J. Soil Plant Interact. 2026; 17(1): 1–19. https://doi.org/10.47176/jspi.17.1.20913

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

The Effect of Plant Growth-Promoting Bacteria (*Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus halotolerans*) on Yield and Fatty Acids of Camellia Seeds Under Drought and Dust Stresses

Hamid Golaraei[1], Asghar Mosleh Arani[2*], Hassan Etesami[3] and Reza Dehghani Bidgoli[4]

1- Department of Arid Land and Desert Management. Faculty of Natural Resources Yazd University, Iran
2- Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Iran
3- Department of Soil Science, University of Tehran, Iran
4- Department of Nature Engineering, University of Kashan, Iran
* Corresponding author, Email: amosleh@yazd.ac.ir

(Received: 5 October 2025; Revised: 27 December 2025; Accepted: 28 December 2025)

Abstract

Background and Objective: Considering the increase of aridity and dust in arid and semi-arid regions, this study investigated the effects of drought stress and dust, as well as the role of plant growth-promoting bacteria (PGPB), including *Bacillus amyloliquefaciens* and *B. halotolerans*, on the yield and fatty acid composition of camellia seeds.

Methods: A factorial experiment was conducted in a randomized complete blocks design with different treatments in farm conditions. The treatments included: plant growth-promoting bacteria (in three levels, control, and inoculation with *B. amyloliquefaciens* and *B. halotolerans*), two irrigation levels (irrigation periods of 4 and 8 days), and the two dust levels (without dust and with dust application). To prepare dust, soil samples were collected from critical dust hotspots in Isfahan province, Aran, and Bidgol counties. Supercritical fluid extraction was used to extract the plant oil.

Results: The results showed that low irrigation and dust significantly reduced seed weight, dry weights of shoot and root, and oil content. Additionally, the profile of fatty acids changed under the influence of drought and dust stresses; the amounts of myristoleic acid, alpha-linolenic acid, and eicosatrienoic acid decreased by 33, 21, and 28%, respectively. The results showed that the use of plant growth-promoting bacteria increased some fatty acids such as linoleic, alpha-linolenic, oleic, palmitic and stearic acids and decreased palmitoleic and myristolic acids, and did not cause any change in other fatty acids. In total, the inoculation of the mentioned bacteria reduced the negative effects of stress, allowing for increased growth of roots and aerial organs, maintaining oil content, and improving the ratio of monounsaturated to polyunsaturated fatty acids.

Conclusion: It is recommended to use *B. amyloliquefaciens* and *B. halotolerans* as an effective strategy to reduce the negative effects of drought and dust and improve the quality and yield of camelina in arid and semi-arid regions.

Keywords: Plant growth-promoting bacteria, Fatty acids, Linolenic acid, Oil seed, Dust center.

How to Cite: Golaraei, H., Mosleh Arani, A., Etesami, H., Dehghani Bidgoli, R., 2026. The effect of plant growth-promoting bacteria (*Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus halotolerans*) on yield and fatty acids of camellia seeds under drought and dust stresses. J. Soil Plant Interact. 17(1), 1–19 (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jspi.17.1.20913

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۵؛ ۱۷(۱): ۱۹-۱، https://doi.org/10.47176/jspi.17.1.20913

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۲۷۸۳-۵۰۱۴ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۵۲۸۶

مقاله پژوهشی

تأثیر باکتری‌های محرک رشد گیاه (*Bacillus amyloliquefaciens* و *Bacillus halotolerans*) بر عملکرد و اسیدهای چرب دانه کاملینا تحت تنش‌های خشکی و گرد و غبار

حمید گل‌آرایی[۱]، اصغر مصلح آرانی[۲*]، حسن اعتصامی[۳] و رضا دهقانی بیدگلی[۴]

۱- گروه مدیریت بیابان، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد، ایران

۲- گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد، ایران

۳- گروه علوم خاک، دانشگاه تهران، ایران

۴- مهندسی طبیعت، دانشگاه کاشان، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: amosleh@yazd.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۱۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۷)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: با توجه به افزایش خشکی و گرد و غبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در این پژوهش آثار تنش خشکی و گرد و غبار و همچنین نقش باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPB) شامل *Bacillus amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* بر عملکرد و ترکیب اسیدهای چرب دانه گیاه کاملینا بررسی شد.

روش‌ها: یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با تیمارهای مختلف در شرایط مزرعه انجام شد. تیمارهای مورد بررسی شامل: باکتری‌های محرک رشد گیاه (در سه سطح شاهد، تلقیح انفرادی با *B. amyloliquefaciens* و تلقیح با *B. halotolerans*)، دو سطح آبیاری (دوره‌های آبیاری ۴ و ۸ روز) و دو سطح گرد و غبار (بدون گرد و غبار و با گرد و غبار) بود. برای تهیه گرد و غبار از نمونه خاک کانون‌های بحرانی گرد و غبار استان اصفهان، شهرستان آران و بیدگل استفاده شد. برای استخراج روغن گیاه از روش استخراج سیال فوق‌بحرانی استفاده شد.

نتایج: نتایج نشان داد که کم‌آبیاری و گرد و غبار به طور معنی‌داری وزن دانه و محتوای روغن را کاهش داد. پروفیل اسیدهای چرب نیز تحت تأثیر تنش خشکی و گرد و غبار تغییر یافت؛ به‌طوری که مقدار اسید میریستولئیک، اسید آلفا-لینولنیک و هموگاما-لینولنیت به‌ترتیب ۳۳، ۲۱ و ۲۸ درصد کاهش یافتند. کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه باعث افزایش برخی از اسیدهای چرب مانند اسید لینولئیک، اسید آلفا-لینولنیک و اسید اولیک، اسید پالمتیک و اسید استاریک و کاهش اسید پالمیتولیک و اسید میریستولیک شد و در سایر اسیدهای چرب تغییری ایجاد نکرد. در مجموع تلقیح باکتری‌های مذکور آثار منفی تنش‌ها را کاهش داد؛ به‌طوری که محتوای روغن حفظ شده و نسبت اسیدهای چرب غیراشباع با یک یا چند پیوند دوگانه بهبود یافت.

نتیجه‌گیری کلی: استفاده از باکتری‌های *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* به‌عنوان یک راهبرد مؤثر برای کاهش آثار منفی خشکی و گرد و غبار و بهبود کیفیت و عملکرد کاملینا در مناطق خشک و نیمه‌خشک پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: باکتری‌های محرک رشد گیاه، اسیدهای چرب، اسید لینولنیک، دانه‌های روغنی، کانون گرد و غبار.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۵ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

به‌دلیل افزایش تقاضا برای روغن‌های گیاهی و با توجه به رشد جمعیت و افزایش سرانه مصرف غذا، افزایش سطح زیر کشت دانه‌های روغنی، عملکرد محصول و تولید پایدار محصولات دانه روغنی برای پاسخ به تقاضای روزافزون روغن خوراکی به‌ویژه در کشورهای جنوب آسیا اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است (Bistgani et al., 2017). کامِلینا (*Camelina sativa* L. Crantz) از خانوده شب‌بو یک منبع جدید روغن بوده که اخیراً در صنعت استخراج روغن مورد توجه قرار گرفته است. کامِلینا گیاهی با قابلیت سازگاری زیاد بوده و در انواع خاک‌ها و اقلیم‌ها رشد می‌کند که کشت آن از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه است. همچنین کشت این گیاه نسبت به سایر دانه‌های روغنی نیاز کمتری به آب، کود و سم دارد (Piravi-vanak et al., 2022). علاوه‌بر این، دارای دوره رشد کوتاه (۱۰۰–۸۰ روز)، قابلیت تناوب با غلات ریزدانه، نیازهای کشت ساده و تحمل زیاد به شرایط نامساعد است که آن را به گزینه‌ای جذاب برای کشاورزان تبدیل می‌کند (Veljković et al., 2022). در دهه‌های اخیر گیاه کامِلینا به‌دلیل نیاز کم به مواد مغذی، دوره رشد کوتاه، حفظ مواد-مغذی، مقاومت زیاد در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی و ویژگی‌های کیفی بذر مورد توجه بوده است.

