Research Article

Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research

DOI: 10.22092/ijmapr.2026.370257.3564

Vol. 42, No. 2, Page 399-414 (2026)

Comparison of native Iranian Cumin ecotypes in terms of antioxidant, metabolic, and agronomic characteristics

Sepideh Ghotbzadeh-Kermani[1*], Ghasem Mohammadi-Nejad[2] and Mahdiyeh Salarpour[3]

1*. Corresponding author, Research Institute of Plant Production Technology, Afzalipour Research Center, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, E-mail: sghotbzadeh@uk.ac.ir
2. Research Institute of Plant Production Technology, Afzalipour Research Center, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
3. Postdoc Researcher, Research Institute of Plant Production Technology, Afzalipour Research Center, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Received: 05/10/2025 Revised: 23/06/2026 Accepted: 25/06/2026

Abstract

Background and Objectives: *Cuminum cyminum* L. (green cumin) is one of the most important medicinal and spice plants, with a wide genetic diversity in Iran. This diversity, expressed in physiological, metabolic, and agronomic traits, provides valuable resources for breeding programs aimed at enhancing yield, quality, and stress tolerance. The present study aimed to compare ten native Iranian cumin ecotypes in terms of antioxidant capacity, secondary metabolites, and agronomic traits, to identify superior genotypes for targeted breeding and medicinal exploitation.

Materials and Methods: This study was conducted during the 2023–2024 growing season at the Experimental Farm of the Research Technology Institute of Plant Production, Afzalipour Research Center, Shahid Bahonar University of Kerman. The experiment was laid out in a randomized complete block design with three replications. Ten native cumin ecotypes (Esfarayen, Bardaskan, Khansar, Ardestan, Sepidan, Sivand, Sirjan, Mahan, Bardsir, and Rafsanjan) collected from different provinces of Iran (North Khorasan, Razavi Khorasan, Isfahan, Fars, and Kerman) were evaluated under uniform agronomic conditions including land preparation, planting, irrigation, weed control, and harvesting. Throughout the growing season, sampling and trait measurements were conducted using standardized procedures. Evaluated traits included seed yield per hectare, essential oil content (%), essential oil yield (calculated as seed yield × essential oil content), cuminaldehyde percentage, total protein content, total phenolics, and total anthocyanins. Activities of antioxidant enzymes (superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), guaiacol peroxidase (GPX), and ascorbate peroxidase (APX)) were also assayed using conventional enzymatic methods. Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) to assess ecotype effects, Pearson correlation to determine relationships among traits, stepwise regression to identify key predictors of seed yield, and principal component analysis (PCA) to explore trait variation patterns and ecotype differentiation.

Results: Analysis of variance revealed significant differences among the ecotypes for all studied traits, indicating substantial genetic diversity within native Iranian cumin. The Esfarayen ecotype exhibited the highest seed yield, exceeding the lowest-yielding ecotype, Sirjan, by 111%. However, Esfarayen had the lowest total phenolics and protein content. The Mahan ecotype stood out with the

Copyright: © 2026 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (http://ijmapr.areeo.ac.ir/) and 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 author and source are credited.

highest essential oil content and essential oil yield among all ecotypes, whereas Bardsir showed the highest total anthocyanin levels. Rafsanjan exhibited the highest total phenolics and activities of guaiacol peroxidase and ascorbate peroxidase but had the lowest catalase and superoxide dismutase activities. Conversely, Sepidan showed the highest catalase and superoxide dismutase activities. Significant negative correlations were observed between protein content and CAT and SOD activities. Additionally, essential oil content negatively correlated with anthocyanin levels, and cuminaldehyde content was negatively correlated with total protein, suggesting metabolic pathway trade-offs in the synthesis of these compounds. Stepwise regression identified four key traits as significant predictors of seed yield: essential oil content (17%), cuminaldehyde percentage (14%), APX activity (10%), and SOD activity (9%), collectively explaining 50% of the variation in seed yield. PCA revealed that the first two principal components accounted for 61.20% of the total trait variation, effectively differentiating the Mahan, Esfarayen, Sepidan, and Rafsanjan ecotypes based on their combined performance and biochemical profiles.

Conclusions: The results highlight a rich pool of genetic and biochemical diversity among Iranian cumin ecotypes, which can be exploited to develop high-yielding, high-quality, and stress-tolerant cultivars. Esfarayen, Mahan, Rafsanjan, and Sepidan emerged as promising candidates for breeding programs, each combining specific desirable traits. The findings also emphasize that improving EO yield in cumin is more effectively achieved through enhancing seed yield rather than increasing EO percentage alone. These outcomes underline the necessity of multi-objective breeding approaches to balance productivity, phytochemical composition, and resilience in medicinal and aromatic plants.

Keywords: Genetic diversity, secondary metabolites, agronomic traits, biosynthetic pathways, medicinal plant breeding.

مقایسه اکوتیپ‌های زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) بومی ایران از نظر ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی، متابولیتی و عملکرد

سپیده قطب‌زاده کرمانی[1*]، قاسم محمدی‌نژاد[2] و مهدیه سالارپور[3]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار، پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی، پژوهشگاه افضلی‌پور، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، پست‌الکترونیک: sghotbzadeh@uk.ac.ir

۲- استاد، پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی، پژوهشگاه افضلی‌پور، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۳- دانشجوی پسادکترا، پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی، پژوهشگاه افضلی‌پور، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳ تاریخ اصلاح نهایی: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴

چکیده

سابقه و هدف: زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) به‌عنوان یکی از مهمترین گیاهان دارویی و ادویه‌ای، دارای تنوع ژنتیکی گسترده‌ای در ایران است و از نظر ویژگی‌های فیزیولوژیک، متابولیتی و عملکردی می‌تواند به‌عنوان منبعی ارزشمند در اصلاح گیاهان دارویی و معطر استفاده شود. شناخت ژنوتیپ‌های برتر با ترکیب مطلوب عملکرد و کیفیت، گامی اساسی در بهبود بهره‌برداری زراعی و دارویی از این گیاه است. هدف از این پژوهش، مقایسه ده اکوتیپ بومی زیره سبز ایران از نظر صفات آنتی‌اکسیدانی، ترکیبات ثانویه و ویژگی‌های عملکردی و شناسایی ژنوتیپ‌های برتر برای برنامه‌های اصلاحی و بهره‌برداری هدفمند بود.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در مزرعه پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی، پژوهشگاه افضلی‌پور دانشگاه شهید باهنر کرمان اجرا شد. طرح آزمایشی به‌صورت بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. ده اکوتیپ بومی زیره سبز (اسفراین، بردسکن، خوانسار، اردستان، سپیدان، سیوند، سیرجان، ماهان، بردسیر و رفسنجان) از استآنهای مختلف ایران (خراسان شمالی، خراسان رضوی، اصفهان، فارس و کرمان) جمع‌آوری و در شرایط زراعی یکسان شامل آماده‌سازی زمین، کاشت، آبیاری، کنترل علف‌های هرز و برداشت مدیریت شدند. در طول دوره رشد، نمونه‌برداری و اندازه‌گیری صفات به‌صورت استاندارد انجام شد. صفات مورد ارزیابی شامل عملکرد دانه در هکتار، درصد اسانس، عملکرد اسانس (حاصل‌ضرب عملکرد دانه و درصد اسانس)، درصد کومین‌آلدهید، محتوای پروتئین کل، فنول کل و آنتوسیانین کل بودند. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شامل سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT)، گایاکول پراکسیداز (GPX) و آسکوربات پراکسیداز (APX) نیز با روش‌های آنزیمی متداول سنجیده شد. برای تحلیل داده‌ها از تجزیه واریانس برای بررسی اثر اکوتیپ استفاده شد و برای سنجش اختلاف معنی‌دار بین اکوتیپ‌ها، از مقایسه میانگین (LSD) استفاده گردید. همبستگی پیرسون برای تعیین روابط بین صفات، رگرسیون مرحله‌ای برای شناسایی صفات مؤثر بر عملکرد دانه و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای تعیین الگوهای تغییرات صفات و تفکیک ژنوتیپ‌ها استفاده گردید.

