

Effect of Levels of Biochar on Growth and some Qualitative Characteristics of *Satureja hortensis* L. in Conditions of Sulfur Nutrition

M.B. Amiri^{1,2*}, V. Mohammadzadeh Kakhki³, M.H. Aminifard³

1- Department of Agrotechnology, University of Gonabad, Gonabad, Iran

2- Department of Agrotechnology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

(*- Corresponding author's Email: amiri@gonabad.ac.ir, mb.amiri@um.ac.ir)

Received: 16 December 2024

Revised: 25 January 2025

Accepted: 29 January 2025

Available Online: 29 January 2025

How to cite this article:

Amiri, M.B., Mohammadzadeh Kakhki, V., & Aminifard, M.H. (2025). Effect of levels of biochar on growth and some qualitative characteristics of *Satureja hortensis* L. in conditions of sulfur nutrition. *Journal of Horticultural Science*, 39(3), 525-548. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jhs.2025.91238.1400>

Introduction

Soil amendment materials exhibit a wide range of properties and influence soil physicochemical characteristics in various ways. Among these, biochar has attracted significant attention for its potential to improve acid soils, remediate pollutants, enhance soil fertility, sequester carbon, and contribute to climate change mitigation. Biochar is a porous carbon-rich material comprised chiefly of aromatic carbons and/or heteroatoms. Biochar is a product obtained from biological waste, particularly agricultural biomass waste which is thermally degraded using a process called pyrolysis, in the absence of oxygen. Biochar is useful as 1) a fuel source (charcoal) for renewable energy and 2) for carbon sequestering to the soil preventing the release of carbon dioxide to the atmosphere, 3) as a waste recycling method, 4) as a soil amendment to improve the soil structure, texture, water holding capacity and other physicochemical properties thus improving the soil fertility, 5) plant growth promotion due to the nutrients supplied by biochar when used as manure and 6) plant disease management by either directly (antagonism) or indirectly (induced systemic resistance) in plants. Sulfur (S) is an important component of many amino acids such as methionine and cysteine in plants. The balance update of sulfur decreases the speed of oxidative processes with an improvement reduction mechanism. It also plays a critical role in the improvement of wheat productivity through better grain production. Sulfur is very important for the efficacious use of nitrogen especially in the formation of protein contents. Without sulfur, the optimum activity of nitrogen regarding protein content biosynthesis cannot be achieved in terms of yield. Application of nano fertilizers and reduction of the size of the material to the nanoscale leads to an increase in the surface mass ratio of the particles, and as a result, an abundant amount of nutrient ions is absorbed slowly and steadily for a long period. *Satureja hortensis* L. which is a medicinal plant of the Lamiaceae (Labiatae) family is widely grown in France, Hungary, Spain and Iran. The essential oil of *Satureja hortensis* L. finds application in food products due to its antimicrobial and antioxidant properties. Traditionally, it was utilized as a stomachic, stimulant, expectorant, aphrodisiac and carminative treatment of various kinds of infectious illnesses.

Material and Methods

In order to investigate the effects of different levels of biochar and common sulfur and nona-fertilizer of sulfur on some morphological and physiological characteristics of *Satureja hortensis* L., an experiment was done at the Research Field of University of Gonabad during the years 2020-2021 and 2021-2022. A split plot experiment based on a randomized complete block design with three replications was conducted. Biochar at



©2024 The author(s). 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/jhs.2025.91238.1400>

three levels (5, 10 and 20 t.ha⁻¹ and control) and two sulfur nutritional treatments (common sulfur, nano-fertilizer of sulfur and control) were used as main and subplots, respectively. Plant height, lateral branch number, leaf area, stem diameter, dry shoot weight, dry matter yield, carbohydrate content, chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll were recorded.

Results and Discussion

The results showed that in both of two cropping years, the highest plant height (with 41 and 39 cm in the first and second cropping year, respectively) and lateral branch number (with 28 and 30 in the first and second cropping year, respectively) obtained in combined application treatment of 20 t.ha⁻¹ biochar and spraying of nano-fertilizer of sulfur and in both two cropping years, use of common sulfur and spraying nano-fertilizer of sulfur at higher levels of biochar (10 and 20 t.ha⁻¹) resulted in the production of more leaf area and stem diameter than the application of these sulfur nutritional inputs at lower levels of biochar. The results of the interaction effects of biochar application and nutritional treatment in the 2018-2019 crop year showed that with increasing biochar amounts to 10 t.ha⁻¹, the positive effects of common sulfur and nanosulfur on improving essential oil content were more noticeable, so the highest amount of essential oil (2.40%) was obtained in the treatment of simultaneous application of 10 t.ha⁻¹ of biochar and soil application of common sulfur. In both years, the highest amount of essential oil (2.10 and 2.13% in the first and second year, respectively) was obtained in 10 t.ha⁻¹ biochar. The highest influence of sulfur nutritional treatments on chlorophyll *a*, chlorophyll *b* and total chlorophyll appeared when they were used simultaneously with biochar, for example, chlorophyll *a* content in conditions of spraying of nano-fertilizer of sulfur with the application of 5, 10 and 20 t.ha⁻¹ biochar was 42, 54 and 72% in the first cropping year, respectively and 43, 54 and 73% in the second cropping year, respectively, more than amount of these traits in conditions of separate spraying of nano-fertilizer of sulfur.

Conclusion

In general, based on the results of this research, it seems that the combined consumption of biochar with common sulfur and nano-fertilizer of sulfur, while improving the quantitative characteristics of *Satureja hortensis* L. can lead to the improvement of its physiological characteristics and the production of free of chemical substances in this valuable medicinal plant.

Acknowledgements

This study was financially supported by the University of Birjand and University of Gonabad, Iran.

Keywords: Biochar, Chlorophyll a, Leaf area, Nano-fertilizer of sulfur, Sustainable agriculture

تأثیر سطوح زغال زیستی بر رشد و برخی خصوصیات کیفی گیاه دارویی مرزه (*Satureja hortensis* L.) در شرایط تغذیه گوگردی

محمد بهزاد امیری^{۱*} - وحید محمدزاده کاخی^۲ - محمد حسین امینی فرد^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

چکیده

امروزه تولید محصولات کشاورزی سالم به‌ویژه در حوزه گیاهان دارویی بسیار مورد تأکید بوده و در راستای نیل به اهداف کشاورزی پایدار، استفاده از نهاده‌های بوم‌سازگار جایگزین نهاده‌های مخرب شیمیایی امری اجتناب‌ناپذیر است. به‌منظور بررسی اثر مقادیر مختلف بیوپچار و گوگرد معمولی و نانوکود گوگرد در مرزه، آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی طی دو سال زراعی (۱۳۹۹-۱۴۰۱) در مجتمع آموزش عالی گناباد با سه تکرار انجام شد. مقادیر مختلف زغال زیستی (شامل مقادیر صفر، ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار) به‌عنوان عامل اصلی و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی (شامل کاربرد خاکی گوگرد، محلول‌پاشی نانوکود گوگرد و شاهد) به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد. نتایج آزمایش نشان داد که در هر دو سال زراعی بیشترین ارتفاع بوته (به‌ترتیب با ۴۱ و ۳۹ سانتی‌متر ارتفاع بوته در سال زراعی اول و دوم) و تعداد شاخه فرعی (به‌ترتیب با ۲۸ و ۳۰ شاخه فرعی در سال زراعی اول و دوم) در تیمار کاربرد تلفیقی ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی و محلول‌پاشی نانوکود گوگرد به دست آمد و در هر دو سال زراعی، استفاده از گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوکود گوگرد در سطوح بالاتر زغال زیستی (۱۰ و ۲۰ تن در هکتار) منجر به تولید سطح برگ و قطر ساقه بیشتری نسبت به کاربرد این نهاده‌های تغذیه‌ای گوگردی در سطوح پایین‌تر زغال زیستی شد. نتایج اثرات متقابل مقادیر مصرفی زغال زیستی و تیمار تغذیه‌ای در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ نشان داد که با افزایش مقادیر زغال زیستی تا سطح ۱۰ تن در هکتار، اثرات مثبت گوگرد معمولی و نانوکود گوگرد در بهبود میزان اسانس محسوس‌تر بود، به‌طوری‌که بیشترین میزان اسانس (۲/۴۰ درصد) در تیمار کاربرد همزمان ۱۰ تن در هکتار زغال زیستی و مصرف خاکی گوگرد معمولی به دست آمد. در هر دو سال زراعی، بیشترین میزان اسانس (به‌ترتیب با ۲/۱۰ و ۲/۱۳ درصد اسانس در سال‌های زراعی اول و دوم) در تیمار ۱۰ تن در هکتار بیوپچار حاصل شد. بیشترین تأثیر تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی بر میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل زمانی مشاهده شد که از آن‌ها همزمان با زغال زیستی استفاده گردید، بدین صورت که میزان کلروفیل a در شرایط محلول‌پاشی نانوکود گوگرد همزمان با کاربرد ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی به‌ترتیب ۴۳، ۵۴ و ۷۲ درصد در سال زراعی اول و به‌ترتیب ۴۳، ۵۴ و ۷۳ درصد در سال زراعی دوم بیشتر از مقدار این صفت در شرایط محلول‌پاشی جداگانه نانوکود گوگرد بود. به‌طور کلی، براساس نتایج این پژوهش، به نظر می‌رسد که مصرف تلفیقی زغال زیستی با گوگرد معمولی و یا نانوکود گوگرد ضمن بهبود خصوصیات کمی مرزه می‌تواند منجر به بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی آن شده و تولید محصول عاری از مواد شیمیایی را در این گیاه دارویی ارزشمند تضمین کند.

واژه‌های کلیدی: بیوپچار، سطح برگ، کشاورزی پایدار، کلروفیل a، نانوکود گوگرد

مقدمه

خاک نقش مهمی در تولید محصولات کشاورزی و کاهش تغییرات آب‌وهوا ایفا می‌کند و سلامت خاک در چگونگی رشد گیاه بسیار مؤثر است. در سال‌های اخیر، مسائل زیست‌محیطی نظیر تخریب خاک، آلودگی خاک، کمبود آب، تغییرات اقلیمی و از دست دادن باروری خاک و افزایش تنش‌های زنده و غیرزنده باعث کاهش عملکرد محصولات کشاورزی و ایجاد خطرات جدی برای امنیت غذایی شده است (Javeed et al., 2023). از این‌رو استفاده از نهاده‌های بوم‌سازگاری که بتواند ضمن افزایش عملکرد کمی و کیفی

۱- گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

۲- گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

(*)- نویسنده مسئول:

(Email: amiri@gonabad.ac.ir, mb.amiri@um.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.91238.1400>

(Emami, 2022). کاربرد بیوپار در مزرعه گیاه دارویی شوید (*Anethum graveolens* L.) در شرایطی که گیاه در معرض تنش شوری قرار داشت، افزایش مقدار لیمونن، کارون، آپپول و دیلاپیول و همچنین بهبود میزان فعالیت آنتی اکسیدانی را سبب شد (Ghassemi-Golezani & Rahimzadeh, 2022).

