



Research Article

Vol. 24, No. 3, Fall 2026, p. 389-402

Evaluation of the Combined Effect of Biochar-Based Organic Fertilizer and Chemical Fertilizer on the Yield of Cumin (*Cuminum cyminum* L)Gh. Amini¹, M. A. Behdani^{1*}, M. Askary², M. H. Sayyari Zahan³, M. Khazaei¹

1- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Research on Medicinal and Crop Plants, Iran

3- Department of Agronomy and Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

(*- Corresponding author's Email: mabehdani@birjand.ac.ir)**How to cite this article:**

Received: 07 December 2025

Revised: 24 January 2026

Accepted: 10 February 2026

Available Online: 12 May 2026

Amini, Gh., Behdani, M. A., Askary, M., Sayyari Zahan, M. H., & Khazaei, M. (2026). Evaluation of the combined effect of biochar-based organic fertilizer and chemical fertilizer on the yield of cumin (*Cuminum cyminum* L). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(3), 389-402. (In Persian)<https://doi.org/10.22067/jcesc.2026.96886.1437>**Introduction**

Cumin (*Cuminum cyminum* L.) is one of the most important medicinal plant. It has high demand in Asia in the treatment of gastrointestinal problems and is used as condiments. It is also recognized for possessing powerful immunomodulatory properties. *Cuminum cyminum* is an important plant due to export benefits, its cultivation utilizes and revitalizes arid and semi-arid lands, and low water demand. Considering the importance of *Cuminum cyminum* as a medicinal plant, therefore, it is essential to better understand the determining factors on the yield of cumin. Therefore, proper nutritional management through utilizing organic and chemical fertilizers is considered essential in growing *Cuminum cyminum* for exploiting the potential of the environment and achieving maximum yield. Organic inputs can guarantee both agricultural production and nature conservation. The current approach is to find an appropriate substitute of chemical fertilizers by organic compounds that are cost-effective and eco-friendly. This study aimed to improve the yield and biodiversity by selecting the most appropriate way of medicinal plants cultivation that in addition to creating plants with high quantitative and qualitative yield, can increase the profitability through enhanced nitrogen use efficiency. Therefore, the purpose of this study is to evaluate the effects of biochar, and chemical fertilizers (NPK) on Cumin's growth and yield. This study provided physiological insights into the agronomic benefit mechanism of biochar utilization.

Materials and Methods

In order to investigate the effects of biochar, NPK complete fertilizer, and their combination on the yield and yield components of two local cumin population (*Cuminum cyminum* L), a factorial experiment in a randomized complete block design (RCBD) with three replications at the Agricultural Research Field of the University of Birjand at 32°53' N and longitude of 59° and 13 East and at an altitude of 1480 m a.s.l. Birjand, Iran. The experimental treatments consisted of three levels of chemical fertilizer (20-20-20 NPK at 0, 40, and 80 kg ha⁻¹), two levels of biochar (0 and 10 ton ha⁻¹), and two local cumin cultivars (Khusf and Sarayan). Before preparing the seed bed, for measuring the physical and chemical properties and other required parameters of the soil, sampling was done from 0 to 30 cm depth from the experimental site. The measured traits included the morphophysiological traits, yield and yield components.

Results and Discussion

The results indicated that biochar and NPK fertilizer significantly affected the studied morphological and yield traits, and there was a statistically significant difference between the levels of biochar and NPK fertilizer

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).<https://doi.org/10.22067/jcesc.2026.96886.1437>

treatments. Significant differences were also observed between the two cumin cultivars. The Khusf cultivar exhibited superior growth and yield traits compared to the Sarayan cultivar. The highest grain and biological yields were obtained with the Khusf cultivar under the combined application of 10 ton ha⁻¹ of biochar and the application of 40 kg ha⁻¹ of NPK. Furthermore, no significant difference was observed between the 40 and 80 kg ha⁻¹ of NPK fertilizer application rates. Therefore, the application of 40 kg ha⁻¹ of NPK is recommended for optimal yield, reduced input costs, and minimized environmental impact.

Conclusion

The expansion of intensive crop production systems for long terms caused several problems, such as the reduction of biodiversity and the environmental contamination. The increasing concern regarding the negative impacts of these conventional agricultural methods on the ecosystems suggests the exploration of alternative methods endowed with improved efficiency and sustainability as well as high productivity. Application of organic fertilizers may be one appropriate way to reach this goal. The present experiment findings suggest that biochar application, in combination with reduced chemical fertilizer inputs, offers a promising approach for the sustainable production of medicinal plants while minimizing adverse environmental impacts.

Keywords: Biological yield, Cultivars, Grain yield, NPK

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص ۳۸۹-۴۰۲

ارزیابی اثر تلفیقی کود آلی مبتنی بر بیوجار و کود شیمیایی بر عملکرد زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.)

غلامرضا امینی^۱، محمدعلی بهدانی^{۱*}، مهدیه عسکری^۲، محمدحسن سیاری زهان^۳، مسعود خزاعی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

چکیده:

به منظور بررسی اثر بیوجار و کود کامل NPK و تلفیق آن‌ها بر عملکرد و اجزاء عملکرد دو توده محلی زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.)، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند طی سال زراعی ۱۴۰۴ انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل کود شیمیایی (۲۰-۲۰-۲۰) NPK در سه سطح (صفر، ۴۰ و ۸۰ کیلوگرم در هکتار)، بیوجار در دو سطح (صفر و ۱۰ تن در هکتار) و دو توده محلی زیره سبز خوسف و سرایان بودند. نتایج نشان داد که صفات ریخت‌شناسی و عملکردی مورد مطالعه تحت تأثیر بیوجار و کود NPK قرار گرفتند و بین سطوح تیمارهای کودی بیوجار و NPK اختلاف آماری معنی‌داری وجود داشت. همچنین نتایج نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین دو توده مورد مطالعه بود. نتایج نشان‌دهنده برتری توده خوسف نسبت به توده سرایان با دارا بودن بیشترین میزان صفات رشدی و عملکردی بود. بیشترین میزان عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک از توده خوسف، کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوجار و کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که بین سطوح ۴۰ و ۸۰ کیلوگرم در هکتار NPK تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. از آنجایی که کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK منجر به افزایش ۲۴ درصدی عملکرد دانه توده خوسف نسبت به شاهد گردید، بنابراین کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK برای حصول عملکرد قابل قبول توصیه می‌گردد که ضمن کاهش هزینه‌های مصرفی (نسبت به کاربرد ۸۰ کیلوگرم در هکتار) از آلودگی زیست‌محیطی نیز جلوگیری می‌گردد. با توجه به نتایج این آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد بیوجار ضمن کاهش مصرف کودهای شیمیایی و کم شدن اثرات سوء زیست‌محیطی، روش مناسبی برای تولید سالم و پایدار گیاه دارویی زیره سبز باشد.

واژه‌های کلیدی: ارقام، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، NPK

مقدمه

2017). گسترش سیستم‌های تولید فشرده محصولات کشاورزی برای مدت طولانی باعث ایجاد مشکلات متعددی از جمله کاهش تنوع زیستی و آلودگی محیط زیست شده است. نگرانی فزاینده در مورد تأثیرات منفی این روش‌های کشاورزی مرسوم بر بوم‌نظام‌ها، جست‌وجو برای روش‌های جایگزین با کارایی و پایداری بهبود یافته و همچنین بهره‌وری بالا را امری لازم و ضروری به شمار می‌آورد (Amani Machiani et al., 2017). نظام‌های کشاورزی پایدار مبتنی بر راهبردهای تولید متنوع برای تولید محصولات با کیفیت بالا با حداقل مصرف منابع هستند، درحالی‌که هدف کشاورزی مدرن برای افزایش بهره‌وری در کشت مرسوم اغلب با مفهوم پایداری در تضاد است (Bedoussac et al., 2015). اثرات منفی و مضر کشاورزی مرسوم (به عنوان مثال، استفاده بیش از اندازه از نهاده‌های شیمیایی از جمله کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها) بر زیست‌بوم، نیاز

امروزه کشاورزی با چالش‌های جدی مانند کاهش زمین‌های زراعی، کمبود آب، فقر مواد مغذی خاک، تغییرات اقلیمی و استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی مواجه است (Gruda, 2019). بنابراین، سیستم‌های کشاورزی سنتی، اگرچه بازده بالایی تولید می‌کنند، اما این کار را با استفاده از منابع تجدیدناپذیر انجام می‌دهند و به طور فزاینده‌ای مورد سؤال قرار می‌گیرند (Duchene et al., 2019).

