

ارزیابی پایداری عملکرد دانه اکوتیپ‌های سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) با استفاده از آماره‌های ناپارامتری

Evaluation of seed yield stability of black cumin (*Nigella sativa* L.) ecotypes using non-parametric statistics

حمیدرضا فنایی^۱، مانی معرفت‌زاده خامنه^۲، مجید رضا کیانی فریز^۳، محمد تقی فیض‌بخش^۴ و مسعود رفیعی^۵

چکیده

فنایی، ح.ر. م. مانی معرفت‌زاده خامنه، م.ر. کیانی فریز، م.ت. فیض‌بخش و م. رفیعی. ۱۴۰۴. ارزیابی پایداری عملکرد دانه اکوتیپ‌های سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) با استفاده از آماره‌های ناپارامتری. نشریه علوم زراعی ایران. ۲۷ (۳): ۳۲۳-۳۰۴.

یکی از مباحث مهم در به‌نژادی گیاهان دارویی، برهمکنش ژنوتیپ × محیط است که روش‌های آماری متعددی برای برآورد آن و انتخاب ژنوتیپ‌های با عملکرد پایدار و پرمحصول معرفی شده است. در این آزمایش ۳۶ اکوتیپ سیاه‌دانه، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در چهار ایستگاه تحقیقاتی (کرج، مشهد، گرگان و لرستان) در دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۲-۱۴۰۳ مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثر اکوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط معنی‌دار بود. با توجه به نتایج آماره‌های ناپارامتری اکوتیپ‌های ۱۷ (TN-59-248)، ۲ (TN-59-5)، ۲۰ (TN-59-252)، ۱۰ (TN-59-133)، ۱۵ (TN-59-223) و ۲۲ (TN-59-255) به‌عنوان اکوتیپ‌های پایدار و اکوتیپ‌های ۲۷ (TN-82-676)، ۳۳ (TN-82-750) و ۹ (TN-59-118) به‌عنوان اکوتیپ‌های ناپایدار شناسایی شدند. نتایج نشان داد که میانگین عملکرد دانه اکوتیپ‌های سیاه‌دانه ۱۲۲۸ کیلوگرم در هکتار همبستگی مثبت و معنی‌داری با آماره TOP داشت. بر اساس نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، آماره‌های ناپارامتری در سه گروه قرار گرفتند. بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای نیز آماره‌های ناپارامتری در چهار گروه متمایز قرار گرفتند. بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای، اکوتیپ‌های سیاه‌دانه در چهار گروه اصلی و اکوتیپ‌های برتر در یک گروه قرار گرفتند. بر اساس نتایج آماره‌های ناپارامتری، اکوتیپ‌های ۱۰ (TN-59-133) و ۱۷ (TN-59-225) به‌ترتیب با میانگین عملکرد دانه ۱۴۸۴ و ۱۴۶۱ کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد دانه را داشتند و به‌عنوان اکوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار جهت استفاده در برنامه‌های به‌نژادی و معرفی به عنوان رقم مناسب برای کرج، مشهد، گرگان و لرستان و محیط‌های مشابه شناسایی شدند.

واژه‌های کلیدی: برهمکنش اکوتیپ و محیط، تجزیه پایداری، تجزیه خوشه‌ای، تجزیه همبستگی و سیاه‌دانه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۴ این مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی شماره ۰۳۴-۰۳-۱۴۷۰۳۰۵-۰۰۱۱۲۲ مصوب موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر می‌باشد

- ۱- استاد مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران (مکانته کننده، mani.marefatzadeh@gmail.com)
- ۲- کارشناس مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
- ۳- استادیار بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
- ۴- استادیار بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گلستان، ایران
- ۵- استادیار بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، لرستان، ایران



© 2025 The Authors. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.



Evaluation of seed yield stability of black cumin (*Nigella sativa* L.) ecotypes using non-parametric statistics

Fanaei, H.R.¹ , Marefatzadeh-Khameneh, M.² , Kiane freez, M.R.³,
Feazbakhsh, M.T.⁴ and Rafeei, M.⁵

ABSTRACT

Fanaei, H.R., Marefatzadeh-Khameneh, M., Kiane freez, M.R., Feazbakhsh, M.T. and Rafeei, M. 2025. Evaluation of seed yield Stability in black cumin (*Nigella sativa* L.) ecotypes using non-parametric statistics. *Iranian Journal of Crop Sciences*. 27(3): 304-323. (In Persian).

Introduction: Black cumin (*Nigella sativa* L.) is an annual medicinal plant of the Ranunculaceae family, native to the Middle East and the Indian subcontinent, and is widely cultivated in Iran for its valuable oil, protein, alkaloids, and essential oils with proven anti-inflammatory, antibacterial, anticancer, and antioxidant properties. Genotype $\times$ environment (G $\times$ E) interaction is a major challenge in plant breeding because it complicates the identification of high-yielding and yield-stable genotypes. Non-parametric stability methods are particularly useful when data are not normally distributed or when outlier genotypes are present, since they are based on yield ranking rather than distributional assumptions. While non-parametric statistics have been successfully applied in crops such as maize, safflower, lentil, and wheat, few studies have evaluated black cumin germplasm from the National Plant Gene Bank of Iran.

Materials and Methods: In this experiment, 36 black cumin (*Nigella sativa* L.) ecotypes were evaluated using randomized complete block design with three replications across four research stations in Iran (Karaj, Mashhad, Gorgan, and Lorestan) over two growing seasons (2022–23 and 2023–24). Combined analysis of variance was performed to assess the ecotype $\times$ environment interaction (with environment defined as the combination of year and location, i.e., eight environments). Non-parametric stability statistics were calculated including Huhn and Nassar ($S^{(1)}$, $S^{(2)}$, $S^{(3)}$, $S^{(6)}$), Thennarasu ($NP^{(1)}$, $NP^{(2)}$, $NP^{(3)}$, $NP^{(4)}$), Fox (TOP and LOW), and Kang's rank mean (KR). Spearman's rank correlation, principal component analysis, and cluster analysis were used to investigate relationships among the statistics, and all analyses were performed using R 4.4.2 software.

Results: Combined analysis of variance revealed that the main effect of ecotype and ecotype $\times$ environment interaction were significant at the 1% probability level, indicating significant genetic diversity and different responses of ecotypes to environment. The sum of $Z_i^{(1)}$ (56) and $Z_i^{(2)}$ (48.32) values was less than the critical χ^2 value with 35 degrees of freedom, indicating no significant difference among ecotypes. Based on the different non-parametric statistics, ecotypes 10 (TN-59-133), 17 (TN-59-225), and 20 (TN-59-252) were consistently identified as the most high-yielding and yield-stable ecotypes. Mean seed yield had a positive and significant correlation with the TOP statistic and a negative correlation with $S^{(3)}$, $S^{(6)}$, $NP^{(2)}$, $NP^{(3)}$, $NP^{(4)}$, KR, and LOW statistics. Positive and significant correlations were observed among the Huhn and Nassar and Thennarasu statistics. Principal component analysis classified the non-parametric statistics into four distinct groups, explaining

82.4% of the total variance, with $S^{(1)}$, $NP^{(1)}$, and $NP^{(4)}$ in one group and TOP, MID, and yield in another. Cluster analysis of the statistics revealed two main clusters and five sub-clusters, confirming that rank-based statistics provide similar information. Cluster analysis of ecotypes placed the superior ecotypes 10 (TN-59-133), 17 (TN-59-225), and 20 (TN-59-252) in one group. The highest seed yields were recorded for ecotypes 10 (TN-59-133, 1484 kg.ha⁻¹) and 17 (TN-59-225, 1461 kg.ha⁻¹), which also exhibited high yield stability.

Conclusion: The results of the present experiment demonstrated that significant genetic diversity exists among black cumin ecotypes, providing a suitable basis for selection and development of superior cultivars. Non-parametric stability statistics effectively identified high-yielding and yield-stable ecotypes. Ecotypes 10 (TN-59-133), 17 (TN-59-225), and 20 (TN-59-252) showed consistent high yield and yield stability. The significant correlations between the statistics and the results of principal component and cluster analyses confirmed the reliability of the selected ecotypes. Therefore, ecotypes 10 (TN-59-133) and 17 (TN-59-225) were identified as high-yielding and yield-stable ecotypes for utilization in black cumin breeding programs and for release as suitable cultivars for Karaj, Mashhad, Gorgan, and Khorramabad and regions with similar environmental conditions.

Key words: Black cumin, Cluster analysis, Correlation, Ecotype × environment interaction and Stability analysis

Received: February, 2026

Accepted: September, 2026

1. Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran
2. Expert, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran (Corresponding author, ✉ mani.marefatzadeh@gmail.com)
3. Assistant Prof., Field and Horticultural Crops Science Research Department, Razavi Khorasan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Mashhad, Iran
4. Assistant Prof., Field and Horticultural Crops Science Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Golestan, Iran
5. Assistant Prof., Field and Horticultural Crops Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Khoarramabad, Iran



2025© The Authors. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

مقدمه

سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) گیاهی دو لپه، علفی و یکساله از خانواده آلاله است که منشاء آن خاورمیانه (بومی غرب آسیا) و شبه قاره هند گزارش شده است. سیاه‌دانه در استان‌های مختلف ایران از جمله فارس، اصفهان و خراسان کشت می‌شود و در اکثر نقاط کشور مانند اراک، اصفهان، کرمانشاه و در مناطقی از خراسان به‌طور خودرو می‌روید (Ghorbanzadeh Neghab and Zare Mehrjerdi, 2018). دانه سیاه‌دانه حاوی ترکیباتی مانند روغن، پروتئین، آلکالوئیدها، فلاونوئیدها، ساپونین و اسانس است. در زمینه خواص درمانی سیاه‌دانه تحقیقات وسیعی صورت انجام شده و اثرات ضد نفخ، ضد صرع، ضد انگل، ضد ویروس باکتری، ضد سرطان، کاهش‌دهنده قند خون، مسکن، شل‌کننده عضلات، شیرآوری، و بهبود سیستم ایمنی آن گزارش شده است. از روغن دانه سیاه‌دانه برای تغذیه انسان و طیور و از دانه‌های آن به‌عنوان ادویه در انواع شیرینی‌ها، شربت‌ها و نوشابه‌ها استفاده می‌شود (Minooeian Haghighi and Khosravi, 2014).

سیاه‌دانه یکی از ذخایر ژنتیکی گیاهی مهم و با ارزش کشور بوده و از تنوع ژنتیکی بالایی برخوردار است. این تنوع منبع مناسبی برای فعالیت‌های به‌نژادی جهت بهبود صفات کمی و کیفی با هدف افزایش عملکرد دانه و روغن و دستیابی به ژنوتیپ‌های زودرس، دارای زیست‌توده و ارتفاع بوته مناسب برای برداشت ماشینی و اجزای عملکرد بالا محسوب می‌شود. عملکرد یک صفت پیچیده و متأثر از عوامل محیطی، ژنوتیپ و برهمکنش آن‌ها است و از مکانی به مکان دیگر متغیر بوده و امکان انتخاب بر اساس عملکرد در یک محیط، معیار مناسبی محسوب نمی‌شود و به همین دلیل ژنوتیپ‌ها باید در دامنه وسیعی از اقلیم‌های مختلف کشت و مورد ارزیابی قرار بگیرند تا ضمن دارا بودن عملکرد قابل قبول، پایداری عملکرد آنها در شرایط مختلف اکولوژیکی ثابت شود (Ghorbanzadeh Neghab and Zare Mehrjerdi, 2018).

