



Effect of Biochar and Biosulfur on grain yield and some ecophysiological traits of rapeseed (*Brassica napus* L.) under drought stress conditions in winter planting

Mohsen Karimi Movahedi¹ | Gholam Abbas Akbari^{2✉} | Gholam Ali Akbari² |
Fatemeh Benakashani³ | Mohammad Reza Ardakani⁴

1. Department of Agronomy and Plant Breeding Sciences, Aburaihan Campus, University of Tehran, Pakdasht, Iran. E-mail: karimi7086@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding Sciences, Aburaihan Campus, University of Tehran, Pakdasht, Iran. E-mail: ghakbari@ut.ac.ir
3. Department of Agronomy and Plant Breeding Sciences, Aburaihan Campus, University of Tehran, Pakdasht, Iran. E-mail: gakbari@ut.ac.ir
4. Department of Agronomy and Plant Breeding Sciences, Aburaihan Campus, University of Tehran, Pakdasht, Iran. E-mail: benakashani@ut.ac.ir
5. Department of Agronomy, Islamic Azad University, Karaj Branch, Karaj, Iran. E-mail: mreza.ardakani@kiau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 18 February 2022
Received in revised form
23 November 2022
Accepted 12 December 2022
Published online
20 September 2023

Keywords:

Biofertilizers
Rapeseed
Soil amendment
Sulfur
Thiobacillus

ABSTRACT

Objective: Environmental stress, especially drought stress, is one of the most important factors that reduce the growth and development of oil plants such as rapeseed in arid and semi-arid regions. The purpose of this research is to investigate the effect of biochar and biosulfur on seed yield and some ecophysiological traits of rapeseed under drought stress conditions in winter cultivation.

Methods: This research was carried out in form of a factorial split-plot with randomized complete block design having three replications in 2019 in Karaj. In this experiment, irrigation treatment witnessed three levels of 30%, 60%, and 100% of crop capacity as main plots, while biochar treatment saw three levels of no application and application of three and six tons per hectare and biosulfur treatment, two levels of application and non-application as plots. Subsidiaries were considered.

Results: It was found that drought stress had a significant effect on the seed and oil yield of rapeseed. Thus, the amount of these traits in drought stress showed a decrease of 50% and 52%, respectively, compared to the control. Also, the use of six tons per hectare of biochar had increased by 49% and 36% in terms of its number of pods per plant and the number of seeds per pod. Also, the interaction effect of biosulfur application and the use of six tons of biochar had the greatest effect on the traits of the number of pods per plant and harvest index.

Conclusion: The results showed that the use of biofertilizers can be used as a suitable method to increase the yield of rapeseed. Increasing oil percentage and grain yield will ultimately increase the field and economic yield (oil) of the rapeseed plant.

Cite this article: Karimi Movahedi, M., Akbari, Gh. A., Akbari, Gh. A., Benakashani, F., & Ardakani, M. R. (2023). Effect of Biochar and Biosulfur on grain yield and some ecophysiological traits of rapeseed (*Brassica napus* L.) under drought stress conditions in winter planting. *Journal of Crops Improvement*, 25 (3), 533-542.
DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2022.339343.2684>



تأثیر بیوچار و بیوسولفور بر عملکرد دانه و برخی صفات اکوفیزیولوژیک کلزا (*Brassica napus* L.) در شرایط تنش خشکی در کشت زمستانه

محسن کریمی موحدی^۱ | غلامعباس اکبری^۲ | غلامعلی اکبری^۳ | فاطمه بناکاشانی^۴ | محمدرضا اردکانی^۴

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران. رایانامه: karimi7086@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران. رایانامه: ghakbari@ut.ac.ir

۳. گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران. رایانامه: gakbari@ut.ac.ir

۴. گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران. رایانامه: benakashani@ut.ac.ir

۵. گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران. رایانامه: mreza.ardakani@kia.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

هدف: تنش‌های محیطی به‌ویژه تنش خشکی از مهمترین عوامل کاهش‌دهنده رشد و نمو گیاهان روغنی مانند کلزا در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر بیوچار و بیوسولفور بر عملکرد دانه و برخی صفات اکوفیزیولوژیک کلزا در شرایط تنش خشکی در کشت زمستانه می‌باشد.

روش پژوهش: این پژوهش به‌صورت کرت خردشده- فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۸ در کرج اجرا گردید. در این آزمایش تیمار آبیاری در سه سطح ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به‌عنوان کرت‌های اصلی و تیمار بیوچار در سه سطح عدم کاربرد و کاربرد سه و شش تن در هکتار و تیمار بیوسولفور در دو سطح کاربرد و عدم کاربرد به‌عنوان کرت‌های فرعی در نظر گرفته شدند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹

یافته‌ها: مشخص شد که تنش خشکی تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه و روغن گیاه کلزا دارد، به‌طوری‌که میزان این صفات در تنش شدید نسبت به شاهد به‌ترتیب ۵۰ و ۵۲ درصد کاهش را نشان می‌دهد. همچنین استفاده از شش تن در هکتار بیوچار موجب افزایش ۴۹ و ۳۶ درصدی در تعداد خورجین در بوته و تعداد دانه در خورجین شده است. همچنین اثر متقابل کاربرد بیوسولفور و استفاده از شش تن بیوچار بیش‌ترین تأثیر را بر صفات تعداد خورجین در بوته و شاخص برداشت داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج در مجموع نشان داد که کاربرد کودهای زیستی می‌تواند به‌عنوان یک روش مناسب برای افزایش عملکرد گیاه کلزا به‌کار برده شود، به‌طوری‌که افزایش درصد روغن و عملکرد دانه در نهایت موجب افزایش عملکرد مزرعه‌ای و اقتصادی (روغن) گیاه کلزا می‌گردد.