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- محقق گیاهان دارویی و زراعی، ایران

۳- گروه زراعت و علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
(Email: mabehdani@birjand.ac.ir)

*) نویسنده مسئول: <https://doi.org/10.22067/jcesc.2026.96886.1437>

۷۰ درصد از کود نیتروژن از سیستم‌های کشاورزی هدر می‌رود که منجر به مجموعه‌ای از مشکلات بوم‌شناختی و زیست‌محیطی مانند اسیدی شدن خاک، کاهش تنوع زیستی و انتشار گازهای نیتروژنی می‌شود (Carneiro et al., 2021). برای افزایش کارایی مصرف نیتروژن و کاهش تهدیدات سلامت گیاه، رویکردهای کشاورزی پایدار، مانند بهینه‌سازی میزان مصرف کود نیتروژن، افزودن کود نیتروژن با رهایش آهسته و استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی، باید توسعه یابند. کاربرد ترکیبی کود نیتروژن و بیوپچار به دلیل مزایای متمایز آن در افزایش محتوای نیتروژن خاک و افزایش کارایی مصرف نیتروژن، توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است (Carneiro et al., 2021). کاربرد ترکیبی بیوپچار و کود نیتروژن مزایای زیادی از جمله موارد زیر را به همراه دارد: ۱- آزادسازی ماده مغذی نیتروژن؛ که منجر به آزادسازی تدریجی نیتروژن برای جذب و استفاده گیاه می‌شود (Liu et al., 2021; Jeffery et al., 2017)؛ ۲- افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی بالای بیوپچار (Farahani et al., 2020)؛ ۳- افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک (Farahani et al., 2020)؛ ۴- بهبود رطوبت خاک در لایه سطحی خاک، که به جلوگیری از تبخیر نیتروژن کمک می‌کند (Borchard et al., 2019)؛ و ۵- بهبود رشد میکروبی‌های خاک و معدنی شدن نیتروژن (Phares et al., 2022). به‌طور کلی، حاصلخیزی خاک برای دستیابی به تولید بالا و سودآوری گیاهان دارویی در واحد سطح ضروری است. عملکرد گیاهان دارویی به شدت تحت تأثیر کودهای آلی و شیمیایی قرار دارد. کودهای شیمیایی به‌ویژه کودهای نیتروژنه، با افزایش تعداد شاخه‌های جانبی و گل در هر بوته، عملکرد کمی و کیفی گیاهان دارویی را بهبود می‌بخشند (Askary et al., 2024). فسفر مشابه نیتروژن از جمله عناصر اصلی و ضروری برای رشد و نمو گیاه می‌باشد و کاربرد آن برای دستیابی به تولید مطلوب بسیار مهم است (Mosapour & Feizian, 2024). این عنصر تشکیل‌دهنده مولکول‌های حیاتی DNA، RNA و ATP است و همچنین در فتوسنتز، تنفس و توسعه رشد نقش بسزایی دارد (Mosapour & Feizian, 2024). فسفر در اثر واکنش‌های پیچیده در خاک (به دلیل بالا و یا پایین بودن pH خاک و رقابت در جذب فسفر) به صورت غیرقابل استفاده تبدیل می‌شود. کودهای آلی به صورت مستقیم و غیرمستقیم، تأثیر قابل توجهی بر فسفر قابل استفاده دارند. به همین دلیل، مدیریت فسفر (به دلیل فرآیندهای جذب و تثبیت فسفر به شکل‌های غیرقابل دسترس) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و شناسایی منابع شیمیایی و آلی جایگزین فسفر الزامی می‌باشد (Lashari et al., 2014). بیوپچار می‌تواند به عنوان مخزنی برای فسفر عمل کرده و نسبت خاصی از فسفر که برای گیاه مناسب است را فراهم نماید (Dari et al., 2016). تان و همکاران (Tan et al., 2018) بیان کردند که تبدیل بقایای گیاهی به بیوپچار سبب تبدیل ترکیبات پیچیده پتاسیم به شکل‌های ساده‌تر می‌شود که

به نظام‌های جدید سازگار با محیط زیست با بهره‌وری بالاتر، کارایی بهبودیافته و پایداری را نشان می‌دهد. استفاده از کودهای آلی می‌تواند یکی از راه‌های مناسب برای رسیدن به این هدف باشد (Amani Machiani et al., 2021). در بین این روش‌ها، استفاده از بیوپچار به عنوان یک راهبردی بالقوه برای افزایش رشد، تاب‌آوری و تولید متابولیت‌های ثانویه گیاهان دارویی پدیدار شده است (Mafakheri & Asghari, 2025). مطالعات علمی نشان داده‌اند که بیوپچار نقش مهمی در دستیابی به پایداری زیست‌محیطی کشاورزی دارد (Ayaz et al., 2021; Kumar & Bhattacharya, 2021). بیوپچار، یک محصول جانبی غنی از کربن حاصل از پیرولیز است که از تجزیه حرارتی مواد آلی مانند بقایای محصولات کشاورزی، تراشه‌های چوب یا کود در شرایط محدود اکسیژن حاصل می‌شود (Lu et al., 2020; Li et al., 2023; Sayed et al., 2024). براساس آیین‌نامه اروپایی که از سال ۲۰۲۰ لازم‌الاجرا شده است، بیوپچار به عنوان ماده‌ای مطابق با اهداف، معیارها و اصول تولید ارگانیک در کشاورزی اتحادیه اروپا شناخته شده و در فهرست کودها/اصلاح‌کننده‌های خاک که می‌توانند در کشاورزی ارگانیک مورد استفاده قرار گیرند، پذیرفته شده است (European Commission, 2020). نشان داده شده است که استفاده از بیوپچار در خاک، ساختار خاک را بهبود می‌بخشد، و همچنین جذب آب و دسترسی به مواد مغذی را افزایش می‌دهد (Rivelli & Libutti, 2022). در واقع، بیوپچار به عنوان یک اصلاح‌کننده مفید خاک برای کاهش تغییرات اقلیمی از طریق ترسیب کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای پیشنهاد می‌شود (Rivelli & Libutti, 2022). این اثرات قابل توجه بر خواص خاک می‌تواند تأثیر مستقیمی بر شاخص‌های رشد گیاه از جمله ارتفاع گیاه، تجمع زیست‌توده و تعداد شاخه‌ها در هر گیاه داشته باشد که برای به حداکثر رساندن عملکرد در گیاهان دارویی بسیار مهم هستند (Akhtar et al., 2021). برای افزایش تأثیر بیوپچار بر رشد گیاه و خواص خاک، باید آن را در ترکیب با منبعی از مواد مغذی گیاهی، مانند کودهای معدنی یا آلی، یا ترکیبی از هر دوی آن‌ها استفاده کرد (Bai et al., 2022; Hannet et al., 2021). ریولی و لیبوتی (Rivelli & Libutti, 2022)، بهبود قابل توجهی در حاصلخیزی خاک و عملکرد محصول هنگام استفاده هم‌زمان از بیوپچار و کود معدنی گزارش کردند. ژو و همکاران (Zhu et al., 2015)، افزایش ۷۵ درصدی زیست‌توده ذرت (*Zea mays* L.) را هنگام ترکیب بیوپچار و کود NPK گزارش کردند. گاثورن-هاردی و همکاران (Gathorne-Hardy et al., 2009) پس از ترکیب بیوپچار و کود نیتروژن، افزایش بیش از ۳۰ درصدی عملکرد جو (*Hordeum vulgare*) را مشاهده کردند.