Mehrjerdi, 2018). در این راستا به‌نژادگران گیاهی به دنبال ژنوتیپ‌هایی با عملکرد پایدار در محیط‌های مختلف هستند (Shobeiri et al., 2025). اگر چه از گذشته تا کنون از روش‌های مختلفی برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر استفاده شده است، ولی موفق‌ترین روش انتخاب زمانی است که اثر محیط یا برهمکنش ژنوتیپ و محیط در حداقل و کنترل ژنتیکی صفت بالا باشد (Pawar and Singh, 2010). برای ارزیابی پایداری صفات آماره‌های متعددی پیشنهاد شده است که شامل روش‌های تک متغیره، چند متغیره، پارامتری و ناپارامتری می‌شوند (Mohammadi et al., 2012). روش آماری ناپارامتری به دلیل اینکه تحت تاثیر خطا و داده‌های پرت قرار نمی‌گیرد، در مواردی که داده‌ها نرمال نباشند و یا واریانس خطاهای آزمایشی یکنواخت نباشد و حذف یا اضافه کردن ژنوتیپ‌ها اثری بر شاخص پایداری نداشته باشد، از مقبولیت و کاربرد بیشتری برخوردار هستند (Barati et al., 2018). روش‌های ناپارامتری متعددی برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار پیشنهاد شده است که اغلب بر مبنای رتبه عملکرد آنها استوار است. بر اساس این روش‌ها ژنوتیپ‌هایی پایدار هستند که رتبه آن‌ها در محیط‌های مختلف دارای کمترین تغییرات یا بدون تغییر باشند. از پرکاربردترین روش‌های ناپارامتری می‌توان آماره‌های هان و نصار برای برآورد برهمکنش اکوتیپ و محیط و پایداری فنوتیپی، آماره‌های تنارازو بر مبنای رتبه‌های تصحیح شده، آماره میانگین رتبه بر اساس آماره کانگ از میانگین عملکرد و واریانس پایداری شوکلا، آماره‌های پایداری فاکس و کتاتا را نام برد (Akbari et al., 2021).

از روش‌های ناپارامتری در تحقیقات متعددی از جمله در ذرت (Rezvani et al., 2023)، گلرنگ (Taherian et al., 2018) و گندم (Badri et al., 2020) استفاده شده است. مبصر و همکاران (Mobasser et al., 2020) در ارزیابی ۱۴ ژنوتیپ ذرت در هشت محیط گزارش کردند که هیبریدهای مورد بررسی علاوه بر

تکرار اجرا شد. بذر هر اکوتیپ روی دو پشته، در هر پشته دو ردیف کاشت (جمعا چهار ردیف) به طول دو متر، فاصله بین ردیف‌ها ۳۰ سانتی متر و در زمان مناسب هر منطقه (اسفند ماه در کرج و لرستان، آبان ماه در گرگان و آذر ماه در مشهد) کاشته شدند. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت بذرها انجام شد و برای سهولت در سبز شدن بذرها، آبیاری‌های بعدی ۳ تا ۵ روز یک‌بار تا زمان استقرار کامل گیاهچه‌ها انجام شد. آبیاری در هر منطقه بر اساس شرایط آب و هوایی محل انجام شد.

تجزیه واریانس مرکب انجام و معنی‌دار بودن برهمکنش اکوتیپ و محیط (محیط به ترکیب سال و مکان یعنی هشت محیط اشاره دارد) بررسی شد. برآورد پایداری با روش‌های ناپارامتری نیازی به توزیع نرمال و یکنواختی واریانس‌ها ندارد و بر مبنای رتبه‌بندی اکوتیپ‌ها انجام می‌شود. در آزمایش حاضر از روش‌های ناپارامتری برای بررسی برهمکنش اکوتیپ و محیط استفاده شد. آماره‌های پایداری ناپارامتری هان و نصار ($S_i^{(1)}$ ، $S_i^{(2)}$ ، $S_i^{(3)}$ و $S_i^{(6)}$) بر اساس رتبه عملکرد در هر محیط با استفاده از روش‌های زیر محاسبه شدند (Nassar and Huhn, 1987):

$$S_i^{(1)} = 2 \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{j'=j+1}^m |r_{ij} - r_{ij'}| / [m(m-1)] \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$S_i^{(2)} = \sum_{j=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_i)^2 / (m-1) \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$S_i^{(3)} = \sum_{j=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_i)^2 / \bar{r}_i \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$S_i^{(6)} = \sum_{j=1}^m |r_{ij} - \bar{r}_i| / \bar{r}_i \quad (\text{رابطه ۴})$$

r_{ij} رتبه اکوتیپ i ام در محیط j ام، $\bar{r}_i$ میانگین رتبه‌های اکوتیپ i ام در تمام محیط‌ها، e تعداد محیط‌های مورد ارزیابی هستند. $S_i^{(1)}$ میانگین اختلاف رتبه‌ها را در تمام محیط‌ها محاسبه می‌کند و $S_i^{(2)}$ واریانس عمومی رتبه‌ها است. برای محاسبه آماره‌های تنارازو و جهت حذف اثر اکوتیپی عملکرد از پایداری عملکرد اکوتیپ‌ها از رابطه ۵ استفاده شد. رتبه اکوتیپ‌ها بر اساس مقادیر تصحیح شده و مطابق با عملکرد تصحیح شده x_{ij}^* تعیین شد

عملکرد بالاتر نسبت به ارقام شاهد، از پایداری عملکرد مناسبی نیز برخوردار بودند. قنبری و همکاران (Ghanbari et al., 2017) پایداری و سازگاری اکوتیپ‌های زیره سبز را بر مبنای برهمکنش اکوتیپ و تاریخ کاشت مورد ارزیابی قرار داده و گزارش کردند که بر اساس روش‌های ناپارامتری میانگین رتبه، انحراف معیار رتبه و نسبت شاخص عملکرد، اکوتیپ‌های کرمان و خراسان شمالی به عنوان اکوتیپ‌های پایدار شناخته شدند. حسن‌زاده و همکاران (Hasanzadeh et al., 2020) با ارزیابی عملکرد دانه ژنوتیپ‌های سیاه‌دانه در شرایط مختلف محیطی با استفاده از پارامترهای پایداری، ژنوتیپ‌های ۸، ۹ و ۱۰ را پیشنهاد کردند.

علی‌رغم وجود غنای ژنتیکی بالای سیاه‌دانه در کشور، تا کنون تحقیقات به‌نژادی چندانی در ارتباط با این گیاه ارزشمند در راستای افزایش عملکرد و معرفی ژنوتیپ‌های پر محصول انجام نشده است. در اکثر مناطق کشور برای زراعت سیاه‌دانه از ارقام وارداتی سایر کشورها به خصوص هندوستان استفاده می‌شود. آزمایش حاضر به منظور ارزیابی کارایی روش‌های تجزیه پایداری ناپارامتری، ارزیابی پایداری عملکرد دانه اکوتیپ‌های منتخب از ژرم‌پلاس سیاه‌دانه بانک ژن گیاهی ملی ایران و شناسایی اکوتیپ‌هایی با عملکرد بالا و پایدار در مناطق مختلف کشور اجرا شد.

مواد و روش‌ها

در این آزمایش پایداری عملکرد دانه ۳۶ اکوتیپ سیاه‌دانه مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۱). اکوتیپ‌های مورد ارزیابی بخشی از ژرم‌پلاس سیاه‌دانه بانک ژن گیاهی ملی ایران هستند که از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شدند. آزمایش حاضر در چهار ایستگاه تحقیقاتی کرج، مشهد، گرگان (گلستان) و لرستان (خرم‌آباد) در دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۲-۱۴۰۳ اجرا شد (جدول ۲). آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه

جدول ۱- مشخصات اکوتیپ‌های سیاه‌دانه مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Characteristics of black cumin ecotypes used in the experiment

شماره No.	کد Code	منشاء Source	شماره No.	کد Code	منشاء Source
1	TN-82-785	Zabol	19	TN-59-249	Khorasan
2	TN-59-5	Sistan	20	TN-59-252	Kurdistan
3	TN-59-6	Sistan	21	TN-59-253	Kurdistan
4	TN-82-788	Zabol	22	TN-59-255	Kurdistan
5	TN-59-48	Yazd	23	TN-82-258	Kurdistan
6	TN-59-50	Fars	24	TN-59-261	Kurdistan
7	TN-59-79	Isfahan	25	TN-82-501	Hamedan
8	TN-59-117	Isfahan	26	TN-82-576	Isfahan
9	TN-59-118	Kerman	27	TN-82-676	-
10	TN-59-133	Khorasan	28	TN-82-677	-
11	TN-59-134	Khorasan	29	TN-82-691	Zabol
12	TN-59-152	Yazd	30	TN-82-745	Golestan
13	TN-59-187	Khorasan	31	TN-82-747	Golestan
14	TN-82-191	Isfahan	32	TN-82-748	Khorasan razavi
15	TN-59-223	Kurdistan	33	TN-82-750	Khorasan razavi
16	TN-59-224	Kurdistan	34	TN-82-751	Khorasan razavi
17	TN-59-225	Kurdistan	35	IPK-6	Uzbekistan
18	TN-59-248	Hamedan	36	IPK-12	Ethiopia

جدول ۲- اطلاعات هواشناسی ایستگاه‌های محل اجرای آزمایش (۱۴۰۱-۰۲ و ۱۴۰۲-۰۳)

Table 2. Meteorological information of the experiment site (2022-2023 and 2023-2024)

		دما (°C) Temperature								بارندگی (mm) Precipitation							
		2022-2023				2023-2024				2022-2023				2023-2024			
		۱۴۰۲-۱۴۰۱				۱۴۰۳-۱۴۰۲				۱۴۰۲-۱۴۰۱				۱۴۰۳-۱۴۰۲			
		کرج	مشهد	گرگان	لرستان	کرج	مشهد	گرگان	لرستان	کرج	مشهد	گرگان	لرستان	کرج	مشهد	گرگان	لرستان
		Karaj	Mashhad	Gorgan	Lorestan	Karaj	Mashhad	Gorgan	Lorestan	Karaj	Mashhad	Gorgan	Lorestan	Karaj	Mashhad	Gorgan	Lorestan
Nov.	آبان	15.0	10.8	23.2	15.3	15.0	14.0	25.7	15.3	9.6	0.1	45.1	71.1	25.6	4.0	49.8	45.8
Dec.	آذر	7.0	8.6	16.5	10.0	10.0	10.0	17.5	9.6	20.7	6.1	49.0	38.8	8.59	8.4	48.3	29.2
Jan.	دی	4.0	0.2	14.5	5.9	8.0	7.2	17.5	7.9	16.4	12	44.2	55.2	53.8	19.6	43.8	43.0
Feb.	بهمن	6.0	6.2	13.2	5.5	6.0	5.4	15.2	7.4	13.8	5.3	62.0	92.7	65.4	37.5	75.0	99.6
Mar.	اسفند	16.0	15.0	14.5	11.8	12.0	10.9	13.8	8.7	105	20.4	52.0	65.8	58.4	30.2	43.9	67.8
Apr.	فروردین	21.0	18.8	18.9	12.9	20.0	15.8	20.9	14.1	32.1	19.3	25.2	123.9	41.8	41.0	19.4	94.6
May	اردیبهشت	27.0	22.6	25.5	18.1	24.0	19.3	26.1	18.3	11.2	0.0	54.0	21.6	68.8	91.0	66.3	108.0
Jun	خرداد	33.0	28.4	31.9	24.9	31.0	26.9	32.9	26.4	41.2	17.5	19.2	3.6	26.7	18.5	9.5	0.4