گوگرد یکی از عناصر اصلی و ضروری برای رشد و توسعه گیاهان است و کمبود آن منجر به کاهش عملکرد و کیفیت محصول و حساس شدن گیاه نسبت به برخی از بیماری‌ها می‌شود و فراهمی میزان کافی گوگرد، بهبود مقاومت گیاه به انواع تنش‌های زنده و غیرزنده را به همراه دارد (Yuan et al., 2021) و به‌ویژه از گیاه در مقابل تنش اکسیداتیو محافظت می‌کند (Narayan et al., 2022). گوگرد در تشکیل بسیاری از اسید آمینه‌های ضروری در ساخت پروتئین‌ها نظیر سیستمین، سیستمین و متیونین نقش ایفا کرده و منجر به تحریک فرآیندهای متابولیسمی می‌شود (Al-Obeidi & Al-Obeidi, 2023) و همچنین وجود آن برای ساخت کلروفیل و بسیاری از ویتامین‌ها ضروری است (Narayan et al., 2022) و وجود این ترکیب در ساختمان بسیاری از متابولیت‌های ثانویه گیاهی به اثبات رسیده است (Borpatragohain et al., 2019). این عنصر نه تنها به عنوان کاهش دهنده اسیدیته خاک در خاک‌های قلیایی بلکه به عنوان تنظیم کننده خاک شناخته می‌شود (Essa et al., 2019) و دسترسی به مواد غذایی به‌ویژه در خاک‌های آهکی را افزایش می‌دهد و کاربرد آن در تغییر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مؤثر است (Holatko et al., 2023). نانوکود گوگرد به دلیل ویژگی‌های خاص اندازه ذرات کوانتومی و سطح ویژه بالا، نسبت به گوگرد معمولی مزیت‌های بیشتری دارد (Turganbay et al., 2019). استفاده از گوگرد به شکل نانوکود، برای رشد گیاه و کیفیت محصولات کشاورزی بسیار مفید است و در عین حال از اثرات سمی آفت‌کش‌ها و هورمون‌ها و افزودنی‌های رشد در بدن انسان جلوگیری می‌کند (Shankar et al., 2020)، نکته حائز اهمیت اینکه نانوکود گوگرد برخلاف بسیاری از فلزات و نانوذرات دیگر، موادی بوم‌سازگار، ایمن و غیرسمی برای محیط‌زیست هستند (Ragab & Saad-Allah, 2020). در یک پژوهش، کاربرد ۲۰ کیلوگرم در هکتار گوگرد منجر به افزایش قابل توجه ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، وزن ۱۰۰ دانه و عملکرد دانه ماش (*Vigna radiate* L.) در مقایسه با شاهد شد (Murshed et al., 2021). در پژوهشی دیگر، بیشترین ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد گل در بوته و عملکرد گل گیاه دارویی آرنیکای چامیسو (*Arnica chamissonis* Less. ssp. *foliosa*) در تیمار ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگردی بنتونیتی به دست آمد (Asadi et al., 2019). کاربرد همزمان کودهای گوگردی و کودهای حاوی

محصولات، تولید پایدار آن‌ها در طولانی مدت را تضمین کند، ضروری به نظر می‌رسد. از جمله این نهادهای اکولوژیک می‌توان به زغال زیستی (Lin et al., 2023) و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی (Dawar et al., 2023) و نانوکودها (Almousswi & Jameel, 2022) اشاره کرد. زغال زیستی نوعی اصلاح کننده خاک است که از مواد زائد آلی غنی از کربن در شرایط محدودیت اکسیژن به روش پیرولیز به دست می‌آید (Hassan et al., 2023) و در دهه‌های اخیر به دلیل استفاده پایدار از آن در شیوه‌های مدیریت خاک و مسائل جهانی تغییرات آب‌وهوا اهمیت یافته است (Ng et al., 2023). این نهاده بوم‌سازگار به دلیل تخلخل بالا و سطح ویژه زیاد منجر به افزایش ظرفیت نگهداری آب (Al Baquy et al., 2023) و کاهش چگالی ظاهری خاک (Javeed et al., 2023) شده و همچنین از طریق افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و تأمین مواد غذایی قابل جذب (Gauditis et al., 2023)، مصرف کود و آب را به حداقل رسانده و اثرات مخرب تنش خشکی را برطرف می‌سازد. بیوپار، محیط مطلوبی برای فعالیت‌های میکروبی فراهم کرده (Javeed et al., 2023) و در عین حال به عنوان یکی از روش‌های کاهش ترسیب کربن در خاک‌های کشاورزی شهرت یافته است (Ng et al., 2023). تحقیقات نشان داده است که افزودن بر کاربردهای این نهاده در کشاورزی و ترسیب کربن، از آن برای احیای جنگل، تصفیه فاضلاب و حذف آلاینده‌ها و تثبیت فلزات سنگین (Hassan et al., 2023) استفاده می‌شود. همچنین گزارش شده است که بیوپار از طریق جذب نمک به اصلاح خاک‌های شور کمک می‌کند (Tang et al., 2023). در یک پژوهش پس از بررسی برهم‌کنش بیوپار و سوپرجاذب بر ترکیب‌های تشکیل دهنده اسانس مرزه رشینگری (*Satureja rechingeri* Jamzad) در شرایط تنش خشکی گزارش شد که بیشترین مقدار کارواکرول در تیمار کاربرد همزمان بیوپار و ۶۰ میلی گرم سوپرجاذب در شرایط تنش شدید رطوبتی به دست آمد (Beiranvandi et al., 2020). تأثیر کاربرد بیوپار و سطوح مختلف مدیریت آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه دارویی زنیان (*Trachyspermum ammi* L. نشان داد که بیشترین مقدار ارتفاع بوته، وزن تر و خشک بوته، وزن ۱۰۰ دانه، عملکرد دانه و کارایی مصرف آب در شرایط کاربرد ۴۵ تن در هکتار بیوپار به دست آمد (Khasheisiuki et al., 2019). مطالعه اثر بیوپار و اسید سالیسیلیک بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد گیاه دارویی سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) در شرایط تنش خشکی حاکی از آن بود که کاربرد ۴۰ تن در هکتار بیوپار زمانی که از اسید سالیسیلیک استفاده نشد منجر به تولید بیشترین میزان عملکرد بیولوژیک در شرایط تنش خشکی ۷۵ درصد و بیشترین میزان کارتنوئید در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد گردید

نمونه‌برداری انجام گرفت. نتایج مربوط به خصوصیات خاک و همچنین زغال زیستی استفاده شده در **جدول ۲** آورده شده است. زغال زیستی مورد استفاده از بقایای گیاهی حاصل از هرس چوب درختان توت (*Morus alba* L.) و در کوره صنعتی شهرستان تربت حیدریه به دست آمد. بدین منظور، پس از جمع‌آوری بقایای گیاهی حاصل از هرس چوب درختان توت، گل و برگ‌ها به قطعات کوچک‌تر (حدود ۵ الی ۱۰ سانتی‌متر) تقسیم شده و با استفاده از دستگاه خشک‌کن، رطوبت آن‌ها به کمتر از ۲۰ درصد رسید. سپس فرآیند پیرولیز با استفاده از کوره صنعتی انجام شد و بقایای گیاهی در کوره با دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت دید. پس از پایان پیرولیز، مواد در دمای محیط خنک شده و زغال زیستی در ظروف غیرقابل نفوذ ذخیره شد (O'Laughlin & McElligott, 2009).

به‌منظور حفظ پایداری خاک، جهت آماده‌سازی زمین تنها عملیات دیسک‌زنی با تأکید بر خاکورزی حداقل در نظر گرفته شد و کلیه مراحل بعدی توسط کارگر و با بیل دستی انجام شد. ابعاد کرت‌های اصلی ۶×۲ متر و ابعاد کرت‌های فرعی ۲×۲ متر در نظر گرفته شد. با توجه به کودی بودن ماهیت تیمارها و جلوگیری از اختلاط تیمارها با هم، برای هر بلوک آزمایشی یک لوله آبیاری و پساب جداگانه در نظر گرفته شد.

بذرهای مرزه با منشأ توده گناباد از مزارع شهرستان گناباد تهیه و نیمه اردیبهشت‌ماه سال ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در ردیف‌هایی به فاصله ۳۵ سانتی‌متر و با فاصله روی ردیف ۳۵ سانتی متر از یکدیگر (Mohammadpour et al., 2013) کشت شدند. مقادیر مختلف کود آلی زغال زیستی بسته به تیمار مورد نظر قبل از کاشت به خاک کرت‌های مربوطه اضافه گردید. برای اعمال خاکی گوگرد، میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار (Shahrusvand et al., 2019) گوگرد به خاک کرت‌های مربوطه افزوده شد. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت به‌روشن نشتی انجام شد و آبیاری‌های بعدی به‌فاصله هر هفت روز یک‌بار اعمال گردید. محلول‌پاشی نانوکود گوگرد براساس توصیه شرکت سازنده ۱ طی دو مرحله و در مرحله چهار تا شش برگی و مرحله قبل از گل‌دهی انجام شد. برای رسیدن به تراکم مطلوب (هشت بوته در مترمربع) (Mohammadpour et al., 2013)، پس از رسیدن گیاه به مرحله چهار برگی، عملیات تنک انجام گرفت. به‌منظور مهار علف‌های هرز، سه نوبت وچین دستی به‌ترتیب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ روز پس از کاشت انجام شد. برای آماده‌سازی زمین و در طول دوره رشد، هیچ‌گونه علف‌کش، آفت‌کش و قارچ‌کش شیمیایی استفاده نشد. برخی مراحل انجام پژوهش در **شکل ۱** نشان داده شده است.

عناصر روی و بور، بیشترین عملکرد اقتصادی و بهترین کیفیت از نظر مقدار آلومین در گیاه دارویی سیر (*Allium sativum* L.) را سبب شد (Zare Pak Ziaberi & Majidian, 2022). بهبود ویژگی‌های کمی و عملکرد باقلا (*Vicia faba* L.) نیز تحت تأثیر کودهای گوگردی گزارش شده است (Hameed & Hasan, 2022).

مرزه گیاهی دارویی و متعلق به خانواده نعنائیان است و بومی مناطق مدیترانه‌ای بوده که در بسیاری از کشورها از جمله فرانسه، مجارستان و ایران به‌صورت گسترده کشت و کار می‌شود (Tekin et al., 2022). مواد مؤثره این گیاه دارای خاصیت ضد میکروبی و ضد قارچی بوده و به‌طور گسترده در پزشکی و در صنایع آرایشی بهداشتی و صنایع غذایی کاربرد دارد (Heidarpour et al., 2019). امروزه از این گیاه به‌شکل چای و دمنوش و در درمان بیماری‌های مختلف از جمله اسهال، آسم، سرماخوردگی، سرفه و برونشیت استفاده می‌شود و همچنین برگ‌های تازه گیاه به‌عنوان طعم‌دهنده در سالاد کاربرد دارند (Piryaee & Behroozi, 2022). با توجه به ماهیت دارویی بودن گیاه مرزه و کاربردهای متعدد آن در پزشکی و صنایع دارویی (Heidarpour et al., 2019)، مصرف نهاده‌های شیمیایی در کشت و تولید این محصول با محدودیت‌هایی همراه بوده و استفاده از نهاده‌های بوم‌سازگار جایگزین کودهای شیمیایی نظیر زغال زیستی و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی همواره مورد تأکید بوده است و از آنجایی که مطالعات چندانی در خصوص مصرف همزمان این نهاده‌های اکولوژیک صورت نپذیرفته است، این پژوهش با هدف بررسی اثر سطوح مختلف زغال زیستی روی برخی خصوصیات ریخت‌شناختی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی مرزه در شرایط کاربرد تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی در یک نظام زراعی اکولوژیک انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در مزرعه تحقیقاتی مجتمع آموزش عالی گناباد با عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۰۶۰ متر از سطح دریا، طی دو سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰ با سه تکرار انجام شد. سطوح مختلف زغال زیستی (صفر، ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار) به‌عنوان عامل اصلی و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی (کاربرد خاکی گوگرد، محلول‌پاشی نانوکود گوگرد و عدم استفاده از کود) به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. اطلاعات هواشناسی منطقه مورد پژوهش به تفکیک سال‌های زراعی در **جدول ۱** آورده شده است.

قبل از شروع آزمایشات مزرعه‌ای، به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک

جدول ۱- اطلاعات هواشناسی منطقه مورد پژوهش

Table 1- Meteorological information of research area

میزان تبخیر و تعرق Evaporation and transpiration (mm)	حداقل دمای ماهیانه Minimum temperature in month (°C)	حداکثر دمای ماهیانه Maximum temperature in month (°C)	متوسط دما ماهیانه Mean temperature in month (°C)	بارندگی Rainfall (mm)
سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ Cropping year of 2020-2021				
فروردین April	3.3	26.4	19.2	0
اردیبهشت May	13	36.5	23.5	49.5
خرداد June	18.9	42.4	30.5	0.5
تیر July	17.2	42.8	30.9	0.5
مرداد August	16.7	39.7	29.7	0
شهریور September	15.4	38.8	26.8	0
سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ Cropping year of 2021-2022				
فروردین April	3	34.1	19.1	1.1
اردیبهشت May	11.4	36.3	24	22.7
خرداد June	13.6	40.9	27.1	0
تیر July	19.7	42.2	23.6	0
مرداد August	16.6	42.1	29.5	0
شهریور September	13.6	37	24.5	0

(Zenk, 1978) اندازه‌گیری شد و برای سنجش محتوای کلروفیل a، b و کل، از بافت تازه برگ‌های نمونه برداری انجام و به ترتیب از معادله‌های ۱، ۲ و ۳ استفاده گردید (Arnon, 1967).

$$\begin{aligned} \text{Chlorophyll a} &= (19.3 \times A_{663} - 0.86 \times A_{645}) \quad (1) \\ \text{Chlorophyll b} &= (19.3 \times A_{645} - 3.6 \times A_{663}) \quad (2) \\ \text{Total chlorophyll} &= \text{Chlorophyll a} + \text{Chlorophyll b} \quad (3) \end{aligned}$$

که در آن، V: حجم عصاره مصرف شده و W: وزن نمونه مصرفی می‌باشد.

به منظور تجزیه واریانس و تحلیل آماری داده‌های آزمایش از نرم‌افزار Excel Ver. 14 SAS Ver. 9.1 استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال پنج درصد انجام گردید.

