	۲/۴۹	۳/۸۴	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۷۲	-

بهره‌وری از بارش و سرعت تشکیل عملکرد دانه برخوردار بودند (جدول ۳). همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری بین سرعت پر شدن دانه و وزن صد دانه مشاهده شد. در این مطالعه، همبستگی بالایی بین صفات مرتبط با عملکرد دانه مانند وزن صد دانه با عملکرد دانه مشاهده نشد. این رابطه ضعیف می‌تواند ناشی از کمی بودن صفت عملکرد دانه و سهم بودن صفات مختلف در عملکرد دانه باشد. در همین راستا، رضوانی‌مقدم و صادقی‌ثمرجان (Rezvani)

همبستگی بین صفات مورفولوژیک

همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری بین عملکرد دانه با صفات بهره‌وری از بارش ($0/96^{**}$)، تعداد دانه در مترمربع ($0/97^{**}$) و سرعت تشکیل عملکرد دانه ($0/99^{**}$) وجود داشت (شکل ۲). نتایج مقایسه میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های مورد ارزیابی نیز با نتیجه به‌دست آمده مطابقت داشت؛ به‌طوری‌که ژنوتیپ‌های G9، G5 و G12 با عملکرد دانه بالا از بیشترین مقدار صفات تعداد دانه در مترمربع،

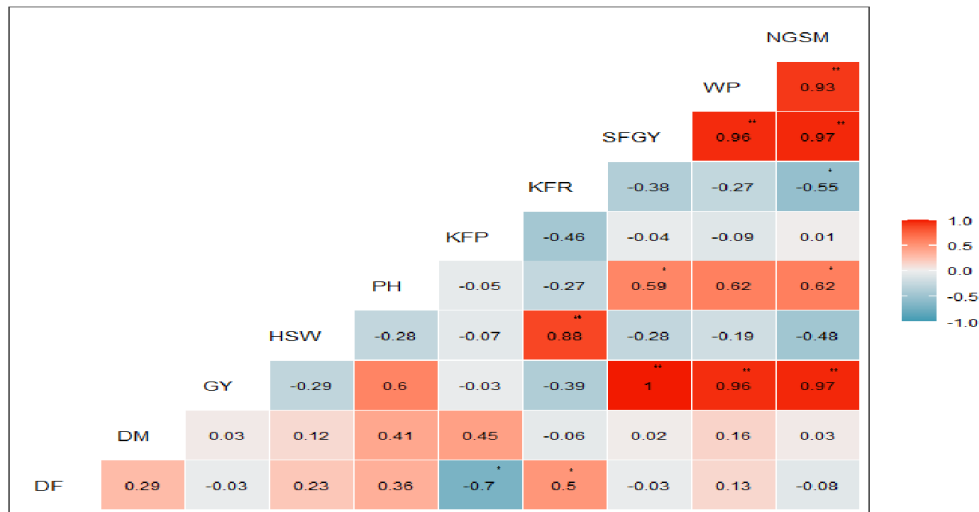
توجیه نمودند (Toker & Cagiran, 2004). پس از چرخش واریماکس، میزان اشتراک از ۰/۶۵ (برای تعداد دانه در مترمربع) تا ۰/۹۹ (برای عملکرد دانه) با میانگین ۰/۹۱ متغیر بود که این امر بیانگر این است که درصد بالای تغییرات هر متغیر به وسیله این عامل‌ها توجیه شده است. عامل اول، ۳۰/۷ درصد واریانس کل را توجیه نمود و بزرگترین ضرایب عاملی آن مربوط به صفات سرعت پرشدن دانه، عملکرد دانه و بهره‌وری از بارش بود (جدول ۴). نام پیشنهادی برای این عامل عملکرد دانه در نظر گرفته شد. این عامل نشان‌دهنده ارتباط قوی بین عملکرد دانه با سرعت پرشدن دانه و بهره‌وری از بارش می‌باشد. نتایج همبستگی ساده صفات نیز بیانگر وجود همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار بین عملکرد دانه با صفات مذکور بوده است (شکل ۲). وزن صد دانه و سرعت پرشدن دانه به‌طور مثبت دومین عامل را تحت تأثیر قرار دادند و ۲۶/۴ درصد تغییرات را تبیین نمودند. نام این عامل، صفات مرتبط با وزن دانه می‌باشد. با توجه به ضرایب عاملی این عامل‌ها، ژنوتیپ‌های انتخاب شده بر اساس این عامل‌ها عملکرد دانه، سرعت پر شدن دانه و وزن صد دانه بالایی خواهند داشت. در سومین عامل تعداد روز تا رسیدگی، تعداد روز تا گلدهی، ارتفاع بوته و تعداد دانه در مترمربع دارای بار عاملی مثبت و بزرگ بودند که ۱۷/۶ درصد از کل تغییرات را تبیین نمودند. چهارمین عامل تعداد روز تا گلدهی و سرعت پرشدن دانه با بار عاملی مثبت و بزرگ بودند که ۱۷/۲ درصد از کل تغییرات را توجیه نمود. نتایج نشان داد که عملکرد دانه (۰/۹۹۳)، وزن صد دانه (۰/۹۹۲)، سرعت تشکیل عملکرد دانه (۰/۹۹۲)، دوره پرشدن دانه (۰/۹۹۱) و سرعت پرشدن دانه (۰/۹۸۲) بالاترین اشتراک و در نتیجه نقش نسبی بالا در عملکرد دانه را داشتند (جدول ۴). نقوی و جهانسوز (Naghavi & Jahansouz, 2004) عاملی را به‌عنوان عملکرد دانه معرفی نمودند که شامل صفات وزن صد دانه و تعداد دانه در مترمربع بود.