کلیدواژه‌ها:

اصلاح‌کننده‌های خاک

تیوباسیلوس

عملکرد کلزا

کودهای زیستی

گوگرد

استناد: کریمی موحدی، محسن؛ اکبری، غلامعباس؛ اکبری، غلامعلی؛ بناکاشانی، فاطمه؛ و اردکانی، محمدرضا (۱۴۰۲). تأثیر بیوچار و بیوسولفور بر عملکرد دانه و برخی صفات اکوفیزیولوژیک کلزا (*Brassica napus* L.) در شرایط تنش خشکی در کشت زمستانه. *بزرگای کشاورزی*، ۲۵ (۳)، ۵۳۳-۵۴۲.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2022.339343.2684>



۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی و سومین گیاه روغنی در جهان کلزا می‌باشد (Tan *et al.*, 2017). هم‌چنین کلزا یک منبع مهم پروتئین گیاهی در جهان محسوب می‌شود (Xia *et al.*, 2016). تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصول کشاورزی در جهان می‌باشد که بر جنبه‌های مختلف رشد گیاه تأثیر گذاشته و موجب کاهش و به تأخیر انداختن جوانه‌زنی، کاهش رشد اندام‌های هوایی و کاهش تولید ماده خشک می‌گردد (Munns, 2002).

بیوجار، محصول جامد حاصل پیرولیز زیست‌توده می‌باشد (پیرولیز^۱ فرایندی ترموشیمیایی است که طی آن مواد آلی در اثر تجزیه می‌شوند) که به‌تازگی به‌خاطر خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردش برای حفاظت از محیط زیست و کاربردهای کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است (Chan & Xu, 2009). در واقع بیوجار نوعی زغال تهیه‌شده از زیست‌توده‌های گیاهی و ضایعات کشاورزی است که سوختن آن‌ها در حضور مقادیر کم اکسیژن و یا عدم حضور آن انجام می‌شود (Abd El-Mageed, 2021). بیوجار ضمن بهبود خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک‌ها دارای دامنه‌ای از شکل‌های عناصر غذایی بوده که با سرعت‌های متفاوتی آزاد شده و تأثیرات متفاوتی را بر حاصلخیزی خاک تخلخل و توزیع اندازه منافذ خاک، فضایی را برای حفظ مواد مغذی ایجاد می‌کند (Mukherjee, 2013).

تنش خشکی در ایران از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد فیزیولوژیک و تغذیه‌ای گیاهان بوده و منجر به کاهش زیست‌توده و عملکرد می‌گردد (Ihuoma & Madramootoo, 2017). از طرفی اضافه کردن بیوجار به خاک با توجه به نقشی که کربن در فرایندهای شیمیایی، زیستی و فیزیکی خاک ایفا می‌کند می‌تواند مهم باشد (Berek *et al.*, 2011). در واقع بیوجار با توجه به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ویژه مانند تخلخل و سطح ویژه زیاد، مقاومت زیاد در برابر تجزیه زیستی، غنی بودن از عناصر و مواد قابل جذب، ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد و داشتن ظرفیت نگهداری آب زیاد نقش مهمی در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک دارد (Lehmann & Joseph, 2009).

از جمله عناصر مورد نیاز گیاهان گوگرد می‌باشد که به دلیل افزایش کاربرد کودهای بدون گوگرد و نیاز بالای گیاهان، کمبود این عنصر در خاک‌های زراعی جهان رو به افزایش است (Hawkesford & Dekok, 2007). یکی از این عناصر غذایی گوگرد می‌باشد که عنصری حیاتی برای تغذیه گیاهان روغنی به‌شمار می‌رود. نقش گوگرد در گیاهان در ساخت پروتئین، روغن و بهبود کیفیت محصولات می‌باشد (Scherer, 2001). هم‌چنین باکتری‌های جنس تیوباسیلوس با اکسید کردن گوگرد ضمن تأمین سولفات مورد نیاز گیاه با کاهش pH خاک به‌طور غیرمستقیم در اطراف ریشه‌ها، باعث افزایش جذب عناصری چون فسفر، روی، آهن و دیگر عناصر غذایی کم مصرف شده و موجب افزایش کمی و کیفی محصول می‌شوند (Ouyang *et al.*, 2014). هم‌چنین کاربرد گوگرد به‌همراه تیوباسیلوس به‌وسیله بسیاری از پژوهش‌گران بررسی شده و بیش‌تر آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که باکتری‌های جنس تیوباسیلوس با اکسید کردن گوگرد و کاهش pH خاک، افزایش حلالیت عناصر غذایی و رشد گیاه را به‌همراه داشتند (Abdou *et al.*, 2010; Fallah *et al.*, 2011).

لذا با توجه به قرار گرفتن ایران در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک و هم‌چنین کاهش شدید انواع بارندگی‌ها و نیز افت سطح آب‌های زیرزمینی، هرگونه کاهش میزان مصرف آب در بخش کشاورزی می‌تواند بسیار مهم و دارای اهمیت باشد. بنابراین هدف از اجرای این پژوهش بررسی تأثیر بیوجار، گوگرد و تیوباسیلوس بر عملکرد دانه، میزان روغن و برخی صفات اکوفیزیولوژیک کلزا در شرایط تنش خشکی می‌باشد.