یافته‌ها: تجزیه واریانس نشان داد تفاوت معنی‌داری بین اکوتیپ‌ها در تمام صفات مورد مطالعه وجود دارد که نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی قابل توجه زیره سبز بومی ایران است. اکوتیپ اسفراین بالاترین عملکرد دانه را داشت که ۱۱۱ درصد بیشتر از کم‌بازده‌ترین ژنوتیپ یعنی سیرجان بود. اما اسفراین کمترین مقدار فنول کل و پروتئین را دارا بود. اکوتیپ ماهان با دارا بودن بالاترین درصد و عملکرد اسانس در میان تمامی ژنوتیپ‌ها از برتری قابل‌توجهی برخوردار بود. در مقابل، اکوتیپ بردسیر بیشترین محتوای آنتوسیانین را نشان داد. اکوتیپ رفسنجان نیز با داشتن بیشترین میزان فنول کل و بالاترین فعالیت GPX و APX متمایز شد، هرچند فعالیت CAT و SOD در آن در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها در کمترین سطح مشاهده گردید. بعکس، سپیدان بیشترین فعالیت کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز را نشان داد. همبستگی‌ها حکایت از رابطه منفی معنی‌دار میان محتوای پروتئین و فعالیت‌های CAT و SOD داشت. همچنین درصد اسانس و آنتوسیانین و کومین‌آلدهید و پروتئین کل

همبستگی منفی داشتند که نشان‌دهنده تعارض مسیرهای متابولیکی در تولید ترکیبات مختلف است. رگرسیون مرحله‌ای چهار صفت درصد اسانس (۱۷ درصد)، درصد کومین‌آلدهید (۱۴ درصد)، فعالیت آسکوربات پراکسیداز (۱۰ درصد) و فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (۹ درصد) را به‌عنوان عوامل مهم پیش‌بینی‌کننده عملکرد دانه معرفی کرد که در مجموع ۵۰ درصد تغییرات عملکرد را تبیین کردند. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که دو مؤلفه اول ۶۱/۲۰ درصد تغییرات صفات را توضیح داده و اکوتیپ‌های ماهان، اسفراین، سپیدان و رفسنجان را براساس ترکیب ویژگی‌های عملکردی و بیوشیمیایی متمایز کرد.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها بیانگر وجود تنوع ژنتیکی و بیوشیمیایی ارزشمند در اکوتیپ‌های زیره سبز ایران است که می‌تواند در اصلاح ژنوتیپ‌های با هدف بهبود عملکرد، کیفیت و مقاومت به تنش‌ها مورد استفاده قرار گیرد. اکوتیپ‌های اسفراین، ماهان، رفسنجان و سپیدان با دارا بودن ترکیب‌های متفاوتی از صفات زراعی و بیوشیمیایی، منابع مطلوبی برای برنامه‌های اصلاحی محسوب می‌شوند. نتایج همچنین نشان داد که بهبود عملکرد اسانس در زیره سبز بیشتر از طریق افزایش عملکرد دانه حاصل می‌شود تا افزایش درصد اسانس، این موضوع ضرورت رویکردهای اصلاحی چندهدفه را برای دستیابی به تعادل بین عملکرد، ترکیب‌های دارویی و مقاومت به تنش‌ها تأکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تنوع ژنتیکی، ترکیبات ثانویه، صفات زراعی، مسیرهای بیوسنتزی، به‌نژادی گیاهان دارویی.

مقدمه

زیره سبز با نام علمی *Cuminum cyminum* L.، گیاهی یکساله از خانواده چتریان (Apiaceae) است که از دیرباز به‌دلیل ارزش‌های دارویی و ادویه‌ای بی‌نظیر خود مورد توجه قرار گرفته است (Mughal, 2022). این گیاه بومی مناطق مدیترانه شرقی، هند و ایران، به دلیل ترکیب‌های فعال شیمیایی متنوعی مانند کومین‌آلدهید، گاما–ترپینن، پاراسیمن و سایر ترکیب‌های فنولی و ترپنوئیدی، کاربرد گسترده‌ای در طب سنتی، صنایع داروسازی، آرایشی–بهداشتی و غذایی دارد (Gachkar *et al*., 2007؛ Sultan *et al*., 2014؛ Mughal, 2022). اهمیت زیره سبز فراتر از کاربردهای سنتی آن است؛ مطالعات نوین علمی، فعالیت‌های زیستی چشمگیری ازجمله خواص آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی، ضدمیکروبی و حتی ضدسرطانی را به ترکیب‌های موجود در این گیاه نسبت داده‌اند که نقش آن را در ارتقاء سلامت عمومی و پیشگیری از بیماری‌ها برجسته می‌کند (Sultan *et al*., 2014). در پژوهش‌های اخیر گزارش شده است که عصاره و اسانس زیره سبز دارای فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی و ضدمیکروبی پایدار است و قابلیت استفاده به‌عنوان نگهدارنده طبیعی یا ماده فعال در فرمولاسیون‌های دارویی و غذایی را دارد. همچنین مطالعات جدید نشان می‌دهند که بهبود روش‌های استخراج و فرایندهای تولید می‌تواند کیفیت و بازده ترکیب‌های زیستی مؤثر را افزایش دهد و مسیرهای امیدوارکننده‌ای برای توسعه کاربردهای صنعتی و پزشکی زیره فراهم کند (Singh *et al*., 2021؛ Nouri *et al*., 2024؛ Ben-Miri, 2025).

ایران به‌عنوان یکی از مراکز اصلی تنوع ژنتیکی زیره سبز در جهان، میزبان مجموعه‌ای گسترده از اکوتیپ‌های بومی این گیاه است که در مناطق مختلف جغرافیایی کشور پراکنده‌اند (Srinivasan, 2018). این اکوتیپ‌ها به‌دلیل سازگاری با شرایط اقلیمی و خاک متفاوت، تفاوت‌های چشمگیری در ویژگی‌های فیتوشیمیایی، عملکرد دانه، مقاومت به تنش‌های محیطی (زیستی و غیرزیستی) و خصوصیات مورفوفیزیولوژیک از خود نشان می‌دهند (Mohamamadizadeh *et al*., 2022). شناسایی، ارزیابی و مقایسه این تنوع درون‌گونه‌ای از منظر شاخص‌های کیفی و عملکردی، می‌تواند بستر مناسبی برای انتخاب و معرفی ژنوتیپ‌های برتر برای برنامه‌های به‌نژادی آینده و توسعه کشت این گیاه ارزشمند فراهم نماید. کیفیت اسانس و ترکیب متابولیت‌های ثانویه زیره سبز، به‌ویژه ترکیب‌های کلیدی مانند

کومین‌آلدهید و سایر ترپنوئیدها، به شدت تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و شرایط محیطی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز، در کنار محتوای فنول کل و آنتوسیانین‌ها، به‌عنوان شاخص‌های مهمی برای ارزیابی مقاومت گیاه به تنش‌ها و ظرفیت دارویی آن شناخته می‌شوند (Gill & Tuteja, 2010؛ Li *et al*., 2018). این ترکیب‌ها نقش حیاتی در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو در گیاه ایفا می‌کنند.

مطالعات پیشین بر اهمیت ارزیابی توأمان صفات عملکردی (مانند عملکرد دانه و عملکرد اسانس) و صفات کیفی (مانند درصد اسانس، درصد ترکیب‌های مؤثره و پروفایل متابولیت‌ها) در شناسایی ژنوتیپ‌های برتر تأکید کرده‌اند (Kazemi *et al*., 2018؛ Hasan *et al*., 2024). در مطالعات پیشین نشان داده شده است که ژنوتیپ‌های خاصی از زیره سبز با محتوای کومین‌آلدهید بالا، عملکرد دانه‌ای قابل قبولی نیز از خود نشان دادند که این موضوع امکان به‌نژادی برای هر دو صفت را فراهم می‌کند (Mortazavian *et al*., 2018). همچنین، پژوهشگران با استفاده از تحلیل‌های آماری چندمتغیره مانند تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، خوشه‌بندی، همبستگی و رگرسیون چندگانه، ابزارهای قدرتمندی برای بررسی ساختار تنوع ژنتیکی و روابط پیچیده بین صفات عملکردی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی زیره سبز معرفی کرده‌اند (Mohammadi & Prasanna, 2003؛ Yan & Tinker, 2006). محققان با استفاده از PCA توانستند اکوتیپ‌های زیره سبز را براساس محتوای فنولی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی آنها گروه‌بندی کنند و روابط مثبتی بین این صفات و مقاومت به خشکی مشاهده نمایند (Soorni *et al*., 2020).