(Moghaddam & sadeghi, 2008) گزارش کردند که بین عملکرد دانه نخود و تعداد دانه در هر بوته، در هر دو شرایط آبیاری تکمیلی و دیم، ارتباط آماری مثبت و بسیار معنی‌داری وجود دارد. نتایج مشابهی توسط فیلیپیتی (۲۰۱۰) ارائه شد، به‌طوری‌که تعداد دانه در بوته به‌عنوان مؤلفه‌ای با بیشترین میزان همبستگی با عملکرد دانه معرفی گردید.

تجزیه به عامل‌ها

تجزیه به عامل‌ها قبل از تجزیه خوشه‌ای، به‌منظور دسته‌بندی صفات، تعیین میزان اهمیت و ارتباط هر یک از آنها در ایجاد تغییرات کل داده‌ها و همچنین تعیین اهمیت متغیرهایی که در گروه‌ها نقش دارند، انجام گردید. از طریق ایت تجزیه و تحلیل می‌توان به تأثیر شرایط محیطی بر اهمیت و گروه بندی صفات مختلف پی برد. با توجه به اینکه مقدار KMO برابر با ۰/۵۰۶ بدست آمد، لذا همبستگی‌های موجود بین داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب می‌باشد و همچنین آزمون کرویت بارتلت نیز بسیار معنی‌دار بود ($\chi^2 = 284/35$) که وجود همبستگی کافی بین متغیرها را نشان داد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب می‌باشند. نتایج مربوط به تجزیه عاملی منجر به شناسایی چهار عامل شد که مقادیر ویژه بیشتر از یک (به ترتیب ۳/۳۷، ۲/۹، ۱/۹۳ و ۱/۸۸) داشتند (جدول ۴). این چهار عامل در مجموع ۹۱/۹ درصد از تغییرات بین صفات را توجیه نمودند.

توکر و کاگیران (Toker & Cagiran, 2004) برای ارزیابی عملکرد نخود، ۱۷ ژنوتیپ نخود کابلی را با استفاده از همبستگی‌های فنوتیپی و تجزیه به عامل‌ها، مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که عملکرد دانه، همبستگی معنی‌داری با ارتفاع گیاه داشته و با وزن دانه، رابطه منفی و معنی‌داری دارد. در این مطالعه، هشت صفت اصلی به سه عامل کاهش یافت که ۹۲/۹ درصد از داده‌های اصلی را



شکل ۲- همبستگی فنوتیپی بین صفات ارزیابی شده در ژنوتیپ‌های نخود کابلی

رنگ هر سلول نشان دهنده قدرت و جهت همبستگی است و رنگ‌های تیره‌تر نشان‌دهنده همبستگی‌های قوی هستند. روز تا رسیدگی (DF)، عملکرد دانه (DM)، عملکرد دانه (GY)، وزن صد دانه (HSW)، ارتفاع بوته (PH)، دوره پرشدن دانه (KFP)، سرعت پرشدن دانه (KFR)، سرعت تشکیل عملکرد دانه (SFGY)، بهره‌وری از بارش (WP) و تعداد دانه در مترمربع (NGSM).