۱. Pyrolysis

۲. پیشینه پژوهش

مطالعات زیادی در زمینه تنش خشکی در کلزا صورت گرفته که شماری از ویژگی‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک مؤثر در تحمل به تنش خشکی گزارش شده است (Qifuma et al., 2006). از جمله اثرات منفی تنش خشکی، اختلال در تغذیه معدنی گیاهان است که به طریق زیر ممکن است باعث این عارضه شود؛ تغییر در جذب یون‌ها توسط ریشه، کاهش انتقال یون‌ها از خاک به ریشه، کاهش توانایی انتقال مواد معدنی در داخل گیاه، کمبود یا تجمع یون‌هایی که ممکن است در متابولیسم اختلال ایجاد کرده یا پاسخ‌های سازش را القا نمایند (Chaudhry et al., 1999). در پژوهش دیگری، نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری بین صفات وزن هزاردانه، تعداد خورجین در بوته، تعداد شاخه فرعی، ارتفاع گیاه و میزان روغن دانه با عملکرد دانه گزارش شده است (Zhang et al., 2011).

تاکنون فواید مصرف بیوچار بر روی گیاهان زراعی زیادی انجام شده است. پژوهش‌گران با کاربرد بیوچار حاصل از کودهای دامی، کاهش چشم‌گیری در آبشویی عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر، منیزیم و سیلیس را در خاک‌های زراعی مورد آزمایش مشاهده کردند (Laird et al., 2010). سایر پژوهش‌گران نیز در آزمایش‌های خود به تأثیر بیش‌تر تیمارهای حاوی ترکیب کود شیمیایی و بیوچار نسبت به تیمارهای حاوی کود شیمیایی بدون کاربرد بیوچار اشاره کرده و دلیل این امر را جلوگیری از آبشویی عناصر غذایی در تیمارهای حاوی بیوچار عنوان کردند (Chaudhry et al., 2016). در بیش‌تر محصولات کشاورزی نسبت نیتروژن به گوگرد در محدوده ۱۵-۱۰ و در دانه‌های روغنی این نسبت برای دستیابی به افزایش عملکرد و بهبود کیفیت، باید کم‌تر از ۱۰ باشد (McGrath & Zhao, 1996). در پژوهشی دیگر، مشاهده شده است که مصرف گوگرد به‌همراه تیوباسیلوس سبب افزایش عملکرد کلزا و نیز حلالیت فسفر، آهن و روی در خاک‌های آهکی شده است (Sakari et al., 2012).

۳. روش‌شناسی پژوهش

این آزمایش در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی دانشگاه تهران در منطقه کرج، با موقعیت طول جغرافیایی ۷۵ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۵ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۰۲۵ متر از سطح دریا در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ اجرا گردید. براساس اطلاعات هواشناسی، منطقه کرج دارای اقلیم معتدل سرد و نیمه‌خشک با متوسط بارندگی سالیانه ۲۴۴ میلی‌متر می‌باشد. بافت خاک مزرعه آزمایشی، لومی رسی بوده و مشخصات خاک محل آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

بافت خاک (کلاس)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	رس (درصد)	ماده آلی نیتروژن کل (درصد)	فسفر قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	شوری (دسی‌زیمنس بر متر)	اسیدیته
لومی - رسی	۴۰	۲۸	۳۲	۰/۶۴	۰/۰۸	۹/۳۷	۱۴۵	۲/۴۹
								۸/۴

این آزمایش به‌صورت کرت خردشده- فاکتوریل با ۱۸ تیمار و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. در این آزمایش تیمار آبیاری در سه سطح (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی تخلیه رطوبت از عمق توسعه ریشه شاهد)، ۶۰ درصد ظرفیت زراعی تخلیه رطوبت از عمق توسعه ریشه و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی تخلیه رطوبت از عمق توسعه ریشه، تیمار کود بیوچار در سه سطح شاهد (عدم کاربرد) و کاربرد سه و شش تن در هکتار و در نهایت تیمار گوگرد+ باکتری تیوباسیلوس در دو سطح کاربرد و عدم کاربرد اعمال گردیدند. تیمارهای آبیاری به کرت‌های اصلی و

تیمارهای تغذیه‌ای به کرت‌های فرعی کوچک اختصاص یافتند. در مجموع ۵۴ کرت آزمایشی وجود داشت و هر کرت آزمایشی شامل شش خط به طول پنج متر، فاصله خطوط ۳۰ سانتی‌متر و دو خط کناری نیز به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته شدند.

قبل از انجام عملیات آماده‌سازی زمین و کاشت، نمونه‌برداری از خاک مزرعه در عمق ۵۰ سانتی‌متری صورت گرفت و درصد ماده آلی، نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم و همچنین EC و pH و نوع بافت خاک تعیین شدند (جدول ۱). عملیات کوددهی براساس نتایج آزمایش خاک و توصیه کودی کلزا انجام شد. بر همین اساس میزان ۱۱ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و ۷۱ کیلوگرم P_2O_5 و مقدار ۶۱ کیلوگرم K_2O در هکتار از دو منبع کودی اوره و فسفات آمونیوم قبل از کاشت به کار برده شد.