با وجود ظرفیت بالای گیاهان دارویی در عرصه کشاورزی پایدار و اقتصاد غیرنفتی، توجه به اصلاح آنها در ایران نسبت به محصولات راهبردی کمتر بوده است. این در حالی است که توسعه کشت گیاهانی مانند زیره سبز، به‌ویژه در مناطق کم‌بازده و دیم‌خیز، می‌تواند ضمن افزایش درآمد کشاورزان، سهم مهمی در تولید داروهای گیاهی و صادرات غیرنفتی ایفا کند. با در نظر گرفتن نیاز روزافزون به منابع طبیعی با خاصیت دارویی بالا و مقاومت در برابر تنش‌ها، مطالعه بر روی اکوتیپ‌های بومی زیره سبز از نظر صفات عملکردی، فیزیولوژیکی، آنتی‌اکسیدانی و بیوشیمیایی موضوعی ضروریست. این پژوهش با هدف مقایسه ۱۰ اکوتیپ بومی زیره سبز ایران از نظر صفات عملکردی، ترکیب‌های ثانویه و فعالیت آنتی‌اکسیدانی انجام شد تا ژنوتیپ‌های برتر و صفات مؤثر بر عملکرد شناسایی شوند. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنایی برای بهره‌برداری مستقیم از ژنوتیپ‌های برتر و نیز استفاده در برنامه‌های اصلاحی آینده فراهم کند.

مواد و روش‌ها

طرح آزمایشی و شرایط کشت

این مطالعه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) با ۱۰ ژنوتیپ بومی و محلی کشور (اسفراین، خوانسار، سیرجان، ماهان، بردسیر، رفسنجان، اردستان، سپیدان، سیوند و بردسکن) انجام شد. آزمایش در محل مزرعه پژوهشگاه افضلی‌پور، دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام و هر ژنوتیپ در سه تکرار کشت گردید. هر واحد آزمایشی شامل یک ردیف با طول مشخص (۲ متر) و فاصله ردیف‌ها ۴۰ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر بود. خاک محل کشت به‌صورت لومی–شنی با بافت متوسط بود و در اوایل پاییز کود حیوانی کاملاً پوسیده (۱۵ تن در هکتار) به خاک داده و بعد شخم زده شد.

صفات مورد اندازه‌گیری

پس از رسیدن محصول، نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی از هر واحد آزمایشی انجام شد. صفات زیر مورد بررسی قرار

گرفتند.

عملکرد دانه: براساس وزن کل دانه‌های برداشت شده از هر واحد به کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

عملکرد اسانس: به‌صورت حاصل‌ضرب درصد اسانس در عملکرد دانه در هکتار، تعیین گردید.

درصد اسانس: برای استخراج اسانس، دانه خشک هر ژنوتیپ به‌صورت آرد شده و به مدت ۳ ساعت تحت تقطیر با آب در دستگاه کلونجر قرار گرفتند. اسانس به‌دست آمده در ظروف خشک و تیره نگهداری شد تا از اکسیداسیون جلوگیری شود. سپس برحسب درصد وزنی اسانس نسبت به وزن خشک دانه، درصد اسانس محاسبه شد.

درصد کومین‌آلدهید: ترکیب اصلی اسانس با استفاده از دستگاه گازی کروماتوگرافی (GC) همراه با طیف‌سنج جرمی (MS) تعیین گردید.

تهیه عصاره، سنجش پروتئین و فعالیت آنزیم‌ها: برای تهیه عصاره گیاهی، ۳۰۰ میلی‌گرم دانه خشک و آسیاب شده با ۳ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد همگن‌سازی شد. سپس مخلوط حاصل به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰g سانتریفوژ گردید. مایع رویی جدا شده و برای سنجش فعالیت آنزیم‌های مختلف و تعیین محتوای پروتئین مورد استفاده قرار گرفت. محتوای پروتئین با استفاده از روش بردفورد (Bradford, 1976) تعیین شد. عصاره‌ها با معرف برادفورد مخلوط و جذب نوری در ۵۹۵ نانومتر اندازه‌گیری گردید.

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD): فعالیت سوپراکسید دیسموتاز با استفاده از روش Giannopolitis و Ries (۱۹۷۷) سنجیده شد. در این روش، عصاره آنزیمی با NBT، ریبوفلاوین و بافر فسفات مخلوط شد و مهار فتوریداکشن NBT در طول موج ۵۶۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. نمونه شاهد فاقد عصاره آنزیمی بود و به‌عنوان معیار ۱۰۰ درصد فتوریداکشن استفاده شد. حجم کل واکنش در این مطالعه ۳ میلی‌لیتر و حجم عصاره ۱۰۰ میکرولیتر بود که نسبت به شیوه‌نامه اصلی کمی تغییر یافته است. فعالیت آنزیمی برحسب واحد در ۱۰۰ میکرولیتر عصاره گزارش شد (Giannopolitis & Ries, 1977).

فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT): فعالیت کاتالاز با روش Dhindsa و همکارن (۱۹۸۱) تعیین شد. واکنش شامل بافر فسفات پتاسیم و H_2O_2 بود و افزودن عصاره آنزیمی تجزیه H_2O_2 را آغاز کرد. کاهش جذب نوری در ۲۴۰ نانومتر در هر دقیقه محاسبه شد. هر واحد آنزیمی برابر مقدار آنزیمی است که ۱ میکرومول H_2O_2 را در یک دقیقه تجزیه می‌کند. فعالیت آنزیمی برحسب واحد بر میلی‌گرم پروتئین گزارش شد (Dhindsa *et al.*, 1981).

گایاکول پراکسیداز (GPX): فعالیت گایاکول پراکسیداز با روش Plewa و همکاران (۱۹۹۱) اندازه‌گیری شد. واکنش شامل ۲/۷۷ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار (pH = 7.0)، ۱۰۰ میکرولیتر از محلول ۱ درصد گایاکول (v/v) و ۳۰ میکرولیتر از نمونه آنزیمی بود (Plewa *et al.*, 1991). فعالیت آنزیمی برحسب واحد در میلی‌گرم پروتئین ($U\ mg^{-1}$ protein) بیان شد.

آسکوربات پراکسیداز (APX): فعالیت آسکوربات پراکسیداز براساس روش Nakano و Asada (۱۹۸۱) اندازه‌گیری گردید (Nakano & Asada, 1981). مخلوط واکنش شامل ۰/۱۱ میلی‌مولار هیدروژن پراکسید، ۰/۵ میلی‌مولار اسید آسکوربیک و بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار با pH برابر ۷، به‌همراه ۱۵۰ میکرولیتر از محلول آنزیمی بود. کاهش جذب نوری در ۲۹۰ نانومتر خوانش و فعالیت آنزیمی برحسب واحد در میلی‌گرم پروتئین ($U\ mg^{-1}$ protein) گزارش شد.

محتوای فنول کل: ۱۰۰ میلی‌گرم از بذر آسیاب شده در پنج میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد سائیده و به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی نگهداری شد. سپس به مدت ۱۰ دقیقه در ۴۰۰۰g

سانتریفوژ شد و از محلول رویی برای سنجش فنل استفاده گردید. ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره با ۰/۲ میلی‌لیتر معرف فولین و دو میلی‌لیتر آب مخلوط گردید و پس از گذشت سه دقیقه یک میلی‌لیتر کربنات سدیم ۱۵ درصد به آن اضافه گردید. مخلوط حاصل به مدت دو ساعت در تاریکی نگهداری شد و بعد جذب هر نمونه در طول موج ۷۶۵ نانومتر خوانده شد (Gao & Liu, 2000) و با استفاده از منحنی استاندارد غلظت ترکیبات فنلی برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن خشک محاسبه گردید.

مقدار آنتوسیانین: دانه‌های زیره در ۱۰ میلی‌لیتر متانول اسیدی‌شده (ترکیب متانول با هیدروکلریک اسید با نسبت حجمی ۹۹:۱) خرد و همگن گردید. نمونه‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق و در تاریکی خیس و انکوبه شدند. سپس عصاره‌ها با سرعت ۴۰۰۰g به‌مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد سانتریفوژ شدند. جذب مایع رویی در طول موج ۵۵۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Wagner, 1979).