به طور میانگین، دانه‌های کامِلینا دارای ۵٪ اسید چرب امگا-۳، ۲۴–۳۱٪ پروتئین، دارای ویتامین E زیاد (۲۸/۲–۲۵/۸ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم) و منبع قوی آنتی‌اکسیدان و ۴۵–۳۰٪ روغن هستند که آن را به یک تغذیه مناسب و ارزشمند برای انسان، دام، طیور و ماهی‌ها تبدیل می‌کند (Berti et al., 2016). علاوه بر این، حدود ۹۰ درصد روغن کامِلینا دارای مقادیر زیادی از اسیدهای چرب غیراشباع مانند اولئیک (۱۶–۱۴٪)، لینولئیک (۲۳–۱۵٪)، لینولنیک (۴۰–۳۱٪) و ایکوزانوئیک (۱۵–۱۲٪) است (Yuan and Li, 2020) که کیفیت روغن آن را نسبت به سایر دانه‌های روغنی افزایش می‌دهد (Kim et al., 2019). سطح بالای اسیدهای چرب غیراشباع، ارزش تجاری کامِلینا را در صنایع مختلفی از جمله خوراک دام، تولید سوخت زیستی، داروسازی افزایش داده است (Załuski et al., 2020). علاوه بر این، روغن کامِلینا دارای مقادیر زیادی توکوفرول است که از آن در برابر اکسیداسیون محافظت می‌کند و استفاده از آن را در محصولات غذایی متنوع امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین، به‌دلیل محتوای زیاد پروتئین، دانه‌های کامِلینا در صنعت خوراک دام نیز کاربرد دارند (Berti et al., 2016; Mondor et al., 2022). بر اساس آخرین آمار در سال ۱۴۰۳، سطح زیر کشت کامِلینا در ایران حدود ۲۵ هزار هکتار بوده که تا حدود ۴۰ هزار هکتار در سال ۱۴۰۴ پیش‌بینی شده است (Kahrisi, 2024).

امروزه بحران آب تهدیدی برای امنیت غذایی در سراسر جهان است؛ بنابراین، بهینه‌سازی مصرف آب و تأمین نیاز آبی محصولات برای دستیابی به عملکرد مناسب دانه و کیفیت روغن مطلوب اهمیت زیادی دارد (Shirani Rad et al., 2024). اگرچه کامِلینا نیازهای زراعی کمی دارد، عملکرد گیاه بسته به عوامل ژنتیکی و شرایط محیطی متفاوت است (Zahuski et al., 2020). ژنوتیپ مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده میزان روغن و ترکیب اسیدهای چرب است. عوامل محیطی نیز ممکن است بر میزان روغن و ترکیب اسیدهای چرب دانه تأثیر بگذارند. تنش خشکی به‌عنوان مهم‌ترین عامل محدودکننده رشد گیاهان، باعث کاهش جذب مواد غذایی، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فعالیت فتوسنتزی و در نهایت کاهش رشد و عملکرد محصول می‌شود (Hashemi et al., 2023). کمبود آب همچنان مهم‌ترین عامل محدودکننده تولید دانه‌های روغنی مانند کامِلینا محسوب می‌شود. اقلیم خشک و نیمه‌خشک منجر به هدررفت زیاد آب در آبیاری می‌شود (Randhawa et al., 2017). آب نقش مهمی در شکل‌دهی فعالیت‌های مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهان دارد (Maqsood et al., 2022). تنش خشکی رشد سلولی را مهار می‌کند و منجر به کاهش زیست‌توده می‌شود و در نتیجه تولید دانه‌های روغنی را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد (Waraich et al., 2020).

تنش خشکی به‌عنوان مهم‌ترین عامل زیست‌محیطی تهدیدکننده، عامل اصلی کاهش تولید غذا در سراسر جهان

محسوب می‌شود (You et al., 2019). کمبود آب می‌تواند به‌طور چشم‌گیری رشد و عملکرد محصول را کاهش دهد. گزارش‌های فراوان نشان می‌دهد که شدت تنش، مدت زمان کاربرد خشکی و زمان وقوع آن می‌تواند بر صفات کمّی و کیفی اغلب گیاهان تأثیر بگذارد. مراحل گل‌دهی و پر شدن دانه، حساس‌ترین مراحل به خشکی هستند. تنش خشکی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی فرآیند فتوسنتز، تولید مواد فتوسنتزی و انتقال آن‌ها به اندام‌های زایشی را تحت تأثیر قرار داده و اندازه، تعداد، وزن و ترکیب دانه را تغییر دهد (Sohrabi et al., 2012). تنش خشکی، تغذیه معدنی و تعادل یونی در سلول‌های گیاه را مختل می‌کند. بنابراین، اثر اصلی تنش خشکی بر گیاهان تغییر در جذب و انتقال مواد مغذی به شاخساره است (Yang et al., 2021). تنش خشکی با کاهش هدایت روزنه‌ای، جریان آب از ریشه به شاخساره را کاهش می‌دهد و در نتیجه جریان مواد مغذی از ریشه به برگ‌ها مختل می‌شود (Khatun et al. 2021). با ادامه تنش خشکی و کمبود مواد مغذی در برگ‌ها، نرخ فتوسنتز، سطح برگ و محتوای کلروفیل کاهش یافته و به‌طور قابل توجهی کیفیت و کمّیت عملکرد محصول را کاهش می‌دهد. مشاهده شد تنش کم‌آبی باعث کاهش معنی‌دار عملکرد دانه و روغن به‌ترتیب به میزان ۲۴ و ۳۳٪ شد و هم‌زمان اسیدهای چرب اشباع، ترکیبات فنولی کل و روی دانه‌ها را افزایش داد (Azhand et al., 2023).