بعد از آماده‌سازی زمین، بذر کلزای رقم هایولا ۳۰۸ از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تهیه و در اواخر بهمن‌ماه ۱۳۹۸ با دست کاشته شدند. زمان اعمال تیمارهای تنش از شروع ساقه‌دهی و برنامه زمان‌بندی آبیاری نیز براساس درصد تخلیه آب خاک در منطقه ریشه بود. آبیاری به‌صورت سبک هر سه روز تا زمان استقرار کامل بوته‌ها تا تاریخ ۱۵ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۸ و بعد از آن براساس دوره‌های آبیاری و جدول زمانی تعریف‌شده صورت گرفت. بیوجار موردنیاز نیز از شرکت صنعت کربن فعال بشل واقع در شمال کشور تأمین شد که مشخصات بیوجار استفاده‌شده در جدول (۲) آورده شده است. همچنین گوگرد مورد آزمایش به میزان ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار و میزان باکتری موردنیاز شش کیلوگرم در هکتار استفاده گردید. طریقه اعمال تیمار بیوجار و گوگرد و تیوباسیلوس در عمق ۱۰ الی ۱۵ سانتی‌متری، به‌صورت نواری در کنار نوار تیپ بود.

جدول ۲. مشخصات بیوجار مورد استفاده در آزمایش

عدد پدی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	مساحت سطح (مترمربع بر گرم)	عدد متین بلو (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	میزان رطوبت (درصد)	اسیدیته	خاکستر (درصد)	دانه بندی (میلی‌متر)
۱۱۰۰ الی ۹۵۰	۱۱۰۰ الی ۹۵۰	۱۰۰ الی ۴۰۰	۶	۵/۸	۴ الی ۵	۱ الی ۳

تنک‌کردن گیاهچه‌های اضافی در مرحله چهار تا هشت برگی و همچنین مبارزه با علف‌های هرز به‌صورت وجین دستی در سه مرحله دو تا سه برگی، چهار تا شش برگی و شروع رشد ساقه صورت گرفت. مبارزه با آفات نیز با ترکیب سموم دیازینون و کنفیدور در دو مرحله شروع ساقه‌دهی و طولیل‌شدن ساقه صورت پذیرفت. زمان برداشت، قهوه‌ای‌شدن ۸۵ الی ۹۰ درصد دانه‌ها در خورجین‌های اصلی بود (رطوبت دانه‌ها در حدود ۱۲ درصد). با نزدیک‌شدن بوته‌های کلزا به مرحله رسیدگی فیزیولوژیک (زردشدن ۷۰ الی ۸۰ درصد خورجین‌ها)، ۶۱ بوته از هر کرت به‌طور تصادفی انتخاب و صفاتی مانند عملکرد دانه، ارتفاع بوته، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزاردانه، شاخص برداشت و درصد پروتئین دانه، درصد روغن، عملکرد روغن، شاخص سطح برگ، محتوای نسبی آب برگ و قند کل محلول مورد ارزیابی قرار گرفت.

۴. یافته‌های پژوهشی

براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثر تنش خشکی، بیوجار و گوگرد و تیوباسیلوس بر صفات عملکرد دانه، ارتفاع بوته، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزاردانه، شاخص برداشت و درصد پروتئین دانه تأثیر معنی داشتند (جدول ۳). براساس جدول مقایسه میانگین داده‌ها با افزایش سطوح تنش خشکی، عملکرد دانه از ۳۱۷۳/۲ کیلوگرم در تیمار شاهد به ۱۶۵۴ کیلوگرم در هکتار در تنش شدید رسیده است. همچنین بالاترین عملکرد دانه مربوط به استفاده

شش تن در هکتار بیوچار می‌باشد که شاهد افزایش درصدی نسبت به تیمار سه تن و شاهد می‌باشیم و در خصوص کاربرد ترکیب گوگرد و تیوباسیلوس نیز افزایش عملکرد درصدی مشاهده می‌گردد. کاربرد بیوسولفور و شش تن بیوچار در هکتار اثر تنش بر ارتفاع بوته را تعدیل نموده به طوری که تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای تنش دیده نشد. کم‌ترین تعداد خورجین در بوته و تعداد دانه در خورجین به ترتیب با مقدار ۹۱/۸۸ و ۱۲ عدد در تیمار تنش شدید مشاهده شد. بیش‌ترین وزن هزاردانه و درصد پروتئین دانه در تیمار مصرف شش تن بیوچار در هکتار و کاربرد بیوسولفور دیده شد از طرفی بالاترین میزان شاخص برداشت با ۳۴/۰۶ درصد نیز در تیمار مصرف شش تن بیوچار در هکتار مشاهده گردید (جدول ۴). همچنین اثر متقابل کاربرد بیوسولفور و بیوچار تأثیر معنی‌دار بر صفت تعداد خورجین در بوته کلزا داشت، به طوری که بالاترین مقدار این صفت در کاربرد بیوسولفور و استفاده از شش تن بیوچار در هکتار دیده شد (شکل ۱).