در هر دو سال زراعی، در مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی، تعداد پنج بوته از هر کرت آزمایشی (سطح ۰/۶۲۵ مترمربع) به طور تصادفی انتخاب و صفاتی نظیر ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، سطح برگ، قطر ساقه و وزن خشک اندام هوایی اندازه‌گیری شد. برای تعیین وزن خشک اندام هوایی، بوته‌ها سایه خشک شد و سپس وزن آن‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم برآورد گردید. در پایان فصل رشد و با زرد شدن بوته‌ها، به منظور تعیین عملکرد ماده خشک، پس از حذف اثر حاشیه‌ای، بوته‌های کل کرت‌های آزمایشی برداشت و وزن کل اندام هوایی آن‌ها اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که در پایان برداشت، مقدار ۱۰۰ گرم از بوته‌های هر کرت آزمایشی برای تعیین ویژگی‌های کیفی و فیزیولوژیکی (میزان کربوهیدرات، مقادیر کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل) به آزمایشگاه ارسال شد. میزان کربوهیدرات‌ها با استفاده از روش کوچرت (Kochert &

جدول ۲- خصوصیات خاک محل آزمایش و زغال زیستی مورد استفاده
Table 2- Soil characteristics of experimental farm and used biochar

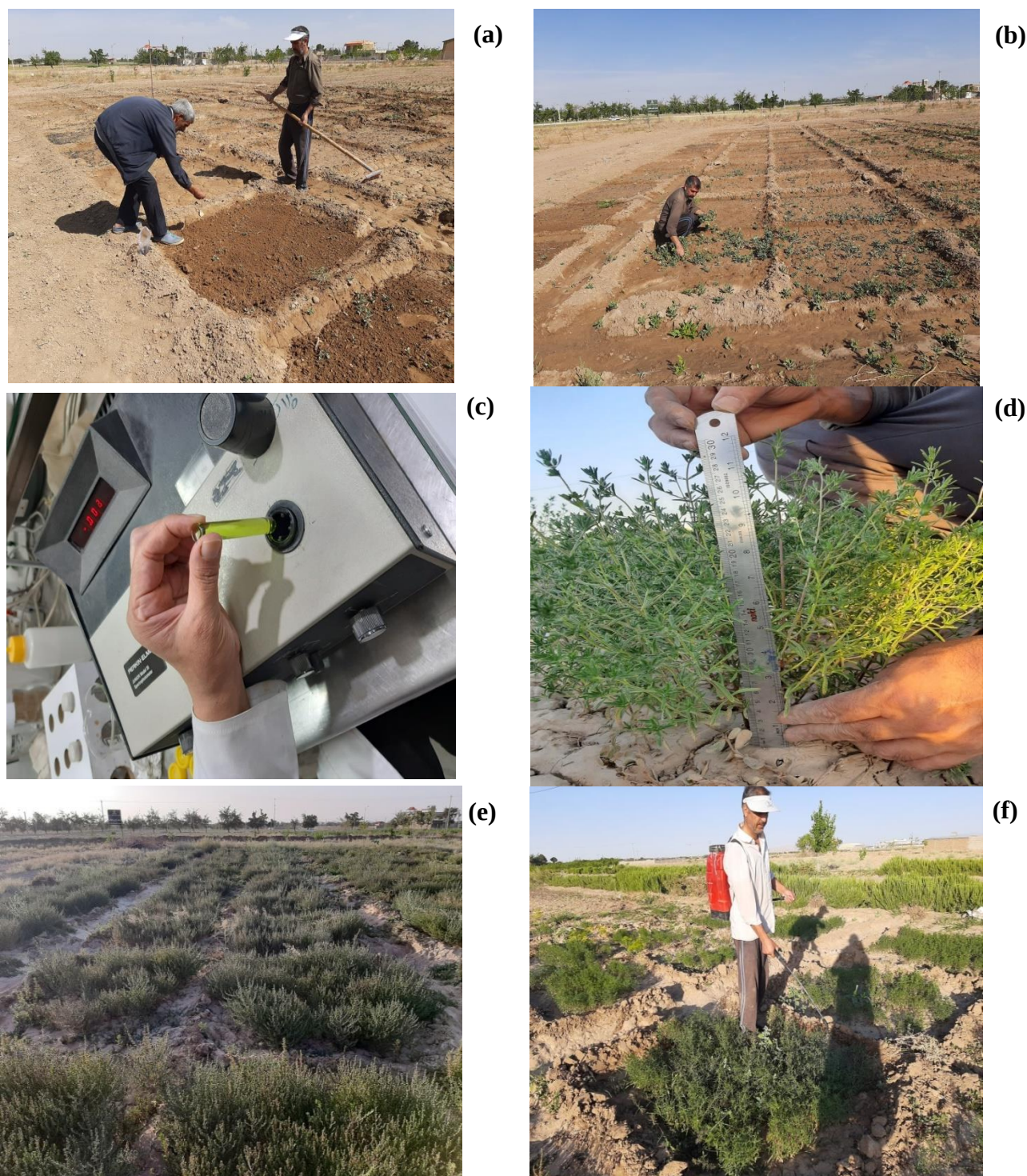
خصوصیات خاک محل آزمایش Soil characteristics of experimental farm		خصوصیات زغال زیستی مورد استفاده Characteristics of used biochar	
بافت Texture	لومی-شنی Loamy-sandy	اسیدیته pH	7.7
		ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (cmol.kg ⁻¹)	19.5
پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	103	رطوبت Moisture (%)	<1
		نیتروژن N (%)	0.41
فسفر P (mg.kg ⁻¹)	8	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	5380
		پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	2360
نیتروژن N (%)	0.019	آهن Fe (mg.kg ⁻¹)	230
		روی Zn (mg.kg ⁻¹)	580
کربن آلی Organic C (%)	0.19	منیزیم Mg (mg.kg ⁻¹)	210
		کلسیم Ca (mg.kg ⁻¹)	4300
اسیدیته pH	8.2	منگنز Mn (mg.kg ⁻¹)	106
		گوگرد S (mg.kg ⁻¹)	2670
هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	4.3	سدیم Na (mg.kg ⁻¹)	4.7
		کربن C (%)	54
		هیدروژن H (%)	1.98
		اکسیژن O (%)	21.43
		ثبات Stability (°c)	540
		ظرفیت جذب سدیم Na-SC (mg.g ⁻¹)	38

نتایج و بحث

خصوصیات رشدی

۳۵ درصد نسبت به شاهد در سال زراعی اول و ارتفاع بوته را به ترتیب ۱۵، ۳۱ و ۴۳ درصد و تعداد شاخه فرعی را به ترتیب ۱۰، ۱۷ و ۴۱ درصد نسبت به شاهد در سال زراعی دوم افزایش دادند. بیشترین و کمترین مقدار ارتفاع بوته و تعداد شاخه فرعی در هر دو سال زراعی به ترتیب متعلق به تیمارهای محلول پاشی نانوکود گوگرد (به ترتیب با ۳۸ و ۳۶ سانتی متر ارتفاع بوته در سال زراعی اول و دوم و به ترتیب با ۲۲ و ۲۰ شاخه فرعی در سال زراعی اول و دوم) و شاهد (به ترتیب با ۲۷ و ۲۶ سانتی متر ارتفاع بوته در سال زراعی اول و دوم و به ترتیب با ۱۹ و ۱۷ شاخه فرعی در سال زراعی اول و دوم) بود (جدول ۴).

اثر مقادیر مختلف زغال زیستی و تیمارهای تغذیه ای گوگردی و برهم کنش آنها در هر دو سال زراعی بر ارتفاع بوته و تعداد شاخه فرعی معنی دار بود (جدول ۳). همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود، در هر دو سال زراعی با افزایش مقادیر مصرفی زغال زیستی، بر میزان ارتفاع بوته و تعداد شاخه فرعی افزوده شد، به طوری که هر یک از سطوح ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی، ارتفاع بوته را به ترتیب ۱۵، ۳۰ و ۴۳ درصد و تعداد شاخه فرعی را به ترتیب ۸، ۱۴ و



شکل ۱- برخی مراحل پژوهش «اثر مقادیر مختلف زغال زیستی بر صفات کمی و کیفی مرزه در شرایط کاربرد گوگرد و نانوکود گوگرد». (a): عملیات کاشت، (b): عملیات وجین علف‌های هرز، (c): اندازه‌گیری شاخص‌های کیفی، (d): اندازه‌گیری شاخص‌های کمی، (e): مزرعه قبل از برداشت، (f): محلول‌پاشی نانوکود گوگرد.

Figure 1- Some stages of the research "The effect of different amounts of biochar on the quantitative and qualitative traits of *Satureja hortensis* L. under the conditions of sulfur and sulfur nanofertilizer application". (a): Planting stage, (b): Weeding stage, (c): Measurement of qualitative characteristics, (d): Measurement of quantitative characteristics, (e): Farm before harvest, (f): Spraying of nano-sulfur fertilizer.

کاربرد گوگرد معمولی نیز منجر به افزایش شش درصدی ارتفاع بوته نسبت به شاهد در سال زراعی اول و دوم شد و تعداد شاخه فرعی تحت تأثیر کاربرد گوگرد معمولی به ترتیب پنج و شش درصد نسبت به شاهد در سال زراعی اول و دوم افزایش یافت (جدول ۴). براساس نتایج اثرات متقابل مقادیر مختلف زغال زیستی و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی، در هر دو سال زراعی بیشترین ارتفاع بوته (به ترتیب با ۴۱ و ۳۹ سانتی‌متر ارتفاع بوته در سال زراعی اول و دوم) و تعداد شاخه فرعی (به ترتیب با ۲۸ و ۳۰ شاخه فرعی در سال زراعی اول و دوم) در تیمار کاربرد تلفیقی ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی و محلول‌پاشی نانوکود گوگرد مشاهده شد (جدول ۵ و ۶). همچنین اثرات مثبت گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوکود گوگرد بر ارتفاع بوته و تعداد شاخه فرعی زمانی بیشتر بروز یافت که در بستر کاشت ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی از آن‌ها استفاده شد، به عنوان مثال مقدار ارتفاع بوته در هر دو سال زراعی در شرایط محلول‌پاشی نانوکود گوگرد در بستر کاشت ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی نسبت به ارتفاع بوته در شرایط استفاده از این نهاده در بستر کاشت‌های ۵ و ۱۰ تن در هکتار زغال زیستی بیشتر بود (جدول ۵ و ۶). براساس نتایج تجزیه واریانس، بین مقادیر مختلف زغال زیستی از نظر سطح برگ و قطر ساقه تفاوت معنی‌داری وجود داشت (جدول ۳)، به‌طوری‌که بیشترین و کمترین میزان سطح برگ و قطر ساقه در هر دو سال زراعی به ترتیب در تیمارهای ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی (به ترتیب با ۲۹۱ و ۲۸۸ سانتی‌مترمربع سطح برگ در سال زراعی اول و دوم و به ترتیب با ۰/۴۹ و ۰/۵۰ سانتی‌متر قطر ساقه در سال زراعی اول و دوم) و شاهد (به ترتیب با ۲۵۶ و ۲۵۳ سانتی‌مترمربع سطح برگ در سال زراعی اول و دوم و به ترتیب با ۰/۳۰ و ۰/۳۱ سانتی‌متر قطر ساقه در سال زراعی اول و دوم) به دست آمد (جدول ۴). کاربرد ۵ و ۱۰ تن در هکتار زغال زیستی نیز میزان سطح برگ را به ترتیب چهار و هشت درصد در سال زراعی اول و به ترتیب پنج و هفت درصد در سال زراعی دوم و قطر

ساقه را به ترتیب ۳۰ و ۳۰ درصد در سال زراعی اول و به ترتیب ۲۸ و ۳۳ درصد در سال زراعی دوم نسبت به شاهد بهبود بخشیدند (جدول ۴). سطح برگ و قطر ساقه در هر دو سال زراعی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی قرار گرفتند (جدول ۳)، به‌طوری‌که مصرف گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوکود گوگرد، میزان سطح برگ را به ترتیب یک و دو درصد در سال زراعی اول و به ترتیب دو و سه درصد در سال زراعی دوم نسبت به شاهد افزایش دادند و قطر ساقه نیز در اثر استفاده از گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوکود گوگرد به ترتیب ۲۸ و ۳۴ درصد در سال زراعی اول و به ترتیب ۲۷ و ۳۳ درصد در سال زراعی دوم در مقایسه با شاهد افزایش یافت (جدول ۴). همان‌طور که در جدول‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، در هر دو سال زراعی، استفاده از گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوکود گوگرد در سطوح بالاتر زغال زیستی (۱۰ و ۲۰ تن در هکتار) منجر به تولید سطح برگ و قطر ساقه بیشتری نسبت به کاربرد این نهاده‌های تغذیه‌ای گوگردی در سطوح پایین‌تر زغال زیستی شد، به عنوان مثال استفاده از گوگرد معمولی در کرت‌های حاوی ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی در مقایسه با کاربرد این کود در بستر کاشت پنج تن در هکتار زغال زیستی، به ترتیب ۸ و ۱۵ درصد سطح برگ و قطر ساقه بیشتری را سبب شد (جدول ۵). براساس نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین میزان قطر ساقه در سال زراعی اول در تیمار کاربرد همزمان ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی و محلول‌پاشی نانوکود گوگرد (۰/۶۰ سانتی‌متر) به دست آمد (جدول ۵)، ولی در سال زراعی دوم در حالی بین تیمار محلول‌پاشی نانوکود گوگرد و شاهد در بستر کاشت ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی از نظر قطر ساقه تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، که محلول‌پاشی نانوکود گوگرد در همین سال زراعی منجر به افزایش معنی‌دار و سه درصدی سطح برگ نسبت به شاهد در بستر کاشت ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی شد (جدول ۶).