تحلیل آماری

اطلاعات جمع‌آوری شده به کمک نرم‌افزارهای آماری SAS 9.4 و Statgraphic مورد تحلیل قرار گرفتند. آنالیز واریانس (ANOVA) برای بررسی تفاوت‌های معنی‌دار بین ژنوتیپ‌ها انجام شد و میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه گردیدند. علاوه بر این، تحلیل همبستگی بین صفات مختلف محاسبه شد تا روابط بین آنها مشخص شود. تحلیل رگرسیون گام به گام برای تعیین صفات مؤثر بر عملکرد دانه استفاده شد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای بررسی ساختار تنوع ژنتیکی و روابط بین صفات استفاده گردید.

نتایج

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی زیره سبز، تفاوت معنی‌داری در کلیه صفات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی، ترکیب‌های متابولیکی و عملکردی وجود دارد (جدول ۱). در بین ژنوتیپ‌ها، اسفراین با بالاترین عملکرد دانه در واحد سطح، برتری مطلق داشت و عملکرد آن حدود ۱۱۱ درصد بیشتر از ژنوتیپ سیرجان (با کمترین مقدار عملکرد دانه) بود. با این حال، همین ژنوتیپ کمترین میزان فنول کل و پروتئین کل را دارا بود (جدول ۲). در مقابل، ژنوتیپ ماهان بالاترین درصد و عملکرد اسانس را ثبت کرد (به‌ترتیب ۱۱۴ و ۲۴۶ درصد بیشتر از ژنوتیپ بردسیر). ژنوتیپ بردسیر در حالی که کمترین مقدار درصد و عملکرد اسانس را داشت (جدول ۲)، بیشترین میزان آنتوسیانین را دارا بود (جدول ۲)، که حکایت از توانمندی آن در مسیرهای سنتز ترکیب‌های آنتی‌اکسیدانی دارد.

جدول ۱- تجزیه واریانس صفات ۱۰ اکوتیپ زیره سبز

Table 1. ANOVA for traits of ten *Cuminum cyminum* ecotypes

S.O.V.	d.f.	Protein content	CAT activity	APX activity	GPX activity	SOD activity	Total phenol content
Replication	2	147603**	3.31**	0.024**	4.86**	0.9996**	1.897**
Genotype	9	9384**	0.59**	0.038**	2195**	0.0469**	12.23**
Experimental error	18	2117	0.05	0.0002	0.78	0.013	0.036
C.V. (%)	-	4.94	4.89	3.76	7.03	4.66	5.34

APX: Ascorbate peroxidase, GPX: Guaiacol peroxidase, CAT: Catalase, and SOD: Superoxide dismutase.
n.s. and **: non-significant and significant at 1% probability level, respectively.

ژنوتیپ رفسنجان در شاخص‌های دفاعی مانند فنول کل، گایاکول پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز بیشترین مقادیر را نشان داد، اما در مقابل، کمترین مقادیر کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز را داشت (جدول ۲).

ادامه جدول ۱-

Continued Table 1. ANOVA for …

S.O.V.	d.f.	Anthocyanin content	Essential oil (EO)	Seed yield	EO yield	Cumin aldehyde
Replication	2	0.0004^{ns}	0.234^{**}	2624^{**}	339786^{**}	0.131^{**}
Genotype	9	0.009^{**}	1.15^{**}	113849^{**}	2664256^{**}	4.29^{**}
Experimental error	18	0.0002	0.019	167	21399	0.0102
C.V. (%)		6.27	3.89	1.49	4.74	0.56

n.s. and **: non-significant and significant at 1% probability level, respectively.

در مقابل، ژنوتیپ سپیدان بیشترین فعالیت سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز را دارا بود (جدول ۲). در نقطه مقابل، ژنوتیپ سپیدان بیشترین فعالیت سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز را داشت؛ می‌توان بیان کرد که احتمالاً ژنوتیپ‌های رفسنجان و سپیدان در مقابله با تنش‌های اکسیداتیو متحمل‌تر خواهند بود. ژنوتیپ سیوند با بالاترین میزان پروتئین دانه، حدود ۲۰ درصد بیشتر از اسفراین، در صدر قرار گرفت اما در مقابل، کمترین فعالیت آسکوربات پراکسیداز را داشت. از نظر ترکیب‌های متابولیت‌های ثانویه، رفسنجان بیشترین مقدار فنول کل و بردسیر بالاترین آنتوسیانین را داشتند (جدول ۲)، در حالی که ژنوتیپ‌های اسفراین، ماهان و بردسکن از نظر عملکرد دانه و اسانس عملکرد بالاتری داشتند. وجود چنین تنوعی در ژنوتیپ‌های بومی نشان‌دهنده ظرفیت بالای آنها برای استفاده در اصلاح ترکیبی یا اختصاصی در راستای بهبود کیفیت دارویی و غذایی زیره سبز است.

جدول ۲- مقایسه میانگین صفات ۱۰ اکوتیپ زیره سبز

Table 2. Mean trait comparison among ten *Cuminum cyminum* ecotypes

Genotype	Protein content (mg g^{-1})	CAT activity	APX activity	GPX activity	SOD activity	Total phenol content (mg g^{-1} quercetin)
		(u mg^{-1} protein)				
Esfarayen	841.9^{f}	4.38^{bc}	0.30^{e}	1.57^{ef}	2.47^{a-c}	0.48^{g}
Khansar	944.4^{a-d}	4.50^{bc}	0.40^{d}	1.00^{ef}	2.43^{a-c}	4.79^{c}
Sirjan	997.3^{ab}	4.27^{bc}	0.48^{b}	1.80^{e}	2.27^{de}	0.54^{g}
Mahan	897.4^{d-f}	4.39^{bc}	0.30^{e}	1.58^{ef}	2.55^{ab}	5.86^{b}
Bardsir	953.6^{a-d}	4.39^{bc}	0.28^{f}	18.10^{b}	2.38^{b-e}	4.91c
Rafsanjan	977.5^{a-c}	3.53^{d}	0.62^{a}	88.07^{a}	2.20^{e}	6.25^{a}
Ardestan	924.9^{b-e}	4.40^{bc}	0.32^{e}	0.25^{f}	2.48^{a-c}	4.14^{d}
Sepidan	864.3^{ef}	5.34^{a}	0.42^{cd}	3.57^{d}	2.58^{a}	3.47e
Sivand	1013^{a}	4.18^{c}	0.26^{f}	2.49^{de}	2.30^{c-e}	2.60^{f}
Bardaskan	905.1^{c-f}	4.59^{b}	0.44^{c}	7.32^{c}	2.48^{a-c}	2.58^{f}

APX: Ascorbate peroxidase, GPX: Guaiacol peroxidase, CAT: Catalase, and SOD: Superoxide dismutase.

Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

بیشترین درصد اسانس متعلق به ماهان بود و پس از آن ژنوتیپ‌های سیوند و رفسنجان قرار داشتند. این در حالی است که عملکرد نهایی اسانس در ژنوتیپ‌های اسفراین و ماهان بیشترین مقدار بود، بنابراین ترکیب این دو عامل در این دو رقم به‌صورت بهینه رخ داده است. از نظر کومین‌آلدهید، ترکیب کلیدی اسانس زیره، ژنوتیپ خوانسار با ۲۲ درصد بیشتر از سیوند در رتبه اول قرار گرفت (جدول ۲). این ترکیب از نظر دارویی و اقتصادی اهمیت ویژه‌ای دارد و ژنوتیپ‌های خوانسار، سپیدان و اسفراین به‌دلیل درصد بالای آن، برای اهداف دارویی توصیه می‌شوند. در مجموع، ژنوتیپ‌هایی مانند رفسنجان (فعالیت آنزیمی و متابولیکی بالا)، اسفراین (عملکرد دانه و اسانس) و ماهان (درصد اسانس بالا) نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها برتری داشتند. سایر ژنوتیپ‌ها نیز با دارا بودن ویژگی‌های خاص، ظرفیت بالایی برای برنامه‌های اصلاح منطقه‌ای یا تلاقی‌های هدفمند دارند.