ناپارامتری مورد مطالعه، رسم شدند. از نرم‌افزار R 4.4.2 برای انجام تجزیه‌ها و رسم نمودارها استفاده شد.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه ۳۶ اکوتیپ سیاه‌دانه، اثر اصلی اکوتیپ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود که نشان دهنده وجود تنوع ژنتیکی قابل توجه بین اکوتیپ‌ها برای انتخاب و گزینش ارقام برتر است. اثر اصلی محیط نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود که نشان می‌دهد میانگین کلی عملکرد در سال‌ها و مکان‌های مختلف تفاوت آماری معنی‌داری داشتند. برهمکنش اکوتیپ و محیط نیز معنی‌دار بود که نشان دهنده تاثیر بالای شرایط خاص هر محیط (سال و مکان) بر عملکرد اکوتیپ‌های سیاه‌دانه است. به عبارت دیگر، واکنش اکوتیپ‌ها به مکان‌های مختلف، در سال‌های متفاوت، یکسان نبوده و این موضوع باعث نوسان عملکرد آنها در محیط‌های مختلف می‌شود. بر این اساس لازم است انتخاب اکوتیپ‌ها با در نظر گرفتن سازگاری خاص آنها با شرایط محیط هدف انجام گیرد و برای دستیابی به پایداری عملکرد در گستره وسیعی از محیط‌ها، لازم است اکوتیپ‌ها از نظر سازگاری عمومی و خصوصی مورد ارزیابی دقیق‌تری قرار گیرند. در بسیاری از پژوهش‌ها اثر محیط بسیار بزرگ گزارش شده است که در این موارد بهتر است اثر محیط حذف و بیشتر بر اثر اکوتیپ و برهمکنش اکوتیپ و محیط تمرکز شود. در تطابق با نتایج به دست آمده، کریمی‌زاده و همکاران (Karimizadeh *et al.*, 2021) نیز معنی‌داری برهمکنش ژنوتیپ و محیط را گزارش کرده‌اند.

برای مقایسه کارآیی روش‌های ناپارامتری در گزینش اکوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار و همچنین انتخاب مناسب‌ترین روش‌ها، از آماره‌های ناپارامتری مختلفی استفاده شد که نتایج حاصل از این روش‌ها برای اکوتیپ‌های سیاه‌دانه مورد مطالعه در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. برای محاسبه آماره پایداری S_i در اکوتیپ‌های

(Thennarasu, 1995). آماره‌های $NP_i^{(1)}$ ، $NP_i^{(2)}$ ، $NP_i^{(3)}$ و

$NP_i^{(4)}$ نیز با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه شدند:

$$(x_{ij}^* = x_{ij} - \bar{x}_i - \bar{x}_{..}) \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$NP_i^{(1)} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |r_{ij}^* - M_{di}^*| \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$NP_i^{(2)} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |r_{ij}^* - M_{ij}^*| / M_{di} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$NP_i^{(3)} = \frac{\sqrt{\sum (r_{ij}^* - \bar{r}_i)^2 / m}}{\bar{r}_i} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$NP_i^{(4)} = \frac{2}{m(m-1)} [\sum_{j=1}^{m-1} \sum_{j'=j-1}^m |r_{ij}^* - r_{ij'}^*| / \bar{r}_i] \quad (\text{رابطه ۹})$$

به ترتیب میانگین و میانه رتبه‌ها برای $NP_i^{(1)}$ و $NP_i^{(2)}$ به ترتیب میانگین و میانه M_{di}^* و $\bar{r}_i$ تصحیح شده و $\bar{r}_i$ میانگین و میانه M_{di} رتبه‌های داده‌های تصحیح نشده هستند. از آماره‌های ناپارامتری فاکس (LOW، MID، TOP) نیز برای شناسایی اکوتیپ‌های پایدار استفاده شد. آماره TOP، MID و LOW به ترتیب نسبت تعداد محیط‌هایی را نشان می‌دهند که یک ژنوتیپ در یک سوم بالایی و پایینی رتبه‌بندی عملکرد قرار می‌گیرد (Fox *et al.*, 1990). آماره پایداری مجموع رتبه (KR) یک معیار جهت تعیین پایداری اکوتیپ‌ها توسط کانگ ارائه شده است (Kang, 1993; Ketata *et al.*, 1989). رسم نمودار حرارتی ضرایب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن و ارزیابی میزان همبستگی میان آماره‌های ناپارامتری با استفاده از نرم‌افزار R انجام شد. بر اساس ضریب همبستگی اسپیرمن، ابتدا مشاهدات و داده‌های آماری مرتب و رتبه‌بندی شدند و تفاوت بین رتبه‌های هر جفت از مشاهدات محاسبه و با d_i نشان داده شد. شاخص r_s با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{(n-1)n(n+1)} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

ضریب همبستگی رتبه اسپیرمن و n تعداد جفت مشاهدات هستند. ضریب r_s با t جدول با درجه آزادی $n-2$ مقایسه می‌شود. برای درک بهتر روابط بین آماره‌های ناپارامتری استفاده شده در تحقیق، از تجزیه به مؤلفه اصلی و تجزیه خوشه‌ای استفاده شد و بای‌پلات‌های میانگین عملکرد در مقابل آماره‌های

سیاه‌دانه، مقادیر $Z_i^{(1)}$ و $Z_i^{(2)}$ به صورت انفرادی برای هر اکوتیپ پیشنهاد شده است (Nassar and Huhn, 1987). بر اساس رتبه داده‌های تصحیح شده برای کلیه اکوتیپ‌های سیاه‌دانه مقادیر $Z_i^{(1)}$ و $Z_i^{(2)}$ محاسبه و روی کلیه اکوتیپ‌ها برای آزمون χ^2 جمع زده شدند. مجموع مقادیر Z_i ها ($\sum Z_i^{(1)} = 56$ و $\sum Z_i^{(2)} = 48.32$) کمتر از مقدار بحرانی χ^2 با درجه آزادی ۳۵ بود و این موضوع نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار بین اکوتیپ‌های سیاه‌دانه است. در سایر پژوهش‌ها نیز برهمکنش ژنوتیپ و محیط برای عملکرد ژنوتیپ‌های عدس بررسی و با استفاده از مجموع مقادیر Z_i ها عدم تفاوت معنی دار بین ژنوتیپ‌های عدس گزارش شده است (Akbari et al., 2021).

اکوتیپ‌هایی با کم‌ترین مقدار آماره‌های ناپارامتری هان و لئون به عنوان اکوتیپ‌های پایدار در نظر گرفته می‌شوند (Huhn and Leon, 1995). بر اساس آماره $S_i^{(1)}$ اکوتیپ‌های ۱۷، ۲۰، ۳۱، ۱۰ و ۲ بر اساس آماره $S_i^{(2)}$ اکوتیپ‌های ۱۷، ۲۰، ۳۱، ۲ و ۱ پایدارترین عملکرد دانه را داشتند. با این حال، اکوتیپ‌های ۱۰، ۲۰ و ۱۷ بیشترین میانگین عملکرد را در بین ۳۶ اکوتیپ سیاه‌دانه داشتند و به عنوان اکوتیپ‌های برتر با عملکرد بالا شناسایی شدند. با توجه به هر دو آماره $S_i^{(1)}$ و $S_i^{(2)}$ اکوتیپ‌های ۲۷، ۲۶، ۱۳، ۹ و ۵ به عنوان ناپایدارترین اکوتیپ‌ها شناخته شدند و این در صورتی است که اکوتیپ ۲۶ میانگین عملکرد بالایی را داشت. صارمی‌راد و طالقانی (Saremirad and Taleghani, 2022) نیز در پژوهش خود برای بررسی پایداری ۱۵۵ هیبرید چغندر قند در هفت منطقه از آماره‌های $S_i^{(1)}$ و $S_i^{(2)}$ استفاده کرده و هیبریدهای پایدار را شناسایی کردند.

بر اساس نتایج آماره‌های پایداری ناپارامتری $S_i^{(3)}$ و $S_i^{(6)}$ که مقادیر کمتر آن‌ها نشان دهنده پایداری بیشتر است، پایدارترین اکوتیپ‌ها از نظر $S_i^{(3)}$ به ترتیب ۱۷، ۲۰، ۲۰، ۱۰ و ۲۲ و از نظر $S_i^{(6)}$ به ترتیب ۱۷، ۱۰، ۲۰، ۲ و ۱۵ بودند. در مقابل، ناپایدارترین اکوتیپ‌ها بر اساس آماره $S_i^{(3)}$ شامل ۹، ۲۷، ۳۳، ۵ و ۳۴ و بر اساس آماره

$S_i^{(6)}$ شامل ۹، ۳۳، ۲۷، ۳۴ و ۵ بودند، هر چند که اکوتیپ ۳۴ میانگین عملکرد بالایی داشت. با توجه به اشتراک نتایج هر دو آماره، اکوتیپ‌های ۱۷، ۲۰، ۲ و ۱۰ به عنوان اکوتیپ‌های پایدار شناخته شدند. اکوتیپ‌های ۱۷، ۲۰ و ۱۰ از پایداری بسیار بالایی برخوردار بودند و همچنین عملکرد دانه بالایی داشتند که به همین دلیل از اکوتیپ‌های قابل توصیه محسوب می‌شوند. در مقابل، اکوتیپ ۲ میانگین عملکرد دانه پایین‌تری نسبت به میانگین عملکرد کل داشت. اکوتیپ ۵ بر اساس $S_i^{(3)}$ و $S_i^{(6)}$ از جمله اکوتیپ‌های ناپایدار بود و برای کشت در محیط‌های مختلف توصیه نمی‌شود. اکوتیپ ۲۲ از پایداری مطلوب $S_i^{(3)}$ و $S_i^{(6)}$ برخوردار بود و با داشتن عملکرد بالا جزء اکوتیپ‌های برتر قرار گرفت. در مجموع، اکوتیپ ۱۷ به عنوان پایدارترین اکوتیپ با عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل برای شرایط نامساعد و مساعد محیطی قابل توصیه است (جداول ۳ و ۴). صفوی و همکاران (Safavi et al., 2025) در یک آزمایش با استفاده از آماره‌های $S_i^{(3)}$ و $S_i^{(6)}$ پایداری ۲۱ اکوتیپ یولاف را در ۱۶ محیط بررسی و ژنوتیپ‌های برتر را معرفی کردند. این نتایج با یافته‌های تحقیقات پیشین مطابقت دارد که نشان می‌دهد روش‌های ناپارامتری نصار و هان می‌توانند پایداری اکوتیپ‌ها را به طور مؤثری در محیط‌های مختلف ارزیابی کنند (Desheva and Valchinova, 2024).