جدول ۴- مقادیر ویژه، واریانس تبیین شده و واریانس تجمعی پس از چرخش واریانس به دست آمده در تحلیل عاملی

صفات	عامل اول	عامل دوم	عامل سوم	عامل چهارم	میزان اشتراک
عملکرد دانه	۰/۹۸۲	-۰/۱۶۱	-۰/۰۴۶	-۰/۰۱۵	۰/۹۹۳
تعداد دانه در مترمربع	-۰/۰۵۷	-۰/۰۵۳	۰/۷۷۱	۰/۳۳۵	۰/۶۵۶
وزن صد دانه	-۰/۱۳۲	۰/۹۸۷	۰/۰۰۱	-۰/۰۲۳	۰/۹۹۲
ارتفاع بوته	۰/۶۳۲	-۰/۲۰۴	۰/۵۶۷	۰/۱۰۳	۰/۷۷۳
روز تا گلدهی	۰/۰۵۶	۰/۲۶۸	۰/۵۵۳	۰/۷۱۸	۰/۸۹۶
روز تا رسیدگی	۰/۰۸۸	۰/۱۴۰	۰/۸۲۹	-۰/۴۲۰	۰/۸۹۱
دوره پرشدن دانه	-۰/۰۵۹	-۰/۱۰۴	۰/۰۸۸	-۰/۹۸۴	۰/۹۹۱
سرعت پرشدن دانه	-۰/۲۴۵	۰/۸۷۶	۰/۰۱۵	۰/۳۹۳	۰/۹۸۲
سرعت تشکیل عملکرد دانه	۰/۹۸۳	-۰/۱۴۹	-۰/۰۵۶	-۰/۰۰۹	۰/۹۹۲
بهره‌وری از بارش	۰/۹۶۹	-۰/۰۶۴	۰/۱۲۰	۰/۰۵۳	۰/۹۶۰
مقادیر ویژه	۳/۳۷۴	۲/۹۰۷	۱/۹۳۸	۱/۸۸۷	
درصد واریانس	۳۰/۷	۲۶/۴	۱۷/۶	۱۷/۲	
درصد واریانس تجمعی	۳۰/۷	۵۷/۱	۷۴/۷	۹۱/۹	

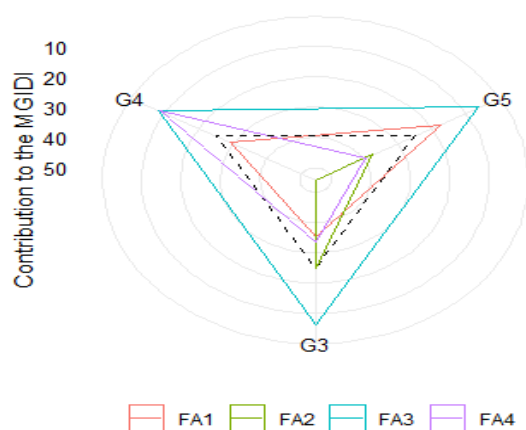
است. نتایج شاخص SIIG نشان داد که ژنوتیپ‌های G9، G5، G12، G6 و G4 با بیشترین مقدار شاخص SIIG و به ترتیب به میزان ۰/۹۰۸، ۰/۹۰۷، ۰/۹۰۱، ۰/۸۴۶ و ۰/۸۴۴ جزو برترین ژنوتیپ‌ها بودند (جدول ۳). ژنوتیپ G9 از بیشترین عملکرد دانه و سرعت تشکیل عملکرد دانه برخوردار بود. ژنوتیپ G5 با عملکرد دانه ۱۱۰۷/۹ کیلوگرم در هکتار در رتبه بعدی از نظر عملکرد دانه، پس از G9 (۱۱۳۱/۹ کیلوگرم در هکتار) قرار گرفت. از سایر ویژگی‌های