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مورفولوژیک و کیفی کلزا

منبع تغییرات	درجه آزادی	شاخص برداشت	ارتفاع بوته	عملکرد دانه	تعداد خورجین در بوته	تعداد دانه در خورجین	وزن هزاردانه	درصد پروتئین دانه
تکرار	۲	۶۵/۳۱*	۶۲/۴۶ _{ns}	۷۱۳۰۳۰/۳*	۹۵۳/۶**	۰/۰۷ _{ns}	۱/۱۹**	۶/۳۰ _{ns}
تنش خشکی	۲	۷۹/۰۵**	۳۱۸/۵۷*	۱۰۴۵۸۱۶۰/۶**	۲۱۸۴۷/۸**	۱۶/۹۶*	۰/۴۹ _{ns}	۸/۲۵ _{ns}
خطای اصلی	۴	۹۷/۲۵	۱۳۷/۱۰	۷۱۴۸۹۹/۹	۳۵۸/۷	۵/۰۷	۰/۳۱	۳/۵۳
بیوچار	۲	۱۱۹۳/۶۹**	۱۰۱۲/۰۱**	۱۲۹۹۰۱۰۲/۲**	۱۱۵۴۱/۲**	۸۲/۳۵**	۴/۶۳**	۱۹/۵۶*
گوگرد و تیوباسیلوس	۱	۲۵۰/۰۴**	۲۰/۱۶ _{ns}	۱۴۰۶۵۰۴/۷**	۶۰۶/۸ _{ns}	۴۶/۲۹**	۱/۵۴**	۲/۰۴ _{ns}
تنش خشکی × بیوچار	۴	۳۰/۰۴۶ _{ns}	۱۳/۵۷ _{ns}	۲۲۳۱۵۸/۴ _{ns}	۲۹۲/۴ _{ns}	۲/۹۳ _{ns}	۰/۲۶ _{ns}	۲/۲۱ _{ns}
تنش خشکی × گوگرد و تیوباسیلوس	۲	۱۴/۸۸ _{ns}	۷۹/۰۵ _{ns}	۳۵۴۸۳/۷ _{ns}	۱۳۴/۸ _{ns}	۳/۶۲ _{ns}	۰/۰۹ _{ns}	۰/۲۱ _{ns}
بیوچار × گوگرد و تیوباسیلوس	۲	۶/۴۰*	۱۱۵/۳۸ _{ns}	۶۱۲۳۵/۴ _{ns}	۸۶۷/۹**	۰/۱۲ _{ns}	۰/۳۴ _{ns}	۳/۶۲ _{ns}
تنش خشکی × بیوچار × گوگرد و تیوباسیلوس	۴	۳۵/۸۲ _{ns}	۱۹/۲۷ _{ns}	۲۰۵۵۲/۹ _{ns}	۳۵۸/۲ _{ns}	۱/۲۱ _{ns}	۰/۱۹ _{ns}	۳/۵۴ _{ns}
خطای فرعی	۳۰	۱۵/۷۸	۱۰/۱۸۴	۱۶۲۶۳۳	۱۶۳/۳	۳/۶۷	۰/۱۸	۳/۷۳
ضریب تغییرات (درصد)	-	۱۵/۸۸	۱۰/۶۶	۱۶/۴۵	۹/۸۶	۱۴/۶۶	۱۷/۴۴	۹/۸۸

* و ** به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد و NS به معنای غیرمعنی‌دار می‌باشد.

جدول ۴. اثرات ساده تنش خشکی و کاربرد بیوچار و بیوسولفور بر برخی صفات کلزا

تیمارها	سطوح	شاخص برداشت (درصد)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	تعداد خورجین در بوته	تعداد دانه در خورجین	وزن هزاردانه (گرم)	پروتئین دانه (درصد)
شاهد	۳۱/۲۳ _a	۹۹/۲۲۲ _a	۳۱۷۳/۲ _a	۱۶۰/۶۶ _a	۱۳/۸۸ _a	۲/۶۷ _a	۲۰/۱۰ _a	
تنش خشکی	۲۵/۳۷ _{ab}	۹۳/۷۷ _a	۲۵۲۳/۹ _a	۱۳۵/۹۴ _b	۱۳/۳۲ _a	۲/۴۵ _a	۱۹/۷۲ _a	
شدید	۱۸/۴۳ _b	۹۰/۹۴۴ _a	۱۶۵۴ _b	۹۱/۸۸ _c	۱۲ _b	۲/۳۵ _a	۱۸/۷۸ _a	
شاهد	۱۸/۲۸ _c	۸۸/۸۳ _b	۱۷۰۳/۷ _c	۱۰۴/۷۲ _c	۱۰/۹۴ _c	۲/۱۵ _b	۱۸/۸۱ _b	
بیوچار	۲۲/۶۹ _b	۹۲ _b	۲۲۷۲/۴ _b	۱۲۸/۴۴ _b	۱۳/۰۵ _b	۲/۲۵ _b	۱۹/۰۷ _b	
تن ۳	۳۴/۰۶ _a	۱۰۳/۱۱ _a	۳۳۷۴/۸ _a	۱۵۵/۳۳ _a	۱۵/۲۲ _a	۳/۰۸ _a	۲۰/۷۳ _a	
تن ۶	۲۲/۸۶ _b	۹۴/۰۳ _a	۲۲۸۹ _b	۱۳۲/۸۵ _a	۱۲/۱۴ _b	۲/۲۳ _b	۱۹/۳۴ _a	
بیوسولفور	۲۷/۱۶ _a	۹۵/۲۵ _a	۲۶۱۱/۸ _a	۱۲۶/۱۴ _a	۱۴ _a	۲/۶۶ _a	۱۹/۷۳ _a	

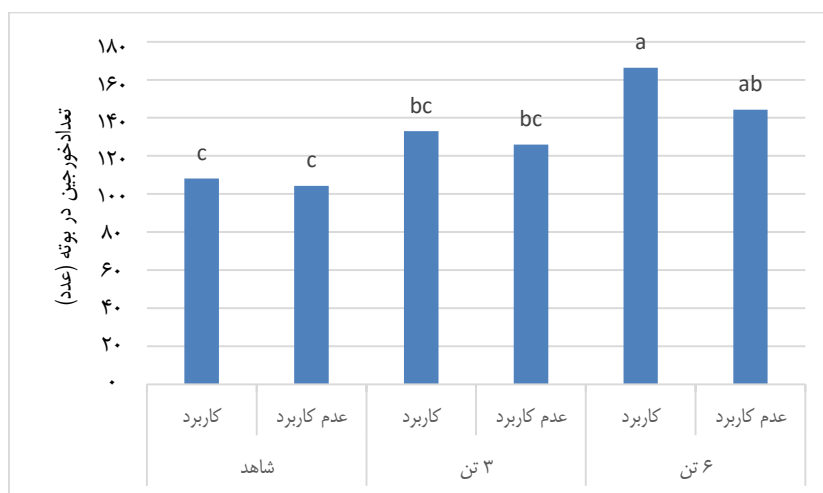
در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