ادامه جدول ۲-

Continued Table 2. Mean trait comparison …

Genotype	Anthocyanin content (mg g^{-1})	Essential oil (EO) (%)	Seed yield (kg h^{-1})	EO yield (kg h^{-1})	Cumin aldehyde (%)
Esfarayen	0.25^{b}	3.66^{b}	1167.00^{a}	4271.50^{a}	19.09^{bc}
Khansar	0.17^{d}	3.66^{b}	754.00^{f}	2759.80^{e}	19.59^{a}
Sirjan	0.18^{d}	3.60^{b}	553.00^{h}	1990.90^{f}	16.68^{g}
Mahan	0.17^{d}	4.10^{a}	1059.00^{b}	4342.10^{a}	18.92^{c}
Bardsir	0.28^{a}	1.92^{d}	649.00^{g}	1256.70^{g}	18.58^{d}
Rafsanjan	0.17^{d}	3.92^{a}	796.00^{e}	3121.00^{cd}	18.17^{e}
Ardestan	0.22^{c}	3.66^{b}	990.00^{c}	3626.10^{b}	16.86^{f}
Sepidan	0.25^{b}	3.33^{c}	932.00^{d}	3109.60^{cd}	19.21^{b}
Sivand	0.23^{c}	4.00^{a}	761.00^{f}	3044.10^{d}	16.10^{h}
Bardaskan	0.09^{e}	3.30^{c}	1009.00^{c}	3335.70^{c}	18.15^{e}

Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

همبستگی صفات و تحلیل رگرسیون عملکرد

تحلیل همبستگی نشان داد که بین پروتئین دانه و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز، همبستگی منفی معنی‌داری وجود دارد (جدول ۳). همچنین، کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز با یکدیگر همبستگی مثبت و قوی نشان دادند، در حالی که کاتالاز با گایاکول پراکسیداز همبستگی منفی داشت (جدول ۳). این الگو بیانگر آن است که مسیرهای دفاعی مختلف در گیاه ممکن است به‌صورت جایگزین یا مکمل در شرایط خاص فعال شوند. رابطه مثبت بین کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز بیانگر هماهنگی در سیستم دفاعی اولیه برای مقابله با تنش‌های اکسیداتیو است. آسکوربات پراکسیداز با آنتوسیانین رابطه منفی و معنی‌داری داشت که ممکن است نشان‌دهنده مسیرهای تنظیمی متفاوت یا رقابت در مسیر سنتز آنزیمی و فنولی باشد. از سوی دیگر، آسکوربات پراکسیداز با گایاکول پراکسیداز رابطه مثبت و معنی‌داری نشان داد. گایاکول پراکسیداز با فنول کل همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد، که تأییدی بر نقش آنزیم‌های پراکسیداز در تجزیه و واکنش‌پذیری ترکیب‌های فنولی در گیاه است. از سوی دیگر، آنتوسیانین با درصد اسانس همبستگی منفی و معنی‌داری داشت. این موضوع در تصمیم‌گیری برای انتخاب ژنوتیپ‌هایی با اهداف دوگانه (عملکرد بالا و کیفیت دارویی) اهمیت دارد. رگرسیون گام‌به‌گام نشان داد که صفاتی مانند درصد کومین‌آلدهید (۱۴٪)، درصد اسانس (۱۷٪)، آسکوربات پراکسیداز (۱۰٪) و سوپراکسید دیسموتاز (۹٪) در مجموع ۵۰ درصد از تغییرات عملکرد دانه را تبیین می‌کنند (جدول ۴).

جدول ۳- همبستگی صفات ۱۰ اکوتیپ زیره سبز

Table 3. Trait correlations among ten *Cuminum cyminum* ecotypes

	Protein content (mg g^{-1})	CAT activity (u mg^{-1} protein)	APX activity (u mg^{-1}protein)	GPX activity (u mg^{-1} protein)	SOD activity (u mg^{-1} protein)	Total phenol content (mg g^{-1} quercetin)	Anthocyanin content (mg g^{-1})	Essential oil (EO) (%)	Seed yield (kg h^{-1})	EO-yield (kg h^{-1})	Cumin aldehyde (%)
	X1	**X2**	**X3**	**X4**	**X5**	**X6**	**X7**	**X8**	**X9**	**X10**	**X11**
X1	1										
X2	-0.85^{**}	1									
X3	-0.22^{ns}	0.07^{ns}	1								
X4	0.12^{ns}	-0.42^{*}	0.67^{**}	1							
X5	-0.96^{**}	0.91^{**}	0.15^{ns}	-0.22^{ns}	1						
X6	0.23^{ns}	-0.30^{ns}	0.08^{ns}	0.49^{**}	-0.17^{ns}	1					
X7	0.03^{ns}	0.06^{ns}	-0.50^{**}	-0.14^{ns}	-0.06^{ns}	-0.05^{ns}	1				
X8	0.20^{ns}	-0.33^{ns}	0.12^{ns}	0.04^{ns}	-0.21^{ns}	0.01^{ns}	-0.38^{*}	1			
X9	-0.31^{ns}	0.11^{ns}	-0.26^{ns}	-0.19^{ns}	0.21^{ns}	-0.02^{ns}	-0.08^{ns}	0.34^{ns}	1		
X10	-0.12^{ns}	-0.10^{ns}	-0.17^{ns}	-0.12^{ns}	0.05^{ns}	0.02^{ns}	-0.22^{ns}	0.72^{**}	0.89^{**}	1	
X11	-0.23^{ns}	0.17^{ns}	0.03^{ns}	0.04^{ns}	0.13^{ns}	0.32^{ns}	0.05^{ns}	-0.17^{ns}	0.37^{*}	0.20^{ns}	1

n.s., *, and **: non-significant, significant at 5, and 1% probability levels, respectively.

APX: Ascorbate peroxidase, GPX: Guaiacol peroxidase, CAT: Catalase, and SOD: Superoxide dismutase.

این موضوع بر ضرورت در نظر گرفتن شاخص‌های بیوشیمیایی در کنار صفات عملکردی در ارزیابی ژنوتیپ‌ها تأکید دارد، که احتمالاً این صفات به‌صورت غیرمستقیم از طریق مسیرهای مختلف بر عملکرد دانه زیره تأثیر می‌گذارند.

جدول ۴- رگرسیون گام به گام برای عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) براساس صفات ۱۰ اکوتیپ زیره سبز

Table 4. Stepwise regression for seed yield (kg.ha^{-1}) based on ten *Cuminum cyminum* ecotypes

Variable	Parameter estimate	Partial R-Square	Model R-Square	*P* > F
Intercept	-1200*	-	-	0.03
Cumin aldehyde (%)	69.5*	0.14	0.14	0.05
Essential oil (%)	159.7*	0.17	0.30	0.02
Ascorbate peroxidase activity (u mg^{-1} protein)	-612.5*	0.10	0.41	0.04
Superoxide dismutase activity (u mg^{-1} protein)	198.6*	0.09	0.50	0.04

*: significant at 5% probability levels.

جدول ۵- مقدار ویژه، واریانس، واریانس تجمعی و ضریب بردارهای ویژه حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی صفات ۱۰ اکوتیپ زیره سبز

Table 5. Eigenvalues, variance, cumulative variance, and eigenvector coefficients from principal component analysis (PCA) of traits in ten *Cuminum cyminum* ecotypes

Variable	PC1	PC2
Protein content	-0.91	-0.16
Catalase activity	0.73	-0.42
Ascorbate peroxidase activity	-0.50	0.53
Guaiacol peroxidase activity	-0.62	0.49
Superoxide dismutase activity	0.95	-0.05
Total phenol content	-0.17	0.31
Anthocyanin content	0.13	-0.63
Essential oil (EO)	0.03	0.74
Seed yield	0.80	0.49
EO-yield	0.61	0.70
Cumin aldehyde	0.52	0.15
Eigenvalue	4.22	2.51
Proportion	38.38	22.80
Cumulative	38.38	61.19