عوامل محیطی معمولاً به‌صورت ترکیبی بر گیاهان تأثیر می‌گذارند. گرد و غبار به‌عنوان رخداد جدایی‌ناپذیر از تنش خشکی در مناطق خشک شناخته می‌شود که اغلب تأثیر خشکی بر گیاهان را تشدید می‌کند. گرد و غبار می‌تواند سطح برگ‌ها را پوشانده، سبب بسته‌شدن روزنه‌ها شده، انتقال نور را کاهش داده و تبادل‌های گازی را محدود سازد که این آثار باعث تشدید تنش خشکی می‌شود (Najafi Zilaie et al., 2023). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تنش ترکیبی خشکی و گرد و غبار تأثیر منفی بیشتری بر صفات فیزیولوژیک مانند کلروفیل، ظرفیت فتوسیستم II و افزایش پراکسیداسیون لیپیدها در اغلب گیاهان دارد (Najafi Zilaie et al., 2022). تلاش‌های زیادی در زمینه‌ی توسعه راهکارهای پایدار برای افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی در حال انجام است. استفاده از روش‌های نوین اصلاح نباتات، اصلاح خاک و فناوری‌های زیستی به یکی از اولویت‌های مهم پژوهشی در سطح جهانی تبدیل شده است. به‌دلیل اهمیت کاملینا، راه‌کارهای متعددی برای افزایش محصول و تحمل گیاه به تنش خشکی انجام شده است. به‌عنوان مثال تأثیر آهن، سیلیکون و روی (Azhand et al., 2025)، تأثیر سیلیکات پتاسیم (Shirani Rad et al., 2024) و تأثیر هم‌افزایی میکروب‌ها و سلنیوم (Nazim et al., 2023) در کاملینا تحت تنش خشکی مورد بررسی قرار گرفته است. در سال‌های اخیر استفاده از تکنیک‌های زیست‌فناوری و تلقیح با باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه (PGPR[1]) برای افزایش تحمل به تنش‌ها به‌طور گسترده‌ای بکار رفته است (Najafi Zilaie et al., 2023). ریزوسفر گیاه، که مکان تجمع ریزجانداران مفید است، نقش مهمی در حفظ سلامت و افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌ها دارد. باکتری‌های PGPR از گروه‌های مهم ریزجانداران هستند که با تأثیر بر رشد و مقاومت گیاهان، نقش مؤثری در افزایش عملکرد دارند (Etesami and Glick, 2020). این باکتری‌ها از راه سازوکارهای مختلفی مانند تولید هورمون‌های رشد (اکسین، سیتوکینین، و جیبرلین)، تثبیت نیتروژن، انحلال فسفات، تولید آنزیم ACC دی‌آمیناز برای کاهش تنش اتیلن، تولید سیدروفورها و افزایش جذب عناصر غذایی، موجب بهبود رشد ریشه و شاخساره می‌شوند (Hajiabadi et al., 2022; Kumar et al., 2020).

سویه‌های *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* به‌دلیل سازگاری با شرایط بیابانی و توانایی تولید اسپور، مقاومت زیاد در برابر شرایط نامساعد محیطی و تولید متابولیت‌های ضدباکتری و ضدقارچ، به‌عنوان باکتری‌های محرک رشد مؤثر شناخته شده‌اند (Yang et al., 2024). تأثیر باکتری *B. amyloliquefaciens* بر رشد گیاه یونجه تحت شرایط تنش خشکی بررسی شد. کاربرد این باکتری به‌طور قابل توجهی طول کل و میانگین قطر ریشه و

1. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria

محتوای پتاسیم و آهن را در برگ‌ها، ریشه‌ها و خاک در کشت یونجه تحت شرایط تنش خشکی افزایش داد. کاهش قابل توجهی همچنین در محتوای سدیم در برگ‌ها و خاک یونجه تحت تیمار *B. amyloliquefaciens* مشاهده شد. به‌طورکلی، نتیجه‌گیری شد که *B. amyloliquefaciens* می‌تواند به‌عنوان یک کود زیستی بالقوه در کشاورزی پایدار برای بهبود مواد مغذی خاک و افزایش تولید گیاه در شرایط خشک‌سالی عمل کند (Yang et al., 2024). نتایج مثبت مشابه در پژوهش Bisht et al. (2025) برای باکتری *B. halotolerans* در پژوهش Tanveer et al. (2024) گزارش شده است.

با توجه به خشک‌سالی‌های سال‌های اخیر، شدت و مدت پدیده‌های گرد و غبار به‌شدت افزایش یافته است؛ به‌طوری که گرد و غبار و خشکی با همبستگی زیاد، به‌طور هم‌زمان در مناطق خشک و نیمه‌خشک بروز کرده و کشاورزی را تحت تأثیر قرار داده است. بررسی منابع نشان می‌دهد پژوهشی درباره تأثیر توام خشکی و گرد و غبار بر گیاه کاملینا وجود ندارد. در این راستا، با توجه به اهمیت دانه‌های روغنی، این پژوهش با هدف بررسی کارآیی و نقش باکتری‌های مقاوم به خشکی *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* بر عملکرد بذر و محتوای روغن گونه کاملینا تحت تنش خشکی و گرد و غبار در شرایط مزرعه انجام شد.

مواد و روش‌ها

کشت و اعمال تیمارها

در این پژوهش تأثیر سویه‌های *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* بر ویژگی‌های ترکیبات روغن و عملکرد گونه کاملینا تحت تنش خشکی و گرد و غبار به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با تیمارهای مختلف اجرا شد. به این منظور کرت‌های ۱ متر مربعی در مزرعه خواجه شاه منصور در شهرستان آران و بیدگل با موقعیت جغرافیایی UTM ۵۴.۳۵۶۰ و ۳۷.۷۴۸۷۲ آماده شد. جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مکان پژوهش را نشان می‌دهد. تیمارهای این پژوهش شامل باکتری‌های محرک رشد گیاه (در سه سطح شامل شاهد بدون باکتری، تلقیح با باکتری *B. amyloliquefaciens* و تلقیح با باکتری *B. halotolerans*)، سطوح آبیاری (در دو سطح با دوره آبیاری ۴ و ۸ روزه)، و گرد و غبار (در دو سطح بدون گرد و غبار و اعمال گرد و غبار) بود.

تیمار باکتری

دو نوع باکتری محرک رشد گیاه *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* برای این آزمایش در نظر گرفته شد. سویه‌های این دو باکتری از مرکز منطقه‌ای کلکسیون قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی ایران تهیه شد. بدین ترتیب سه سطح سوسپانسیون باکتریایی با غلظت نهایی 3×10^8 CFU/mL شامل (شاهد، سوسپانسیون بدون باکتری، سوسپانسیون با سویه *B. amyloliquefaciens*، سوسپانسیون با سویه *B. halotolerans*) تهیه شد. بذرهای سالم کاملینا که از اداره جهاد کشاورزی یزد تهیه شده بود پیش از کشت به مدت دو ساعت در مایه تلقیح قرار گرفت. ۱۶ عدد بذر تلقیح‌شده در هر کرت با فواصل یکسان کشت شده و بر اساس طرح آبیاری شد.

اعمال سطوح آبیاری

در هر کرت یک مترمربعی تعداد ۱۶ بذر کاشته شد. این تعداد بذر بر اساس پژوهش Shirani Rad et al. (2017) انتخاب شد که نشان دادند با این تراکم بیشترین محصول کاملینا به‌دست می‌آید. بذرها در فواصل ۲۵ سانتی‌متری از یکدیگر کشت شدند. آبیاری نهال‌ها بر اساس شرایط اقلیمی منطقه هر ۴ روز یک‌بار، به‌عنوان شاهد (مشابه عرف زارعین محلی) و آبیاری ۸ روزه به‌عنوان کم‌آبیاری شدید اعمال شد. آبیاری تا زمان استقرار نهال‌ها (یک ماه پس از کاشت) هر ۴ روز یک‌بار انجام شد.