براساس جدول تجزیه واریانس داده‌ها اثر تنش خشکی، بیوچار و گوگرد و تیوباسیلوس بر صفات درصد روغن، عملکرد روغن، شاخص سطح برگ، محتوای نسبی آب برگ و قند کل محلول اثر معنی‌داری داشتند. از طرفی تیمار استفاده از کود بیوچار بر تمامی صفات در سطح یک درصد معنی‌دار بوده که این موضوع می‌تواند اهمیت استفاده از کودهای زیستی در تعدیل شرایط تنش را بیان کند (جدول ۵).

جدول ۵. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برخی صفات کیفی و فیزیولوژیک کلزا

منبع تغییرات	درجه آزادی	درصد روغن دانه	عملکرد روغن در هکتار	شاخص سطح برگ	محتوای نسبی آب برگ	قند کل محلول
تکرار	۲	*۱۱/۵	ns ۶۹۷۶۵/۷	**۰/۲۲	**۳۹۷/۷	ns ۰/۰۲
تنش خشکی	۲	ns ۵/۳۰	**۱۷۴۷۹۲۳/۱	**۰/۳۱	*۲۶۸/۵	ns ۰/۰۱
خطای اصلی	۴	۱۰/۹۹	۵۷۴۰۶/۹	۰/۱۸	۷۲/۳	۰/۱۲
بیوچار	۲	**۴۴/۰۹	**۲۵۸۵۵۰۳/۶	**۹/۱۸	**۱۳۳۰/۸	**۰/۹۲
گوگرد و تیوباسیلوس	۱	**۴۱/۵۳	**۴۱۶۸۷۴/۱	**۳/۳۸	ns ۶۹/۸	**۰/۲۲
تنش خشکی × بیوچار	۴	**۱۳/۱۷	ns ۳۴۵۳۸/۱	*۰/۰۸	ns ۲۷/۹	ns ۰/۰۲
تنش خشکی × گوگرد و تیوباسیلوس	۲	ns ۳/۷۷	ns ۲۲۹۲۱/۹	ns ۰/۰۷	ns ۴/۸۸	ns ۰/۰۷
بیوچار × گوگرد و تیوباسیلوس	۲	ns ۱/۴۳	ns ۲۹۱۰۸/۸	ns ۰/۰۵	ns ۵۱/۳۰	ns ۰/۰۷
تنش خشکی × بیوچار × گوگرد و تیوباسیلوس	۴	ns ۰/۲۳	ns ۲۷۰۴۶/۷	ns ۰/۱۰	ns ۳۲/۱	ns ۰/۰۸
خطای فرعی	۳۰	۲/۶۷	۲۷۴۹۴/۳	۰/۰۲	۵۲/۴	۰/۰۳
ضریب تغییرات (درصد)		۴/۲۰	۱۷/۲۳	۷/۲۸	۱۸/۲۳	۲/۱۸

* و ** به ترتیب نشان دهنده معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد و ns به معنای غیر معنی دار می باشد.



شکل ۱. اثر متقابل کاربرد بیوچار و بیوسولفور بر تعداد خورجین در بوته

بر اساس جدول مقایسه میانگین داده‌ها با افزایش سطوح تنش خشکی، عملکرد روغن، شاخص سطح برگ و محتوای نسبی آب برگ تحت تأثیر قرار گرفتند، به طوری که عملکرد روغن در هکتار از ۱۲۶۰/۶۱ به ۶۳۸/۸۳ کیلوگرم در هکتار رسید و این موضوع به این مفهوم است که عملکرد روغن به عنوان شاخص اقتصادی گیاه کلزا تحت تأثیر تنش شدید تقریباً به نصف کاهش یافته است (جدول ۶). بالاترین درصد روغن در تیمارهای کاربرد بیوسولفور و استفاده از شش تن بیوچار به ترتیب با ۳۹/۷۴ و ۴۰/۶۵ درصد مشاهده شد. از طرفی صفت قند محلول کل تفاوت معنی داری در بین تیمارهای تنش نشان نداد که این موضوع نشان از نقش مهم قندها در تنظیم اسمزی سلول‌ها در شرایط تنش خشکی می باشد (جدول ۶). اثر متقابل تنش و بیوچار بر صفت درصد روغن کلزا نشان داد که بالاترین مقدار این صفت در تیمارهای استفاده هم‌زمان از شش تن بیوچار در تنش خفیف و شاهد به دست آمده و این‌طور می توان بیان کرد که اثر کود زیستی بیوچار توانسته است اثر تنش خفیف را تعدیل نموده و از کاهش عملکرد درصد روغن در شرایط تنش جلوگیری نماید.