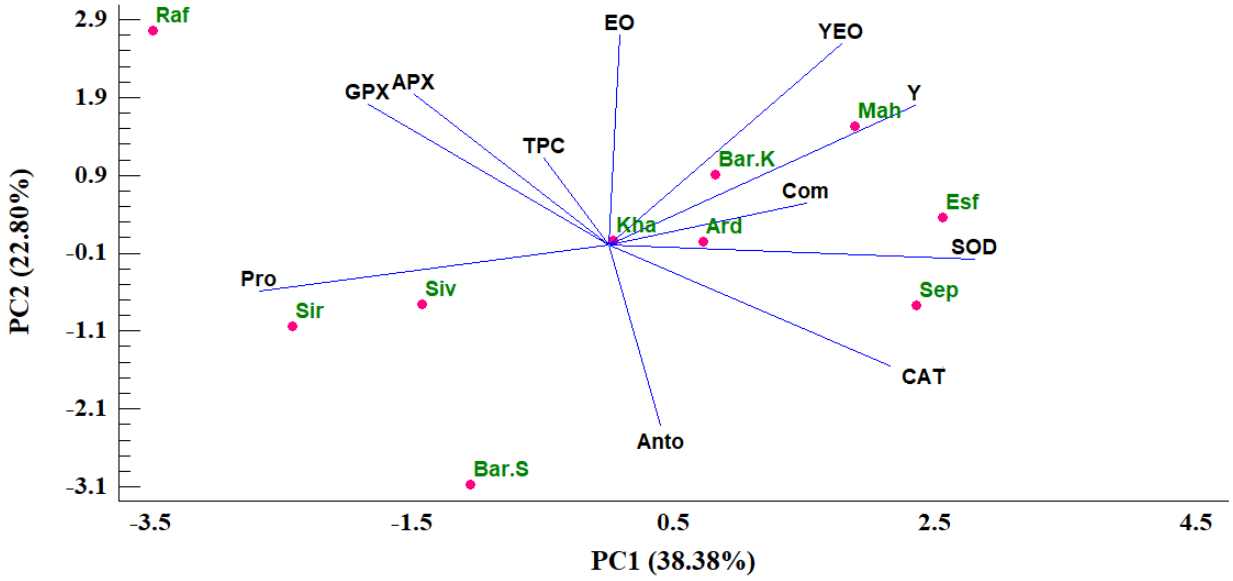
Eigenvalues (of the correlation matrix) above 1 are significant. Only significant eigenvalues are shown in the table.

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)

دو مؤلفه اول در مجموع ۶۱ درصد واریانس داده‌ها را تبیین کردند، که از کفایت مدل در توصیف تنوع ساختاری حکایت دارد. مؤلفه اول با سهم ۳۸ درصد، با صفاتی مانند کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، عملکرد دانه، عملکرد اسانس و کومین‌آلدهید همبستگی مثبت و با پروتئین کل، گایاکول پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز همبستگی منفی داشت. این ترکیب حکایت از تضاد متابولیکی بین سنتز پروتئین و مسیرهای عملکردی-دفاعی دارد. مؤلفه دوم که ۲۳ درصد از تغییرات را دربر داشت، با آسکوربات پراکسیداز و درصد اسانس همبستگی

مثبت و با آنتوسیانین رابطه منفی داشت، که نشان‌دهنده مسیرهای متابولیکی مجزا یا رقابتی در سنتز ترکیب‌های دفاعی و اسانسی است. بنابراین ژنوتیپ‌هایی که مقدار مثبت و بالاتری از هر دو مؤلفه را داشته باشند از نظر خصوصیات عملکردی (عملکرد دانه و عملکرد اسانس) و خصوصیات کیفی (فعالیت آنزیمی و کیفیت اسانس) بهتر خواهند بود و از نظر متابولیت‌هایی مانند پروتئین و آنتوسیانین ضعیف‌ترند.

به نظر می‌رسد ژنوتیپ‌های ماهان، اسفراین و سپیدان از نظر خصوصیات عملکردی، کیفیت اسانس و فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز از سایرین بهترند و از بقیه ژنوتیپ‌ها جدا شده‌اند و ژنوتیپ رفسنجان که بیشترین مقادیر مثبت مؤلفه دوم و منفی مؤلفه اول را داراست از نظر فنول کل، فعالیت آنزیم‌های گایاکول و آسکوربات پراکسیداز و مقدار پروتئین از سایرین به‌طور واضح‌تر جداست. بنابراین در تحلیل پراکنش ژنوتیپ‌ها، جدایی واضح ژنوتیپ‌های رفسنجان (فعالیت‌های آنزیمی بالا)، ماهان (عملکرد و درصد اسانس) و اسفراین و سپیدان (فعالیت آنزیمی) نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها دیده شد. این نتایج هم‌راستا با عملکرد مطلوب این ژنوتیپ‌ها در تحلیل‌های تک‌متغیره است.



شکل ۱- نمودار بای‌پلات حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی صفات ۱۰ اکوتیپ زیره سبز

Figure 1. Biplot from principal component analysis (PCA) of traits in ten *Cuminum cyminum* ecotypes

Trait: Y: Seed yield, YEO: Essential oil yield, EO: Essential oil percentage, TPC: Total phenolics content, APX: Ascorbate peroxidase, GPX: Guaiacol peroxidase, Pro: Total protein, Anto: Total anthocyanin, CAT: Catalase, and SOD: Superoxide dismutase.
Genotype: Sep: Sepidan, Esf: Esfarayen, Mah: Mahan, Bar.K: Bardaskan, Ard: Ardestan, Kha: Khansar, Raf: Rafsanjan, Siv: Sivand, Sir: Sirjan, and Bar.S: Bardsir.

از نظر تحلیل بردارها، مشخص شد که عملکرد اسانس همبستگی قوی‌تری با عملکرد دانه نسبت به درصد اسانس دارد. این یافته حائز اهمیت است، زیرا نشان می‌دهد که برای بهبود عملکرد اسانس، تمرکز بر افزایش عملکرد دانه (نه فقط درصد

اسانس) رویکرد مؤثرتری خواهد بود. در واقع، حتی اگر درصد اسانس ثابت بماند، با افزایش بیوماس تولیدی (عملکرد دانه)، عملکرد نهایی اسانس نیز افزایش خواهد یافت. نکته قابل‌توجه دیگر، رابطه منفی بین عملکرد دانه و درصد کومین‌آلدهید با پروتئین کل بود. بنابراین برای انتخاب ژنوتیپ‌های بهینه، تعادل بین عملکرد اقتصادی، کیفیت اسانس و ارزش تغذیه‌ای باید به‌صورت هدفمند لحاظ شود.

بحث

نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان داد که ژنوتیپ‌های بومی زیره سبز ایران از نظر صفات عملکردی، بیوشیمیایی و متابولیکی تنوع چشمگیری دارند. نتایج تجزیه واریانس بیانگر و تأییدکننده وجود تنوع ژنتیکی قابل‌توجه در ژنوتیپ‌های جمع‌آوری شده از نقاط مختلف ایران است که می‌تواند منبع غنی‌ای برای اصلاح و به‌نژادی هدفمند فراهم نماید (Ghotbzadeh-Kermani *et al*., 2024). مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که ژنوتیپ‌های مختلف زیره دارای ترکیب‌های فنولی و فلاونوئیدی متنوعی هستند که با فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالا و ظرفیت دارویی قابل‌توجه ارتباط مستقیم دارند (Mohammed *et al*., 2024). چنین تنوعی نه‌تنها امکان انتخاب ژنوتیپ‌های برتر برای اهداف خاص (مانند افزایش عملکرد دانه یا کیفیت اسانس) را فراهم می‌آورد، بلکه ظرفیت بالایی برای برنامه‌های اصلاحی چندهدفه ایجاد می‌کند. یافته‌ها حکایت از آن دارد که عملکرد دانه بالا الزاماً با غلظت بالای ترکیب‌های ثانویه همزمان نمی‌شود، که این موضوع نشان‌دهنده وجود تعارضات متابولیکی در گیاه است. این نتایج با گزارش‌های مشابهی که نشان داده‌اند عملکرد دانه و ترکیب‌های ثانویه ممکن است با یکدیگر در تضاد باشند، همسو است (Gill & Tuteja, 2010؛ Hasan *et al*., 2024).

ژنوتیپ اسفراین با وجود بالاترین عملکرد دانه، کمترین میزان فنول کل و پروتئین کل را داشت، که می‌تواند ناشی از اولویت‌دهی مسیرهای متابولیکی به سنتز بیوماس به‌جای ترکیب‌های دفاعی باشد. این الگو در بسیاری از گیاهان دارویی و معطر نیز گزارش شده و نشان می‌دهد که اصلاح‌گران باید میان افزایش عملکرد اقتصادی و حفظ کیفیت دارویی تعادل برقرار کنند. مطابق یافته‌های گذشته ژنوتیپ‌هایی با قابلیت بیشتر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان احتمالاً کارایی بیشتر در مقابله با تنش‌های اکسیداتیو دارند (Carmo *et al*., 2022)، بنابراین می‌توان بیان کرد که احتمالاً ژنوتیپ‌های رفسنجان و سپیدان در مقابله با تنش‌های اکسیداتیو متحمل‌تر خواهند بود. همچنین بیان شده است که افزایش تحمل به خشکی در ژنوتیپ‌های زیره سبز با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند CAT و APX همراه بوده و می‌تواند در انتخاب ژنوتیپ‌های مقاوم مؤثر باشد (Arshadi-Bidgoli *et al*., 2025).