گزینش ژنوتیپ‌ها با استفاده از شاخص‌های MGIDI و SIIG

به منظور گزینش بهترین ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد دانه و سایر صفات زراعی، از شاخص‌های MGIDI و SIIG استفاده شد. در این مطالعه شاخص‌های SIIG و MGIDI بر اساس تمامی صفات مورد ارزیابی به دست آمد. به عبارتی گزینش ژنوتیپ‌ها بر اساس این شاخص‌ها نشان‌دهنده گزینش بر اساس عملکرد و سایر صفات زراعی به طور همزمان بوده

که به لبه خارجی نزدیک است، بیانگر نزدیک بودن صفات در آن عامل به ژنوتیپ ایده‌آل است. خط‌چین نشان‌دهنده ارزش نظری است، در صورتی که همه عوامل به یک اندازه نقش داشته باشند. به این ترتیب، ژنوتیپ‌های G5، G4 و G3 جزو ژنوتیپ‌های برتر با استفاده از عامل سوم بودند که دارای بیشترین عملکرد دانه، تعداد دانه در مترمربع، بهره‌وری از بارش، سرعت تشکیل عملکرد دانه و وزن صد دانه بودند (شکل ۴). ژنوتیپ‌های G5 و G3 کمترین سهم عامل دوم را به خود اختصاص دادند. ژنوتیپ G5 کمترین مقدار را در عامل اول داشت. نتایج همبستگی عملکرد دانه با تعداد دانه در مترمربع، سرعت تشکیل عملکرد دانه و بهره‌وری از بارش، بیانگر این است که عملکرد دانه همبستگی قوی و مثبتی با تعداد دانه در مترمربع، سرعت تشکیل دانه و بهره‌وری از بارش داشته است.

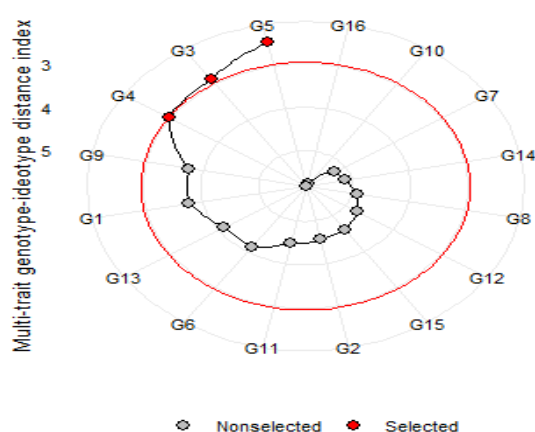
دیفرانسیل‌گزینی آماره MGIDI برای تمامی صفات، بجز صفات تعداد روز تا گلدهی و رسیدگی و ارتفاع بوته مثبت بود (جدول ۵). این موضوع بیانگر توانایی شاخص MGIDI در شناسایی ژنوتیپ‌های برتری است که می‌توانند به‌عنوان ژنوتیپ ایده‌آل برای اصلاح با صفات زراعی مطلوب استفاده شود. بیشترین و کمترین مقدار درصد دیفرانسیل‌گزینی به ترتیب مربوط به صفات عملکرد دانه (۱۸/۵ درصد) و ارتفاع بوته (۶/۳ - /) بود. سود گزینی نامطلوب شامل ارتفاع بوته بود.