جدول ۶. اثرات ساده تنش خشکی و کاربرد بیوچار و بیوسلفور بر برخی صفات کلزا

تیماها	سطوح	روغن دانه (درصد)	عملکرد روغن (گرم در هکتار)	شاخص سطح برگ	محتوای نسبی آب برگ (درصد)	قند کل محلول (مترمربع بر گرم)
تنش خشکی	شاهد	۳۹/۸۴ _a	۱۲۶۰/۶۱ _a	۲/۴۵ _a	۴۳/۳۸ _a	۰/۸۶ _a
	خفیف	۳۸/۴۴ _a	۹۸۶/۵۹ _b	۲/۴۱ _a	۳۹/۸۹ _{ab}	۰/۸۶ _a
	شدید	۳۸/۶۹ _a	۶۳۸/۸۳ _c	۲/۲۱ _b	۳۵/۶۷ _b	۰/۸۱ _a
بیوچار	شاهد	۳۷/۷۴ _b	۶۴۰/۴۶ _c	۱/۶۲ _c	۳۱/۵۰ _c	۰/۶۶ _b
	۳ تن	۳۸/۲۱ _b	۸۶۵/۷۰ _b	۲/۴۱ _b	۳۸/۸۲ _b	۰/۷۶ _b
	۶ تن	۴۰/۶۵ _a	۱۳۷۹/۸۷ _a	۳/۰۴ _a	۴۸/۶۳ _a	۱/۱۰ _a
بیوسلفور	عدم کاربرد	۳۷/۹۹ _b	۸۷۴/۱۵ _b	۲/۱۱ _b	۳۸/۵۱ _a	۰/۷۸ _b
	کاربرد	۳۹/۷۴ _a	۱۰۴۹/۸۷ _a	۲/۶۱ _a	۴۰/۷۸ _a	۰/۹۱ _a

در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

۵. بحث

نتایج یک آزمایش روی کلزا نشان داد که خشکی در مرحله گلدهی باعث کاهش عملکرد دانه و اجزای آن شد (Hasan *et al.*, 2005). اثر تنش رطوبتی در مراحل زایشی گیاه با نقصان در باروری گل‌ها و انتقال مواد سنتز شده به مقصد (دانه‌ها) همراه است که در گیاه کلزا به صورت ریزش خورجین، کاهش تعداد دانه در خورجین، کاهش وزن هزاردانه و در نهایت کاهش عملکرد دانه در واحد سطح همراه خواهد بود (Dadivar & Khodshenas, 2007). در پژوهشی، اثر هفت سطح بیوچار بر روی محصول گندم مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار ۲۰-۵ تن در هکتار سبب افزایش محصول دانه گندم به میزان ۲/۹ تا ۱۹/۴ درصد در مقایسه با سطح شاهد گردید (Sun *et al.*, 2019). پژوهش‌گران دیگر نیز به افزایش عملکرد گندم در تیمارهای حاوی بیوچار اشاره کرده و دلیل این امر را نگهداری بهتر آب و عناصر غذایی توسط بیوچار و تغذیه بهتر گیاه عنوان کردند (Gebremedhin *et al.*, 2015). Biederman & Harpole (2013) نیز تأثیر مثبت بیوچار بر عملکرد دانه را گزارش کردند. در آزمایش حاضر نیز استفاده از شش تن بیوچار اثر تنش را تا حد زیادی تعدیل نموده به طوری که در برخی از صفات از جمله قند کل محلول تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای تنش مشاهده نگردید.

گوگرد از جمله از عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان است که در ساختمان اسیدهای آمینه، پروتئین، روغن و در نتیجه در بهبود کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی دارای اهمیت ویژه‌ای است (Vidyalakshmi *et al.*, 2009). Momen *et al.* (2011) نیز گزارش کردند که افزایش میزان گوگرد سبب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه و وزن هزاردانه گندم شد. Borujerdnia *et al.* (2017) گزارش کردند تنش خشکی به طور معنی‌داری باعث کاهش محتوای رطوبت نسبی برگ شد. پژوهش‌ها نشان داده که مقدار رطوبت نسبی برگ در پاسخ به تنش قطع آبیاری کاهش یافت (Ghanbari *et al.*, 2013; Burling *et al.*, 2013). نتایج مطالعه Dehkoda *et al.* (2013) نشان داد که کاهش یا عدم آبیاری باعث کاهش عملکرد دانه و مقدار روغن و در نهایت عملکرد روغن می‌شود. در مقابل، بهبود عملکرد روغن در نتیجه کاربرد تیمارهای کودی، به ویژه تیمار استفاده از کودهای زیستی می‌تواند ناشی از افزایش درصد روغن (نمودار ۳) و عملکرد دانه (جدول ۴) باشد.

تجمع قندهای محلول داخل سلول‌ها در تنظیم اسمزی نقش مهم ایفا نموده و کمک می‌کند تا پتانسیل آب سلول کاهش و آب بیش‌تری برای حفظ تورگر تحت تنش کم‌آبی داخل سلول باقی بماند (Sato, 2004). همان‌طور که ملاحظه شد صفت قند محلول کل تفاوت معنی‌داری در بین تیمارهای تنش نشان نداد که این موضوع نشان از نقش مهم قندها در تنظیم اسمزی سلول‌ها در شرایط تنش خشکی می‌باشد (جدول ۶).