بر اساس آماره‌های ناپارامتری تنارازو، اکوتیپ‌هایی با کمترین مقدار هر آماره به عنوان پایدارترین اکوتیپ‌ها در نظر گرفته شدند. با توجه به آماره $NP_1^{(1)}$ ، اکوتیپ‌های ۱۷، ۲۰، ۱۰، ۲ و ۳ پایدارترین اکوتیپ‌ها بودند. از میان آن‌ها، دو اکوتیپ ۲ و ۳ عملکردی پایین‌تر از میانگین کل (۱۲۲۸ کیلوگرم در هکتار) داشتند و از فهرست اکوتیپ‌های پایدار قابل توصیه حذف شدند. در مقابل، اکوتیپ‌های ۱۷، ۲۰ و ۱۰ از عملکرد بالاتری نسبت به میانگین برخوردار بودند. بر اساس این آماره، اکوتیپ‌های ۹، ۲۷، ۳۲، ۳۳ و ۲

ناپایدار گزینۀ مناسبی باشند (Khazaei *et al.*, 2021). بر اساس آماره‌های پایداری ناپارامتری فاکس، اکوتیپ‌هایی که درصد TOP بالاتر و درصد LOW پایین‌تر داشته باشند، به‌عنوان اکوتیپ‌های با سازگاری بالا به محیط در نظر گرفته می‌شوند. محققان از روش‌های ناپارامتری تنارازو و شاخص فاکس برای انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار در گیاهان مختلف، از جمله یولاف، استفاده نموده و تاکید کرده‌اند که این روش‌ها می‌توانند به عنوان جایگزین مناسبی برای روش‌های پارامتری در نظر گرفته شوند (Amini *et al.*, 2021; Saremirad and Taleghani, 2022). در آزمایش حاضر اکوتیپ ۱۷ که دومین اکوتیپ برتر از نظر عملکرد دانه بود، با دارا بودن بیشترین مقدار آماره TOP (عملکرد در یک سوم بالایی) ضعیف‌ترین توده بود که تنها در یک محیط برتری داشته است. از سوی دیگر اکوتیپ‌های ۱، ۲، ۴ و ۸ با بیشترین مقدار این آماره جزء برترین توده‌ها از نظر سازگاری عمومی بالا و پایداری دینامیک در اکثر محیط‌ها شناخته شدند. برای بررسی عملکرد در یک سوم میانی (پایداری ایستا) از آماره MID استفاده و مشاهده شد که شدیدترین نوسان عملکردی مربوط به اکوتیپ‌های ۳۱، ۳۳، ۳۴ و ۳۵ با کمترین مقدار این پارامتر بود. در این میان، اکوتیپ شماره ۱۷ با وجود بالاترین مقدار آماره MID (برابر با ۱۰۰) و پایداری ایستای عالی، از سازگاری عمومی پایینی برخوردار بود (TOP=2.78، رتبه ۱) و بر این اساس این اکوتیپ یک نمونه بسیار پایدار اما نه همیشه پرمحصول شناخته شد که عملکرد دانه آن در کلیه محیط‌ها متوسط و یکنواخت بوده است.

از نظر آماره KR، اکوتیپ‌های ۱۷، ۲۰، ۱، ۱۵ و ۲۲ کمترین مقادیر را داشته و پایدارترین اکوتیپ‌ها شناخته شدند. کلیه این اکوتیپ‌ها میانگین عملکردی بالاتر از میانگین کل داشتند. در مجموع، اکوتیپ‌های ۱۷ و ۱۰ در هر سه آماره (TOP بالا، LOW پایین و KR پایین) وضعیت مناسبی داشته و با دارا بودن عملکرد بالاتر از میانگین،

به‌عنوان ناپایدارترین اکوتیپ‌ها شناسایی شدند که از این میان دو اکوتیپ ۵ و ۳۳ عملکردی پایین‌تر و اکوتیپ ۳۲ عملکردی بالاتر از میانگین کل داشتند.

بر اساس آماره $NP_1^{(2)}$ ، اکوتیپ‌های ۲۰، ۲، ۱۵، ۳۰ و ۱۶ پایدارترین اکوتیپ‌ها بودند. از این میان، اکوتیپ ۲ با عملکردی پایین‌تر از میانگین کل حذف شد. چهار اکوتیپ ۲۰، ۱۵، ۳۰ و ۱۶ نیز عملکردی بالاتر از میانگین کل داشتند. اکوتیپ‌های ۱، ۹، ۳۳، ۳۱ و ۳۴ به‌عنوان ناپایدارترین اکوتیپ‌ها شناسایی شدند، زیرا همگی عملکردی پایین‌تر از میانگین کل داشتند. با استفاده از آماره $NP_1^{(3)}$ ، اکوتیپ‌های ۱۰، ۱۵، ۱۷، ۲۰ و ۲۲ با عملکردی بالاتر از میانگین کل، پایدارترین اکوتیپ‌ها بودند. اکوتیپ‌های ۱، ۳۳، ۹، ۷ و ۳۱ ناپایدارترین اکوتیپ‌ها بودند که همگی عملکردی پایین‌تر از میانگین داشتند.

با توجه به آماره $NP_1^{(4)}$ ، اکوتیپ‌های ۱۰، ۱۵، ۱۷، ۲۰ و ۲۲ پایدارترین اکوتیپ‌ها بودند و کلیه آنها عملکردی بالاتر از میانگین کل داشتند. اکوتیپ‌های ۹، ۳۳، ۲۷، ۳۴ و ۱ به‌عنوان ناپایدارترین اکوتیپ‌ها شناخته شدند که عملکرد همه آنها پایین‌تر از میانگین بود. بررسی پایداری اکوتیپ‌ها نشان داد که دو آماره $NP_1^{(3)}$ و $NP_1^{(4)}$ از نظر شناسایی اکوتیپ‌های پایدار نتایج نسبتاً مشابهی داشتند. در مجموع، بر اساس آماره‌های $NP_1^{(1)}$ ، $NP_1^{(3)}$ و $NP_1^{(4)}$ اکوتیپ‌های ۱۰، ۱۷ و ۲۰ به‌طور مشترک به‌عنوان اکوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالاتر از میانگین کل شناسایی شدند. هم‌چنین اکوتیپ ۱۵ در دو آماره $NP_1^{(2)}$ و $NP_1^{(3)}$ و ۲۲ در دو آماره $NP_1^{(3)}$ و $NP_1^{(4)}$ به‌عنوان اکوتیپ پایدار با عملکرد بالا شناخته شد. این اکوتیپ‌ها می‌توانند به‌عنوان اکوتیپ‌های برتر از نظر پایداری و عملکرد مناسب در برنامه‌های به‌نژادی و توصیه ارقام مورد توجه قرار گیرند. این یافته‌ها با مطالعات قبلی مطابقت دارد و نشان می‌دهد که اکوتیپ‌های پایدار ممکن است در عملکرد دانه کل رتبه بالایی نداشته باشند، اما برای شرایط محیطی

جدول ۳- برآورد آماره‌های پایداری ناپارامتری و آزمون معنی‌داری ($Z_i^{(1)}$ و $Z_i^{(2)}$) برای ۳۶ اکوتیپ سیاهدانه

Table 3. Non-parametric stability parameters for yield and tests of non-parametric stability procedures ($Z_i^{(1)}$ and $Z_i^{(2)}$) for 36 black cumin ecotypes

اکوتیپ‌های سیاهدانه Black cumin ecotypes	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha ⁻¹)	$S_i^{(1)}$	$Z_i^{(1)}$	$S_i^{(2)}$	$Z_i^{(2)}$	$S_i^{(3)}$	$S_i^{(6)}$	$NP_i^{(1)}$	$NP_i^{(2)}$	$NP_i^{(3)}$	$NP_i^{(6)}$	TOP	MID	LOW	KR
1	1010m	7.1	4.16	36.3	3.25	31.7	4.75	7.8	1.84	1.13	0.89	94.4	2.7	5.5	42
2	1221di	7.1	4.22	35.3	3.34	14.4	2.05	5.2	0.27	0.40	0.41	100.0	5.5	2.7	23
3	1216ei	8.5	2.07	52.2	1.96	21.8	2.62	6.2	0.35	0.46	0.51	33.3	36.1	33.3	26
4	1289ch	9.3	1.22	61.4	1.36	20.9	2.58	7.2	0.44	0.41	0.45	94.4	2.7	5.5	19
5	1178gk	14.3	1.02	150	1.14	62.3	5.05	11.0	0.51	0.74	0.85	72.2	16.6	13.8	56
6	1273ch	12.5	0.05	110	0.002	39.3	3.23	8.3	0.41	0.53	0.64	33.3	55.5	13.8	45
7	1078klm	11.3	0.07	94.8	0.10	52.5	4.83	9.1	0.88	0.85	0.89	72.2	16.6	13.8	64
8	1205fi	12.5	0.04	106	0.001	42.5	3.82	10.6	0.43	0.68	0.71	91.6	11.1	11.1	44
9	1088jm	14.5	1.11	157	1.53	86.2	6.70	12.7	1.66	1.04	1.13	33.3	36.1	33.3	64
10	1484a	7.0	4.41	65.9	1.11	15.0	1.28	5.1	0.38	0.23	0.22	72.2	16.6	13.8	10
11	1250di	13.2	0.28	122.0	0.13	45.4	3.88	9.8	0.42	0.59	0.70	33.3	36.1	33.3	38
12	1259ci	11.9	0.0001	99.0	0.05	36.7	3.21	8.7	0.45	0.54	0.63	33.3	36.1	33.3	30
13	1226di	15.2	1.88	165.0	2.09	56.1	4.25	11.0	0.41	0.62	0.73	16.6	13.8	72.2	52
14	1193fj	8.9	1.66	55.4	1.75	24.6	3.17	7.8	0.46	0.57	0.56	33.3	36.1	33.3	37
15	1298cg	9.2	1.29	61.7	1.35	18.7	2.17	6.7	0.29	0.34	0.40	33.3	36.1	33.3	11
16	1259ci	10.7	0.28	78.8	0.53	27.9	2.96	8.7	0.33	0.47	0.54	72.2	16.6	13.8	22
17	1461ab	5.07	8.47	17.9	5.13	4.01	0.83	3.7	0.37	0.15	0.16	2.7	100.0	100.0	3
18	1228di	12.7	0.09	115.0	0.03	44.2	3.39	8.3	0.44	0.57	0.69	33.3	36.1	33.3	40
19	1256di	11.2	0.095	87.8	0.25	30.9	2.98	8.2	0.38	0.47	0.56	72.2	16.6	13.8	27
20	1339cd	6.3	5.69	28.3	4.02	8.37	1.48	5.0	0.25	0.24	0.26	16.6	13.8	72.2	6
21	1171hk	11.6	0.02	101.0	0.03	43.7	4.03	9.3	0.42	0.67	0.71	16.6	13.8	72.2	49
22	1313cf	8.5	2.07	52.5	1.94	16.5	2.18	6.6	0.43	0.36	0.38	33.3	36.1	33.3	13
23	1176hk	13.6	0.48	133.0	0.38	50.8	4.19	9.7	0.62	0.63	0.74	16.6	13.8	72.2	61
24	1239di	12.0	0.0004	102.0	0.02	37.7	3.56	9.0	0.37	0.54	0.63	33.3	36.1	33.3	31
25	1208ei	13.6	0.46	131.0	0.32	55.8	4.50	9.8	0.65	0.66	0.83	16.6	13.8	72.2	39
26	1326cde	15.8	2.64	188.0	4.03	58.4	4.13	10.6	0.40	0.52	0.70	72.2	16.6	13.8	29
27	1214ei	16.1	3.05	191.0	4.32	79.6	5.85	12.5	0.90	0.78	0.96	33.3	36.1	33.3	51
28	1256di	13.7	0.54	133.0	0.4	46.9	3.86	9.7	0.56	0.58	0.69	33.3	36.1	33.3	40
29	1176hk	8.9	1.66	57.7	1.59	26.0	3.35	8.3	0.50	0.57	0.57	72.2	16.6	13.8	36
30	1292ch	13.2	0.29	135.0	0.45	40.5	3.16	8.87	0.33	0.45	0.57	33.3	36.1	33.3	34
31	1061lm	6.92	4.53	34.2	3.44	23.3	3.51	6.5	1.13	0.85	0.67	11.1	2.7	88.8	48
32	1372bc	12.1	0.004	106.0	0.002	31.5	3.06	12.0	0.52	0.54	0.51	16.6	13.8	72.2	24
33	1039lm	12.9	0.15	131.0	0.34	78.2	5.95	11.0	1.36	1.06	1.10	11.1	2.7	88.8	71
34	1140il	12.7	0.09	117.0	0.05	58.7	5.14	9.1	0.92	0.81	0.90	5.5	2.7	94.4	59
35	1174hk	9.6	1.006	63.3	1.26	26.2	3.03	7.7	0.42	0.54	0.56	5.5	2.7	94.4	46
36	1234di	14.2	0.90	139.0	0.62	56.1	4.31	9.8	0.56	0.68	0.82	16.6	13.8	72.2	42
Mean	1228	11.2		97.6											
		$\Sigma Z_i^{(1)}=56$		$\Sigma Z_i^{(2)}=48.32$											
		$VarSi^{(1)}=8.50$		$VarSi^{(2)}=2077.03$		$\chi^2_{Z1,Z2}=18.31$		$\chi^2_{sum}=49.80$							