شکل ۴- نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌های انتخاب‌شده به‌صورت نسبت هر عامل بر مقدار محاسبه‌شده MGIDI نشان داده شده است

این ژنوتیپ، دارا بودن بیشترین بهره‌وری از بارش بود. ژنوتیپ G12 از لحاظ عملکرد دانه (۱۰۵۸/۸ کیلوگرم در هکتار) در رتبه سوم و از نظر بهره‌وری از بارش در رتبه دوم قرار گرفت. نتایج شاخص SIIG نشان داد که ژنوتیپ G16 با کمترین مقدار شاخص (۰/۴۲) ضعیف‌ترین ژنوتیپ از نظر بهره‌وری از بارش، سرعت تشکیل عملکرد دانه و کمترین ارتفاع بوته بود. بر اساس نتایج شاخص‌گزینی MGIDI، ژنوتیپ‌های G5، G3 و G4 به‌عنوان ژنوتیپ‌های مطلوب مورد گزینی قرار گرفتند (شکل ۳). در مجموع، برآورد شاخص‌های انتخاب SIIG و MGIDI برای ژنوتیپ‌ها بر اساس صفات مختلف نشان داد که ژنوتیپ‌های G5، G4 و G3 با داشتن بیشترین مقدار SIIG و کمترین مقدار MGIDI، به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌ها انتخاب شدند. پژوهشگران ۲۲۰ ژنوتیپ نخود به همراه ۶ رقم شاهد را با استفاده از شاخص MGIDI ارزیابی نمودند که بر اساس نتایج شاخص MGIDI هفت لاین به همراه دو رقم شاهد با کمترین مقدار این شاخص جزء برترین ژنوتیپ‌ها بودند (Abderemane *et al.*, 2023).

در شکل ۴ نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌های انتخابی بر اساس سهم هر عامل در شاخص MGIDI ارائه شده است. برای هر ژنوتیپ گزینی شده، سهم هر عامل در شاخص MGIDI از بیشترین عامل توجیه‌کننده (نزدیک به مرکز نمودار) تا کمترین عامل توجیه‌کننده (دور از مرکز نمودار) طبقه‌بندی شد (شکل ۴). کوچکترین سهم توجیه‌شده توسط هر عامل



شکل ۳- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس شاخص MGIDI

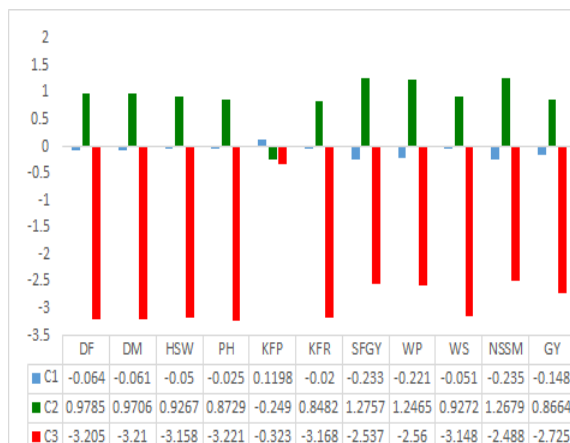
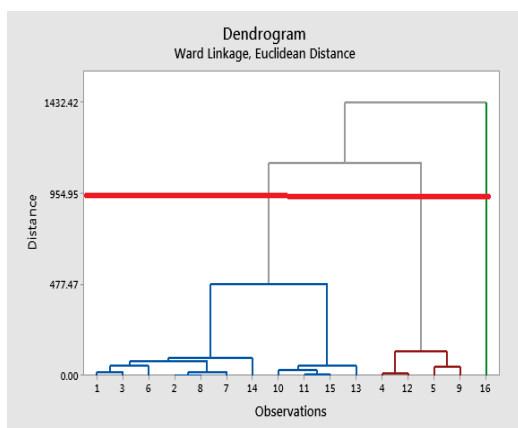
جدول ۵- عوامل مرتبط با صفات همبسته، دیفرانسیل و سود گزینش