نیتروژن به دلیل نقش منحصربه‌فرد در فرآیندهای ژنتیکی و متابولیکی گیاه، یکی از ضروری‌ترین مواد مغذی برای رشد گیاه و بهره‌وری محصول محسوب می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که ۵۰ تا

و بادام در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد تهیه شده بود؛ کود شیمیایی NPK (۲۰+۲۰+۲۰) (در سه سطح عدم کاربرد، ۴۰ و ۸۰ کیلو گرم در هکتار NPK) و توده‌های محلی زیره سبز (توده خوسف و توده سرایان که به لحاظ ظاهری و دوره رشدی هیچ تفاوتی بین آنها وجود ندارد) بودند. هر بلوک دارای ۱۲ کرت و جوی آب مجزا جهت آبیاری به روش سیفونی (به دلیل استفاده از تیمار کودها) بود، فاصله بین کرت‌ها دو متر و فاصله بین بلوک‌ها سه متر در نظر گرفته شد. هر کرت شامل پنج ردیف با فاصله ردیف ۵۰ سانتی‌متر به طول پنج متر و عرض ۲/۵ متر بود. قبل از تهیه بستر کاشت، نمونه‌برداری از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک محل آزمایش برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی انجام شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه خاک‌شناسی منتقل شده و میزان شاخص‌های مورد نیاز اندازه‌گیری گردید (جدول ۱). پس از انجام کرت‌بندی، عملیات کوددهی و کاشت بذر به صورت دستی انجام شد. به طوری که در محل کاشت بذر روی پشته‌ها شیار به عمق پنج سانتی‌متر ایجاد شده و کود مورد نیاز به مقدار مشخص شده داخل شیارها ریخته و روی آن با لایه‌ای به قطر دو تا سه سانتی‌متر از خاک پوشیده و سپس عملیات کاشت بذر به صورت دستی انجام شد. تراکم زیره سبز ۱۲۰ بوته در مترمربع در نظر گرفته شد (Azizi et al., 2008). اولین آبیاری پس از کاشت به روش سیفونی انجام گردید. وجین علف‌های هرز به صورت دستی در دو مرحله (۲۰ فروردین و اول اردیبهشت) انجام شد. عملیات واکاری هم‌زمان با اولین وجین علف‌های هرز انجام گردید. قبل از تهیه بستر کاشت، نمونه‌برداری از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک محل آزمایش برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی انجام شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه خاک‌شناسی منتقل شده و میزان شاخص‌های مورد نیاز اندازه‌گیری گردید (جدول ۱). همچنین نتایج آنالیز بیوجار پسته استفاده شده، در جدول ۲ ارائه شده است.

صفات مورد مطالعه شامل ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، تعداد چتر در بوته، تعداد دانه در چتر، وزن دانه در بوته، وزن خشک بوته، وزن هزاردانه، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه بودند. صفات مورد مطالعه در مرحله رسیدگی کامل انجام شد و برای این منظور پس از حذف اثر حاشیه‌ای، دو مترمربع از هر کرت انتخاب و برداشت شدند. بوته‌ها در پاکت‌های مجزا بسته‌بندی و به آزمایشگاه منتقل گردید. پس از اندازه‌گیری صفات ریخت‌شناختی، نمونه‌های متعلق به تیمارهای مختلف در پاکت‌های مجزا در آون به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شده و سپس صفات عملکردی اندازه‌گیری شدند. در پایان، صفات اندازه‌گیری شده بر مبنای آزمایش فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند و برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و رسم شکل‌ها از نرم‌افزارهای SAS (V9.1) و Excel استفاده گردید. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون FLSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

به راحتی قابل جذب گیاه می‌باشند. بنابراین مدیریت تغذیه گیاهان دارویی با استفاده از کودهای آلی می‌تواند آنها را در برابر شرایط تنش‌زا مقاوم‌تر کرده و پایداری تولید آنها را افزایش دهد (Askary et al., 2018). بنابراین، شناخت عوامل مؤثر بر کیفیت و کمیت اجزای فعال زیستی گیاهان دارویی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا کیفیت دارویی این گیاهان به مدیریت صحیح چرخه مواد مغذی و استفاده صحیح از منابع آلی و زیستی بستگی دارد.

زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) از نظر اقتصادی یک محصول دارویی مهم محسوب می‌شود. این گیاه در آسیا برای درمان مشکلات گوارشی تقاضای زیادی دارد و به عنوان چاشنی استفاده می‌شود (Alqethami & Aldhebiani, 2021). همچنین به دلیل داشتن خواص ویژه، به عنوان تعدیل‌کننده سیستم ایمنی شناخته شده است (Pelvan et al., 2022). زیره سبز به دلیل مزایای صادراتی، استفاده و احیای زمین‌های خشک و نیمه‌خشک و نیاز کم به آب، گیاهی مهم است (Alqethami & Aldhebiani, 2021). این گیاه به طور گسترده در فرمولاسیون داروهای گیاهی و طب سنتی استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت زیره سبز به عنوان یک گیاه دارویی، کشت صحیح و بهینه آن از طریق مدیریت‌های مختلف کشاورزی باید جایگزین کشت فعلی آن شود. بنابراین، مدیریت صحیح تغذیه‌ای از طریق استفاده از کودهای آلی و شیمیایی در کشت زیره سبز برای بهره‌برداری از پتانسیل محیط و دستیابی به حداکثر عملکرد ضروری است. نهاده‌های ارگانیک می‌توانند هم تولید محصولات کشاورزی و هم حفاظت از طبیعت را تضمین کنند. رویکرد فعلی، یافتن جایگزین مناسب کودهای شیمیایی با ترکیبات آلی است که مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست باشند. بنابراین، هدف از این مطالعه، ارزیابی اثرات بیوجار و کودهای شیمیایی (NPK) بر رشد و عملکرد زیره سبز است. این مطالعه، بینش فیزیولوژیکی در مورد سازوکار سودمندی زراعی استفاده از بیوجار را ارائه می‌دهد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش طی سال زراعی ۱۴۰۴ به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند با عرض جغرافیایی ۳۲ درجه، ۵۳ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۳ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح دریا انجام شد. منطقه مورد آزمایش با میانگین درجه حرارت بالای ۳۰ درجه سانتی‌گراد در ۱۴۲ روز از سال (در نیمی از فصل بهار و فصل تابستان) و میانگین بارندگی سالیانه ۱۷۰ میلی‌متر، به لحاظ آب‌وهوایی جزء مناطق گرم و خشک محسوب می‌شود. عامل‌های آزمایش شامل دو سطح بیوجار (عدم مصرف و ۱۰ تن در هکتار. بیوجار مورد استفاده از شاخه‌ها و ضایعات درختان پسته

نتایج

ارتفاع بوته

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر اصلی بیوپچار بر ارتفاع بوته می‌باشد و بقیه اثرات اصلی، اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه معنی‌دار نشد (جدول ۳). بین سطوح تیمار بیوپچار به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری وجود داشت و کاربرد بیوپچار باعث افزایش ارتفاع بوته زیره سبز گردید، به طوری که ارتفاع بوته در شاهد (عدم کاربرد بیوپچار) نسبت به تیمار کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوپچار ۶/۵ درصد کاهش یافت (شکل ۱).

تعداد شاخه فرعی در بوته

نتایج آنالیز واریانس داده‌های حاصل از آزمایش داده‌ها

جدول ۱- تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک

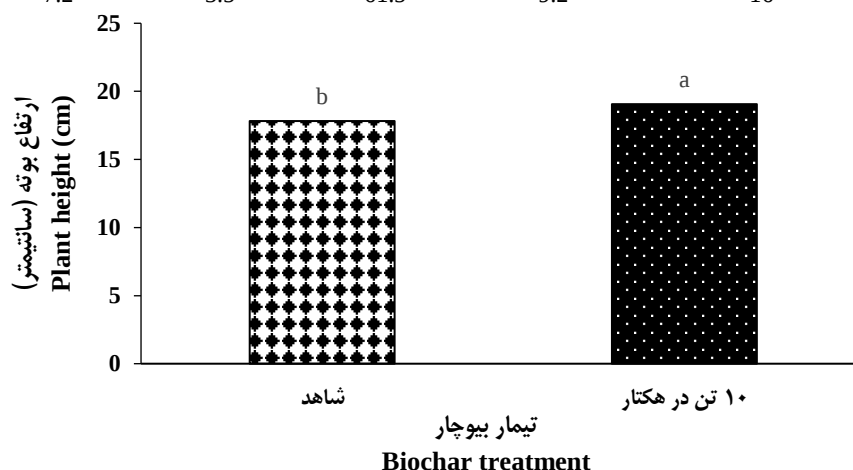
Table 1- Physical and chemical analysis of field soil at a depth of 0-30 cm