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برخی صفات ریخت‌شناختی و عملکرد مرزه تحت تأثیر مقادیر مختلف زغال زیستی و در شرایط کاربرد گوگرد و نانوکود گوگرد
Table 3- ANOVA (mean of squares) for some morphological and yield characteristics of *Satureja hortensis* L. affected by different amounts of biochar and application of sulfur and nano-sulfur

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	تعداد شاخه فرعی Lateral branch number	سطح برگ Leaf area	قطر ساقه Stem diameter	وزن خشک اندام هوایی Dry shoot weight	عملکرد ماده خشک Dry matter yield
سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ Cropping year of 2020-2021							
بلوک Block	2	2.92*	0.41 ^{ns}	2.83 ^{ns}	0.00005 ^{ns}	0.02 ^{ns}	132.42 ^{ns}
زغال زیستی Biochar	3	427.27**	152.69**	2000.58**	0.06**	20.67**	132312**
خطای Error a	6	1.32	0.42	4.02	0.00005	0.01	88.47
تیمار تغذیه‌ای Nutrient treatment	2	34.71**	17.13**	137.80**	0.08**	1.09**	6979**
زغال زیستی × تیمار تغذیه‌ای Biochar × nutrient treatment	6	3.72**	4.72**	6.34*	0.0030**	0.08**	553.97**
خطای Error b	16	0.59	0.43	1.76	0.00008	0.01	89.07
ضریب تغییرات CV (%)	-	2.65	3.20	0.48	2.25	3.08	3.08
سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ Cropping year of 2021-2022							
بلوک Block	2	47.04**	35.04**	55.19*	0.19**	0.38**	7103 ^{ns}
زغال زیستی Biochar	3	419.32**	193.20**	1946**	0.06**	19.91**	153789**
خطای Error a	6	0.02	1.55	10.85	0.001	0.002	1999
تیمار تغذیه‌ای Nutrient treatment	2	36.14**	29.02**	192.25**	0.08**	1.36**	18680**
زغال زیستی × تیمار تغذیه‌ای Biochar × nutrient treatment	6	3.60**	11.38**	5.99 ^{ns}	0.003*	0.05**	3322 ^{ns}
خطای Error b	16	0.01	1.28	9.76	0.001	0.004	2024
ضریب تغییرات CV (%)	-	0.45	6.03	1.15	7.60	1.69	14.59

***، * و ns: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم معنی‌دار.
***, * and ns: significant at the 0.01 and 0.05 of probability levels, and non-significant, respectively.

جدول ۴- برخی خصوصیات ریخت‌شناختی و عملکرد مرزه تحت تأثیر مقادیر مختلف زغال زیستی و در شرایط کاربرد گوگرد و نانوکود گوگرد

Table 4- Some morphological and yield characteristics of <i>Satureja hortensis</i> L. affected by different amounts of biochar and application of sulfur and nano-sulfur							
سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰	Cropping year of 2020-2021	ارتفاع بوته	تعداد شاخه فرعی	سطح برگ	قطر ساقه	وزن خشک اندام	عملکرد ماده خشک
		Plant height (cm)	Lateral branch number	Leaf area (cm ²)	Stem diameter (cm)	Dry shoot weight (g)	Dry matter yield (kg.ha ⁻¹)
مقادیر زغال زیستی							
		Amounts of biochar (t.ha ⁻¹)					
		21.86 ^{d*}	17.05 ^d	255.59 ^d	0.30 ^d	1.90 ^d	152.50 ^d
		25.62 ^c	18.58 ^c	267.49 ^c	0.43 ^c	3.41 ^c	273.33 ^c
		31.10 ^b	19.94 ^b	276.78 ^b	0.43 ^b	4.60 ^b	368.71 ^b
		37.70 ^a	26.42 ^a	290.88 ^a	0.49 ^a	5.38 ^a	430.67 ^a
تیمار تغذیه‌ای							
		Nutrient treatment					
گوگرد معمولی		28.99 ^b	20.35 ^b	273.05 ^b	0.43 ^b	3.85 ^b	308.32 ^b
نانوکود گوگرد		30.81 ^a	21.76 ^a	275.87 ^a	0.47 ^a	4.11 ^a	329.35 ^a
شاهد		27.14 ^c	19.39 ^c	269.13 ^c	0.31 ^c	3.51 ^c	281.24 ^c
مقادیر زغال زیستی							
		Amounts of biochar (t.ha ⁻¹)					
		20.52 ^d	14.99 ^d	252.74 ^d	0.31 ^c	1.87 ^d	144.40 ^d
		24.17 ^c	16.63 ^c	264.92 ^c	0.43 ^b	3.46 ^c	275.61 ^c
		29.79 ^b	18.00 ^b	273.15 ^b	0.46 ^b	4.53 ^b	361.28 ^b
		36.15 ^a	25.47 ^a	287.77 ^a	0.50 ^a	5.31 ^a	451.57 ^a
تیمار تغذیه‌ای							
		Nutrient treatment					
گوگرد معمولی		27.55 ^b	18.45 ^b	271.10 ^a	0.45 ^b	3.78 ^b	299.04 ^b
نانوکود گوگرد		29.44 ^a	20.46 ^a	272.71 ^a	0.49 ^a	4.13 ^a	351.45 ^a
شاهد		25.98 ^c	17.40 ^c	265.12 ^b	0.33 ^c	3.46 ^c	274.16 ^b
سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱							
Cropping year of 2021-2022							
		Amounts of biochar (t.ha ⁻¹)					
		20.52 ^d	14.99 ^d	252.74 ^d	0.31 ^c	1.87 ^d	144.40 ^d
		24.17 ^c	16.63 ^c	264.92 ^c	0.43 ^b	3.46 ^c	275.61 ^c
		29.79 ^b	18.00 ^b	273.15 ^b	0.46 ^b	4.53 ^b	361.28 ^b
		36.15 ^a	25.47 ^a	287.77 ^a	0.50 ^a	5.31 ^a	451.57 ^a
تیمار تغذیه‌ای							
		Nutrient treatment					
گوگرد معمولی		27.55 ^b	18.45 ^b	271.10 ^a	0.45 ^b	3.78 ^b	299.04 ^b
نانوکود گوگرد		29.44 ^a	20.46 ^a	272.71 ^a	0.49 ^a	4.13 ^a	351.45 ^a
شاهد		25.98 ^c	17.40 ^c	265.12 ^b	0.33 ^c	3.46 ^c	274.16 ^b

* In each column, means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$) based on Duncan's multiple range test.
* در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن تفاوت معنی‌داری ندارند.

جدول ۵- اثرات متقابل مقادیر مختلف زیغال زیستی × کاربرد گوگرد و نانوکود گوگرد بر برخی خصوصیات ریخت‌شناختی و عملکرد مرزه در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰
Table 5- The interaction effects of different amounts of biochar × application of sulfur and nano-sulfur on some morphological and yield characteristics of *Satureja hortensis* L. in cropping year of 2020-2021

	ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد شاخه فرعی Lateral branch number	سطح برگ Leaf area (cm ²)	قطر ساقه Stem diameter (cm)	وزن خشک اندام هوایی Dry shoot weight (g)	عملکرد ماده خشک Dry matter yield (kg.ha ⁻¹)
عدم کاربرد زیغال زیستی Non-Application of biochar						
گوگرد معمولی Common sulfur	22.30 ^a	17.00 ^{de}	257.65 ^{ef}	0.30 ^g	1.96 ^k	157.60 ^h
نانوکود گوگرد Nano-sulfur	23.25 ^{ef}	17.55 ^{de}	259.68 ^e	0.41 ^e	2.04 ^j	163.73 ^h
شاهد Control	20.85 ^f	16.25 ^e	251.03 ^f	0.19 ^h	1.70 ^l	136.16 ⁱ
۵ تن در هکتار زیغال زیستی 5 t.ha ⁻¹ biochar						
گوگرد معمولی Common sulfur	25.50 ^e	18.80 ^{cde}	267.25 ^{cd}	0.44 ^d	3.56 ^h	285.60 ^f
نانوکود گوگرد Nano-sulfur	28.60 ^d	19.10 ^{cd}	272.50 ^{bc}	0.46 ^{cd}	3.70 ^g	285.60 ^f
شاهد Control	23.00 ^{ef}	17.90 ^{de}	262.70 ^{de}	0.32 ^g	3.12 ⁱ	248.80 ^g
۱۰ تن در هکتار زیغال زیستی 10 t.ha ⁻¹ biochar						
گوگرد معمولی Common sulfur	30.80 ^{cd}	19.25 ^{cd}	275.50 ^b	0.45 ^{cd}	4.68 ^e	373.60 ^d
نانوکود گوگرد Nano-sulfur	31.80 ^c	20.95 ^c	279.28 ^b	0.47 ^c	4.99 ^d	398.93 ^c
شاهد Control	30.40 ^{cd}	19.60 ^{cd}	275.15 ^b	0.37 ^f	4.16 ^f	333.60 ^e
۲۰ تن در هکتار زیغال زیستی 20 t.ha ⁻¹ biochar						
گوگرد معمولی Common sulfur	37.31 ^b	26.25 ^{ab}	291.47 ^a	0.52 ^b	5.20 ^b	416.48 ^b
نانوکود گوگرد Nano-sulfur	40.72 ^a	28.40 ^a	292.00 ^a	0.60 ^a	5.90 ^a	469.12 ^a
شاهد Control	36.20 ^b	24.50 ^b	287.45 ^a	0.37 ^f	5.10 ^c	406.40 ^{bc}

* در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن تفاوت معنی‌داری ندارند.
* In each column, means followed by the same letters are not significantly different (p≤0.05) based on Duncan's multiple range test.

جدول ۶- مقایسه میانگین اثرات متقابل مقادیر مختلف زغال زیستی و کاربرد گوگرد و نانوکود گوگرد بر برخی خصوصیات ریخت‌شناختی و عملکرد مرزه در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱
Table 6- Mean comparison of interaction effects of different amounts of biochar and application of sulfur and nano-sulfur on some morphological characteristics and yield of *Satureja hortensis* L. in cropping year of 2021-2022

عملکرد ماده خشک Dry matter yield (kg.ha ⁻¹)	وزن خشک اندام هوایی Dry shoot weight (g)	قطر ساقه Stem diameter (cm)	سطح برگ Leaf area (cm ²)	تعداد شاخه فرعی Lateral branch number	ارتفاع بوته Plant height (cm)
عدم کاربرد زغال زیستی Non-application of biochar					
گوگرد معمولی Common sulfur	1.96 ^g	0.32 ^{bc}	254.69 ^{ef}	15.26 ^{de}	20.51 ^{fg}
نانوکود گوگرد Nano-sulfur	2.03 ^g	0.39 ^{abc}	254.80 ^{ef}	15.70 ^{de}	21.71 ^{fg}
شاهد Control	1.63 ^h	0.20 ^e	248.73 ^f	14.00 ^e	19.34 ^g
۵ تن در هکتار زغال زیستی 5 t.ha ⁻¹ biochar					
گوگرد معمولی Common sulfur	3.45 ^e	0.47 ^{ab}	266.67 ^d	16.77 ^{de}	23.69 ^{ef}
نانوکود گوگرد Nano-sulfur	3.86 ^d	0.51 ^{ab}	269.33 ^{cd}	16.89 ^{de}	26.88 ^{de}
شاهد Control	3.06 ^f	0.31 ^{bc}	258.76 ^e	16.22 ^{de}	21.94 ^{fg}
۱۰ تن در هکتار زغال زیستی 10 t.ha ⁻¹ biochar					
گوگرد معمولی Common sulfur	4.58 ^e	0.50 ^{ab}	273.84 ^c	17.52 ^{de}	29.59 ^d
نانوکود گوگرد Nano-sulfur	4.90 ^b	0.48 ^{ab}	275.17 ^c	18.88 ^{cd}	30.40 ^{cd}
شاهد Control	4.11 ^d	0.39 ^{abc}	270.43 ^{cd}	17.59 ^{de}	29.38 ^d
۲۰ تن در هکتار زغال زیستی 20 t.ha ⁻¹ biochar					
گوگرد معمولی Common sulfur	5.14 ^b	0.50 ^{ab}	289.21 ^a	24.24 ^b	36.40 ^{ab}
نانوکود گوگرد Nano-sulfur	5.74 ^a	0.59 ^a	291.54 ^a	30.38 ^a	38.78 ^a
شاهد Control	5.04 ^b	0.41 ^{abc}	282.54 ^b	21.79 ^{bc}	33.26 ^{bc}

* در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن. تفاوت معنی‌داری ندارند.
* In each column, means followed by the same letters are not significantly different (p≤0.05) based on Duncan's multiple range test.