صفات	عامل	میانگین جمعیت اصلی (X ₀)	میانگین جمعیت گزینش شده (X _s)	درصد دیفرانسیل گزینش	سود گزینش
عملکرد دانه	اول	۸۶۳/۰	۱۰۲۳/۰	۱۶۰/۰۰	۱۸/۵۰
ارتفاع بوته	اول	۵۱/۴	۴۸/۲	-۳/۲۴	-۶/۳۰
سرعت تشکیل عملکرد دانه	اول	۴/۸۹	۵/۸۱	۰/۹۲	۱۸/۹۱
بهره‌وری از بارش	اول	۲/۲۵	۲/۵۵	۰/۳۰	۱۳/۲۰
تعداد دانه در مترمربع	اول	۲۶۷/۰	۳۰۶/۰	۳۸/۵۰	۱۴/۴۰
وزن صد دانه	دوم	۳۱/۸	۳۲/۹	۱/۰۵	۳/۳۰
سرعت پرشدن دانه	دوم	۸/۳۸	۸/۴۸	۰/۰۹	۱/۱۰
روز تا رسیدگی	سوم	۱۷۲/۰	۱۷۲/۰	-۰/۴۰	-۰/۲۳
روز تا گلدهی	سوم	۱۳۲/۰	۱۳۱/۰	-۱/۱۷	-۰/۸۸
دوره پرشدن دانه	سوم	۳۹/۵	۴۰/۰	۰/۵۰	۱/۲۷

تجزیه کلاستر ژنوتیپ‌ها

در تجزیه خوشه‌ای، ژنوتیپ‌ها بر اساس رنگ‌های متمایز سبز، قرمز و آبی در شکل ۵ به سه گروه تقسیم شدند و گروه اول هم به دو زیر گروه تقسیم شد (شکل ۵). و میانگین صفات مختلف اندازه‌گیری شده در هر گروه در شکل ۵ نشان داده شده است. در اولین، دومین و سومین گروه به ترتیب ۱۱، ۴ و ۱ ژنوتیپ قرار گرفت. به این ترتیب که ژنوتیپ‌های ۱، ۳، ۶، ۲، ۸، ۷، ۱۴، ۱۱، ۱۰، ۱۵ و ۱۳ در گروه اول، ژنوتیپ‌های ۴، ۱۲، ۵ و ۹ در گروه دوم و ژنوتیپ ۱۶ در گروه سوم قرار گرفتند. به منظور مقایسه گروه‌های مختلف از نظر صفات مورد ارزیابی، مقادیر تمامی صفات به نمره Z تبدیل و سپس مقایسه انجام گرفت. اولین گروه، کمترین دوره پرشدن دانه، و بیشترین تعداد روز تا گلدهی و رسیدگی و ارتفاع بوته را نشان داد. دومین گروه بیشترین عملکرد دانه، دوره پرشدن دانه، سرعت تشکیل عملکرد دانه، بهره‌وری از بارش و تعداد دانه در مترمربع را

نشان داد. در سومین گروه، بیشترین وزن صد دانه و سرعت پرشدن دانه و کمترین تعداد روز تا رسیدگی، عملکرد دانه، ارتفاع بوته، سرعت تشکیل عملکرد دانه، بهره‌وری از بارش و تعداد دانه در مترمربع مشاهده شد. با توجه به اینکه در شرایط دیم، به‌نژادگران به دنبال ژنوتیپ‌های زودرس با عملکرد بالا، دوره پرشدن دانه بیشتر و تعداد دانه بیشتر و سرعت تشکیل عملکرد دانه بیشتر می‌باشند، ژنوتیپ‌های گروه دو می‌توانند به‌عنوان ژنوتیپ‌های امیدبخش برای کاشت در اراضی دیم یا استفاده در برنامه‌های به‌نژادی آینده در نظر گرفته شوند. در مطالعه‌ای، تعداد ۱۲ رقم و ژنوتیپ پیشرفته نخود از نظر صفات مختلف زراعی در شرایط دیم مورد ارزیابی قرار گرفت (Pezeshkpour et al., 2022) که بر اساس نتایج تجزیه کلاستر، ژنوتیپ‌ها به سه گروه تقسیم شدند و ژنوتیپ‌های گروه دوم که متشکل از سه ژنوتیپ بودند، با عملکرد دانه بالا به‌عنوان ژنوتیپ‌های مناسب شناخته شدند.



شکل ۵- تجزیه خوشه‌ای برای صفات ارزیابی شده ۱۶ ژنوتیپ نخود

شکل سمت چپ تجزیه خوشه‌ای با استفاده از روش WARD و شکل سمت راست مقایسه سه دسته از تجزیه خوشه‌ای برای صفات ارزیابی شده ۱۶ ژنوتیپ نخود را نشان می‌دهد.