اعمال تیمار گرد و غبار

با توجه به منشاءیابی انجام‌شده و تعیین کانون‌های بحرانی گرد و غبار

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

Table 1. Physical and chemical properties of the farm soil

فسفر P (mg kg^{-1})	پتاسیم K (mg kg^{-1})	نیتروژن N (%)	ماده آلی Organic matter, OM (%)	کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent, CCE (%)	رسانایی الکتریکی Electrical conductivity, EC (dS m^{-1})	واکنش pH
49	104	0.02	0.38	19.4	6	7.7
بافت Texture	درصد سیلیسیم Si (%)	آب قابل دسترس گیاه Plant available water, PAW (v/v%)	رطوبت پژمردگی دائم گیاه Permanent wilting point, PWP (v/v%)	گنجایش مزرعه‌ای Field capacity, FC (v/v%)	درصد اشباع Saturation percentage, SP (v/v%)	
لوم شنی Sandy loam	4	11	9	20	40	

استان اصفهان-شهرستان آران و بیدگل، برای تهیه گرد و غبار از نمونه خاک کانون گرد و غبار استفاده شد. از آنجایی‌که اندازه ذرات گرد و غبار اندازه‌گیری‌شده در استان اصفهان بین ۱ تا ۱۰۰ میکرون است، مقداری از نمونه خاک‌های منطقه برداشته شده، درون دستگاه الک ریخته شده و از ذرات زیر ۱۰۰ میکرون برای اعمال گرد و غبار استفاده شد. بر اساس پژوهش میدانی انجام‌شده توسط Ranjbar Fordoeil et al. (2018) در منطقه‌ی بیابانی کاشان (دشت مرنجاب)، میزان رسوب گرد و غبار ریزشی بر سطح برگ‌های گیاه دم‌گاوی (*Smirnovia iranica*) در بازه‌ی زمانی (آوریل تا ژوئن) یعنی از اواسط فروردین تا اوایل تیر، بین ۰/۰۵۷ تا ۰/۱۱۳ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع در روز گزارش شده است؛ که معادل ۰/۵۷ تا ۱/۱۳ گرم بر متر مربع در روز است. با توجه به این‌که دوره‌ی اجرای آزمایش حاضر نیز در همین بازه‌ی زمانی انجام شده است، مقدار گرد و غبار اعمال‌شده بر پایه‌ی همین مقادیر منطقه‌ای تعیین شد. بدین منظور مقدار مشخص از گرد و غبار به‌صورت هفتگی وزن شده و توسط بلوور دمنده به درون پلاستیک مکعب‌شکل (برابر با ابعاد هر کرت) که بدین منظور ساخته شده بود، دمیده شد.

نمونه‌برداری از گیاه کاملینا برای اندازه‌گیری عملکرد و ترکیبات روغن دانه پس از رسیدن کامل دانه انجام شد.

استخراج روغن به روش سیال فوق‌بحرانی (SFE)

برای استخراج روغن از روش استخراج با سیال فوق‌بحرانی (Supercritical Fluid Extraction - SFE) استفاده شد (Yousefi et al., 2022; Manaf et al., 2023). در این روش از گاز دی‌اکسید کربن به عنوان حلال اصلی و از n- هگزان به عنوان کمک حلال استفاده شد، تا ضمن افزایش کارایی استخراج امکان جداسازی بهتر ترکیبات زیست‌فعال مانند اسیدهای چرب غیراشباع فراهم شود.

متیل‌استری‌کردن اسیدهای چرب

برای فرار شدن اسیدهای چرب و تزریق آنها به دستگاه کروماتوگرافی گازی (مدل CP7489 GC، کمپانی Agilent) متیل استری‌سازی آنها بر اساس پروتوکل مربوطه انجام شد (Kangani et al., 2008).

شاخص کیفیت تغذیه‌ای روغن

کیفیت روغن در رژیم غذایی به مقدار اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع بستگی دارد که با شاخص‌های متعددی ارزیابی می‌شود. یکی از این شاخص‌ها نسبت هیپوکلسترولمی به هیپرکلسترلمی (HH) است که بر اساس آن می‌توان وضعیت قلبی-عروقی انسان را بررسی کرد. نسبت HH شاخصی است که برای تعیین تأثیر اسیدهای چرب بر متابولیسم کلسترول است. از نظر ارزش تغذیه‌ای، نسبت HH بیشتر با مقدار اسیدهای چرب غیراشباع با چند پیوند دوگانه رابطه مستقیمی دارد که برای سلامتی انسان مفیدتر است. شاخص HH از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Ratusk et al., 2018):

$$HH = \frac{\text{اسید اولوئیک + اسید لینولنیک + اسید لینولئیک}}{\text{اسید استئاریدونیک + اسید آراشیدونیک / (اسید میریستیک + اسید پالمتیک)}} \quad (۱)$$

محاسبات آماری

به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌های صفات مختلف اندازه‌گیری‌شده از نرم افزار SPSS استفاده شد و نمودارها نیز در نرم‌افزار Excel رسم گردید. پس از اطمینان از نرمال‌بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف، تفاوت بین سطوح مختلف تیمارها به صورت آنالیز داده‌ها با آزمون تجزیه واریانس و در نهایت مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن (α=۰/۰۵) انجام شد.

نتایج

نتایج نشان داد اثر برهمکنش باکتری، گرد و غبار و آبیاری به‌جز برای درصد روغن و اسیدهای چرب غیراشباع برای سایر صفات اندازه‌گیری‌شده معنی‌دار بود (جدول ۲).

جدول ۲. تجزیه واریانس صفات وزن دانه و اسیدهای چرب در گیاه کاملینا

Table 2. Analysis of variance of seed weight and fatty acids in Camelina sativa

Seed weight وزن دانه	HH هیپوکلسترولمی به هیپرکلسترلمی	Fatty acid اسید چرب	Saturated acid اسید چرب اشباع	Unsaturated acid اسید چرب غیراشباع	Homogamma Linolenic هموگاما-لینولنیت	Eicosanoic اکاسترنوئیک	Alpha Linolenic آلفالینولنیک	Palmitoleic پالمیتولئیک	Myristoleic میریستولئیک	Myristic میریستیک	Stearic استئاریک	Palmitic پالمتیک	Oleic اولئیک	Linoleic لینولئیک	Sources of variation منابع تغییر
4**	0.99ns	65ns	47**	69ns	0.002ns	0.36**	145**	1.6**	0.002**	0.001**	41**	.39ns	31**	1.4**	Bacteria (B)
0.9**	3*	92ns	235**	32ns	0.004*	4**	772**	4.8**	0.002**	0.0002ns	178**	0.007ns	108**	1.8*	Dust (D)
21**	1.3ns	118ns	175**	5.6ns	0.25**	10**	226**	4.7**	0.005**	0.004**	163**	7**	55**	30**	Irrigation (I)
0.01ns	0.26ns	680**	46**	371**	0.018**	11**	59**	0.03*	0.003**	0.001**	2.6**	2.3*	38**	3.3**	Block
0.19**	3.8**	64ns	43**	2ns	0.04**	6**	207**	1.2**	0.002**	0.002**	47**	3.5**	46**	14**	B*D
0.78**	3.4**	31ns	52**	5ns	0.2**	1.1**	245**	1.2**	0.01**	0.002**	47**	3.4**	32**	6**	B*I
0.001ns	7**	1ns	124*	148ns	0.002ns	0.8*	878**	5.6**	0.002**	0.002**	188**	2.7*	138**	9**	D*I
0.3**	3.5**	39ns	62**	117ns	0.9**	2.5**	184**	0.9**	0.008**	0.002**	45**	4.5**	25**	2*	B*D*I
0.008	0.4	44	1	38	0.001	0.1	1.1	0.008	0.0001	0.0003	0.27	0.49	0.17	0.38	Error

ns، * و ** به‌ترتیب بیان‌گر نبود اثر معنی‌دار، و اثر معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

ns, * and ** indicate non-significant effect, and significant effect at 5 and 1% probability levels, respectively.