زراعی اول و دوم) همبستگی مثبت و معنی‌دار وجود داشت، لذا با توجه به اثر مثبت زغال زیستی و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی بر خصوصیات کمی مرزه (جدول ۴، ۵ و ۶)، بهبود عملکرد ماده خشک در شرایط استفاده از این نهاده‌های اکولوژیک منطقی به نظر می‌رسد. به نظر می‌رسد که زغال زیستی به دلیل تخلخل زیاد و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا (Gaudutis et al., 2023) و احتمالاً از طریق بهبود وضعیت ساختمان خاک و کاهش سمیت نمک (Ghassemi-Golezani & Rahimzadeh, 2022) و همچنین کاهش ترسیب کربن خاک (Ng et al., 2023) و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی احتمالاً از طریق بهبود فعالیت‌های متابولیسمی و میزان فتوسنتز گیاه (Shankar et al., 2020) و افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های زنده و غیرزنده (Yuan et al., 2021) توانسته است که نقش مؤثری در بهبود خصوصیات ریخت‌شناختی مرزه ایفا کند. تأثیر کاربرد بیوپار و سطوح مختلف مدیریت آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه دارویی زنیان نشان داد که بیشترین مقدار ارتفاع بوته، وزن تر و خشک بوته، وزن ۱۰۰ دانه، عملکرد دانه و کارایی مصرف آب در شرایط کاربرد ۴۵ تن در هکتار بیوپار به دست آمد (Khasheisiuki et al., 2019). بیشترین عملکرد دانه ذرت (*Zea mays* L.) در تیمار آبیاری پس از تخلیه ۴۰ درصد ظرفیت زراعی و کاربرد چهار تن در هکتار بیوپار مشاهده شد (Charkhab et al., 2021). عملکرد خشک، وزن خشک ریشه، نیکوتین و قند احیاء گیاه دارویی توتون (*Nicotiana tabacum* L.) در شرایط کاربرد چهار تن در هکتار بیوپار، به ترتیب از افزایش ۲۶، ۴۴، ۳ و ۲۴ درصدی در مقایسه با شاهد بهره‌مند شد (Mesbah et al., 2021). فیضی و همکاران (Feizi et al., 2021) پس از بررسی اثر کاربرد همزمان بیوپار و اسید سالیسیلیک در زراعت گیاه دارویی ریحان (*Ocimum basilicum* L.) به این نتیجه رسیدند که بیشترین ارتفاع بوته، وزن تر و خشک اندام هوایی و سطح برگ در تیمار سه درصد بیوپار و ۲۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک به دست آمد. کاربرد زغال زیستی در سطح سه درصد وزنی در مقایسه با تیمارهای استفاده از سه درصد وزنی کمپوست و شاهد نتیجه بهتری در افزایش مؤلفه‌های رشدی و جذب عناصر غذایی گیاه دارویی جعفری (*Petroselinum crispum* Mill.) نشان داد و کاهش اثرات تنش شوری را به همراه داشت (Karaminiya et al., 2019). کاربرد ۲۰ کیلوگرم در هکتار گوگرد منجر به افزایش قابل توجه ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، وزن ۱۰۰ دانه و عملکرد دانه ماش در مقایسه با شاهد شد (Murshed et al., 2021). در پژوهشی دیگر، بیشترین ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد گل در بوته و عملکرد گل گیاه دارویی آرنیکای چامیسو در تیمار ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگردی بنتونیتی به دست آمد (Asadi et

مقادیر مختلف زغال زیستی و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی، در هر دو سال زراعی تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک اندام هوایی و عملکرد ماده خشک داشت (جدول ۳). در هر دو سال زراعی افزایش مقادیر مصرفی زغال زیستی بهبود وزن خشک اندام هوایی و عملکرد ماده خشک را نسبت به شاهد در پی داشت (جدول ۴)، به‌طوری‌که در هر دو سال زراعی بیشترین میزان وزن خشک اندام هوایی (به‌ترتیب با ۵/۳۸ و ۵/۳۱ گرم وزن خشک اندام هوایی در سال زراعی اول و دوم) و عملکرد ماده خشک (به‌ترتیب با ۴۳۰/۶۷ و ۴۵۱/۵۷ کیلوگرم در هکتار عملکرد ماده خشک در سال زراعی اول و دوم) در تیمار ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی به دست آمد. کاربرد مقادیر ۵ و ۱۰ تن در هکتار زغال زیستی نیز وزن خشک اندام هوایی را به‌ترتیب ۴۴ و ۵۹ درصد در سال زراعی اول و به‌ترتیب ۴۶ و ۵۹ درصد در سال زراعی دوم نسبت به شاهد افزایش دادند و عملکرد ماده خشک نیز تحت تأثیر مقادیر ۵ و ۱۰ تن در هکتار زغال زیستی به‌ترتیب از افزایش ۴۴ و ۵۹ درصدی در سال زراعی اول و افزایش ۴۸ و ۶۰ درصدی در سال زراعی دوم بهره‌مند شد (جدول ۴). در هر دو سال زراعی، مقدار وزن خشک اندام هوایی و عملکرد ماده خشک تحت تأثیر کاربرد گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوکود گوگرد به‌مراتب بیشتر از شاهد بود، ولی بیشترین میزان صفات یادشده (به‌ترتیب با ۴/۱۱ و ۴/۱۳ گرم وزن خشک اندام هوایی در سال زراعی اول و دوم و به‌ترتیب با ۳۲۹/۳۵ و ۳۵۱/۴۵ کیلوگرم در هکتار عملکرد ماده خشک در سال زراعی اول و دوم) در شرایط محلول‌پاشی نانوکود گوگرد حاصل شد (جدول ۴). با توجه به نتایج جدول ۵ و ۶، بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی در هر دو سال زراعی (به‌ترتیب با ۵/۹۰ و ۵/۷۴ گرم وزن خشک اندام هوایی در سال زراعی اول و دوم) در تیمار کاربرد تلفیقی ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی و محلول‌پاشی نانوکود گوگرد حاصل شد، ولی اثر برهم‌کنش زغال زیستی و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی در هیچ یک از سال‌های زراعی مورد مطالعه بر عملکرد ماده خشک معنی‌دار نبود (جدول ۳). بررسی تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی در مقادیر مختلف زغال زیستی نشان داد که در هر دو سال زراعی در کلیه سطوح بیوپار مورد مطالعه، محلول‌پاشی نانوکود گوگرد بیشترین وزن خشک اندام هوایی نسبت به سایر تیمارها را ایجاد کرد (جدول ۵ و ۶). با توجه به نتایج همبستگی صفات مورد مطالعه (جدول ۷ و ۸)، در هر دو سال زراعی بین عملکرد ماده خشک و ارتفاع بوته (به‌ترتیب با $r = 0.94^{***}$ و $r = 0.91^{**}$ در سال زراعی اول و دوم)، تعداد شاخه فرعی (به‌ترتیب با $r = 0.83^{**}$ و $r = 0.80^{**}$ در سال زراعی اول و دوم)، سطح برگ (به‌ترتیب با $r = 0.96^{**}$ و $r = 0.91^{**}$ در سال زراعی اول و دوم)، قطر ساقه (به‌ترتیب با $r = 0.79^{**}$ و $r = 0.64^{**}$ در سال زراعی اول و دوم) و وزن خشک اندام هوایی (به‌ترتیب با $r = 0.98^{**}$ و $r = 0.93^{**}$ در سال

بیشترین میزان اسانس در تیمار کاربرد همزمان ۱۰ تن در هکتار زغال زیستی و مصرف خاکی گوگرد معمولی به دست آمد و افزایش بیشتر مقدار زغال زیستی (تا سطح ۲۰ تن در هکتار) کاهش میزان اسانس در تیمارهای تغذیه‌ای مذکور را به همراه داشت (جدول ۱۱). در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰، اثر برهم‌کنش مقادیر مختلف زغال زیستی و تیمارهای تغذیه‌ای گوگرد بر میزان اسانس معنی‌دار نبود (جدول ۱۱). میزان فنل کل در هر دو سال زراعی تحت تأثیر استفاده همزمان مقادیر زغال زیستی و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی کاهش یافت، به‌طوری‌که بیشترین میزان این صفت زمانی حاصل شد که از هیچ مقدار زغال زیستی به‌صورت توأم با تیمارهای تغذیه‌ای استفاده نگردید (جدول ۱۱).

اثر مقادیر مختلف زغال زیستی، تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی و برهم‌کنش آن‌ها در سال زراعی اول بر میزان کربوهیدرات معنی‌دار بود، ولی اثرات ساده و متقابل این عوامل تأثیر معنی‌داری بر میزان کربوهیدرات در سال زراعی دوم نداشت (جدول ۹). در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰، میزان کربوهیدرات در کرت‌های حاوی زغال زیستی به‌مراتب بیشتر از کرت‌های عاری از این کود بود، به‌طوری‌که هر یک از مقادیر ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی به‌ترتیب منجر به افزایش ۴، ۹ و ۱۰ درصدی میزان کربوهیدرات در مقایسه با شاهد شدند (جدول ۱۰). کاربرد گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوکود گوگرد میزان کربوهیدرات را به‌ترتیب دو و شش درصد در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ نسبت به شاهد افزایش داد (جدول ۱۰). همان‌طور که در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان کربوهیدرات در سال زراعی اول زمانی به دست آمد که در کرت‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی از محلول‌پاشی نانوکود گوگرد (به‌ترتیب با ۰/۱۲۵۵ و ۰/۱۲۷۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) استفاده شد.

اثر مقادیر مختلف زغال زیستی، تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی و برهم‌کنش آن‌ها در هر دو سال زراعی، میزان کلروفیل a و b و کلروفیل کل را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد (جدول ۹). در هر دو سال زراعی، با افزایش مقادیر مصرفی زغال زیستی، بر میزان کلروفیل a و b و کلروفیل کل افزوده شد، به‌طوری‌که کاربرد ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی، میزان کلروفیل a را به‌ترتیب ۳۴، ۵۶ و ۶۹ درصد، میزان کلروفیل b را به‌ترتیب ۱۷، ۲۲ و ۳۲ درصد و میزان کلروفیل کل را به‌ترتیب ۲۷، ۴۴ و ۵۸ درصد نسبت به شاهد در سال زراعی اول و میزان کلروفیل a را به‌ترتیب ۳۸، ۵۸ و ۷۱ درصد، میزان کلروفیل b را به‌ترتیب ۱۶، ۲۰ و ۳۱ درصد و میزان کلروفیل کل را به‌ترتیب ۲۸، ۴۴ و ۵۸ درصد نسبت به شاهد در سال زراعی دوم بهبود بخشیدند (جدول ۱۰).

(al., 2019). بهبود ویژگی‌های کمی و عملکرد باقلا نیز تحت تأثیر کودهای گوگردی گزارش شده است (Hameed & Hasan, 2022). در یک پژوهش، الموسوی و جمیل (Almousswi & Jameel, 2022) گزارش کردند که استفاده از گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد کلیه صفات مورد مطالعه (نظیر ارتفاع بوته، سطح برگ و وزن خشک) در گیاه دارویی تره کوهی (*Allium ampeloprasum* L.) را نسبت به شاهد افزایش داد که البته از این نظر کاربرد نانوگوگرد نسبت به گوگرد معمولی نقش مؤثرتری در بهبود خصوصیات کمی و کیفی گیاه ایفا کرد.