$S_i^{(1)}$, $S_i^{(2)}$, $S_i^{(3)}$ و $S_i^{(6)}$: آماره‌های هان نصار و هان، $NP_i^{(1)}$ ، $NP_i^{(2)}$ ، $NP_i^{(3)}$ و $NP_i^{(4)}$: آماره‌های تنارازو، LOW و TOP: آماره‌های فاکس، KR: میانگین رتبه کتاتا، Mean: میانگین کل، $VarSi^{(1)}$: واریانس آماره $S_i^{(1)}$ ، $VarSi^{(2)}$: واریانس $S_i^{(2)}$. $\Sigma Z_i^{(1)}$: مجموع مقادیر $Z_i^{(1)}$ ، $\Sigma Z_i^{(2)}$: مجموع مقادیر $Z_i^{(2)}$ ؛ $\chi^2_{Z1,Z2}$: کای اسکور جدول بر اساس $Z_i^{(1)}$ و $Z_i^{(2)}$ ؛ χ^2_{sum} : کای اسکور جدول. حروف مقایسه میانگین بر اساس حرف اول و آخر خلاصه شده است. $S_i^{(1)}$ ، $S_i^{(2)}$ ، $S_i^{(3)}$ و $S_i^{(6)}$: (Nassar and Huhn, 1987); $NP_i^{(1)}$ ، $NP_i^{(2)}$ ، $NP_i^{(3)}$ و $NP_i^{(4)}$: (Thennarasu, 1995); LOW and TOP: (Fox *et al.*, 1990); KR: Rank mean Ketata; mean: Total mean; $VarSi^{(1)}$: Variance of $S_i^{(1)}$; $VarSi^{(2)}$: Variance of $S_i^{(2)}$; $\Sigma Z_i^{(1)}$: Sum values of $Z_i^{(1)}$; $\Sigma Z_i^{(2)}$: Sum values of $Z_i^{(2)}$; $\chi^2_{Z1,Z2}$: χ^2 Table; χ^2_{sum} : χ^2 Table. Mean comparison letters are summarized based on the first and last letters.

جدول ۴- رتبه ۳۶ اکوتیپ سیاه‌دانه برای آماره‌های پایداری ناپارامتری

Table 4. Ranks of 36 black cumin ecotypes for non-parametric stability parameterrs

اکوتیپ‌های سیاه‌دانه Black cumin ecotypes	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha ⁻¹)	S _i ⁽¹⁾	S _i ⁽²⁾	S _i ⁽³⁾	S _i ⁽⁶⁾	NP _i ⁽¹⁾	NP _i ⁽²⁾	NP _i ⁽³⁾	NP _i ⁽⁶⁾	TOP	MID	LOW	KR
1	36	6	5	16	30	11	36	36	31	34	1	2	22
2	20	5	4	3	4	4	2	6	6	36	2	1	8
3	21	7	6	8	8	5	6	9	8	12	13	12	10
4	9	12	10	7	7	9	20	7	7	34	1	2	6
5	26	32	32	33	32	31	24	29	30	26	6	5	31
6	10	22	22	19	16	14	13	13	18	12	20	5	25
7	33	16	16	27	31	21	30	32	32	26	6	5	34
8	24	21	21	21	21	29	17	27	24	33	4	4	24
9	32	33	33	36	36	36	35	34	36	12	13	12	34
10	1	4	13	4	2	3	10	2	2	26	6	5	3
11	15	26	25	24	23	26	15	22	22	12	13	12	18
12	12	18	17	17	15	17	21	15	16	12	13	12	13
13	19	34	34	29	27	31	12	23	26	6	5	26	30
14	25	9	8	10	14	11	22	18	12	12	13	12	17
15	7	11	11	6	5	8	3	4	5	12	13	12	4
16	11	14	14	13	9	17	5	10	10	26	6	5	7
17	2	1	1	1	1	1	7	1	1	1	36	36	1
18	18	23	23	23	18	14	19	20	21	12	13	12	20
19	14	15	15	14	10	13	9	11	11	26	6	5	11
20	4	2	2	2	3	2	1	3	3	6	5	26	2
21	30	17	18	22	24	23	16	26	25	6	5	26	28
22	6	7	7	5	6	7	18	5	4	12	13	12	5
23	27	29	28	26	26	24	28	24	27	6	5	26	33
24	16	19	19	18	20	20	8	17	17	12	13	12	14
25	23	28	26	28	29	26	29	25	29	6	5	26	19
26	5	35	35	31	25	29	11	12	23	26	6	5	12
27	22	36	36	35	34	35	31	30	34	12	13	12	29
28	13	30	29	25	22	24	26	21	20	12	13	12	20
29	28	9	9	11	17	14	23	19	15	26	6	5	16
30	8	27	30	20	13	19	4	8	14	12	13	12	15
31	34	3	3	9	19	6	33	33	19	4	1	32	27
32	3	20	20	15	12	34	25	16	9	6	5	26	9
33	35	25	27	34	35	31	34	35	35	4	1	32	36
34	31	23	24	32	33	21	32	31	33	2	1	34	32
35	29	13	12	12	11	10	14	14	13	2	1	34	26
36	17	31	31	30	28	26	27	28	28	6	5	26	22

S_i⁽¹⁾, S_i⁽²⁾, S_i⁽³⁾ و S_i⁽⁶⁾: آماره‌های هان نصار و هان، NP_i⁽¹⁾، NP_i⁽²⁾، NP_i⁽³⁾ و NP_i⁽⁴⁾: آماره‌های تنارازو، TOP و LOW: آماره‌های فاکس، KR: میانگین رتبه کتاتا

S_i⁽¹⁾ S_i⁽²⁾, S_i⁽³⁾ and S_i⁽⁶⁾: (Nassar and Huhn ,1987); NP_i⁽¹⁾, NP_i⁽²⁾, NP_i⁽³⁾ and NP_i⁽⁴⁾: (Thennarasu ,1995); LOW and TOP: (Fox *et al.*, 1990); KR: Rank mean Ketata

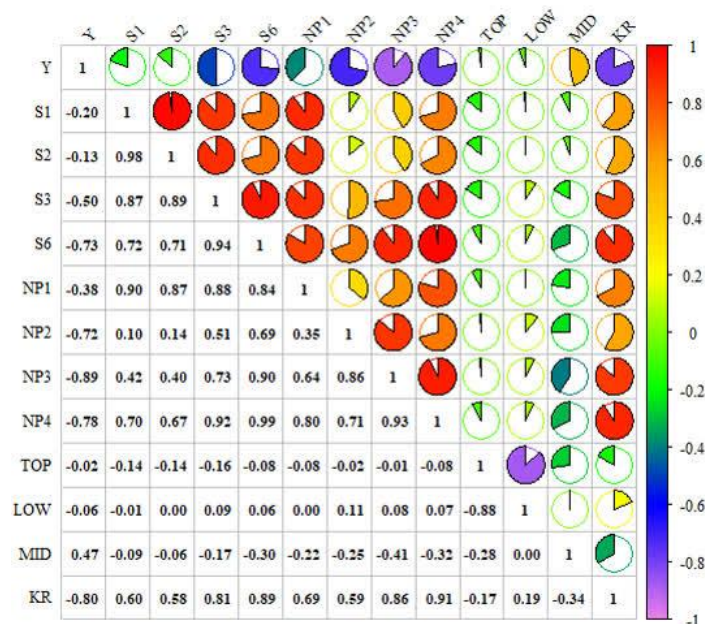
۱). وجود همبستگی‌های معنی‌دار بین پارامترهای مختلف پایداری در نتایج سایر آزمایش‌ها گزارش شده است (Vaezi et al., 2019; Zeinalzadeh -Tabrizi et al., 2021) از این نتایج می‌توان استنباط کرد که برای تجزیه پایداری استفاده از تعداد زیادی از شاخص‌ها چندان لازم نیست و برخی از شاخص‌ها که همبستگی بالایی با یکدیگر دارند را می‌توان از تجزیه‌ها حذف کرد.