اسید استئاریک

نتایج نشان داد که باکتری‌های *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* مقدار اسید استئاریک را به‌ترتیب به میزان ۸۵ و ۸۴ درصد در شرایط بدون گرد و غبار و آبیاری نرمال (آبیاری ۴ روزه) افزایش دادند (شکل ۱).

اسید پالمیتولئیک

نتایج نشان داد که باکتری‌های *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* مقدار اسید پالمیتولئیک را به ترتیب به میزان ۸۵ و ۸۴ درصد در شرایط بدون گرد و غبار و آبیاری نرمال (آبیاری ۴ روزه) افزایش دادند (شکل ۱).

اسید پالمتیک

نتایج نشان داد که باکتری *B. halotolerans* مقدار اسید پالمتیک را در شرایط گرد و غبار و آبیاری ۸ روزه به میزان ۲۳ درصد افزایش داد (شکل ۱).

اسید اولئیک

نتایج نشان داد که باکتری‌های *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* مقدار اسید اولئیک را در شرایط بدون گرد و غبار و آبیاری ۴ روزه به‌ترتیب به میزان ۴۳ و ۴۴ درصد افزایش دادند (شکل ۱).

اسید میریستولئیک

نتایج نشان داد که باکتری *B. halotolerans* در شرایط اعمال گرد و غبار و کم‌آبیاری ۸ روزه مقدار اسید میریستولئیک را افزایش داد. این افزایش برای باکتری *B. amyloliquefaciens* در آبیاری ۴ روزه مشاهده شد (شکل ۲).

اسید میریستیک

نتایج نشان داد که در شرایط اعمال گرد و غبار، باکتری *B. halotolerans* در آبیاری ۴ و ۸ روزه باعث افزایش به‌ترتیب ۱۵ و ۱۹ درصدی مقدار اسید میریستیک شد (شکل ۲).

اسید لینولئیک

نتایج نشان داد که باکتری *B. amyloliquefaciens* در شرایط اعمال گرد و غبار و آبیاری ۸ روزه مقدار اسید لینولئیک را کاهش داد (شکل ۲).

هموگاما-لینولنیت

نتایج نشان داد که در شرایط اعمال گرد و غبار، باکتری *B. amyloliquefaciens* باعث افزایش معنی‌دار هموگاما-لینولنیت در آبیاری ۸ روزه شد، در حالی که *B. halotolerans* باعث کاهش این اسید چرب در آبیاری ۸ روزه شد (شکل ۲).

اسید اکاسترنوئیک

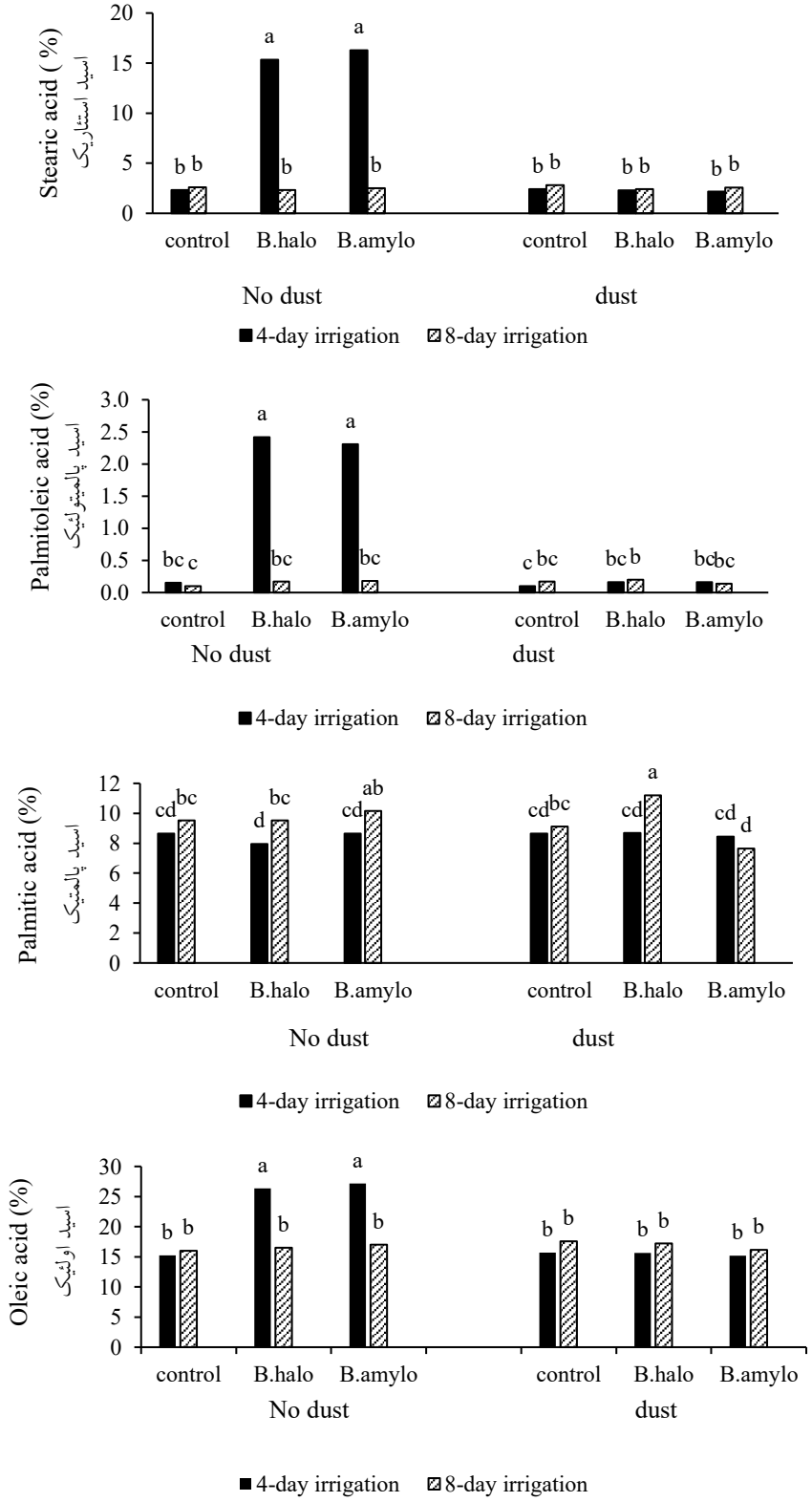
نتایج نشان داد که در شرایط اعمال گرد و غبار، باکتری *B. halotolerans* در آبیاری ۸ روزه باعث کاهش و باکتری *B. amyloliquefaciens* باعث افزایش اسید اکاسترنوئیک شد (شکل ۳).

اسید آلفا-لینولنیک

نتایج نشان داد که هر دو باکتری *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* مقدار اسید آلفا-لینولنیک را در شرایط بدون گرد و غبار در دوره آبیاری ۴ روزه به طور معنی‌داری کاهش داد. (شکل ۳).