ژنوتیپ سیوند با بالاترین میزان پروتئین دانه کمترین فعالیت آسکوربات پراکسیداز را نشان داد که چنین تضادهایی میان صفات آنزیمی و تغذیه‌ای، به احتمال زیاد ناشی از اولویت‌های متابولیکی در مسیرهای تنظیم مقابله با تنش یا عملکرد می‌باشند (Kazemi *et al*., 2018؛ Nouri *et al*., 2024). از آنجا که ژنوتیپ رفسنجان بیشترین مقدار فنول کل و بردسیر بالاترین آنتوسیانین را دارا بودند، همچنین ژنوتیپ‌های اسفراین، ماهان و بردسکن از نظر عملکرد دانه و اسانس عملکرد بالاتری داشتند، می‌توان بیان کرد که اصلاح برای عملکرد بالا ممکن است منجر به کاهش در برخی ترکیب‌های ثانویه شود (Ben-Miri, 2025؛ Pant *et al*., 2021). ترکیب‌های فرّار و پلی‌فنول‌های آنتی‌اکسیدانی زیره به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر منطقه جغرافیایی و شرایط فراوری قرار دارد که بیانگر اهمیت تنوع متابولیتی در جمعیت‌های مختلف است (Sun *et al*., 2025). عملکرد اسانس، که حاصل‌ضرب درصد اسانس در عملکرد دانه است (Crișan *et al*., 2023)، در ژنوتیپ‌های اسفراین و ماهان بیشترین مقدار را داشتند، بنابراین ترکیب این دو عامل در این دو رقم به‌صورت بهینه رخ داده است.

همبستگی‌های مشاهده‌شده میان آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و متابولیت‌ها نیز به درک عمیق‌تر سازوکارهای دفاعی گیاه کمک می‌کند. این یافته حکایت از وجود یک تعارض متابولیکی احتمالی

بین مسیرهای سنتز پروتئین و فعالیت‌های دفاعی گیاه دارد (Yousaf *et al*., 2025). همبستگی مثبت بین کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز نشان‌دهنده هماهنگی این دو آنزیم در کاهش تنش اکسیداتیو است، در حالی که همبستگی منفی کاتالاز با گایاکول پراکسیداز می‌تواند بیانگر مسیرهای جایگزین دفاعی در شرایط خاص باشد. بنابراین این روابط از امکان استفاده مکمل یا جایگزین از مسیرهای دفاعی توسط گیاه در شرایط استرس حمایت می‌کنند (Gill & Tuteja, 2010). همچنین، رابطه منفی آنتوسیانین با درصد اسانس از احتمال رقابت بین مسیرهای سنتز فلاونوئید و ترپنوئید حکایت دارد، که می‌تواند در برنامه‌های اصلاحی با اهداف دوگانه چالش ایجاد کند (Ahadi et al., 2023).

براساس نتایج رگرسیون گام‌به‌گام، می‌توان استنباط کرد که عملکرد دانه در زیره سبز نه تنها تحت تأثیر مستقیم صفات مورفولوژیک و زراعی است، بلکه به‌طور معناداری از شاخص‌های بیوشیمیایی و کیفی نیز اثر می‌پذیرد. سهم نسبتاً بالای درصد اسانس و درصد کومین‌آلدهید در تبیین تغییرات عملکرد، نشان‌دهنده آن است که ترکیب‌های متابولیکی ثانویه، علاوه‌بر ارزش اقتصادی و دارویی، می‌توانند با فرایندهای فیزیولوژیکی مؤثر بر رشد و نمو گیاه مرتبط باشند. از سوی دیگر، نقش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز بیانگر اهمیت سازوکارهای دفاعی گیاه در حفظ کارایی فتوسنتزی و سلامت سلولی در شرایط تنش است. این آنزیم‌ها از طریق کاهش آسیب اکسیداتیو، پایداری غشاها و حفظ تعادل متابولیکی، به‌طور غیرمستقیم بر افزایش بیوماس و نهایتاً عملکرد دانه تأثیر می‌گذارند. بنابراین، رویکردهای به‌نژادی که فقط بر انتخاب ژنوتیپ‌ها براساس عملکرد ظاهری متمرکز باشند، ممکن است بخشی از ظرفیت واقعی بهبود عملکرد را نادیده بگیرند. ترکیب ارزیابی‌های عملکردی با شاخص‌های بیوشیمیایی و متابولیتی، به‌ویژه در گیاهان دارویی مانند زیره سبز، می‌تواند منجر به انتخاب ژنوتیپ‌هایی شود که هم از نظر بازده اقتصادی و هم از نظر کیفیت محصول و پایداری در شرایط محیطی متغیر برتری داشته باشند.

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی، علاوه بر تأیید یافته‌های تک‌متغیره، تصویری کلی از الگوهای تنوع ارائه کرد. جدایی ژنوتیپ‌های ماهان، اسفراین، سپیدان و رفسنجان در فضای چندبعدی داده‌ها نشان می‌دهد که هریک از این ژنوتیپ‌ها نقاط قوت ویژه‌ای دارند و می‌توانند در راهبردهای اصلاحی مکمل یکدیگر باشند.

از نظر کاربرد عملی، یافته‌ها حکایت از آن دارد که برای افزایش عملکرد اسانس، تمرکز بر افزایش عملکرد دانه مؤثرتر از افزایش درصد اسانس است. این نکته برای کشاورزان و صنایع فراوری اسانس اهمیت دارد، زیرا می‌تواند بر انتخاب ژنوتیپ و مدیریت زراعی تأثیر بگذارد. در نهایت، مشاهده روابط منفی بین برخی ترکیب‌های کلیدی مانند پروتئین کل و درصد کومین‌آلدهید، بار دیگر بر لزوم رویکردهای اصلاحی چندهدفه و مبتنی بر تعادل متابولیکی تأکید می‌کند. این پژوهش می‌تواند مبنایی برای طراحی برنامه‌های به‌نژادی زیره سبز بومی ایران با تمرکز بر اهداف ترکیبی مانند عملکرد بالا، کیفیت اسانس و مقاومت به تنش‌های اکسیداتیو فراهم نماید.

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش نشان داد که اکوتیپ‌های بومی زیره سبز ایران دارای تنوع چشمگیری در صفات عملکردی، فیتوشیمیایی و دفاعی هستند که می‌تواند به‌عنوان منبع ارزشمند در برنامه‌های اصلاحی و تولید دارویی مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور خاص، ژنوتیپ‌های اسفراین، ماهان و رفسنجان به‌ترتیب برای بهره‌برداری در جهت افزایش عملکرد، تولید اسانس و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی توصیه می‌شوند. وجود تعارض بین برخی صفات مانند عملکرد و ترکیب‌های ثانویه یا فعالیت‌های آنزیمی، ضرورت اتخاذ رویکرد چندهدفه در اصلاح ارقام را برجسته می‌کند. البته استفاده همزمان از داده‌های عملکردی و بیوشیمیایی در غربالگری اکوتیپ‌ها، راهبردی مؤثر برای بهبود کیفیت و کمیت تولید در کشت زیره خواهد بود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت مالی پژوهشگاه افضلی‌پور در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را داریم.