به‌عنوان ژنوتیپ‌های امیدبخش برای برنامه معرفی رقم پیشنهاد می‌شوند.

سپاسگزاری

این مقاله از پروژه تحقیقاتی به شماره مصوب ۰۲۰۹۹۶-۱۵-۱۵-۰۵۴ در موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور استخراج شده است. بدین وسیله از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان که امکانات لازم برای اجرای این پروژه را فراهم نمود، تشکر و قدردانی می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج این تحقیق، ژنوتیپ‌های G5، G4 و G3 با کمترین مقدار MGIDI و عملکرد بیشتر نسبت به میانگین و ارقام شاهد، به‌عنوان ژنوتیپ‌های ایده‌آل بر اساس شاخص MGIDI گزینش شدند. ژنوتیپ G9 در رتبه چهارم قرار گرفت. همچنین بر اساس شاخص SIIG، ژنوتیپ‌های G9، G5، G12 و G4 بهترین بودند. به این ترتیب، ژنوتیپ‌های G9، G5 و G4 برای استفاده در برنامه‌های به‌زادی بعدی یا

منابع

- Abderemane, B. A., Fakiri, M., Idrissi, O., Baidani, A., Zeroual, A., Mazzucotelli, E., Özkan, H., Marcotuli, I., Gadaleta, A., & Houasli, C. (2023). Evaluation of the productive potential of a world collection of chickpeas (*Cicer arietinum* L.) for the initiation of breeding programs for adaptation to conservation agriculture. *Sustainability*, 15(15), 11927. <https://doi.org/10.3390/su151511927>.
- Bagheri, M., Tahmasebi, Z., & Geravandi, M. (2024). Genetic diversity and relationships between some agronomic traits of desi chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.) under autumn sowing conditions. *Journal of Crop Breeding*, 16(3), 114-124. <https://doi.org/10.61186/jcb.16.3.114>
- Baidani, A., Zeroual, A., Abderemane, B.A., Mitache, M., Aboutayeb, R., Houasli, C., & Idrissi, O. (2025). Genetic variability for protein, zinc, and iron content in a chickpea collection under no-tillage system conditions. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 72(3), 3437-3448. <https://doi.org/10.1007/s10722-025-01709-3>
- Ceron-Rojas, J.J., & Crossa, J. (2022). The statistical theory of linear selection indices from phenotypic to genomic selection. *Crop Science*, 62(2), 537-563. <https://doi.org/10.1002/csc2.20676>.
- Debnath, P., Chakma, K., Bhuiyan, M. S. U., Thapa, R., Pan, R., & Akhter, D. (2024). A novel multi trait genotype ideotype distance index (MGIDI) for genotype selection in plant breeding: application, prospects and limitation. *Crop Design*, 3(4), 100074. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2024.100074>.
- Esmaili, A., Najaphy, A., & Kahrizi, D. (2022). Evaluation of drought tolerance in Camelina (*Camelina sativa*) doubled haploid lines using selection index of ideal genotype (SIIG). *Journal of Crop Breeding*, 14(44), 199-210. <https://doi.org/10.1016/10.52547/jcb.14.44.199>
- Fadakar Navrood, F., Asghari Zakaria, R., Mostafav Rad, M., Zare, N., & Moghaddaszadeh Ahrabi, M. (2023). Evaluation of seed yield stability of groundnut genotypes by multi-characteristic selection indicators. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(3), 191-205. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.289979.654989>