اسیدهای چرب اشباع

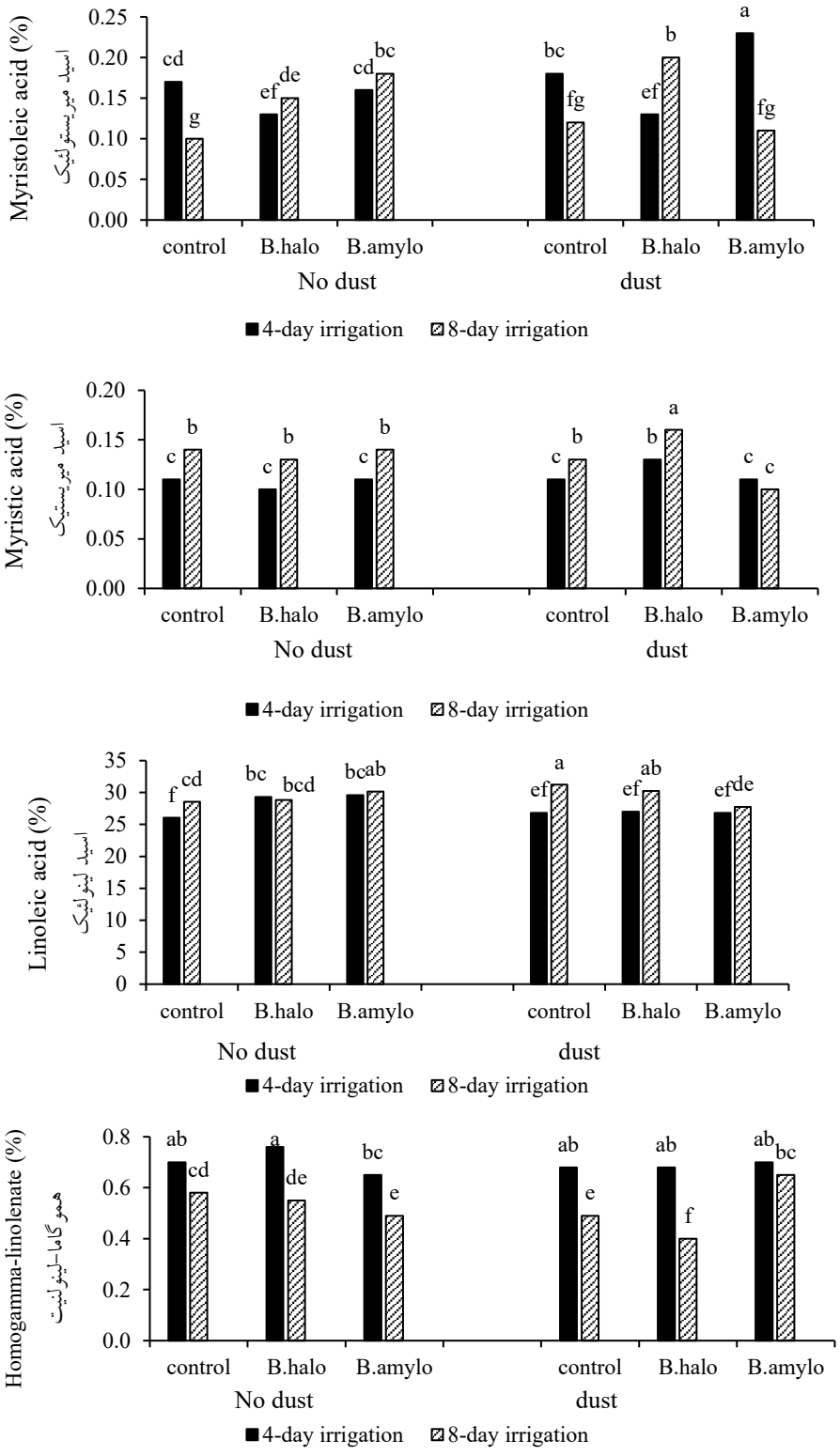
نتایج نشان داد که هر دو باکتری *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* در شرایط بدون گرد و غبار مقدار اسیدهای چرب اشباع را در دوره آبیاری ۴ روزه به مقدار ۴۰ درصد افزایش دادند (شکل ۴).



شکل ۱. اثر برهمکنش باکتری، گرد و غبار و دوره آبیاری بر مقدار اسید استئاریک، اسید پالمیتولئیک، اسید پالمتیک و اسید اولئیک در بذر کاملینا.

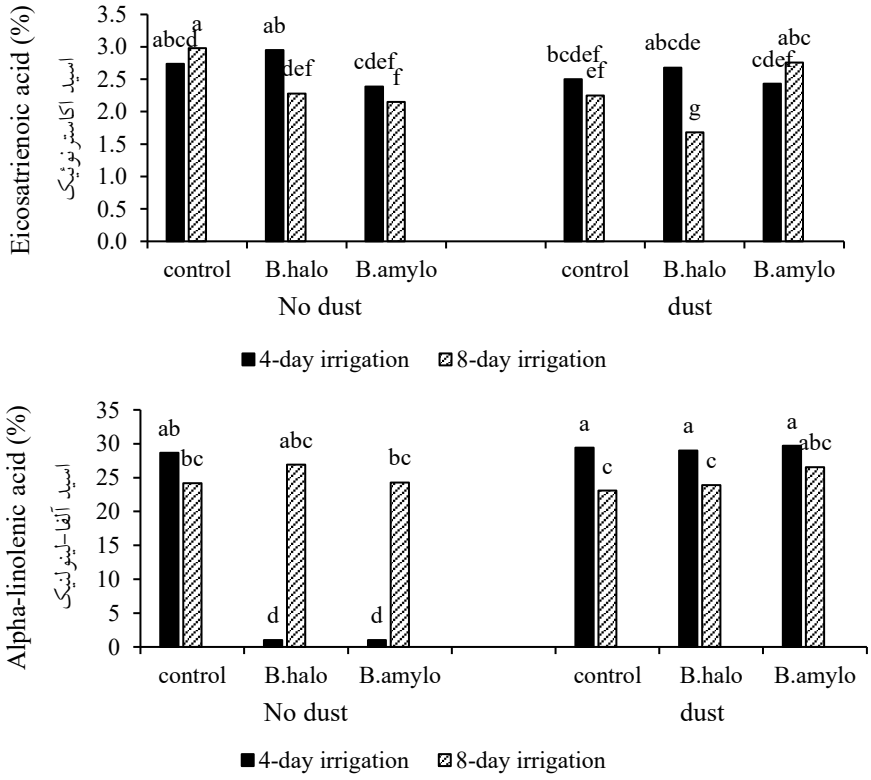
ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 1. Interaction effect of bacteria, dust and irrigation on stearic acid, palmitoleic acid, palmitic acid and oleic acid contents in Camelina seeds. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).



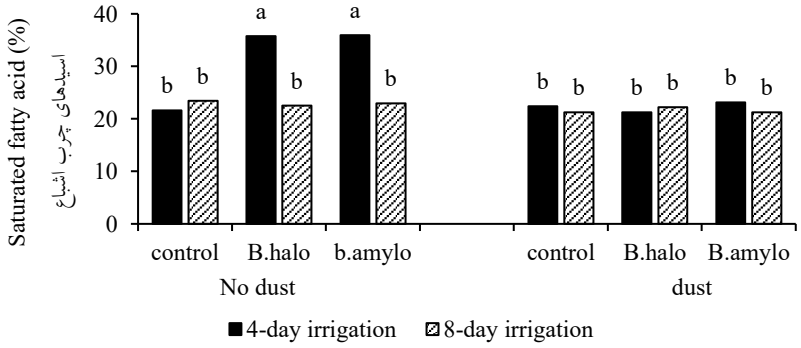
شکل ۲. اثر برهمکنش باکتری، گرد و غبار و دوره آبیاری بر مقدار اسید میریستولئیک، اسید میریستیک، اسید لینولئیک و هموگاما–لینولنیت در بذر کاملینا. ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 2. Interaction effect of bacteria, dust and irrigation on myristoleic acid, myristic acid, linoleic acid and homogamma-linolenic acid content in Camelina seeds. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).