خصوصیات کیفی و فیزیولوژیکی

در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰، اثر مقادیر مختلف زغال زیستی و تیمار تغذیه‌ای و برهم‌کنش آن‌ها به‌طور معنی‌داری بر میزان اسانس تأثیر داشت و در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ نیز میزان اسانس تحت تأثیر مقادیر مختلف زغال زیستی و کاربرد همزمان مقادیر زغال زیستی و تیمار تغذیه‌ای قرار گرفت، ولی اثر ساده تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی تأثیر چندانی بر میزان اسانس نداشت (جدول ۹). در هر دو سال زراعی، بیشترین میزان اسانس (به‌ترتیب با ۲/۱۰ و ۲/۱۳ درصد اسانس در سال‌های زراعی اول و دوم) در تیمار ۱۰ تن در هکتار بیوپار به دست آمد (جدول ۱۰). کاربرد پنج تن در هکتار زغال زیستی به‌ترتیب افزایش سه و شش درصدی میزان اسانس نسبت به شاهد را در سال زراعی اول و دوم سبب شد (جدول ۱۰). میزان اسانس در سال زراعی اول تحت تأثیر کاربرد ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی از افزایش ۱۰ درصدی در مقایسه با شاهد برخوردار شد، ولی از این نظر بین این سطح زغال زیستی و شاهد در سال زراعی دوم تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۱۰). نتایج آزمایش نشان داد که در هر دو سال زراعی با افزایش مقادیر مصرفی زغال زیستی از میزان فنل کل کاسته شد، به‌طوری‌که هر یک از سطوح ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی، میزان فنل کل را به‌ترتیب ۷، ۱۳ و ۲۹ درصد در سال زراعی اول در مقایسه با شاهد کاهش دادند و در سال زراعی دوم نیز وضعیت مشابهی مشاهده شد (جدول ۱۰). در هر دو سال زراعی، بیشترین میزان فنل کل (به‌ترتیب با ۱۱/۰۴ و ۱۱/۸۱ درصد در سال‌های زراعی اول و دوم) به‌ترتیب در تیمارهای محلول‌پاشی نانوگوگرد و کاربرد گوگرد معمولی مشاهده شد (جدول ۱۰). نتایج اثرات متقابل مقادیر مصرفی زغال زیستی و تیمار تغذیه‌ای در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ نشان داد که با افزایش مقادیر زغال زیستی تا سطح ۱۰ تن در هکتار، اثرات مثبت گوگرد معمولی و نانوگوگرد در بهبود میزان اسانس محسوس‌تر بود، به‌طوری‌که

جدول ۷- ضرایب همبستگی صفات مورد مطالعه در مرزه تحت تأثیر مقادیر مختلف زغال زیستی و در شرایط کاربرد گوگرد و نانوگود گوگرد در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹

Table 7- The correlation coefficients of studied traits in *Satureja hortensis* L. affected by different amounts of biochar and application of sulfur and nano-sulfur in cropping year of 2020-2021

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ارتفاع بوته (۱) Plant height (1)	1											
تعداد شاخه فرعی (۲) Lateral branch number (2)	0.91**	1										
سطح برگ (۳) Leaf area (3)	0.98**	0.90**	1									
قطر ساقه (۴) Stem diameter (4)	0.79**	0.75**	0.80**	1								
وزن خشک اندام هوایی (۵) Dry shoot weight (5)	0.94**	0.89**	0.96**	0.79**	1							
عملکرد ماده خشک (۶) Dry matter yield (6)	0.94**	0.83**	0.96**	0.79**	0.98**	1						
اسانس (۷) Essential oil (7)	0.10	-0.13	0.14	0.09	0.32*	0.32*	1					
فنل کل (۸) Total phenol (8)	-0.89**	-0.84**	-0.91**	-0.59**	-0.85**	-0.85**	-0.03	1				
میزان کربوهیدرات (۹) Carbohydrate content (9)	0.79**	0.74**	0.80**	0.81**	0.85**	0.85**	0.31	-0.56**	1			
کلروفیل a (۱۰) Chlorophyll a (10)	0.97**	0.94**	0.96**	0.81**	0.93**	0.93**	0.08	-0.85**	0.82**	1		
کلروفیل b (۱۱) Chlorophyll b (11)	0.83**	0.79**	0.85**	0.82**	0.88**	0.88**	0.15	-0.75**	0.78**	0.84**	1	
کلروفیل کل (۱۲) Total chlorophyll (12)	0.97**	0.93**	0.96**	0.83**	0.95**	0.95**	0.09	-0.85**	0.84**	0.99**	0.89**	1

*** و **: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد.
** and *: are significant at the 0.01 and 0.05 of probability level, respectively.

جدول ۸- ضرایب همبستگی صفات مورد مطالعه در مرزه تحت تأثیر مقادیر مختلف زغال زیستی و در شرایط کاربرد گوگرد و نانوکود گوگرد در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰
Table 8- The correlation coefficients of studied traits in *Satureja hortensis* L. affected by different amounts of biochar and application of sulfur and nano-sulfur in cropping year of 2021-2022

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ارتفاع بوته (۱) Plant height (1)	1											
تعداد شاخه فرعی (۲) Lateral branch number (2)	0.89**	1										
سطح برگ (۳) Leaf area (3)	0.96**	0.84**	1									
قطر ساقه (۴) Stem diameter (4)	0.69**	0.65**	0.63**	1								
وزن خشک اندام هوایی (۵) Dry shoot weight (5)	0.94**	0.78**	0.95**	0.62**	1							
عملکرد ماده خشک (۶) Dry matter yield (6)	0.91**	0.80**	0.91**	0.64**	0.93**	1						
اسانس (۷) Essential oil (7)	0.30	0.18	0.22	0.64**	0.32*	0.29	1					
فیل کل (۸) Total phenol (8)	-0.73**	-0.61**	-0.78**	-0.13	-0.76**	-0.68**	0.13	1				
میزان کربوهیدرات (۹) Carbohydrate content (9)	0.45**	0.42*	0.37*	0.52**	0.36*	0.36*	0.47**	-0.06	1			
کلروفیل a (۱۰) Chlorophyll a (10)	0.97**	0.89**	0.95**	0.60**	0.94**	0.92**	0.17	-0.77**	0.39*	1		
کلروفیل b (۱۱) Chlorophyll b (11)	0.81**	0.78**	0.80**	0.79**	0.80**	0.78**	0.46**	-0.46**	0.37*	0.77**	1	
کلروفیل کل (۱۲) Total chlorophyll (12)	0.97**	0.90**	0.96**	0.66**	0.94**	0.92**	0.24	-0.74**	0.40*	0.99**	0.84**	1

** و *: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد.
** and *: are significant at the 0.01 and 0.05 of probability level, respectively.

جدول ۹- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برخی خصوصیات فیزیولوژیکی مرزه تحت تأثیر مقادیر مختلف زغال زیستی، کاربرد گوگرد و نانوکود گوگرد
Table 9- ANOVA (mean of squares) for some physiological characteristics of *Satureja hortensis* L. affected by different amounts of biochar and application of sulfur and of nano-sulfur

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	اسانس Essential oil	فنل کل Total phenol	میزان کربوهیدرات Carbohydrate content	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll
سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ Cropping year of 2020-2021							
بلوک Block	2	0.0005*	0.03 ^{ns}	0.000001 ^{ns}	0.0011 ^{ns}	0.0017 ^{ns}	0.0019 ^{ns}
زغال زیستی Biochar	3	0.09**	20.007**	0.0002**	32.45**	1.23**	46.02**
خطای a Error a	6	0.0001	0.02	0.000002	0.0018	0.0004	0.0030
تیمار تغذیه‌ای Nutrient treatment	2	0.005**	1.02**	0.0001**	4.14**	0.40**	6.78**
زغال زیستی × تیمار تغذیه‌ای Biochar × nutrient treatment	6	0.007**	0.23**	0.00002**	0.8367**	0.12**	0.87**
خطای b Error b	16	0.0001	0.02	0.000002	0.0014	0.0007	0.0037
ضریب تغییرات CV (%)	-	0.59	1.57	1.29	0.94	1.10	0.96
سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ Cropping year of 2021-2022							
بلوک Block	2	0.28**	2.99**	0.002**	0.34**	0.75**	2.11**
زغال زیستی Biochar	3	0.09**	19.30**	0.0007 ^{ns}	32.61**	1.28**	46.58**
خطای a Error a	6	0.003	0.02	0.0003	0.03	0.006	0.05
تیمار تغذیه‌ای Nutrient treatment	2	0.001 ^{ns}	1.46**	0.0004 ^{ns}	3.85**	0.32**	6.25**
زغال زیستی × تیمار تغذیه‌ای Biochar × nutrient treatment	6	0.013**	0.21**	0.0003 ^{ns}	0.68**	0.15**	0.61**
خطای b Error b	16	0.003	0.01	0.0002	0.05	0.008	0.08
ضریب تغییرات CV (%)	-	2.83	1.21	15.08	6.06	3.68	4.59

***، * و ns: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم معنی‌دار.
***, * and ns: significant at the 0.01 and 0.05 of probability levels, and non-significant, respectively.

جدول ۱۰ - برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی مرزه تحت تأثیر مقادیر مختلف زغال زیستی و در شرایط کاربرد گوگرد و نانوکود گوگرد
Table 10- Some physiological characteristics of *Satureja hortensis* L. affected by different amounts of biochar and application of sulfur and nano-sulfur

اسانس Essential oil (%)	فنل کل Total phenol (mg.g ⁻¹ fresh weight)	میزان کربوهیدرات Carbohydrate content (mg.g ⁻¹ fresh weight)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg.g ⁻¹ fresh weight)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.g ⁻¹ fresh weight)	کلروفیل کل Total chlorophyll (mg.g ⁻¹ fresh weight)
مقادیر زغال زیستی Amounts of biochar (t.ha ⁻¹)					
0	1.88 ^{d*}	12.24 ^a	1.97 ^d	1.93 ^d	3.90 ^d
5	1.94 ^b	11.34 ^b	3.00 ^c	2.33 ^c	5.34 ^c
10	2.10 ^a	10.70 ^c	4.47 ^b	2.46 ^b	6.94 ^b
20	1.90 ^c	8.73 ^d	6.34 ^a	2.83 ^a	9.18 ^a
تیمار تغذیه‌ای					
Nutrient treatment					
گوگرد معمولی Common sulfur	1.95 ^b	10.45 ^c	3.90 ^b	2.48 ^a	6.39 ^b
نانوکود گوگرد Nano-sulfur	1.94 ^c	11.04 ^a	4.55 ^a	2.50 ^a	7.06 ^a
شاهد Control	1.98 ^a	10.76 ^b	3.38 ^c	2.18 ^b	5.56 ^c
مقادیر زغال زیستی Amounts of biochar (t.ha ⁻¹)					
0	1.88 ^c	12.94 ^a	1.81 ^d	2.06 ^d	3.87 ^d
5	2.00 ^b	11.91 ^b	2.90 ^c	2.44 ^c	5.34 ^c
10	2.13 ^a	11.35 ^c	4.35 ^b	2.58 ^b	6.93 ^b
20	1.94 ^{bc}	9.45 ^d	6.20 ^a	2.98 ^a	9.19 ^a
تیمار تغذیه‌ای					
Nutrient treatment					
گوگرد معمولی Common sulfur	1.99 ^a	11.18 ^b	3.81 ^b	2.58 ^a	6.40 ^b
نانوکود گوگرد Nano-sulfur	1.98 ^a	11.81 ^a	4.38 ^a	2.63 ^a	7.02 ^a
شاهد Control	2.00 ^a	11.25 ^b	3.25 ^c	2.33 ^b	5.58 ^c

* در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن تفاوت معنی‌داری ندارند.
* In each column, means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$) based on Duncan's multiple range test.

جدول ۱۱ - اثرات متقابل مقادیر مختلف زغال زیستی × کاربرد گوگرد و نانوکود گوگرد بر برخی خصوصیات فیزیولوژیکی مرزه
Table 11- The interaction effects of different amounts of biochar and nano-sulfur on some physiological characteristics of *Satureja hortensis* L.