عمق Depth (cm)	رس Clay (%)	سیلت Loam (%)	شن Sand (%)	بافت Texture	چگالی ظاهری Db (g cm ⁻³)	فسفر P (mg kg ⁻¹)	پتاسیم قابل جذب Exchangeable K (meq L ⁻¹)	نیتروژن N (%)	درصد اشباع SP (%)	ظرفیت زراعی FC	ماده آلی Organic matter	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	اسیدیته pH
0-30	12	38	50	لومی Loam	1.2	12	250	0.03	32	17	0.29	5.2	8.16

جدول ۲- نتایج آنالیز بیوپچار پسته

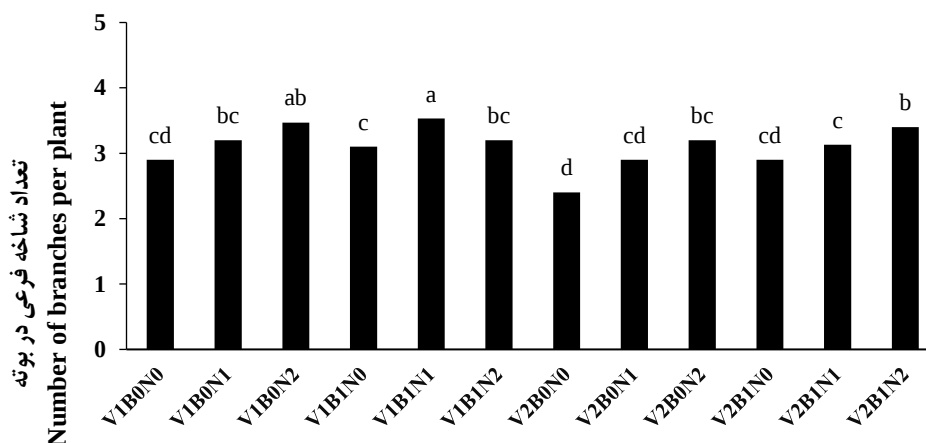
Table 2- Pistachio biochar analysis

درصد اشباع Sp (%)	اسیدیته خاک pH	هدایت الکتریکی Ec (dS m ⁻¹)	پتاسیم K (meq lit ⁻¹)	کربن آلی Organic C (%)	ماده آلی Organic matter (%)	فسفر P (mg kg ⁻¹)
100	7.2	3.5	61.5	9.2	16	49.4



شکل ۱- اثر اصلی تیمار بیوپچار بر ارتفاع بوته (سانتی‌متر)

Figure 1- Main effect of biochar treatment on plant height (cm)



تلفیق توده، بیوچار و NPK

The interaction of variety, biochar, NPK

شکل ۲- اثر متقابل توده، بیوچار و NPK بر تعداد شاخه فرعی در بوته

Figure 2- Interaction effect of variety, biochar, and NPK on number of branches per plant

V2B1N1 (توده سرایان، کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار، و ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK) اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۴). کمترین تعداد دانه در چتر متعلق به تیمار V2B0N0 (توده سرایان، عدم کاربرد بیوچار و NPK) بود (شکل ۴).

وزن خشک بوته در هکتار (عملکرد بیولوژیک)

نتایج آنالیز واریانس نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر اصلی بیوچار و اثر متقابل سه‌گانه توده، بیوچار و NPK بر وزن خشک بوته در هکتار (عملکرد بیولوژیک) در سطح احتمال یک درصد بود، ولی بقیه اثرات اصلی و دوگانه بر این صفت معنی‌دار نگردید (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه توده، بیوچار و NPK نشان داد که بیشترین وزن خشک بوته از تیمار V1B1N2 (توده خوسف کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار و کاربرد ۸۰ کیلوگرم در هکتار NPK) به دست آمد و کمترین وزن خشک بوته نیز متعلق به تیمار V2B0N0 (توده سرایان، عدم کاربرد بیوچار و عدم کاربرد کامل NPK) بود که با تیمار V2B0N1 (توده سرایان، عدم کاربرد بیوچار و کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK) اختلاف آماری معنی‌داری نداشت (شکل ۵).

وزن هزاردانه

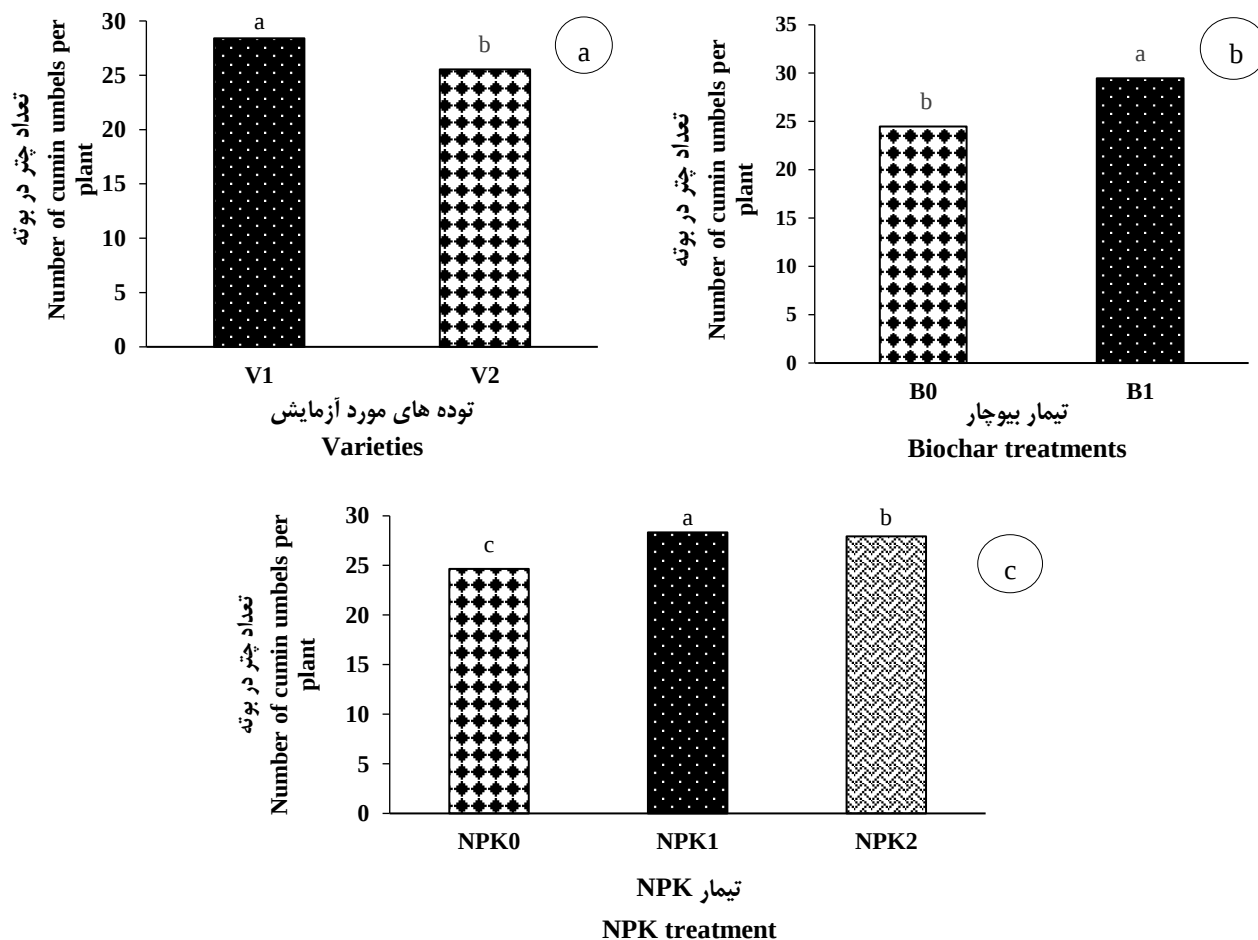
نتایج نشان داد که وزن هزاردانه فقط تحت تأثیر اثر معنی‌دار NPK قرار گرفت و بقیه اثرات اصلی، اثرات متقابل دوگانه و اثر متقابل سه‌گانه بر وزن هزاردانه معنی‌دار نگردید (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین و کمترین وزن هزاردانه به ترتیب از تیمارهای ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK و شرایط شاهد (عدم کاربرد NPK) به دست آمد (شکل ۶).