شکل ۳. اثر برهمکنش باکتری، گرد و غبار و دوره آبیاری بر مقدار اسید اکاسترنوئیک و اسید آلفا–لینولنیک در بذر کاملینا. ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 3. Interaction effect of bacteria, dust and irrigation on ecusternic acid and alpha-linolenic acid content in Camelina seeds. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

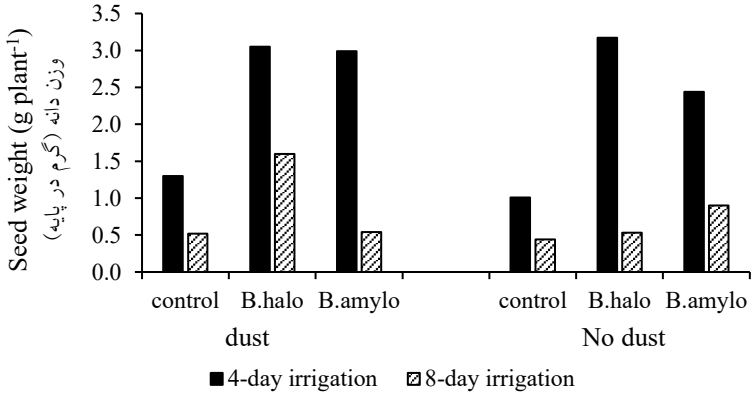


شکل ۴. اثر برهمکنش باکتری، گرد و غبار و دوره آبیاری بر مقدار اسیدهای چرب اشباع در کاملینا. ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 4. Interaction effect of bacteria, dust and irrigation on the amount of saturated fatty acids in Camelina. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

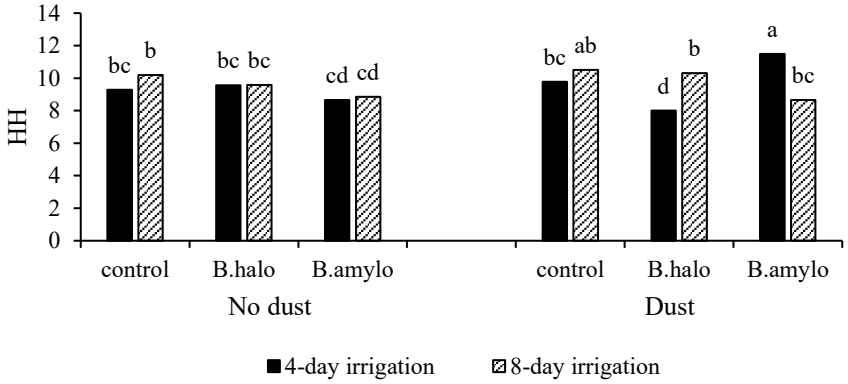
وزن دانه در هر پایه

نتایج نشان داد که هر دو باکتری *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* در شرایط گرد و غبار و آبیاری ۴ روزه، وزن دانه را افزایش دادند. باکتری *B. amyloliquefaciens* در



شکل ۵. اثر برهمکنش باکتری، گرد و غبار و آبیاری بر مقدار وزن دانه در کاملینا. ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 5. Interaction effect of bacteria, dust and irrigation on seed weight in Camelina. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).



شکل ۶. اثر برهمکنش باکتری، گرد و غبار و آبیاری بر HH در کاملینا. ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 6. Interaction effect of bacteria, dust and irrigation on HH in Camelina. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

شرایط اعمال گرد و غبار در آبیاری ۸ روزه نیز وزن دانه را به مقدار ۴۸ درصد افزایش داد (شکل ۵).

شاخص‌ها نسبت هیپوکلسترولمی به هیپرکلسترلمی (HH)

نتایج نشان داد که باکتری *B. amyloliquefaciens* در شرایط گرد و غبار در آبیاری ۴ روزه شاخص‌ها نسبت هیپوکلسترولمی به هیپرکلسترلمی را افزایش درحالی‌که *B. halotolerans* این شاخص را کاهش داد (شکل ۶).

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که وزن بذر شدیداً تحت تأثیر خشکی و گرد و غبار قرار گرفت و مقدار آن به‌طورمعنی‌داری کاهش یافت (شکل ۵). حساس‌ترین مرحله رشد و نمو کاملینا، مرحله گل‌دهی است که به‌شدت نسبت به خشکی حساس است. کمبود آب در این مرحله باعث کاهش قابل‌توجه تعداد گل، خوشه و دانه می‌شود؛ کم‌آبیاری باعث می‌شود گل‌دهی کند شده، و به‌دلیل دمای زیاد محیط، گیاهان سریع‌تر به نیازهای گرمایی خود برسند.