- Filippet, A (2010) Variability of plant and seed characteristics in a collection of chickpea. *Legume Reserch*, 43, 39-46
- Gaur, P. M., Jukanti, A. K., & Varshney, R. K. (2012). Impact of genomic technologies on chickpea breeding strategies. *Agronomy*, 2, 199–221. <https://doi.org/10.3390/agronomy2030199>
- Hasan, M., & Deb, A. (2017). Stability analysis of yield and yield components in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Horticulture International Journal*, 1(1), 4-14. <https://doi.org/10.15406/HIJ.2017.01.00002>
- Houasli, C., Sahri, A., Nsarellah, N., & Idrissi, O. (2021). Chickpea (*Cicer arietinum* L.) breeding in Morocco: genetic gain and stability of grain yield and seed size under winter planting conditions. *Euphytica*, 217(8), 159. <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02885-x>
- IBPGR, ICRISAT and ICARDA (1993). Descriptors for Chickpea (*Cicer arietinum* L.) International Board for Plant Genetic Resources, Rome, Italy; International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Patancheru, India and International Center for Agriculture Research in the Dry Areas, Aleppo, Syria.
- Karimizadeh, R., Pezeshkpour, P., Barzali, M., Armion, M., & Sharifi, P. (2021). Stability of some of chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes by AMMI indices and biplots. *Iranian Journal Pulses Research*, 12(2), 214-228. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/ijpr.v12i2.2103-1006>
- Mehripour Azbarmi, H., Saba, J., Alizadeh, B., Gholizadeh, A., & Shekari, F. (2024). Studying the genotype× environment interaction and grain yield stability of winter oilseed rape mutant lines using parametric, non-parametric and SIIG index methods. *Plant Genetic Research*, 11(1), 103-120. <https://doi.org/10.61186/pgr.11.1.103>
- Mekonnen, F., Mekbib, F., Kumar, S., Ahmed, S. and Sharma, T. R. (2014). Agromorphological traits variability of the Ethiopian lentil and exotic genotypes. *Advances in Agriculture*, 2014(1), 1-15. <https://doi.org/10.1155/2014/870864>
- Naghavi, M. R., & Jahansouz. M. R. (2005). Variation in the agronomic and morphological traits of Iranian chickpea accessions. *Journal of Integrative Plant Biology*. 47(3), 375-379.
- Olivoto, T., & Nardino, M. (2020). MGIDI: A novel multi-trait index for genotype selection in plant breeding. *Bioinformatics*, 1-22. <https://doi.org/10.1101/2020.07.23.217778>
- Olivoto, T., & Nardino, M. (2021). MGIDI: Toward an effective multivariate selection in biological experiments. *Bioinformatics*, 37(10), 1383-1389. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa981>
- Oweis, T., & Hachum, A. (2003). Improving water productivity in the dry areas of west Asia and north Africa CAB International, water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement (eds Kijne JW, Barker R and Molden D), 179-198.
- Pezeshkpour, P., Amiri, R., & Namdari, A. (2023). Study of agronomic traits and their relationship in promising lentil lines under rain-fed conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 16(1), 35-51. <https://doi.org/10.22077/escs.2021.4307.2005>
- Pezeshkpour, P., Minapour, A., & Raeisvand, M. (2022). Seed yield stability of autumn sowing chickpea genotypes using nonparametric methods. *Crop Production Journal*, 14 (4), 1-20. <https://doi.org/10.22069/ejcp.2022.18882.2408>
- Rezvani Moghaddam. P., & Sadeghi, S. R. (2008). Effect of sowing dates and different irrigation regimes on morphological characteristics and grain yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) (cultivar 3279 ILC). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 6(2), 315-326. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/gsc.v6i2.2438>
- Sellami, M. H., Lavini, A., & Pulvento, C. (2021). Phenotypic and quality traits of chickpea genotypes under rainfed conditions in south Italy. *Agronomy*, 11(5), 962. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050962>
- Solat Petloo, N., Asghari Zakaria, R., Ebadi, A., Sharifi Ziveh, P. (2022). Selection of Cow Cockle (*Vaccaria hispanica*) ecotypes based on agronomic traits under different irrigation regimes. *Journal of Crop Breeding*, 14 (43), 135-144. (In Persian). <https://doi.org/10.52547/jcb.14.43.135>
- Toker, C., & Ilhan Cagiran, M. (2004). The use of phenotypic correlations and factor analysis in determining characters for grain yield selection in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Hereditas*, 140(3), 226-228.
- Zali, H., Sofalian, O., Hasanloo, T., Asghari, A., & Hoseini, S.M. (2015). Appraising of drought tolerance relying on stability analysis indices in canola genotypes simultaneously, using selection index of ideal genotype (SIIG) technique: Introduction of new method. *Biological Forum – An International Journal*, 7(2), 703-711. <https://doi.org/10.13140/2.1.5178.5287>