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر اساس ماتریس همبستگی رتبه در بین معیارهای پایداری ناپارامتری انجام شد. بر اساس نتایج، دو مؤلفه اصلی اول ۸۲/۴ درصد (مؤلفه اصلی اول ۶۱ درصد و مؤلفه اصلی دوم ۲۱/۴ درصد) از واریانس متغیرهای اصلی را توجیه کردند. بای‌پلات PC_1 در مقابل PC_2 روابط بین میانگین عملکرد دانه و آماره‌های پایداری را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بای‌پلات تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (شکل ۲) آماره‌های $S_i^{(1)}$ ، $S_i^{(2)}$ ، $S_i^{(3)}$ ، $S_i^{(6)}$ ، $NP_i^{(1)}$ ، $NP_i^{(4)}$ و KR در یک گروه قرار گرفتند که همبستگی مثبتی نیز با هم داشتند. بر اساس کلیه این آماره‌ها، اکوتیپ ۱۷ و ۲۰ به‌عنوان اکوتیپ پایدار با عملکرد بالا شناخته شد. گروه دوم شامل $NP_i^{(2)}$ ، $NP_i^{(3)}$ و LOW بود و در یک گروه قرار گرفتند که همبستگی مثبتی با هم داشتند، ولی با عملکرد دانه همبستگی نداشتند. در گروه سوم $Z_i^{(1)}$ و $Z_i^{(2)}$ قرار داشتند. در گروه چهارم نیز TOP و $Yield$ قرار گرفتند که همبستگی بالایی نیز با هم داشتند (شکل ۲). بر اساس نتایج بای‌پلات تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، سایر محققان TOP و $Yield$ در یک گروه گزارش شده‌اند. شبیری و همکاران (Shobeiri et al., 2023) در بررسی تجزیه پایداری ۲۰ اکوتیپ عدس طی دو سال و دو مکان از بای‌پلات مؤلفه اصلی اول PC_1 در مقابل مؤلفه اصلی دوم PC_2 ، برای آماره‌های پایداری ناپارامتری استفاده کرده و چهار گروه را شناسایی کردند.

به‌عنوان پایدارترین و پر محصول‌ترین اکوتیپ‌ها قابل توصیه هستند. اکوتیپ‌های ۱۵ و ۲۲ نیز با KR پایین و عملکرد بالا، از پایداری مناسبی برخوردار بودند. در مقابل، اکوتیپ‌های ۱، ۳۱، ۳۳ و ۳۴ با TOP پایین، LOW بالا و KR ناپایدارترین اکوتیپ‌ها شناخته شدند که همگی عملکردی پایین‌تر از میانگین کل داشتند. صالحی و همکاران (Salehi et al., 2025) نیز با استفاده از مجموع رتبه کانگ و سایر روش‌های ناپارامتری، لاین‌های بسیار پایدار در محیط‌های بررسی شده را شناسایی کردند.

همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن به منظور بررسی رابطه بین میانگین عملکرد دانه اکوتیپ‌های سیاه‌دانه و آماره‌های ناپارامتری محاسبه شد (شکل ۱). بر اساس نتایج، عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری با آماره TOP داشت. همچنین همبستگی عملکرد دانه با آماره‌های $S_i^{(3)}$ ، $S_i^{(6)}$ ، $NP_i^{(2)}$ ، $NP_i^{(3)}$ ، $NP_i^{(4)}$ و KR و LOW منفی بود (شکل ۱). از سوی دیگر، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین آماره‌های $S_i^{(1)}$ ، $S_i^{(2)}$ ، $S_i^{(3)}$ ، $S_i^{(6)}$ ، $NP_i^{(1)}$ و $NP_i^{(4)}$ مشاهده شد. بالالیک و همکاران (Balalic et al., 2011) نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری بین $S_i^{(1)}$ و $S_i^{(2)}$ گزارش کردند. بر اساس این آماره‌ها اکوتیپ‌های ۱۰ و ۱۷ به‌عنوان اکوتیپ‌های پایدار که بیشترین مقدار عملکرد را در بین اکوتیپ‌های سیاه‌دانه داشتند، شناخته شدند. علیزاده و همکاران (Alizadeh et al., 2020) نیز در ژنوتیپ‌های کلزا بین آماره‌های $S_i^{(6)}$ ، $NP_i^{(2)}$ ، $NP_i^{(3)}$ و $NP_i^{(4)}$ همبستگی رتبه‌ای مثبت و معنی‌داری گزارش کردند.

بین میانگین رتبه کتاتا و آماره‌های S_i و NP_i همبستگی بالایی وجود داشت. بنابراین با استفاده از آماره‌های مختلف و همبستگی بالایی بین آنها، می‌توان نتایج این آماره‌ها را اعتبار سنجی و تایید کرد (شکل



شکل ۱- ضرایب همبستگی رتبه‌ای بین میانگین عملکرد دانه اکوتیپ‌های سیاه‌دانه و آماره‌های پایداری ناپارامتری ($S_i^{(1)}$, $S_i^{(2)}$, $S_i^{(3)}$ و $S_i^{(6)}$), آماره‌های نثار و هان ($NP_1^{(1)}$, $NP_1^{(2)}$, $NP_1^{(3)}$ و $NP_1^{(4)}$), آماره‌های تنارازو (LOW, MID و TOP), آماره میانگین رتبه کتاتا (KR). مقادیر بحرانی همبستگی با درجه آزادی ۱۲ در سطوح احتمال یک و پنج درصد به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۵۶ می‌باشد

Fig. 1. Spearman rank correlation coefficients between seed yield of black cumin ecotypes and non-parametric stability statistics ($S_i^{(1)}$, $S_i^{(2)}$, $S_i^{(3)}$ and $S_i^{(6)}$), Nassar and Huhn ($NPI^{(1)}$, $NPI^{(2)}$, $NPI^{(3)}$ and $NPI^{(4)}$), Thennarasu (MID, LOW and TOP), Rank mean ketata (KR). The critical correlation values with degrees of freedom 12 are 0.71 and 0.56 for the 1% and 5% probability levels, respectively

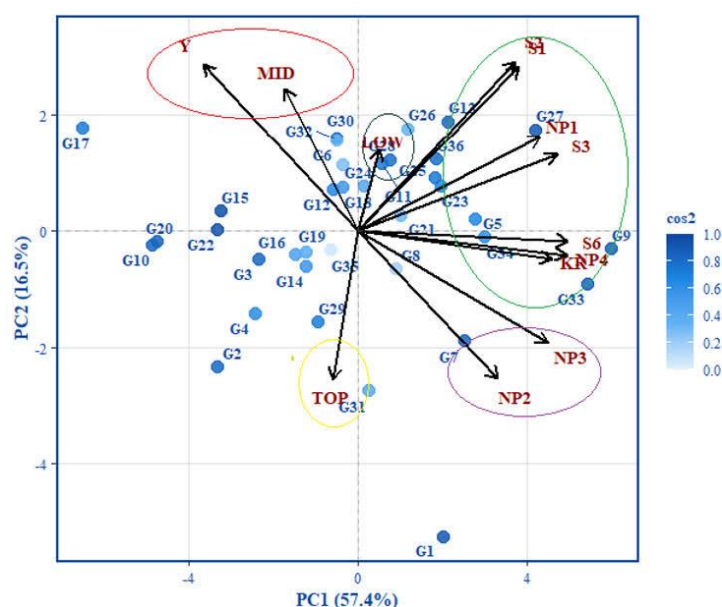
اکوتیپ ۱۷ بالاترین مقدار عملکرد دانه را داشت و اکوتیپ پایداری نیز بود (شکل ۳).

به منظور درک بهتر روابط بین آماره‌های پایداری ناپارامتری، تجزیه خوشه‌ای بر اساس روش Ward و فاصله اقلیدسی انجام شد (شکل ۳). بر اساس نتایج حاصل از تجزیه خوشه‌ای، پارامترها در دو خوشه اصلی و پنج زیر خوشه قرار گرفتند. خوشه اول (I)، گروه آماره‌های پایدار شامل پارامترهای $NP_1^{(2)}$, $NP_1^{(1)}$, $NP_1^{(4)}$, $NP_1^{(3)}$ و $NP_1^{(6)}$ و $NP_1^{(1)}$ بود که علاوه بر دارا بودن همبستگی مثبت در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در یک گروه قرار گرفتند. این گروه‌بندی نشان می‌دهد که این آماره‌ها اطلاعات

بر اساس بای پلات دو مؤلفه اصلی اول، اکوتیپ‌های سیاه‌دانه مورد مطالعه در چهار گروه اصلی قرار گرفتند (شکل ۲). گروه اول شامل اکوتیپ‌های ۵، ۱۱، ۱۳، ۲۱، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸ و ۳۶ بود که همگی به جز اکوتیپ ۲۶ میانگین عملکرد پایینی داشتند. گروه دوم ۱، ۷، ۸، ۹، ۳۱، ۳۳ و ۳۴ کمترین مقدار عملکرد را بین اکوتیپ‌های سیاه‌دانه داشتند. گروه سوم شامل اکوتیپ‌های ۲، ۳، ۴، ۱۰، ۱۴، ۱۶، ۱۹، ۲۰، ۲۲، ۲۹ و ۳۵ با عملکرد دانه بالا بود که در بین آنها اکوتیپ‌های ۱۰ و ۲۰ بیشترین مقدار عملکرد دانه را داشتند. در گروه چهارم اکوتیپ‌های ۶، ۱۲، ۱۵، ۱۷، ۱۸، ۳۰ و ۳۲ با میانگین عملکرد بالا و پایدار قرار داشتند که در بین آنها

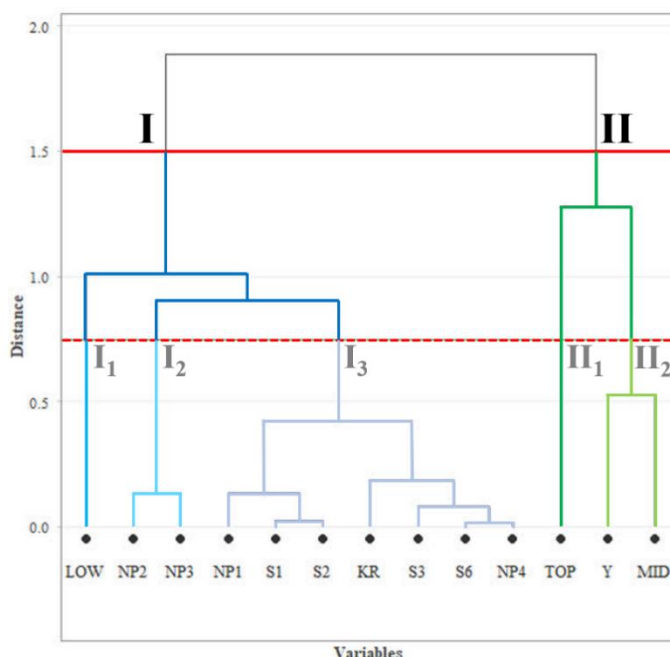
از تجزیه خوشه‌ای نشان داد که آماره‌های مبتنی بر رتبه در یک خوشه قرار گرفته و اطلاعات مشابهی در مورد پایداری اکوتیپ‌ها ارائه می‌دهند. این هم‌گروه شدن نشان می‌دهد که این آماره‌ها عمدتاً بر اساس واریانس رتبه‌ها عمل می‌کنند و می‌توان از میان آن‌ها، تعداد محدودی را برای ارزیابی پایداری انتخاب کرد. از سوی دیگر، قرار گرفتن MID در کنار عملکرد دانه به عنوان یک آماره بینابین در یک خوشه مجزا، نشان دهنده توانایی این آماره‌ها در ترکیب هم‌زمان عملکرد بالا و پایداری است و تأیید می‌کند که اکوتیپ‌های با MID بالا، نه تنها پایدار بلکه پر محصول نیز هستند (شکل ۳). این نتایج با یافته‌های غفاری و همکاران (Ghaffari *et al.*, 2022) و آبیاری و همکاران (Abyar *et al.*, 2022) هم‌خوانی دارد و نشان می‌دهد که تجزیه خوشه‌ای به عنوان یک روش مکمل، می‌تواند به گروه‌بندی دقیق‌تر آماره‌ها و تسهیل انتخاب شاخص‌های کلیدی برای برنامه‌های به‌نژادی کمک کند.