	عدم کاربرد زغال زیستی Non-application of biochar				۵ تن در هکتار زغال زیستی 5 t.ha ⁻¹ biochar				۱۰ تن در هکتار زغال زیستی 10 t.ha ⁻¹ biochar				۲۰ تن در هکتار زغال زیستی 20 t.ha ⁻¹ biochar			
	گوگرد معمولی Common sulfur	نانوکود Nano-sulfur	شاهد Control	گوگرد معمولی Common sulfur	نانوکود Nano-sulfur	شاهد Control	گوگرد معمولی Common sulfur	نانوکود Nano-sulfur	شاهد Control	گوگرد معمولی Common sulfur	نانوکود Nano-sulfur	شاهد Control	گوگرد معمولی Common sulfur	نانوکود Nano-sulfur	شاهد Control	گوگرد معمولی Common sulfur
اسانس Essential oil (%)	1.86 ^{fg}	1.91 ^e	1.88 ^f	1.96 ^d	1.84 ^g	2.03 ^c	2.40 ^a	2.10 ^b	2.09 ^b	1.88 ^f	1.89 ^{ef}	1.96 ^d	1.88 ^f	1.89 ^{ef}	1.96 ^d	1.96 ^d
فلفل کل Total phenol (mg.g ⁻¹ fresh weight)	11.80 ^b	12.25 ^a	12.60 ^a	11.25 ^c	11.30 ^c	11.50 ^{bc}	10.15 ^c	11.10 ^c	10.63 ^d	8.41 ^g	9.10 ^f	8.50 ^g	8.41 ^g	9.10 ^f	8.50 ^g	8.50 ^g
میزان کربوهیدرات Carbohydrate content (mg.g ⁻¹ fresh weight)	0.1090 ^d	0.1110 ^c	0.1050 ^d	0.1130 ^{bc}	0.1130 ^{bc}	0.1120 ^{bc}	0.1170 ^b	0.1255 ^a	0.1155 ^{bc}	0.1165 ^{bc}	0.1270 ^a	0.1160 ^{bc}	0.1165 ^{bc}	0.1270 ^a	0.1160 ^{bc}	0.1160 ^{bc}
کلروفیل a (mg.g ⁻¹ fresh weight)	2.01 ^j	2.17 ⁱ	1.80 ^k	2.78 ^g	3.75 ^f	2.55 ^h	4.65 ^d	4.68 ^d	4.10 ^c	6.25 ^b	7.68 ^a	5.09 ^c	6.25 ^b	7.68 ^a	5.09 ^c	5.09 ^c
کلروفیل b (mg.g ⁻¹ fresh weight)	1.86 ^j	2.06 ^g	1.92 ⁱ	2.61 ^d	2.35 ^e	2.15 ^f	2.68 ^c	2.72 ^c	1.98 ^h	2.82 ^b	2.98 ^a	2.72 ^c	2.82 ^b	2.98 ^a	2.72 ^c	2.72 ^c
کلروفیل کل Total chlorophyll (mg.g ⁻¹ fresh weight)	3.87 ^j	4.23 ^h	3.73 ⁱ	5.40 ^f	6.10 ^e	4.70 ^g	7.33 ^d	7.40 ^d	6.08 ^c	9.07 ^b	10.66 ^a	7.81 ^c	9.07 ^b	10.66 ^a	7.81 ^c	7.81 ^c
اسانس Essential oil (%)	1.89 ^{ab}	1.95 ^{ab}	1.81 ^b	2.01 ^{ab}	1.93 ^{ab}	2.07 ^{ab}	2.17 ^a	2.11 ^{ab}	2.11 ^{ab}	1.90 ^{ab}	1.92 ^{ab}	2.01 ^{ab}	1.90 ^{ab}	1.92 ^{ab}	2.01 ^{ab}	2.01 ^{ab}
فلفل کل Total phenol (mg.g ⁻¹ fresh weight)	12.60 ^{ab}	13.13 ^a	13.10 ^a	11.90 ^{bc}	12.12 ^b	11.72 ^{bcd}	11.13 ^{cd}	12.00 ^{bc}	10.92 ^d	9.08 ^f	10.01 ^c	9.27 ^{cd}	9.08 ^f	10.01 ^c	9.27 ^{cd}	9.27 ^{cd}
میزان کربوهیدرات Carbohydrate content (mg.g ⁻¹ fresh weight)	0.1097 ^{ab}	0.1090 ^{ab}	0.1010 ^{ab}	0.0790 ^b	0.1157 ^{ab}	0.1107 ^{ab}	0.1193 ^{ab}	0.1227 ^a	0.1200 ^{ab}	0.1167 ^{ab}	0.1270 ^a	0.1150 ^{ab}	0.1167 ^{ab}	0.1270 ^a	0.1150 ^{ab}	0.1150 ^{ab}
کلروفیل a (mg.g ⁻¹ fresh weight)	1.89 ^{ij}	2.04 ^{hi}	1.49 ⁱ	2.70 ^g	3.58 ^f	2.42 ^{gh}	4.55 ^d	4.46 ^d	4.04 ^e	6.11 ^b	7.45 ^a	5.05 ^c	6.11 ^b	7.45 ^a	5.05 ^c	5.05 ^c
کلروفیل b (mg.g ⁻¹ fresh weight)	1.92 ^d	2.21 ^{cd}	2.06 ^d	2.68 ^{abc}	2.34 ^{abc}	2.30 ^{abc}	2.75 ^{ab}	2.89 ^a	2.09 ^d	2.98 ^a	3.09 ^a	2.86 ^a	2.98 ^a	3.09 ^a	2.86 ^a	2.86 ^a
کلروفیل کل Total chlorophyll (mg.g ⁻¹ fresh weight)	3.82 ^g	4.26 ^{fg}	3.55 ^g	5.38 ^{de}	5.92 ^d	4.72 ^{ef}	7.30 ^e	7.36 ^e	6.14 ^d	9.09 ^b	10.55 ^a	7.92 ^e	9.09 ^b	10.55 ^a	7.92 ^e	7.92 ^e

در هر ردیف، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن تفاوت معنی‌داری ندارند.
* In each row, means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$) based on Duncan's multiple range test.

به نظر می‌رسد که زغال زیستی احتمالاً از طریق افزایش ظرفیت نگهداری آب (Al Baquy et al., 2023) و بهبود فعالیت‌های میکروبی خاک (Javeed et al., 2023) و تأمین مواد غذایی قابل جذب (Gaudutis et al., 2023) و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی احتمالاً از طریق نقش آفرینی در ساختمان پروتئین‌ها، آنزیم‌ها (Al-Narayan et al., 2022) و بهبود مقاومت گیاه به انواع تنش‌های زنده و غیرزنده (Yuan et al., 2021) منجر به بهبود خصوصیات کمی و کیفی مرزه شده‌اند و از طرفی وجود گوگرد در ساختمان بسیاری از متابولیت‌های ثانویه به اثبات رسیده است (Borpatragohain et al., 2019). در یک پژوهش، کاربرد پنج تن در هکتار بیوپچار در مزرعه گیاه دارویی گلرنگ (*Carthamus tinctorium* L.) میزان نشت یونی سلول را نسبت به شاهد ۱۵ درصد کاهش و عملکرد روغن را در مقایسه با شاهد ۲۰ درصد افزایش داد و مصرف همزمان ۱۰ تن در هکتار از این کود و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک، افزایش ۴۳/۴ درصدی محتوای کلروفیل a نسبت به شاهد را در پی داشت (Sajedi & Sajedi, 2020). کاربرد همزمان بیوپچار و سوپرجاذب بر خصوصیات کیفی مرزه رشینگری بررسی و بیشترین میزان کارواکرول، گاما-ترینین و لینالول در تیمار کاربرد بیوپچار و ۶۰ میلی‌گرم سوپرجاذب مشاهده شد (Beiranvandi et al., 2020). در پژوهشی دیگر، اثر مقادیر مختلف بیوپچار بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد گیاه دارویی سرخارگل در شرایط تنش خشکی بررسی و گزارش شد که کاربرد بیوپچار منجر به افزایش عملکرد بیولوژیک و میزان کلروفیل a نسبت به شاهد شد و به‌طور کلی استفاده از این نهاده آلی در بهبود اثرهای منفی ناشی از تنش خشکی مفید بود (Emami, 2022). کاربرد بیوپچار در مزرعه گیاه دارویی شوید در شرایطی که گیاه در معرض تنش شوری قرار داشت، افزایش مقدار لیمونن، کارون، آپپول و دیلاپیول و همچنین بهبود میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی را سبب شد (Ghassemi-Golezani & Rahimzadeh, 2022). کاربرد همزمان کودهای گوگردی و کودهای حاوی عناصر روی و بور، بیشترین عملکرد اقتصادی و بهترین کیفیت از نظر مقدار آلئوسین در گیاه دارویی سیر را در پی داشت (Zare Pak Ziaberi & Majidian, 2022). کاربرد ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار گوگرد همراه با ۲۰ کیلوگرم در هکتار باکتری تیوباسیلوس، منجر به تولید بیشترین عملکرد دانه، درصد روغن، وزن هزار دانه و غلظت عناصر غذایی دانه کلزا (*Brassica napus* L.) شد (Ghaderi et al., 2021). بیشترین میزان روغن، پروتئین و عملکرد دانه کنجد (*Sesamum indicum* L.) در شرایط

در هر دو سال زراعی، بیشترین و کمترین میزان کلروفیل a، b و کل به‌ترتیب در تیمارهای محلول‌پاشی نانوکود گوگرد (به‌ترتیب با ۴/۵۵، ۲/۵۰ و ۷/۰۶ میلی‌گرم بر وزن تر کلروفیل a، b و کل در سال زراعی اول و به‌ترتیب با ۴/۳۸، ۲/۶۳ و ۷/۰۲ میلی‌گرم بر وزن تر کلروفیل a، b و کل در سال زراعی دوم) و شاهد (به‌ترتیب با ۳/۳۸، ۲/۱۸ و ۵/۵۶ میلی‌گرم بر وزن تر کلروفیل a، b و کل در سال زراعی اول و به‌ترتیب با ۳/۲۵، ۲/۳۳ و ۵/۵۸ میلی‌گرم بر وزن تر کلروفیل a، b و کل در سال زراعی دوم) به دست آمد (جدول ۱۰). کاربرد گوگرد معمولی نیز میزان کلروفیل a، b و کل را به‌ترتیب ۱۳، ۱۲ و ۱۳ درصد در سال زراعی اول و به‌ترتیب ۱۵، ۱۱ و ۲۱ درصد در سال زراعی دوم در مقایسه با شاهد افزایش داد (جدول ۱۰). نتایج اثرات متقابل مقادیر مختلف زغال زیستی و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی نشان داد که بیشترین میزان کلروفیل a، b و کل در هر دو سال زراعی در تیمار کاربرد همزمان ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی و محلول‌پاشی نانوکود گوگرد (به‌ترتیب با ۷/۶۸، ۲/۹۸ و ۱۰/۶۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر کلروفیل a، b و کل در سال زراعی اول و به‌ترتیب با ۷/۴۵، ۳/۰۹ و ۱۰/۵۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر کلروفیل a، b و کل در سال زراعی دوم) حاصل شد (جدول ۱۱). براساس نتایج جدول ۱۱، بیشترین تأثیر تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی بر میزان کلروفیل a، b و کل زمانی بروز یافت که از آن‌ها همزمان با زغال زیستی استفاده شد، به‌عنوان مثال میزان کلروفیل a در شرایط محلول‌پاشی نانوکود گوگرد همزمان با کاربرد ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی به‌ترتیب ۴۲، ۵۴ و ۷۲ درصد در سال زراعی اول و به‌ترتیب ۴۳، ۵۴ و ۷۳ درصد در سال زراعی دوم بیشتر از مقدار این صفت در شرایط محلول‌پاشی جداگانه نانوکودگوگرد بود (جدول ۱۱). شرایط اقلیمی متفاوت دو سال زراعی مورد مطالعه (جدول ۱) و متوسط بارندگی بیشتر و دمای پایین‌تر طی فصل رشد سال اول نسبت به سال دوم احتمالاً بر روی نتایج آزمایش و ویژگی‌های کمی و کیفی گیاهان دارویی مرزه اثر گذاشته است. میزان بارندگی بیشتر در سال اول ممکن است به تأمین آب مورد نیاز گیاه کمک کرده و رشد بهتر و باردهی بالاتری را به دنبال داشته است. دمای پایین‌تر ممکن است باعث کاهش تنش گرما و تأمین شرایط بهینه برای رشد و توسعه گیاه شده است. تغییرات دما و رطوبت می‌تواند اثربخشی زغال زیستی و گوگرد را در خاک تحت تأثیر قرار دهند. در سال اول، ممکن است این ترکیبات به‌طور مؤثرتری به جذب و نگهداری آب و مواد مغذی کمک کرده باشند و به‌طور کلی شرایط اقلیمی (به‌ویژه بارندگی و دما) می‌تواند بر رشد و عملکرد مرزه تأثیر مستقیم و غیرمستقیم داشته باشد.

کاربرد همزمان گوگرد (هشت تن در هکتار) و کود گاوی (۲۰ تن در هکتار) به دست آمد (Saeidinezhad et al., 2019). محلول پاشی نانوگوگرد در مزرعه آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.)، منجر به تولید بیشترین ماده خشک، عملکرد دانه و میزان روغن شد و میزان گوگرد خاک را نیز به میزان قابل توجهی افزایش داد (Subramanian et al., 2022). در پژوهشی دیگر، بیشترین میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل کنگد در شرایط استفاده از ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار گوگرد حاصل شد (Gilani et al., 2020).

نتیجه گیری

به طور کلی، نتایج این پژوهش حاکی از نقش آفرینی مثبت کاربرد جداگانه و همزمان زغال زیستی و تیمارهای تغذیه ای گوگردی در هر دو سال زراعی بر اکثر صفات کمی و کیفی مورد مطالعه بود، به عنوان مثال در هر دو سال زراعی، در کلیه مقادیر مصرفی زغال زیستی، میزان صفات ریخت شناسی همچون ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، سطح برگ، قطر ساقه، وزن خشک اندام هوایی و عملکرد ماده خشک و همچنین میزان صفات کیفی و فیزیولوژیکی نظیر میزان کربوهیدرات و میزان کلروفیل a، b و کل بیشتر از شاهد بود که البته

از این نظر کاربرد ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی در مقایسه با سایر مقادیر مصرفی این کود، اثرات مثبت بیشتری بر صفات یادشده بر جای گذاشت و کاربرد گوگرد معمولی و محلول پاشی نانوکود گوگرد نیز کلیه خصوصیات ریخت شناسی و فیزیولوژیکی مورد مطالعه و عملکرد مرزه را به میزان قابل توجهی نسبت به شاهد افزایش دادند. اگر چه کاربرد جداگانه گوگرد معمولی یا نانوکود گوگرد در هر دو سال زراعی دارای اثر مثبت بر اکثر خصوصیات ریخت شناسی، فیزیولوژیکی و عملکرد مرزه بود، ولی نقش مؤثر تیمارهای تغذیه ای گوگردی در بهبود ویژگی های گیاه زمانی بیشتر بروز یافت که از این نهادهای گوگردی همزمان با بیوپچار و به ویژه مقادیر بالاتر زغال زیستی (سطوح ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار) استفاده شد. به طور کلی، کاربرد جداگانه و همزمان مقادیر بهینه نهادهای بوم سازگار زغال زیستی و تیمارهای تغذیه ای گوگردی به ویژه نانوکود گوگرد ضمن بهبود خصوصیات ریخت شناسی گیاه منجر به بهبود ویژگی های فیزیولوژیکی و عملکرد آن شد و براساس نتایج این پژوهش، کاربرد همزمان ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی و محلول پاشی نانوکود گوگرد جهت دستیابی به حداکثر عملکرد کمی و کیفی مرزه توصیه می گردد.