تعداد چتر در بوته

در بین تیمارهای مورد مطالعه، اثرات اصلی توده، بیوچار و NPK بر تعداد چتر در بوته معنی‌دار گردید ولی اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی توده نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار بین توده‌های مورد مطالعه بود، به طوری که توده خوسف تعداد چتر در بوته بیشتری نسبت به توده سرایان داشت (شکل ۳ الف). همچنین نتایج بیانگر تفاوت معنی‌دار بین سطوح بیوچار بود و کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار منجر به افزایش تعداد چتر در بوته گردید (شکل ۳ ب). نتایج نیز نشان داد که کاربرد کود شیمیایی NPK منجر به افزایش تعداد چتر در بوته نسبت به شرایط شاهد گردید، هرچند بین تیمارهای ۴۰ و ۸۰ کیلوگرم در هکتار NPK از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۳ ج).

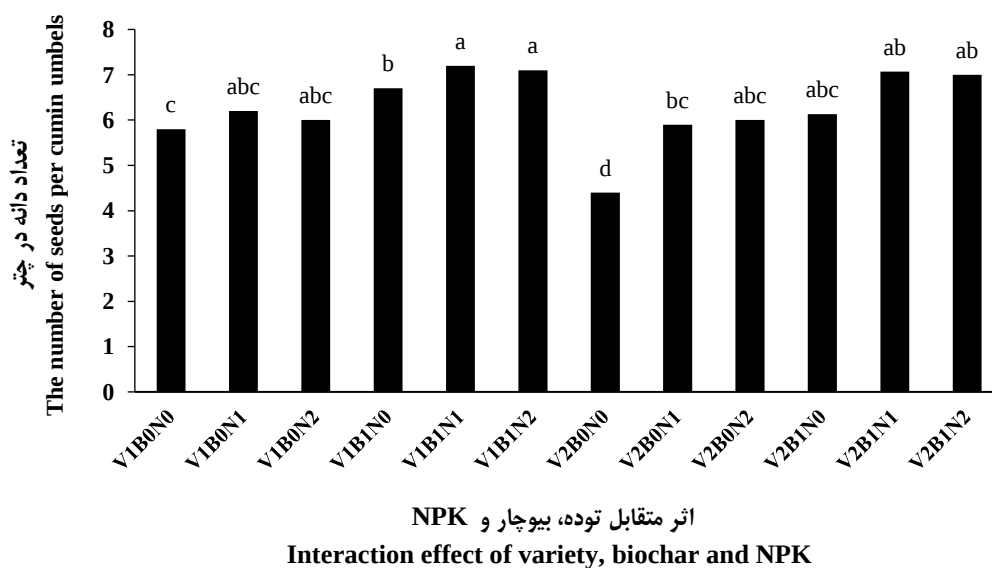
تعداد دانه در چتر

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر اصلی بیوچار در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل سه‌گانه توده، بیوچار و NPK در سطح احتمال پنج درصد بر تعداد دانه در چتر می‌باشد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه توده، بیوچار و NPK نشان داد که در هر دو توده مورد آزمایش بین سطوح کودی بیوچار و NPK اختلاف آماری معنی‌دار وجود داشت. اگرچه بیشترین تعداد دانه در چتر از تیمار V1B1N1 (توده خوسف، کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار و کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK) به دست آمد، ولی به لحاظ آماری با تیمارهای V1B1N2 (توده خوسف، ۱۰ تن در هکتار بیوچار و ۸۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن) و



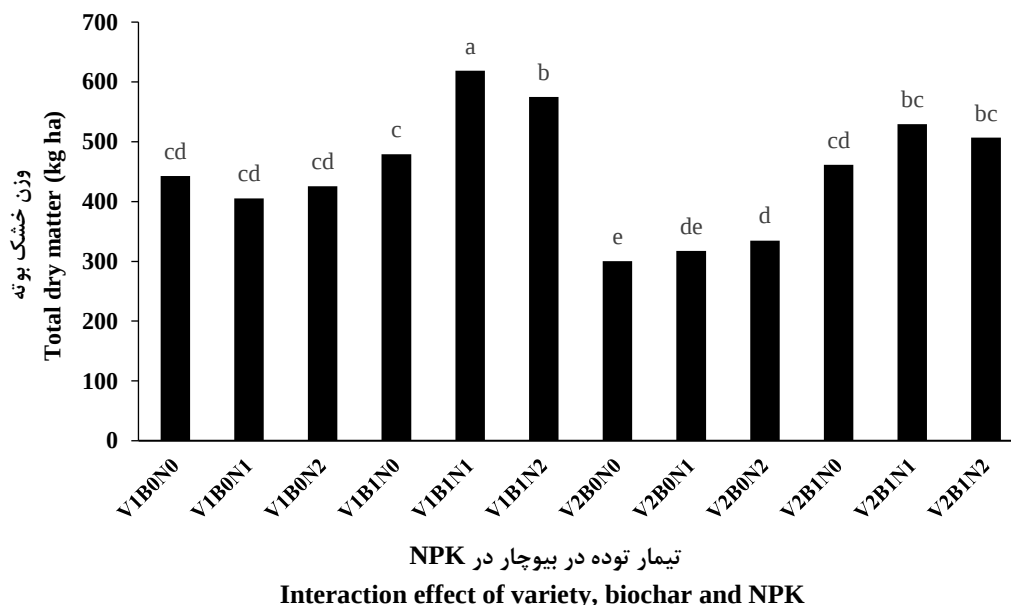
شکل ۳- اثرات اصلی توده (الف)؛ بیوچار (ب) و NPK (ج) بر تعداد چتر در بوته

Figure 3- Main effects of variety (a); biochar (b) and NPK (c) on the number of cumin umbels per plant

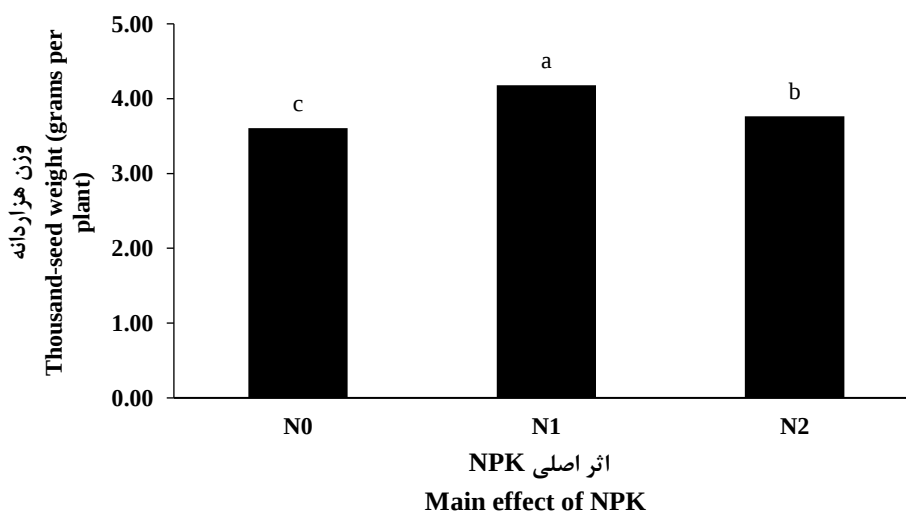


شکل ۴- اثر متقابل توده، بیوچار و NPK بر تعداد دانه در چتر

Figure 4- Interaction effect of variety, biochar and NPK on the number of seeds per cumin umbels



شکل ۵- اثر متقابل توده، بیوچار و NPK بر وزن خشک کل بوته (کیلوگرم در هکتار)
Figure 5- Interaction effect of variety, biochar and NPK on total dry matter (kg ha)