مشابهی در مورد پایداری اکوتیپ‌ها ارائه می‌دهند و عمدتاً بر اساس واریانس رتبه‌ها عمل می‌کنند، بنابراین می‌توان از میان آن‌ها تعداد محدودی را برای ارزیابی پایداری انتخاب کرد. خوشه دوم (II) که گروه عملکرد و آماره‌های وابسته بود شامل آماره‌های MID، TOP و Yield بود. نکته قابل توجه در این گروه‌بندی، تفکیک آماره TOP از سایر آماره‌های پایداری است. برخلاف انتظار، در این آزمایش همبستگی بین TOP و عملکرد دانه (Yield) بسیار پایین ($r = -0.02$) بود که نشان می‌دهد TOP معیار مناسبی برای انتخاب بر اساس عملکرد در این شرایط محیطی نبوده است. در مقابل، آماره MID همبستگی متوسط و مثبتی با عملکرد دانه ($r = 0.47$) نشان داد. قرار گرفتن MID در کنار عملکرد دانه نشان دهنده توانایی این آماره در ترکیب هم‌زمان عملکرد بالا و پایداری است و تأیید می‌کند که اکوتیپ‌های با MID بالا، نه تنها پایدار هستند، بلکه پر محصول نیز هستند. به‌طوری کلی گروه‌بندی حاصل



شکل ۲- بای‌پلات مؤلفه اصلی اول در مقابل مؤلفه اصلی دوم بر اساس میانگین عملکرد دانه و آماره‌های پایداری ناپارامتری ۳۶ اکوتیپ سیاه‌دانه در چهار منطقه (کرج، مشهد، گرگان و لرستان) طی دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۲-۱۴۰۳

Fig. 2. Biplot (PC₁ vs. PC₂) of non-parametric stability procedures based on the rank correlation matrix with yield of 36 black cumin ecotypes in four locations (Karaj, Mashhad, Gorgan and Lorestan) during 2022-2023 and 2023-2024

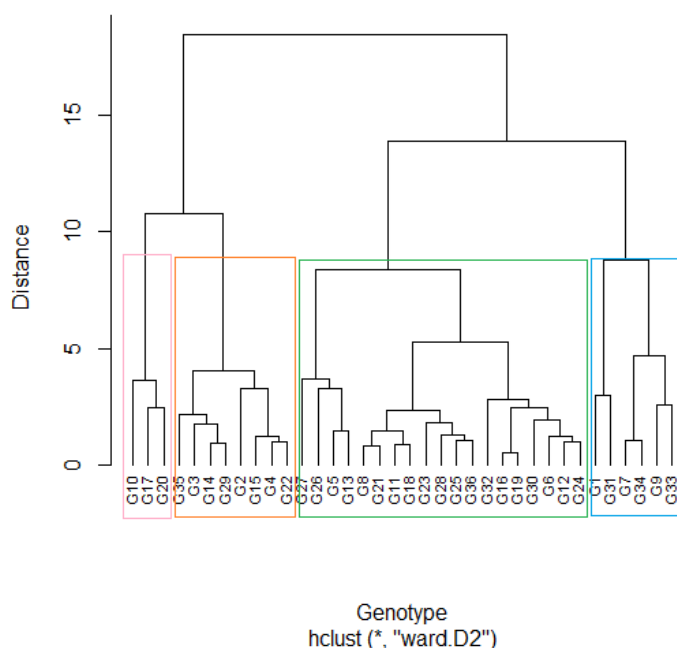


شکل ۳- تجزیه خوشه‌ای آماره‌های پایداری ناپارامتری و میانگین عملکرد دانه اکوتیپ‌های سیاه‌دانه در چهار منطقه (کرج، مشهد، گرگان و لرستان) طی دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۲-۱۴۰۳

Fig. 3. Cluster analysis of non-parametric stability procedures and mean yield of black cumin ecotypes in four locations (Karaj, Mashhad, Gorgan and Lorestan) during 2022-2023 and 2023-2024

نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تجزیه خوشه‌ای همپوشانی قابل توجهی مشاهده شد، این همپوشانی نشان دهنده قابلیت اعتماد بالای هر دو روش در تفکیک آماره‌های پایداری است، به‌طوری که در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، روابط بین آماره‌ها آشکار و در تجزیه خوشه‌ای، گروه‌بندی اکوتیپ‌های مشابه تسهیل شده است. تأیید قرار گرفتن اکوتیپ‌های برتر (۱۰، ۱۷ و ۲۰) در گروه پایدار و پرمحصول در هر دو روش، صحت گزینش آن‌ها را تایید می‌کند. غفاری و همکاران (Ghaffari et al., 2022) از تجزیه خوشه‌ای برای گروه‌بندی ۱۵ ژنوتیپ آفتابگردان در چهار مکان و دو سال بر اساس آماره‌های ناپارامتری استفاده کردند و بر اساس نتایج، ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا در یک گروه قرار گرفتند.

در مرحله بعد از تجزیه خوشه‌ای برای گروه‌بندی اکوتیپ‌های سیاه‌دانه استفاده شد. با توجه به نتایج تجزیه خوشه‌ای (شکل ۴)، اکوتیپ‌های سیاه‌دانه بر اساس عملکرد دانه و آماره‌های پایداری ناپارامتری در چهار خوشه اصلی قرار گرفتند. گروه اول شامل اکوتیپ‌های ۱، ۷، ۹، ۳۱، ۳۳ و ۳۴ کمترین مقدار عملکرد دانه را داشتند. گروه دوم شامل اکوتیپ‌های ۵، ۶، ۸، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۶، ۱۸، ۱۹، ۲۱، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۳۰، ۳۲ و ۳۶ بودند که همگی بجز اکوتیپ ۲۶ عملکرد دانه پایینی داشتند. گروه سوم شامل اکوتیپ‌های ۲، ۳، ۴، ۱۴، ۱۵، ۲۲، ۲۹ و ۳۵ بود. در گروه چهارم اکوتیپ‌های ۱۰، ۱۷ و ۲۰ قرار گرفتند که اکوتیپ ۱۰ بالاترین مقدار عملکرد دانه را داشت و اکوتیپ پایداری نیز بود (شکل ۴). اگرچه بین



شکل ۴- تجزیه خوشه‌ای اکوتیپ‌های سیاه‌دانه بر اساس میانگین عملکرد و آماره‌های پایداری ناپارامتری

Fig. 4. Cluster analysis of black cumin ecotypes based on mean yield and non-parametric

توصیه هستند. اکوتیپ‌های ۱۵ و ۲۲ با عملکرد دانه بالا و پایداری مطلوب، به‌ویژه بر اساس آماره‌های $NP_1^{(3)}$ و $NP_1^{(4)}$ و KR ، به‌عنوان اکوتیپ‌های برتر بعدی شناخته شدند. در مقابل، اکوتیپ‌های ۱، ۹، ۳۳ و ۳۴ با پایداری بسیار پایین و عملکرد دانه کمتر از میانگین، نامناسب‌ترین اکوتیپ‌ها برای کشت در دامنه وسیع محیطی بودند. از بین اکوتیپ‌های برتر توصیه شده، سه اکوتیپ از کردستان و یک اکوتیپ از خراسان هستند. اکوتیپ ۲ (TN-59-5) (سیستان) با عملکرد دانه ۱۲۲۱ کیلوگرم در هکتار، اگر چه جزء اکوتیپ‌های پایدار بود، ولی عملکرد دانه آن از میانگین کل بالاتر نبود. با این حال، کلیه اکوتیپ‌های یک منطقه الزاما پایدار نبودند (به‌عنوان مثال اکوتیپ‌های ۳۳ (TN-82-750) و ۳۴ (TN-82-751) از خراسان ناپایدار بودند)، بنابراین منشاء به تنهایی نمی‌تواند ملاک انتخاب باشد و غربالگری طبق آنچه ارائه شد ضروری است. تحلیل‌های تکمیلی شامل همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن، تجزیه به

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج آزمایش حاضر، تنوع ژنتیکی معنی‌داری بین اکوتیپ‌های سیاه‌دانه وجود داشت که امکان گزینش اکوتیپ‌های برتر را فراهم می‌کند. اگر چه آثار اصلی سال و مکان معنی‌دار نبود، اما برهمکنش سه‌گانه اکوتیپ و سال و مکان معنی‌دار بود که نشان دهنده واکنش متفاوت اکوتیپ‌ها به تغییرات محیطی و ضرورت ارزیابی پایداری آن‌ها است. ارزیابی پایداری با استفاده از روش‌های ناپارامتری (هان، تنارازو، فاکس و کتاتا) باعث تفکیک اکوتیپ‌های پایدار و ناپایدار شد. آزمون مجموع مقادیر $Z_i^{(1)}$ و $Z_i^{(2)}$ عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین اکوتیپ‌ها را نشان داد. اکوتیپ‌های ۱۷، ۱۰ و ۲۰ به‌عنوان پایدارترین و پرمحصول‌ترین اکوتیپ‌ها در اکثر آماره‌های پایداری $S_i^{(1)}$ ، $S_i^{(2)}$ ، $S_i^{(3)}$ ، $S_i^{(6)}$ ، $NP_1^{(1)}$ ، $NP_1^{(3)}$ و KR شناخته شدند و با عملکرد بالاتر از میانگین کل (۱۲۲۸ کیلوگرم در هکتار) برای کشت در شرایط محیطی مختلف قابل

هکتار، به‌عنوان اکوتیپ‌های پایدار و پرمحصول سیاه‌دانه برای برنامه‌های به‌نژادی در مناطق مورد مطالعه (کرج، مشهد، گلستان و خرم‌آباد) قابل توصیه هستند.

سپاسگزاری

نگارندگان از مدیریت و همکاری موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج به خصوص بخش تحقیقات ژنتیک و بانک ژن گیاهی ملی ایران و هم‌چنین ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی مشهد، گلستان و خرم‌آباد جهت فراهم آوردن امکانات لازم برای اجرای این پژوهش سپاسگزاری می‌کنند.