۶. نتیجه گیری و پیشنهادها

بر اثر تنش خشکی رشد گیاه و توسعه آن کاهش می‌یابد که منجر به اختلال در گلدهی، پرشدن دانه‌ها و در نتیجه عملکرد کم‌تر گیاه می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش نیز حاکی از این بود که وقوع تنش به‌ویژه اعمال تنش شدید به دلیل تداوم تنش آبی از اواسط مرحله گلدهی تا پایان فصل رشد با اثر منفی بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا در نهایت سبب کاهش عملکرد دانه شد. تنش خشکی هم‌چنین تأثیر منفی روی اجزای عملکرد و هم‌چنین برخی از صفات فیزیولوژیک گیاه نظیر، محتوای نسبی آب برگ، شاخص سطح برگ، درصد روغن و به‌دنبال آن عملکرد روغن، قند کل محلول کلزا داشت. کاربرد تیمارهای کودی به‌ویژه تیمار استفاده از شش تن بیوچار و کاربرد بیوسولفور با تعدیل شرایط تنش منجر به بهبود صفات مذکور گردید. بنابراین با توجه به نقش مهم کودهای زیستی در بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، زیستی و حاصلخیزی خاک با تأمین سطوح مناسب این مواد در خاک می‌توان در راستای کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی گام برداشت و این نتیجه می‌تواند تأمین‌کننده بخشی از اهداف کشاورزی پایدار به‌منظور دستیابی به یک عملکرد قابل قبول باشد.

۷. تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از رساله دکتری می‌باشد؛ بدین‌وسیله از اساتید محترم و کارکنان آزمایشگاه گروه زراعت پردیس ابوریحان دانشگاه تهران تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

- Abd El-Mageed, T. A., Belal, E. E., Rady, M. O. A., Abd El-Mageed, S. A., Mansour, E., Awad, M. F., & Semida, W. M. (2021). Acidified biochar as a soil amendment to drought stressed (*Vicia faba* L.) plants: influences on growth and productivity, nutrient status, and water use efficiency. *Agronomy*, 11, 2-18.
- Abdou, A., Soaud, A. A., Al-Darwish, F. H., Saleh, M. E., El-Tarabily, K. A., Sofian-Azirun, M., & Motior, R. M. (2011). Effects of elemental sulfur, Phosphorus, micronutrients and *Paracoccus versutus* on nutrient availability of calcareous soils. *Australian Journal of Crop Science*, 5, 554-561.
- Berek, A. K., Hue, N., & Ahmad, A. (2011). Beneficial use of biochar to correct soil acidity. *Food Provider Hanai*, 9, 1-3.
- Biederman, L. A., & Harpole, W. S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB bioenergy*, 5, 202-214.
- Boroujerdnia, M., Bihanta, M., AlamiSaid, K., & Abdossi, V. (2016). Effect of drought tension on proline content, soluble carbohydrates, electrolytes leakage and relative water content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Crop Physiology Journal*, 29, 41-23.
- Burling, K., Cerovic, Z. G., Cornic, G., Ducruet, M. J., Noga, G., & Hunsche, M. (2013). Fluorescence-based sensing of drought-induced stress in the vegetative phase of four contrasting wheat genotypes. *Environmental and Experimental Botany*, 89, 51-59.
- Gebeyehu, S. (2006). Physiological response to drought stress of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes differing in drought resistance. *Ph.D. thesis*. Giessen: Justus-Liebig university of Giessen, Institute of Plant Nutrition.

- Gebremedhin, G., Bereket, H., Daniel, B., & Tesfaye, B. (2015). Effect of biochar on yield and yield components of wheat and post-harvest soil properties in Tigray, Ethiopia. *Journal of Fertilizers & Pesticides*, 6, 2-5.
- Hawkesford, M. J., & De Kok, L. J. (2007). *Sulfur in plants*. London, England: Springer.
- Ihuoma, S. O., & Madramootoo, C. A. (2017). Recent advances in crop water stress detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 267-275.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). *Biochar for environmental management: an introduction. Biochar for environmental management: Science and technology*, London: Earthscan.
- Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, cell & environment*, 25(2), 239-250. <http://dx.doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x>.
- Mukherjee, A., & Zimmermann, A. R. (2013). Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory produced biochars and biochar–soil mixtures. *Geoderma*, 194, 122-130.
- Ouyang, L., Tang, Q., Yu, L., & Zhang, R. (2014). Effects of amendment of different biochars on soil enzyme activities related to carbon mineralisation. *Soil Research*, 52(7), 706-716.
- Sato, F., Yoshioka, H., Fujiwara, T., Higashio, H., Urugami, A., & Tokuda, S. (2004). Physiological responses of cabbage plug seedlings to water stress during low-temperature storage in darkness. *Science Horticulturae*. 101, 349-357.
- Scherer, H. W. (2001). Sulphur in crop production. *European Journal of agronomy*, 14(2), 81-111.
- Sun, H., Shi, W., Zhou, M., Ma, X., & Zhang, H. (2019). Effect of biochar on nitrogen use efficiency, grain yield and amino acid content of wheat cultivated on saline soil. *Plant, Soil and Environment*, 65(2), 83-89.
- Tan, M., Liao, F., Hou, L., Wang, J., Wei, L., Jian, H., & Liu, L. (2017). Genome-wide association analysis of seed germination percentage and germination index in *Brassica napus* L. under salt and drought stresses. *Euphytica*, 213, 1-15.
- Vidyalakshmi, R., Paranthaman, R., & Bhagyaraj, R. (2009). Sulphur oxidizing bacteria and pulse nutrition - a review. *World Journal of Agricultural Sciences*, 5, 270-278.
- Xia, L., Yang, L., Sun, N., Li, J., Fang, Y., & Wang, Y. (2016). Physiological and antioxidant enzyme gene expression analysis reveals the improved tolerance to drought stress of the somatic hybrid offspring of *Brassica napus* and *Sinapis alba* at vegetative stage. *Acta physiologiae plantarum*, 38, 88-102.
- Chan, K. Y., & Xu, Z. H. (2009). Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement. edited by J. Lehmann, & S. Joseph. In *Biochar for Environmental Management: science and technology*. London: Earthscan.