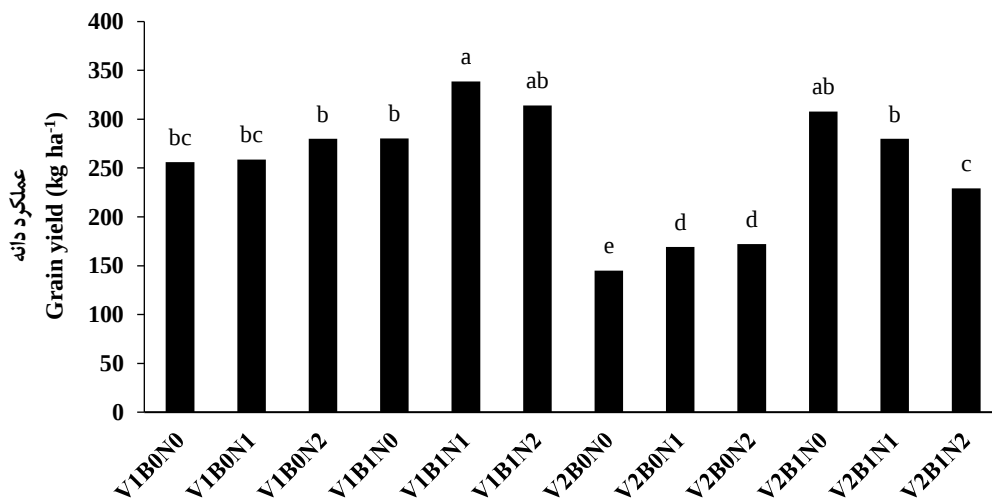


شکل ۶- اثر اصلی NPK بر وزن هزاردانه (گرم در بوته)
Figure 6- Main effect of NPK on thousand-seed weight (grams per plant)

عملکرد دانه در هکتار

در بین تیمارهای مورد مطالعه، اثر اصلی بیوچار در سطح احتمال یک درصد، اثر متقابل دوگانه توده و NPK و اثر متقابل سه‌گانه توده، بیوچار و NPK به‌ترتیب در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد بر عملکرد دانه در هکتار معنی‌دار گردید (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه توده، بیوچار و NPK نشان داد که در هر دو توده مورد بررسی، بین سطوح بیوچار و NPK اختلاف آماری معنی‌داری وجود داشت (شکل ۷). بیشترین عملکرد دانه در هکتار از تیمار V1B1N1 (توده خوسف، کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار و کاربرد ۴۰ کیلوگرم در

هکتار کود کامل NPK) به دست آمد که به‌لحاظ آماری با تیمارهای V1B1N2 (توده خوسف کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار و کاربرد ۸۰ کیلوگرم در هکتار NPK) و V2B1N1 (توده سرایان، کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار و کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار کود کامل NPK) اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۷). همچنین کمترین عملکرد دانه در هکتار متعلق به تیمار V2B0N0 (توده سرایان، عدم کاربرد بیوچار و عدم کاربرد کامل NPK) بود که با تیمار V2B1N0 (توده سرایان، کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار و عدم کاربرد کود کامل NPK) اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۷).



تیمار توده در بیوچار در NPK

Interaction effect of variety, biochar and NPK

شکل ۷- اثر متقابل توده، بیوچار و NPK بر عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)

Figure 7- Interaction effect of variety, biochar and NPK on grain yield (kg ha⁻¹)

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر بیوچار و NPK بر عملکرد دو توده محلی زیره سبز

Table 3- Results of analysis of variance of the effect of biochar and NPK on the yield of two studied cumin varieties.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد شاخه فرعی Number of branch	تعداد چتر در بوته Number of umbels per plant	تعداد دانه در چتر Number of seeds per umbels	وزن خشک بوته (عملکرد بیولوژیک) Plant dry weight (biological yield) (kg ha ⁻¹)	وزنه هزار دانه Weight of 1000-grains (g)	عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)
تکرار Replication	2	21.82**	2.71**	639.2**	13.48**	102473**	3.82**	31434**
توده‌های زیره Cumin varieties (V)	1	0.0044ns	0.0044ns	73.38*	0.26ns	14641ns	0.016ns	6084ns
بیوچار Biochar (B)	1	13.69**	0.75**	224**	11.67**	114469**	0.082ns	37636**
NPK	2	0.65ns	0.18*	94.01*	1.62ns	6520ns	1.05**	1401ns
توده در بیوچار V × B	1	1.13ns	0.53**	3.36ns	0.09ns	7685ns	0.016ns	1877ns
توده × NPK V × NPK	2	0.22ns	0.087ns	17.74ns	0.026ns	25608ns	0.1ns	8281*
بیوچار × NPK B × NPK	2	1.84ns	0.32**	9.36ns	0.63ns	1375ns	0.18ns	465ns
توده × بیوچار × NPK V × B × NPK	2	1.19ns	0.27**	19.48ns	1.75*	56523**	0.075ns	23411**
خطا	22	0.64	0.05	12.58	0.5	9077	0.1	2356.23
ضریب تغییرات C.V (%)		4.3	6.8	13.1	11.2	21.1	8.2	20.3

***: معنی‌داری در سطح یک درصد؛ *: معنی‌داری در سطح پنج درصد و ns: عدم معنی‌داری را نشان می‌دهند.

***: Significance at the 1% level; *: Significance at the 5% level and ns: indicate non-significance.

بحث

بیوجار از جمله مهم‌ترین کودهای آلی مؤثر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به شمار می‌رود. این مواد از جرم مخصوص ظاهری پایین و ساختار متخلخل برخوردار بوده (Guo et al., 2014; Mukherjee et al., 2016) و با توجه به اثرات مثبت متعدد بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، به ثبات و افزایش تولید و کیفیت محصول کمک می‌کند. این ماده به‌عنوان ابزاری جهت بهبود باروری خاک، کارکردهای بوم‌نظام و ترسیب کربن جهت کاهش تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود (Saah et al., 2022). کاربرد این مواد به‌تنهایی یا به‌صورت مخلوط با هم سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش تولید در محصولات مختلف شده است (Mukherjee et al., 2014; Agegnehu et al., 2016). بیوجار با وجود خصوصیات مثبت ذکر شده به‌خصوص از نظر اثرات مثبت بر خصوصیات فیزیکی خاک، از محتوای عنصری پایین برخوردار بوده و در نتیجه کاربرد آن به‌تنهایی از پتانسیل اندکی برای بهبود رشد و تغذیه گیاه برخوردار است (Fischer & Glaser, 2012). تلفیق بیوجار و کودهای شیمیایی به‌ویژه NPK اثر هم‌افزایی داشته و منجر به تأثیرات مثبت بیشتری نسبت به تیمارهای جداگانه آن‌ها شده است. در واقع، تیمار تلفیقی در قیاس با تیمارهای جداگانه آن‌ها توانسته میزان کافی نیتروژن مورد نیاز گیاه را فراهم کند و به‌دنبال آن خصوصیات رشدی و عملکردی گیاه افزایش یافته است (Peng et al., 2015; Rezaei Chiyaneh et al., 2021). در مطالعه چندساله خود نشان دادند که استفاده از بیوجار موجب کاهش تلفات نیتروژن، بهبود حاصلخیزی خاک، افزایش کربن آلی خاک، تثبیت نیتروژن و افزایش جذب نیتروژن توسط ذرت شده است و بنابراین ماده مؤثری برای بهبود بوم‌نظام کشاورزی است. همچنین فلوی و همکاران (Faloye et al., 2020) گزارش کردند که کاربرد ترکیبی بیوجار و کود نیتروژن باعث بهبود مواد مغذی خاک، افزایش جذب مواد غذایی و کاهش آب‌شویی مواد معدنی در همه تیمارها شده است. به‌دلیل دوام بسیار بالای بیوجار در خاک (برای قرن‌های متمادی)، این کود قابلیت بالایی برای بهبود تولیدات کشاورزی دارد. توانایی بالای این ماده آلی در جذب و نگهداری عناصر غذایی و کودهای شیمیایی نظیر نیتروژن و فسفر و جلوگیری از آب‌شویی آن‌ها، باعث افزایش رشد گیاهان می‌شود (Lu et al., 2020). چادری و همکاران (Chaudhry et al., 2016) در مطالعات خود به تأثیر بیشتر تیمارهای حاوی تلفیق کود شیمیایی و بیوجار نسبت به تیمارهای مجزای آن‌ها اشاره کردند و دلیل این امر را جلوگیری از آب‌شویی عناصر غذایی در تیمارهای حاوی بیوجار عنوان کرد. در همین رابطه گزارش شده است که تلفیق تیمارهای کودهای آلی با کودهای شیمیایی منجر به حداکثر فعالیت آن‌تی‌اکسیدانی در

ریحان (Ocimum basilicum L.) (Pandey et al., 2016)، گیاهان جعفری معطر (Tagetes minuta L.) (Pandey et al., 2015) و شمعدانی معطر (Pelargonium graveolens) (Pandey & Patra., 2015) شده است.