References

1. Arnon, A.N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23(4), 112-121.
2. Al Baquy, M.A., Nkon, J.N., Alam, M., & Masud, M.M. (2023). Biochar Application to Soils to Improve the Management of Irrigation Water. *Sustainable Agriculture Reviews Book Series*, 61, 273-291. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26983-7_12
3. Almousawi, Z., & Jameel, D.A. (2022). The effect of foliar fertilization with normal and nano sulfur and the interaction between them in some vegetative characteristics, plant pigments content and dry weight of the shoot system of two varieties of leek plans *Allium ampeloprasum* L. *Iranian Journal of Ichthyology*, 1, 397-405.
4. Al-Obeidi, M.M.H., & Al-Obeidi, H.S.H. (2023). Effect of organic fertilizer spraying from various sources and agricultural sulfur in the growth and harvest of garlic. Fifth International Conference for Agricultural and Environments Sciences. 1158, 042067. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1158/4/042067>
5. Asadi, M., Hadian, J., Ebrahimi, S., & Karimzadeh, G. (2019). Effect of different levels of sulfur on growth, quality characteristics and yield of *Arnica chamissonis* Less. ssp. *foliosa*. *Journal of Horticultural Science*, 33(2), 219-232. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.71858>
6. Beiranvandi, M., Akbari, N., Ahmadi, A., Mumivand, H., & Nazarian, F. (2020). Interaction of biochar and superabsorbent on the composition of *Satureja rechingeri* Jamzad essential oil under drought stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Research*, 36(5), 780-793. (in Persian). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2020.342067.2732>
7. Borpatragohain, P., Rose, T.J., Liu, L., Barkla, B.J., Raymond, C.A., & King, G.J. (2019). Remobilization and fate of Sulphur in mustard. *Annals of Botany*, 124(3), 471-480. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz101>
8. Charkhab, A., Mojaddam, M., Lack, Sh., Sakinejad, T., & Dadnia, M.R. (2021). The effect of biochar and humic acid rates on some phophysiological characteristics and grain yield SC704 corn hybrid under water deficit stress. *Journal of Crop Ecophysiology*, 15(2), 171-192. (in Persian). <https://doi.org/10.30495/jcep.2021.683381>
9. Dawar, Kh., Khan, A.A., Jahangir, M.M.R., Mian, I.A., Khan, B., Ahmad, B., Fahad, Sh., Moustafa, M., Al-Shehri, M., Mubashir, M., Datta, R., & Danish, S. (2023). Effect of nitrogen in combination with different levels of sulfur on wheat growth and yield. *ACS Omega*, 8, 279-288. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04054>
10. Emami, T. (2022). Effect of biochar and salicylic acid on physiological traits and yield of echinacea (*Echinacea purpurea* L.) under non-stress and drought stress conditions. *Journal of Crop Research in Arid Regions*, 4(1), 229-243. (in Persian). <https://doi.org/10.22034/CSRAR.2022.320762.1172>

11. Essa, E.M., Abd El-Rheem, Kh.M., Yassen, A.A., & Elsayy, A.M. (2019). Effect of vermicompost and sulfur on growth, yield and nutritional status of tomato plants grown on calcareous soil. *World Wide Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 5(2), 46-50.
12. Feizi, Kh., Amirinejad, A., & Ghobadi, M. (2021). The effects of biochar and salicylic acid on reducing pb-induced stress in basil crop (*Ocimum basilicum* L.). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(2), 539-547. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.313282.668795>
13. Gaudutis, A., Jotautiene, E., Mieldazys, R., Bivainis, V., & Jasinskas, A. (2023). Sustainable use of biochar, poultry and cattle manure for the production of organic granular fertilizers. *Agronomy*, 13, 1426. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051426>
14. Ghaderi, J., Davoodi, M.H., & Khavazi, K. (2021). Effect of elemental sulfur and *Thiobacillus* bacteria on yield and some quality characteristics of canola. *Iranian Journal of Soil Research*, 35(3), 235-252. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijsr.2021.354082.595>
15. Ghassemi-Golezani, K., & Rahimzadeh, S. (2022). The biochar-based nanocomposites influence the quantity, quality and antioxidant activity of essential oil in dill seeds under salt stress. *Scientific Reports*, 12, 21903. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26578-0>
16. Gilani, A., Abbasdokht, H., & Gholami, A. (2020). Morphophysiological and growth responses of sesame plant to combined use of sulfur and *Thiobacillus*. *Journal of Horticultural Plant Nutrition*, 3(1), 131-144. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22070/hpn.2020.5469.1097>
17. Hameed, D.B., & Hasan, A.E. (2022). Effect of sulfur and *rhizobium leguminosarum* on available of some nutrients and the growth of broad bean plants. *Annals of Forest Research*, 65(1), 4827-4834.
18. Hassan, S.H., Chafik, Y., Sena-Velez, M., Lebrun, M., Scippa, G.S., Bourgerie, S., Trupiano, D., & Morabito, D. (2023). Importance of application rates of compost and biochar on soil metal (loid) immobilization and plant growth. *Plants*, 12, 2077. <https://doi.org/10.3390/plants12112077>
19. Heidarpour, O., Esmailpour, B., Soltani, A.A., & Khorramdel, S. (2019). Effect of vermicompost on essential oil composition of (*Satureja hortensis* L.) under water stress condition. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 22(2), 484-492. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2019.1618204>
20. Holatko, J., Hammerschmidt, T., Mustafa, A., Kintl, A., Skarpa, P., Ryant, P., Baltazar, T., Malicek, O., Latal, O., & Brtnicky, M. (2023). Time-dependent impact of co-matured manure with elemental sulfur and biochar on the soil agro-ecological properties and plant biomass. *Scientific Reports*, 13, 4327. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31348-7>
21. Javeed, H.M.R., Ali, M., Zamir, M.S.I., Qamar, R., Kanwal, S., Andleeb, H., Qammar, N., Jhangir, K., Elkelish, A., Mubeen, M., Sarwar, M.A., Khalid, S., Zain, M., Nawaz, F., Mubeen, Kh., Bukhari, M.A., Zakir, A., Farooq, M.A., & Masood, N. (2023). *Biochar and Arbuscular Mycorrhizae Fungi to Improve Soil Organic Matter and Fertility*. pp 331-354 in E. Lichfous. Sustainable Agriculture Reviews Book Series. Springer Press.
22. Karaminiya, F., Rangzan, N., Nadian, H., & Lotfi Jalal-Abadi, A. (2019). The effect of spent mushroom compost and its biochar on parsley yield under salinity stress. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6), 1453-1465. (in Persian).
23. KhasheiSiuki, A., Shahidi, A., Yaghoubzadeh, M., & Dastorani, M. (2019). Effect of biochar application and irrigation management on yield and yield components medicinal plant (*Trachyspermum ammi* L.). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(2), 319-328. (in Persian).
24. Kochert, G., & Zenk, M.H. (1978). *Carbohydrate Determination by the Phenolsulfuric Acid Method in Helebus Cambridge University*. Press Cambridge, 231, 44-52.
25. Lin, X., Xie, Z., Hu, T., Wang, H., Chen, Z., Zhou, R., & Jin, P. (2023). Biochar application increases biological nitrogen fixation in soybean with improved soil properties in a Ultisol. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, Published Online, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01286-4>
26. Mesbah, R., Ardakani, M.R., Moghaddam, A., & Rafiei, F. (2021). Effect of biofertilizer and biochar application on quantitative, qualitative yield and root characteristics of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) under dryland farming conditions. *Journal of Crop Ecophysiology*, 15(2), 229-250.
27. Mohammadpour, M., Ghasemnejad, A., Lebaschy, M.H., Abbaszadeh, B., & Azadbakht, M. (2013). Effects of sowing date and plant density on morphological characteristics and yield of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 29(3), 621-634. (in Persian). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2013.4046>
28. Murshed, M.D.F., Syfullah, Kh., Zonayet, M.D., Bashir, M.D.A., Jahan, A., & Sayeed, K.A. (2021). Effect of nitrogen and sulfur on the growth and yield of mungbean. *Asian Journal of Plant and Soil Sciences*, 6(1), 187-194.
29. Narayan, O.P., Kumar, P., Yadav, B., Dua, M., & Johri, A.K. (2022). Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signaling and Behavior*, 7, 2030082. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2030082>

30. Ng, Ch.W.W., Touyon, L., & Bordoloi, S. (2023). Influence of biochar on improving hydrological and nutrient status of two decomposed soils for yield of medicinal plant-*Pinellia ternate*. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 71(2), 156-168. <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0008>
31. O'Laughlin, J., & McElligott, K. (2009). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, Johannes Lehmann, Stephen M. Joseph (Eds.), Earthscan, London UK (2009), 448 p. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2009.07.001>
32. Piryaee, M., & Behroozi, M. (2022). Deep eutectic solvent as a green solvent for fast analysis of the volatile components of *Satureja hortensis* L. *Physical Chemistry Research*, 10(3), 421-428. <https://doi.org/10.22036/PCR.2022.312969.1979>
33. Ragab, G.A., & Saad-Allah, K.M. (2020). Green synthesis of sulfur nanoparticles using *Ocimum basilicum* leaves and its prospective effect on manganese-stressed *Helianthus annuus* (L.) seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 191, 110242. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110242>
34. Saeidinezhad, M., Behdani, M.A., Sayyari, M.H., & Mahmoudi, S. (2019). The effect of sulfur and manure on quantitative and qualitative characteristics of sesame varieties (*Sesamum indicum* L.). *Journal of Agroecology*, 11(3), 845-857. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v11i3.71128>
35. Sajedi, A., & Sajedi, N.A. (2020). Effect of application biochar and priming and foliar application with water and salicylic acid on physiological traits of dry land safflower. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(1), 155-169. (in Persian). <https://doi.org/10.22077/escs.2019.1823.1426>
36. Shahrusvand, S., Eisvand, H.R., Firozabadi, F.N., & Feizian, M. (2019). Effect of sulphur and vermicompost application on agronomic traits of hubbit cultivar of soybean (*Glycine max* L.). *Journal of Crop Ecophysiology*, 51(3), 447-460. (in Persian).
37. Shankar, S., Jaiswal, L., & Rhim, J.W. (2020). New insight into sulfur nanoparticles: Synthesis and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(20), 2329-2356.
38. Subramanian, K.S., Rajeswari, R., Yuvaraj, M., Pradeep, D., Guna, M., & Yoganathan, G. (2022). Synthesis and characterization of nano-sulfur and its impact on growth, yield, and quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 21 January 2022.
39. Tang, E., Liao, W., & Thomas, S.C. (2023). Optimizing biochar particle size for plant growth and mitigation of soil salinization. *Agronomy*, 13, 1394. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051394>
40. Tekin, G.K., Akalp, E., Pirinc, V., & Toncer, O. (2022). *The effect of various fertilizer forms on the essential oil composition of the summer savory (Satureja hortensis L.)*. 7th International Mediterranean Science and Engineering Congress, Bildirini. 107, 246-251.
41. Turganbay, S., Aidarova, S.B., Turganbay, G., Tileuberdi, Y., & Chen, S.L. (2019). Synthesis and characterization of sulfur nanoparticles with WSP/surfactants mixtures. *International Journal of Biological Chemistry*, 12, 146-152. <https://doi.org/10.26577/ijbch-2019-1-i19>.
42. Yuan, H., Liu, Q., Guo, Zh., Fu, J., Sun, Y., Gu, Ch., Xing, B., & Dhankher, O.P. (2021). Sulfur nanoparticles improved plant growth and reduced mercury toxicity via mitigating the oxidative stress in *Brassica napus* L. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128589. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128589>
43. Zare ak Ziaberi, S.S., & Majidian, M. (2022). Effects of zinc, boron, and sulfur on quantitative and qualitative characteristic of *Allium sativum* L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 38(4), 592-607. (in Persian). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2022.358786.3174>