Refrences

- Ahadi, H., Majid, S., Fatahi, R., Naghavi, M.R. and Mirjalili, M.H., 2023. Essential oil, flavonoids and anthocyanins profiling of some Iranian damask rose (*Rosa damascena* Mill.) genotypes. Industrial Crops and Products, 205: 117579. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117579
- Arshadi-Bidgoli, M., Mortazavian, S.M.M., Kazemi, H., Khavali, H. and Ranjbar, M., 2025. Enhancing drought tolerance in cumin through physiological and genetic insights from a synthetic variety. Scientific Reports, 15: 10154. https://doi.org/10.1038/s41598-025-95293-3
- Bradford, M.M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochemistry, 72(1-2): 248-254. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3
- Ben Miri, Y., 2025. Essential oils: Chemical composition and diverse biological activities: A comprehensive review. Natural Product Communications, 20: 1934578X241311790. https://doi.org/10.1177/1934578X241311790
- Carmo de Carvalho e Martins, M., da Silva Santos Oliveira, A.S., da Silva, L.A.A., Primo, M.G.S. and de Carvalho Lira, V.B., 2022. Biological indicators of oxidative stress [malondialdehyde, catalase, glutathione peroxidase, and superoxide dismutase] and their application in nutrition: 833-856. In: Patel, V.B. and Preedy, V.R., (Eds.). Biomarkers in Nutrition. Springer, 1206p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81304-8_49-1
- Crişan, I., Ona, A., Vârban, D., Muntean, L., Vârban, R., Stoie, A., Mihăiescu, T. and Morea, A., 2023. Current trends for lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) crops and products with emphasis on essential oil quality. Plants, 12(2): 357. https://doi.org/10.3390/plants12020357
- Dhindsa, R.S., Plumb-Dhindsa, P. and Thorpe, T.A., 1981. Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. Journal of Experimental Botany, 32: 93-101. https://doi.org/10.1093/jxb/32.1.93
- Gachkar, L., Yadegari, D., Rezaei, M.B., Taghizadeh, M., Alipoor Astaneh, S. and Rasooli, I., 2007. Chemical and biological characteristics of *Cuminum cyminum* and *Rosmarinus officinalis* essential oils. Food Chemistry, 102: 898-904. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.035
- Gao, J. and Liu, Y., 2000. Curing behavior and thermal property of epoxy resin with boron- containing phenol formaldehyde resin. Journal of Applied Polymer Science, 76: 1054-1061. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(20000516)76:7<1054::AID-APP9>3.0.CO;2-Z
- Ghotbzadeh-Kermani, S., Saeidi, G. and Sabzalian, M.R., 2024. Study of genetic parameters for agronomic traits affecting seed yield in some sesame (*Sesamum indicum*) genotypes. Journal of Genetics and Plant Breeding, 1: 43-66. https://doi.org/10.22103/gpb.2024.23161.1007
- Giannopolitis, C.N. and Ries, S.K., 1977. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. Plant Physiology, 59: 309-14. https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309
- Gill, S.S. and Tuteja, N., 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. Plant Physiology and Biochemistry, 48: 909-30. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016
- Hasan, N., Laskar, R.A., Farooqui, S.A., Naaz, N., Sharma, N., Budakoti, M., Joshi, D.C., Choudhary, S. and Bhinda, M.S., 2024. Genetic improvement of medicinal and aromatic plant species: breeding techniques, conservative practices and future prospects. Crop Design, 3: 100080. https://doi.org/10.1016/j.cropd.2024.100080
- Kazemi, H., Mortazavian, S.M.M. and Ghorbani-Javid, M., 2018. Breeding cumin landraces (*Cuminum cyminum* L.) for drought tolerance based on physiological and genetical traits. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 9: 78-90. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2018.03.001
- Li, B., Gao, K., Ren, H. and Tang, W., 2018. Molecular mechanisms governing plant responses to high temperatures. Journal of Integrative Plant Biology, 60: 757-79. https://doi.org/10.1111/jipb.12701
- Merah, O., Sayed-Ahmad, B., Talou, T., Saad, Z., Cerny, M., Grivot, S., Evon, P. and Hijazi, A., 2020. Biochemical composition of cumin seeds, and biorefining study.

Biomolecules, 10: 1054. https://doi.org/10.3390/biom10071054
- Mohammed, F.S., Sevindik, M., Uysal, İ., Česko, C. and Koraqi, H., 2024. Chemical composition, biological activities, uses, nutritional and mineral contents of cumin (*Cuminum cyminum*). Measurement: Food, 14: 100157. https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2024.100157
- Mohamamadizadeh, M.S., Bahadori, F., Hakimi, L. and Dehshiri, A., 2020. Evaluation of molecular diversity analysis and relation with environmental factors in accessions of cumin (*Cuminum cyminum* L.) in Iran, revealed by inter-simple sequence repeat (ISSR) markers and start codon targeted (SCoT) markers. Plant Molecular Biology and Genetics, 11: 1-14. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-35133/v1
- Mohammadi, S.A. and Prasanna, B.M., 2003. Analysis of genetic diversity in crop plants-salient statistical tools and considerations. Crop Science, 43: 1235-1248. https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1235
- Mortazavian, S.M.M., Safari, B., SadatNoori, S.A. and Foghi, B., 2018. Evaluation of diverse cumin (*Cuminum cyminum* L.) ecotypes for seed yield under normal and water stress condition. Journal of Agricultural Science and Technology, 20: 359-372. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.16807073.2018.20.2.15.9
- Mughal, S.A., 2022. A review on potential antioxidant effects of cumin (*Cuminum cyminum*), phytochemical profile and its uses. Authorea Preprints, 8(9): 1-19. https://doi.org/10.22541/au.166401164.45578619/v1
- Nakano, Y. and Asada, K., 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant and Cell Physiology, 22: 867-80. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232
- Nouri, A., Mofasseri, M., Jahani, R., Ghodrati, M., Emam, S.M.M. and Ebadi, M.T., 2024. Phytochemical composition, hypnotic activity, and antinociceptive properties of cumin essential oil collected from various geographical regions. Food Science and Nutrition, 12: 9025-9034. https://doi.org/10.1002/fsn3.4432
- Pant, P., Pandey, S. and Dall'Acqua, S., 2021. The influence of environmental conditions on secondary metabolites in medicinal plants: A literature review. Chemistry and Biodiversity, 18: e2100345. https://doi.org/10.1002/cbdv.202100345
- Plewa, M.J., Smith, S.R. and Wagner, E.D., 1991. Diethyldithiocarbamate suppresses the plant activation of aromatic amines into mutagens by inhibiting tobacco cell peroxidase. Mutation Research - Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis, 247: 57-64. https://doi.org/10.1016/0027-5107(91)90033-K
- Singh, N., Yadav, S.S., Kumar, S. and Narashiman, B., 2021. A review on traditional uses, phytochemistry, pharmacology, and clinical research of dietary spice *Cuminum cyminum* L. Phytotherapy Research, 35: 5007-5030. https://doi.org/10.1002/ptr.7133
- Soorni, J., Roustakhiz, J., Salimi, K. and Noori, M., 2020. Effects of drought stress on yield and yield-related traits, antioxidant enzymes and essential oil content of some cumin (*Cuminum cyminum* L.) ecotypes. Environmental Stresses in Crop Sciences, 13: 1125-1134. https://doi.org/10.22077/escs.2020.2395.1624
- Srinivasan, K., 2018. Cumin (*Cuminum cyminum*) and black cumin (*Nigella sativa*) seeds: traditional uses, chemical constituents, and nutraceutical effects. Food Quality and Safety, 2: 1-16. https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyx031
- Sultan, M.T., Butt, M.S., Akhtar, S., Ahmad, A.N., Rauf, M., Saddique, M.S. and Naz, A., 2014. Antioxidant and antimicrobial potential of dried cumin (*Cuminum cyminum* L.), caraway (*Carum carvi* L.) and turmeric powder (*Curcuma longa* L.). Journal of Food, Agriculture and Environment, 12(3): 71-76. https://www.researchgate.net/publication/281718584
-Sun, M., Lv, X., Liu, X., Chen, W., Shen, X., Chai, Z. and Zeng, M., 2025. Study on volatile organic compounds and antioxidant polyphenols in cumin produced in xinjiang. International Journal of Molecular Sciences, 26: 2628. https://doi.org/10.3390/ijms26062628
- Wagner, G., 1979. Content and vacuole/extravacuole distribution of neutral sugars, free amino acids, and anthocyanin in protoplasts. Plant Physiology, 64: 88-93. https://doi.org/10.1104/pp.64.1.88
- Yan, W. and Tinker, N.A., 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. Canadian Journal of Plant Science, 86: 623-645. https://cdnsciencepub.com/doi/pdf/10.4141/P05-169
- Yousaf, M.M., Yasmeen, A., Kareem, S.H.S., Arif, M., Alharby, H.F., Alsamadany, H., Alzahrani, H.M., Alamri, A.M., Latif, A. and Rehman, H., 2025. Mitigating terminal drought in chickpea (*Cicer arietinum* L.) using organic manures; effects on yield, potassium uptake and antioxidants activity. International Journal of Plant Production: 1-15. https://doi.org/10.1007/s42106-025-00342-6