در مطالعه حاضر نیز بیشترین میزان عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در هر دو توده مورد مطالعه از تلفیق کودهای بیوجار و NPK به دست آمد. نتایج نشان‌دهنده آن است که استفاده از تلفیق کود بیوجار و نیتروژن باعث شده نیتروژن به‌صورت بهینه در اختیار گیاه قرار گیرد و کارایی استفاده از نیتروژن بیشتر شود. همچنین نتایج نشان‌دهنده برتری کاربرد بیوجار نسبت به عدم کاربرد آن بود و کاربرد بیوجار موجب بهبود صفات رشدی و عملکردی زیره سبز شد که می‌تواند به‌دلیل فراهمی بهینه عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم باشد. به‌طور کلی نیتروژن پر مصرف‌ترین عنصر غذایی در تغذیه گیاهان محسوب می‌شود و اثر مستقیم بر عملکرد کمی و کیفی گیاهان دارد (Eskandari et al., 2021). کشاورزان معمولاً برای تأمین کمبود این عنصر، از کودهای شیمیایی حاوی این عنصر استفاده می‌کنند تا نیاز گیاه به این عنصر را جبران کنند (Nikbakht et al., 2020). مصرف بیش از حد نیتروژن باعث اسیدی شدن خاک، کاهش فعالیت میکروبی خاک، طولانی‌تر شدن دوره رشد گیاه، افزایش هزینه‌های تولید و مسائل زیست‌محیطی مانند آلودگی منابع آب زیرزمینی می‌گردد (Eskandari et al., 2021). بنابراین مصرف بهینه نیتروژن و راه‌های افزایش بهره‌وری این عنصر برای گیاهان از اولویت‌های تحقیقاتی بخش کشاورزی می‌باشد (Nikbakht et al., 2020).

نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقی در مورد گیاهان دارویی، بررسی شرایط مختلف محیطی تأثیرگذار بر میزان عملکرد کمی و کیفی آن‌ها است. شاید بتوان بیان کرد که یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های تولیدکنندگان گیاهان دارویی علاوه بر میزان کمی محصول، تولید گیاهی با کیفیت بالا است. از آنجاکه هدف نهایی از کشت آن‌ها، استفاده از مواد مؤثره موجود در آن‌ها است و مسلماً هرچه مقدار این مواد مؤثره و متابولیت‌های ثانویه در واحد وزن گیاه بیشتر باشد از نظر اقتصادی نفع بیشتری حاصل خواهد شد. بنابراین بررسی و به‌دست آوردن بهترین شرایط محیط کشت که بتواند منجر به تولید گیاهی با بیشترین عملکرد کمی و کیفی گردد از جمله مهم‌ترین اهداف تحقیقات مربوط به کشت گیاهان دارویی می‌باشد. در مطالعه حاضر، بیشترین عملکرد کمی و عملکرد دانه از توده خوسف با کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوجار و کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK به دست آمد. اصلاح خواص فیزیکی خاک و قابلیت

توصیه می‌گردد که ضمن کاهش هزینه‌های مصرفی، از آلودگی زیست‌محیطی (آلودگی خاک و آب) نیز جلوگیری می‌گردد. با توجه به نتایج این آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد بیوپچار ضمن کاهش مصرف کودهای شیمیایی، می‌تواند روش مناسبی برای تولید سالم و پایدار گیاهان دارویی باشد.

دسترسی گیاه زیره سبز به عناصر غذایی بیشتر می‌تواند دلیل عمده افزایش عملکرد تحت شرایط کاربرد کود بیوپچار باشد. به همین دلیل مصرف کود بیوپچار در مدیریت منابع غذایی جهت حصول عملکرد کمی قابل قبول توصیه می‌شود. از آنجایی که بین کاربرد ۴۰ و ۸۰ کیلوگرم در هکتار NPK تفاوت آماری معنی‌داری مشاهده نگردید، کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK برای حصول عملکرد قابل قبول

References

1. Akhtar, S. S., Andersen, M. N., & Liu, F. (2021). Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agricultural Water Management*, 219, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.02.016>
2. Agegnehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2016). Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 543, 295-306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054>
3. Alqethami, A., & Aldhebiani, A. Y. (2021). Medicinal plants used in Jeddah, Saudi Arabia: Phytochemical screening. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1), 805-812. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.11.013>
4. Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedlood, M. R., & Maggi, F. (2017). Evaluation of yield, essential oil content and compositions of peppermint (*Mentha piperita* L.) intercropped with faba bean (*Vicia faba* L.). *Journal of Cleaner Production*, 171, 529-537. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.062>
5. Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedlood, M. R., Aghaee, A., & Maggi, F. (2021). Funnelformis mosseae inoculation under water deficit stress improves the yield and phytochemical characteristics of thyme in intercropping with soybean. *Scientific Reports*, 11, 15279. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94681-9>
6. Askary, M., Behdani, M. A., Parsa, S., Mahmoodi, S., & Jamialahmadi, M. (2018). Water stress and manure application affect the quantity and quality of essential oil of *Thymus daenensis* and *Thymus vulgaris*. *Industrial Crops & Products*, 111, 336-344. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.056>
7. Askary, M., Behdani, M. A., Mollaei, H., Fallahi, H. R., Azarmi-Atajan, F., & Mokhtari Macinaei, H. (2024). Bioactive compounds and apoptotic effects of saffron (*Crocus sativus* L.) in different fertilizer conditions. *Biochemical Systematics and Ecology*, 114, 104806. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2024.104806>
8. Ayaz, M., Feiziene, D., Tilvikiene, V., Akhtar, K., Stulpinaite, U., & Iqbal, R. (2021). Biochar role in the sustainability of agriculture and environment. *Sustainability*, 13, 1330. <https://doi.org/10.3390/su13031330>
9. Azizi, K., Amini, M., Sabouri, B., & Shabani, G. (2008). Effect of different levels of nitrogen fertilizer and plant density on quantitative and qualitative cumin function in Lorestan. In 10th Congress of Agronomy and Plant Breeding, Tehran, Iran. (In Persian).
10. Bai, S. H., Omidvar, N., Gallart, M., Kämper, W., Tahmasbian, I., Farrar, M. B., Singh, K., Zhou, G., Muqadass, B., Xu, C. Y., Koech, R., Li, Y., Nguyen, T. T. N., & Zwieten, L. V. (2022). Combined effects of biochar and fertilizer applications on yield: A review and meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 808, 152073. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152073>
11. Bedoussac, L., Journet, E. P., Hauggaard-Nielsen, H., Naudin, C., Corre-Hellou, G., Jensen, E. S., Prieur, L., & Justes, E. (2015). Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 911-935. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7>
12. Borchard, N., Schirrmann, M., Cayuela, M., Kammann, C., Wrage-Monnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizábal, T., Sigua, G., Spokas, K., Ippolito, J. A., & Novak, J. (2019). Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 651, 2354-2364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.060>
13. Carneiro, J. S. S., Ribeiro, I. C. A., Nardis, B. O., Barbosa, C. F., Filho, J. F. L., & Melo, L. C. A. (2021). Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability. *Science of the Total Environment*, 760, 143955. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143955>
14. Chaudhry, U. K., Shahzad, S., Naqqash, M. N., Saboor, A., Yaqoob, S., Abbas, M. S., & Saeed, F. (2016). Integration of biochar and chemical fertilizer to enhance quality of soil and wheat crop (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 9(1), 348-358. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.1631>
15. Dari, B., Nair, V. D., Harris, W. G., Nair, P. K. R., Sollenberger, L., & Mylavarapu, R. (2016). Relative influence of soil- vs. biochar properties on soil phosphorus retention. *Geoderma*, 280, 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.018>
16. Duchene, O., Vian, J. F., & Celette, F. (2017). Intercropping with legume for agroecological cropping systems:

- complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 240, 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.019>
17. Eskandari, Z., Taab, A., Eshghizadeh, H. R., & Khorvash, M. (2021). Growth characteristics and yield evaluation of dual-purpose corn hybrids in two levels of urea fertigation. *Journal of Crop Production and Processing*, 11(3), 111-124. (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jcpp.11.3.36172>
18. European Commission. (2020). Farm to Fork Strategy. for a Fair, Healthy and Environmentally-Friendly Food System; European Commission: Brussels, Belgium. pp. 1–23.
19. Faloye, O. T., Ajayi, A. E., Alatise, M. O., Ewulo, B. S., & Horn, R. (2020). Nutrient uptake, maximum yield production, and economic return of maize under deficit irrigation with biochar and inorganic fertiliser amendments. *Biochar Journal*, 1, 375–388. <https://doi.org/10.1007/s42773-019-00032-3>
20. Farahani, S. S., Asoodar, M. A., & Moghadam, B. K. (2020). Short-term impacts of biochar, tillage practices, and irrigation systems on nitrate and phosphorus concentrations in subsurface drainage water. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(1), 761–771. <https://doi.org/10.1007/S11356-019-06942-W>
21. Fischer, D., & Glaser, B. (2012). Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration. In Management of organic waste. In Tech, Rijeka and Shanghai, p. 167-198. <https://doi.org/10.5772/31200>
22. Gathorne-Hardy, A., Knight, J., & Woods, J. (2009). Biochar as a soil amendment positively interacts with nitrogen fertilizer to improve barley yields in the UK. In IOP Conference Series. Earth and Environmental Science; IOP Publishing: Bristol, UK, 6, p. 372052.
23. Gruda, N. S. (2019). Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*, 9(6), 298. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>
24. Guo, L., Wu, G., Li, Y., Li, C., Liu, W., Meng, J., Liu, H., Yu, X., & Jiang, G. (2016). Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat–maize rotation system in eastern China. *Soil and Tillage Research*, 156, 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.010>
25. Hannet, G., Singh, K., Fidelis, C., Farrar, M. B., Muqaddas, B., & Bai, S. H. (2021). Effects of biochar, compost, and biochar-compost on soil total nitrogen and available phosphorus concentrations in a corn field in Papua New Guinea. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 27411–27419. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12477-w>
26. Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A. C., Van Groenigen, J. W., Hungate, B. A., & Verheijen, F. (2017). Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters*, 12(5), 053001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa67bd>
27. Kumar, A., & Bhattacharya, T. (2021). Biochar: A sustainable solution. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 6642–6680. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00970-0>
28. Lashari M. S., Ye Y., Ji H., Li L., Kibue G. W., Lu H., Zheng J., & Pan G. (2014). Biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from Central China: A two-year field experiment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95, 1321-1327. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6825>
29. Li, C., Zhao, C., Zhao, X., Wang, Y., Lv, X., Zhu, X., & Song, X. (2023). Beneficial effects of biochar application with nitrogen fertilizer on soil nitrogen retention, absorption and utilization in maize production. *Agronomy*, 13(1), 113. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010113>
30. Liu, B., Li, H., Li, H., Zhang, A., & Rengel, Z. (2021). Long-term biochar application promotes rice productivity by regulating root dynamic development and reducing nitrogen leaching. *GCB Bioenergy*, 13(1), 257–268. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12766>
31. Lu, L., Yu, W., Wang, Y., Zhang, K., Zhu, X., Zhang, Y., & Chen, B. (2020). Application of biochar-based materials in environmental remediation: From multi-level structures to specific devices. *Biochar*, 2, 1–31. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00041-7>
32. Mafakheri, M., & Asghari, M. (2025). Optimization of growth and biochemical production in *Dracocephalum moldavica* L. through biochar and salicylic acid application in a pot experiment. *Journal of Medicinal Plants and By-Products*, 03, 222–229. <https://doi.org/10.22034/jmpb.2024.366761.1742>
33. Mukherjee, A., Lal, R., & Zimmerman, A. R. (2014). Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. *Science of the Total Environment*, 487, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.141>
34. Mosapour, M., & Feizian, M. (2024). The effect of humic acid and biochar in sheep manure on the concentration of some nutrient elements in aerial parts and the yield of the summer savory plant (*Satureja hortensis* L.). *Plant Process and Function*, 13(59), 24. <https://doi.org/10.22034/13.59.417>
35. Nikbakht, J., Eshghi, V., Barzegar, T., & Vaezi, A. (2020). Interaction of urea fertilizer and magnetized water on

- yield and water and fertilizer use efficiency in cucumber (*Cucumis sativus* cv. Kish F1). *Water and Soil*, 34(3), 675-688. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i3.83971>
36. Pandey, V., & Patra, D. D. (2015). Crop productivity, aroma profile and antioxidant activity in *Pelargonium graveolens* L'Hér. under integrated supply of various organic and chemical fertilizers. *Industrial Crops and Products*, 67, 257-263. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.042>
 37. Pandey, V., Patel, A., & Patra, D. D. (2015). Amelioration of mineral nutrition, productivity, antioxidant activity and aroma profile in marigold (*Tagetes minuta* L.) with organic and chemical fertilization. *Industrial Crops and Products*, 76, 378-385. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.07.023>
 38. Pandey, V., Patel, A., & Patra, D. D. (2016). Integrated nutrient regimes ameliorate crop productivity, nutritive value, antioxidant activity and volatiles in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Industrial Crops and Products*, 87, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.035>
 39. Pelvan, E., Karaoglu, O., Firat, E. O., Kalyon, K. B., RoS, E., & Alasalvar, C. (2022). Immunomodulatory effects of selected medicinal herbs and their essential oils: A comprehensive review. *Journal of Functional Foods*, 94, 105108. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105108>
 40. Peng, J., Han, X., Li, N., Chen, K., Yang, J., Zhan, X., Luo, P., & Liu, N. (2021). Combined application of biochar with fertilizer promotes nitrogen uptake in maize by increasing nitrogen retention in soil. *Biochar Journal*, 3, 367-379. <https://doi.org/10.1007/s42773-021-00090-6>
 41. Phares, C. A., Amoakwah, E., Danquah, A., Akaba, S., Frimpong, K. A., & Mensah, T. A. (2022). Improved soil physicochemical, biological properties and net income following the application of inorganic NPK fertilizer and biochar for maize production. *Acta Ecologica Sinica*, 42(4), 289-295. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2021.12.002>
 42. Rezaei Chiyaneh, I., Pirzad, A., & Farjami, A. (2015). Effect of nitrogen, phosphorus and sulfur supplier bacteria on seed yield and essential oil of cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 24(4), 71-83.
 43. Rivelli, A. N., & Libutti, A. (2022). Effect of biochar and inorganic or organic fertilizer co-application on soil properties, plant growth and nutrient content in Swiss Chard. *Agronomy*, 12, 2089. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092089>
 44. Saah, K. J. A., Kaba, J. S., & Abunyewa, A. A. (2022). Inorganic nitrogen fertilizer, biochar particle size and rate of application on lettuce (*Lactuca sativa* L.) nitrogen use and yield. *All Life*, 15(1), 624-635. <https://doi.org/10.1080/26895293.2022.2080282>
 45. Sayed, Y. A., Ali, A. M., Ibrahim, M. F., Fadl, M. E., Casucci, C., Drosos, M., Scopa, A., & Al-Sayed, H. M. (2024). Impact of poultry manure-derived biochar and bio-fertilizer application to boost production of black cumin plants (*Nigella sativa* L.) grown on sandy loam soil. *Agriculture*, 14, 1801. <https://doi.org/10.3390/agriculture14101801>
 46. Tan, Z., Ye, Z., Zhang, L., & Huang, Q. (2018). Application of the 15N tracer method to study the effect of pyrolysis temperature and atmosphere on the distribution of biochar nitrogen in the biomass-biochar-plant system. *Science of The Total Environment*, 622-623, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.341>
 47. Zhu, Q., Peng, X., & Huang, T. (2015). Contrasted effects of biochar on maize growth and N use efficiency depending on soil conditions. *International Agrophysics*, 29, 257-266. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0023>