مؤلفه‌های اصلی و تجزیه خوشه‌ای، نتایج حاصل از آماره‌های پایداری را تایید و گروه‌بندی اکوتیپ‌ها را تسهیل نمود. همبستگی بالای بین برخی آماره‌ها نشان داد که استفاده هم‌زمان از همه آن‌ها ضروری نبوده و می‌توان با انتخاب تعداد محدودی از شاخص‌های کلیدی، به ارزیابی دقیقی از پایداری دست یافت. در مجموع بر اساس پایین‌ترین مقدار KR (آماره کتاتا) و بالاترین مقدار TOP (آماره فاکس) همراه با عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل (۱۲۲۸ کیلوگرم در هکتار)، اکوتیپ‌های ۱۷، ۱۰، ۲۰، ۲۲ و ۱۵ به ترتیب با عملکرد دانه ۱۴۶۱، ۱۴۸۴، ۱۳۳۹، ۱۳۱۳ و ۱۲۹۸ کیلوگرم در

References

منابع مورد استفاده

- Abyar, S., Navabpour, S., Karimizadeh, R., Nasrollahnejad Ghomi, A.A., Kiani, G. and Gholizadeh, A., 2021. Evaluation of genotype $\times$ environment interaction and grain yield stability of different bread wheat genotypes using non-parametric methods. *Cereal Research*, 11(2), pp.89-104. [In Persian] doi: 10.22124/cr.2021.20461.1687
- Akbari, S., Akbarpour, O.A. and Pezeshkpour, P., 2021. Evaluation of genetic variation and grain yield stability of lentil genotypes using non-parametric methods. *Plant Genetic Researches*, 8(1), pp.95-114. [In Persian] doi: 10.52547/pgr.8.1.7
- Alizadeh, B., Rezaizad, A., Yazdandoost, Hamedani, M., Shiresmaeili, G., Nasserghadimi, F., Khademhamzeh, H.R. and Gholizadeh, A., 2020. Evaluation of seed yield stability of winter rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes using non-parametric methods. *Journal of Crop Breeding*, 12(35), pp.202-212. [In Persian]. doi:10.52547/jcb.12.35.202
- Amini, A., Tabatabaee, M.T., Akbari Moghadam, H., Ravari, S.Z., Amin Azarm, D. and Tajalli, H., 2021. Evaluation of grain yield and its stability in bread wheat genotypes in saline regions of Iran. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 51(4), pp.191-202. [In Persian] doi: 10.22059/ijfcs.2020.290344.654649
- Badri, H., Mohammadi, R. and Etminan, A. 2020. Study on adaptability and grain yield stability of durum Wheat genotypes. *Journal of Crop Breeding*, 12(33), pp.119-126. [In Persian] doi:10.29252/jcb.12.33.119
- Balalic, I., Zoric, M., Miklic, V., Dusanic, N., Terzic, S. and Radic, V., 2011. Non-parametric stability analysis of sunflower oil yield trials. *Helia*, 34(54), pp.66-77. <https://doi.org/10.2298/HEL1154067B>
- Barati, A., Tabatabae, M., Malooji, M. and Saberi, M.H., 2018. Assessment of grain yield stability of barley (*Hordeum vulgare* L.) promising lines under salinity stress using non-parametric and AMMI analysis methods. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 20(3), pp.209-221. [In Persian]. URL: <http://agrobreedjournal.ir/article-1->

941-fa.html

- Desheva, G., and Valchinova, E., 2024.** Evaluation of yield stability and adaptability of oat genotypes (*Avena sativa* L.). *Poljoprivreda*, 30(1), pp.3-12. <https://doi.org/10.18047/poljo.30.1.1>
- Fox, P.N., Skovmand, B., Thompson, B.K., Braun, H.J. and Cormier, R., 1990.** Yield and adaptation of hexaploid spring triticale. *Euphytica*, 47, pp.57-64. <https://doi.org/10.1007/BF00040364>
- Ghaffari, M., Gholizadeh, A., Andarkhor, S.A.A., Zareei Siahbidi, A., Kalantar Ahmadi, S.A., Shariati, F. and Rezaeizad, A., 2022.** Evaluation of seed yield stability of sunflower genotypes using non-parametric statistics. *Journal of Crop Production and Processing*, 12(1), pp.1-13. [In Persian] doi: 10.47176/jcpp.12.1.36104
- Ghanbari, J., Khajoei-nejad, Gh.R. and Mahammadi-nejad, Gh., 2017.** Study of ecotype and sowing date interaction in cumin (*Cuminum cyminum* L.) using different univariate stability parameters. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 15(1), pp.87-102. [In Persian] doi: 10.22067/GSC.V15I1.43232
- Ghorbanzadeh Neghab, M. and Zare Mehrjerdi, M., 2018.** The study of genetic diversity, correlation between traits and path analysis in black cumin (*Nigella sativa* L.) ecotypes. *Journal of Plant Production Research*, 25(3), pp.1-12. [In Persian] doi: 10.22069/jopp.2018.12268.2111
- Hasanzadeh, H., Shahbazi, E., Mohammadi, S. and Saeidi, K.A., 2020.** Evaluation of drought tolerance indices for selection of superior genotypes in black cumin (*Nigella sativa* L.). *Journal of Crop Production and Processing*, 10(2), pp.67-80. [In Persian]. doi: 10.47176/jcpp.10.2.26631
- Huhn, M. and Leon, J., 1995.** Non-parametric analysis of cultivar performance trials: Experimental results and comparison of different procedures based on ranks. *Agronomy Journal*, 87, pp.627-632.
- Kang, M.S., 1993 .** Simultaneous selection for yield and stability in crop performance trials: consequences for growers. *Agronomy Journal*, 85, pp.754-757.
- Karimizadeh, R., Hosseiniour, T., Alt Jafarby, J., Shahbazi Homonlo, K. and Armion, M., 2021.** Evaluation of genotype $\times$ environment interaction and determining grain yield stability of durum wheat genotypes in uniform regional yield trials in semi -warm rainfed areas. *Plant Genetic Researches*, 7(2), pp.25-40. [In Persian]. doi: 10.52547/pgr.7.2.3
- Ketata, H.Y., Yau, S.K. and Nachit, M., 1989.** Relative consistency performance across environments; International Symposium on Physiology and Breeding of Winter Cereals for stressed Mediterranean Environments: Montpellier, France.
- Khazaei, A., Golzardi, F., Torabi, M., Fyzbakhsh, M. T., Azari Nasrabad, A., Ghasemi, A., Nazari, L. and Motaghi, M., 2021.** Evaluation of the yield stability of grain sorghum genotypes using AMMI analysis in different regions of Iran. *Cereal Research*, 11(1), pp.77-88. [In Persian] doi: 10.22124/CR.2021.19921.1675
- Minooeian Haghighi, M.H. and Khosravi, A.R., 2014.** Effects of anti-aflatoxin of essential oils of *Cuminum cyminum*, *Ziziphora clinopodioides* and *Nigella sativa*. *Koomesh*, 15(3), pp.396-404. [In Persian]

http://www.koomeshjournal.ir/browse.php?a_id=1985&sid=1&slc_lang=enhttp://spij.areo.ir/article_111122_en.html

- Mobasser, S., Jazayeri, M.H., Mardi, M., Rezvani, A., Farhadi, A., Qarakhani, A., Eshghi, M. and Jahed, A., 2020.** Cultivation value determination test (VCU) of 14 forage varieties at year 2018, Final Report of Research Project, Seed and Plant Registration and Certification Research Institute, Registration No. 58859, 25 pages. [In Persian].
- Mohammadi, R., Armion, M., Zadhasan, E., Ahmadi, M.M. and Sadeghzadeh Ahari, D., 2012.** Genotype $\times$ environment interaction for grain yield of rainfed durum wheat using the GGE biplot model. *Seed and Plant Improvement journal*, 28-1(3), pp.503-518. [In Persian].
- Nassar, R. and Huhn, M. 1987.** Studies on estimation of phenotypic stability: tests of significance for non-parametric measures of phenotypic stability. *Biometrics*, 43, pp.45-53. <https://doi.org/10.2307/2531947>
- Pawar, I.S. and Singh, S., 2010.** Theory and Application of Biometrical Genetics. CBS Publisher and Distributors (1st Ed). New Delhi, India.
- Rezvani, E., Mobasser, S., Ghasemi Ranjbar, J. and Jazayeri, M.R. 2023.** Evaluation of forage yield and yield stability of 16 forage maize genotypes of local and exotic origin to introduce the farmers. *Research Achievements for Field and Horticulture Crops Journal*. 12(1), pp.113-124. [In Persian] doi: 10.22092/RAFHC.2023.359855.1314
- Safavi, S.M., Bahraminejad, S. and Beheshtizadeh, H., 2025.** Grain yield stability analysis of oat (*Avena sativa* L.) genotypes using univariate parametric and non-parametric methods. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, 4(1), pp.66-91. [In Persian]. doi: 10.22126/cbb.2024.11410.1093
- Salehi, M., Dehghani, F., Hasheminejad, Y., Karami, A. and Mosavat, S.A., 2025.** Adaptability and yield stability of black seed quinoa compared to white seed lines under saline conditions. *Crop Production Journal*, 17(4), pp.1-22. [In Persian] doi: 10.22069/ejcp.2025.22090.2614
- Saremirad, A. and Taleghani, D., 2022.** Utilization of univariate parametric and non-parametric methods in the stability analysis of sugar yield in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) hybrids. *Journal of Crop Breeding*, 14(43), pp.49-63. [In Persian] doi: 10.52547/jcb.14.43.49
- Shobeiri, S.S., Asadi, A.A., Tabrizvand Taheri, M. and Shorideh, H., 2025.** Assessment of adaptability and seed yield stability of rainfed lentil (*Lens culinaris* Medik) genotypes in cold dryland regions in Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 27(2), pp.192-210. [In Persian]. doi: 20.1001.1.23223243.2021.19.129.0
- Thennarasu, K., 1995.** On certain non-parametric procedures for studying genotype-environment interactions and yield stability. PhD. Dissertation, P.J. School IARI, New Dehli, India
- Taherian, M., Eskandari torbaghan, M., Najjar, H., 2018.** Stability analysis of seed yield in safflower genotypes under dryland conditions. *Journal of Crop Breeding*, 10(26), pp.139-145. [In Persian] doi: 10.29252/jcb.10.26.139

- Vaezi, B., Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Mehraban, A., Hossein-Pour, T., Koohkan, E. and Siddique, K.H., 2019.** Integrating different stability models to investigate genotype× environment interactions and identify stable and high-yielding barley genotypes. *Euphytica*, 215, pp.1-18. <https://doi.org/10.1007/s10681-019-2386-5>
- Zeinalzadeh -Tabrizi, H., Mansouri, S. and Fallah -Toosi, A., 2021.** Evaluation of seed yield stability of promising sesame lines using different parametric and non-parametric methods. *Plant Genetic Researches*, 8(1), pp.43-160. [In Persian]. doi: 10.52547/pgr.8.1.4