بنابراین، در شرایط تنش آبی مرحله گل‌دهی کوتاه‌تر شده و توانایی تولید خوشه کاهش می‌یابد (Yadav et al., 2020). کاهش وزن دانه در اثر خشکی شدید احتمالاً نتیجه کاهش جذب آب و مواد معدنی توسط گیاهان و متعاقباً کاهش تولید و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها باشد. در چنین شرایطی، گیاه، حتی با وجود سازوکارهای جبرانی، نمی‌تواند کاهش در محتوای مواد فتوسنتزی ناشی از خشک‌سالی را جبران کند و در نهایت وزن دانه کاهش می‌یابد. نتایج مشابه در بررسی گیاه کاملینا بدست آمد که نشان داد وزن هزار دانه کاملینا به‌طور معنی‌داری تحت تنش خشکی کاهش یافت (Azhand et al., 2025; Haghaninia et al., 2024; Haghaninia et al., 2025; Shirani Rad et al., 2024). همسو با نتایج پژوهش حاضر، Borzoo et al. (2021) در پژوهشی روی کاملینا اظهار داشتند که تنش خشکی باعث کاهش عملکرد محصول شد که این کاهش با اندازه‌گیری طول خورجین، تعداد خورجین و بذر و وزن هزار دانه مشخص گردید. نتایج پژوهش Haghaninia et al. (2025) روی گیاه کاملینا نشان داد که تنش خشکی، به‌ویژه زمانی که از گل‌دهی آغاز می‌شود، به‌طور قابل‌توجهی رنگدانه‌های فتوسنتزی، جذب مواد مغذی، محتوای نسبی آب، عملکرد بذر، ویژگی‌های مربوط به روغن و میزان کلونی‌زایی قارچ میکوریزا را کاهش می‌دهد. باکتری‌های مذکور از راه تولید ایندول-۳-استیک اسید، سایتوکنین‌ها و جیبرلین‌ها موجب افزایش توسعه ریشه، طویل‌شدن سلول‌ها، افزایش سطح برگ و رشد کل گیاه می‌شود. این هورمون‌ها در مراحل مختلف نمو گیاه به‌ویژه در دوره‌های تنش‌زا مانند خشکی یا کمبود عناصر غذایی نقش کلیدی ایفا می‌کنند (Sheteiwy et al., 2021). نتایج مشابه افزایش عملکرد در اثر تلقیح *B. amyloliquefaciens* در گیاه سویا تحت تنش خشکی (Sheteiwy et al., 2021) بدست آمد. این باکتری با تعدیل تولید فیتوهورمون‌ها و تنظیم تعادل اسمزی، هموستاز یونی و بیان ژن، از رشد گیاه محافظت می‌کند. *B. halotolerans* نیز مشابه سویه پیشین، در گیاه گندم (Wu et al., 2022) مقدار عملکرد را افزایش داد.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که روغن استخراج‌شده از دانه کاملینا از نظر اسیدهای چرب غیراشباع بسیار غنی بوده و مقدار آن به حداکثر ۷۳/۸۶ درصد رسید (شکل ۴). نتایج مشابهی توسط Haghaninia et al. (2024) بدست آمد که نشان داد ترکیبات اصلی روغن کاملینا شامل اسیدهای چرب اشباع مانند پالمیتیک و استئاریک و اسیدهای چرب غیراشباع شامل اولئیک، لینولئیک، لینولنیک و ایکوزنوئیک بودند. یافته‌های Piravi-vanak et al. (2022) نشان دادند که اسید لینولنیک (۳۲/۳۷-۲۹/۹۶٪)، اسید لینولئیک (۱۸/۵۲-۱۸/۱۸٪)، اسید اولئیک (۲۰/۴۷-۱۹/۷۷٪)، اسید ایکوزنوئیک (۱۳/۰۶-۱۱/۵۱٪)، اسید پالمیتیک (۶/۳۰-۶/۰۵٪)، اسید استئاریک (۳/۴۲-۳/۲۷٪) و اسید اروسیک (۲/۳۳-۱/۵۲٪) در روغن گیاه کاملینا اندازه‌گیری شد (شکل ۲). گزارش Borzoo et al. (2023) نشان داد که بیشترین نسبت اسیدهای چرب با اسیدهای چرب غیراشباع با چند پیوند دوگانه، به‌ویژه اسید لینولنیک در روغن گیاه کاملینا، رابطه معنی‌داری دارد. این نتایج نسبت زیاد اسیدهای چرب غیراشباع به اسیدهای چرب اشباع‌شده در روغن کاملینا، بر اساس گفته Wood et al. (2004)، معیار تعیین‌کننده‌ای برای ارزیابی کیفیت تغذیه‌ای روغن‌های غذایی است.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد مقدار اسید لینولئیک تحت تنش گرد و غبار و تنش کم‌آبیاری به‌طور معنی‌داری افزایش، ولی مقدار اسید میریستولئیک، اسید آلفا-لینولنیک، هموگاما-لینولنیت و اسید اکاسترنوئیک کاهش یافت (شکل ۲). اسید اولئیک، اسید لینولئیک، اسید میریستولئیک و اسید لینولنیک به‌عنوان اسیدهای چرب غیراشباع گروه‌بندی می‌شوند (Kostik et al., 2013). گرد و غبار باعث افزایش دما در گیاه می‌شود و این می‌تواند تأثیر خشکی بر محتوای روغن در کاملینا را تشدید کند. یکی از سازوکارهای اساسی مقاومت گیاه در برابر کم‌آبی، تغییر ساختار و سیالیت غشاء و بازسازی محتوای روغن و پروفیل اسیدهای چرب است. (Mohamed and Latif, 2017). کاهش فتوسنتز و باز توزیع کربن منجر به کاهش محتوای روغن بذر در تنش خشکی می‌شود (El Sabagh et al., 2019). کاهش روغن هم‌زمان با افزایش اسیدهای چرب اشباع و اسیدهای چرب غیراشباع با چند پیوند دوگانه و کاهش اسیدهای چرب غیراشباع با یک پیوند

دوگانه رخ داده است (Borzoo et al., 2023). افزایش اسیدهای چرب غیراشباع (لینولئیک) ممکن است به دلیل فعال‌شدن آنزیم لیپاز و ایجاد سیالیت بیشتر غشاء برای سازگاری با کم‌آبی باشد (Upchurch, 2008). آنزیم‌های غیراشباع‌کننده فعال در تولید اسیدهای چرب غیراشباع تحت تنش‌های زیستی و غیرزیستی پایدار هستند (Nayeri and Yarizade, 2014).

نتایج پژوهش حاضر همچنین نشان داد که تحت تنش گرد و غبار و تنش کم‌آبیاری مقدار اسید میرستیک افزایش یافت ولی تغییری در مقدار اسید پالمتیک و اسید استئاریک ایجاد نشد (شکل ۳). اسید پالمیتیک، اسید استاریک و اسید میریستیک به‌عنوان اسیدهای چرب اشباع گروه‌بندی می‌شوند (Kostik et al., 2013). محتوا و عملکرد روغن، به‌عنوان ویژگی‌های بنیادی دانه‌های روغنی، همواره تحت تأثیر برهمکنش پارامترهای محیطی و مدیریت کشاورزی قرار دارند (Brock et al., 2020; Shiranirad et al., 2023). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که وقتی گیاهان کاملینا به‌طور کامل آبیاری می‌شوند، محتوا و عملکرد روغن در بیشینه مقدار باقی می‌ماند، در حالی که تنش‌های خشکی باعث کاهش محتوای روغن و عملکرد آن می‌شوند. Singh and Sinha, (2005) گزارش کردند که کاهش محتوای روغن در گیاهان دچار خشکی ممکن است به‌دلیل اکسیداسیون اسیدهای چرب غیراشباع باشد. نتایج مشابه توسط Shiranirad et al. (2023) نیز گزارش شد که محتوای روغن و عملکرد کاملینا در شرایط محدودیت آبیاری (در مراحل تشکیل غلاف، گل‌دهی و بیشینه طول ساقه) نسبت به شرایط آبیاری کامل کمتر بود. کاهش محتوای روغن در دانه کاملینا توسط Neupane et al. (2019) نیز گزارش شده است.

ترکیب اسیدهای چرب در روغن دانه به‌شدت تحت تأثیر عوامل محیطی و شیوه‌های کشاورزی قرار دارد (Menard et al., 2017; Mokhtassi-Bidgoli., et al 2022). ، محتوای اسیدهای چرب اشباع مانند اسید پالمیتیک، اسید استئاریک و اسید آراشیدیک تحت تنش خشکی تمایل به افزایش داشت، در حالی که کاربرد سیلیکات پتاسیم باعث کاهش جزئی محتوای اسیدهای چرب اشباع شد. برعکس، محتوای اسیدهای چرب غیراشباع با پیوند چندگانه مانند اسید اروسیک، اسید لینولئیک و اسید لینولنیک، پاسخ معکوسی به تنش خشکی و تیمار سیلیکات پتاسیم نشان دادند.

پژوهش‌های پیشین بر روی کلزا و سیاه‌دانه نیز نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش اسیدهای اولئیک و لینولئیک می‌شود و گاهی اسید لینولنیک افزایش می‌یابد (Enjalbert et al., 2013). افزایش محتوای اسیدهای چرب اشباع تحت شرایط آبیاری محدود در گیاهانی مانند کلزا، سیاه‌دانه و کاملینا گزارش شده است. افزایش اسیدهای چرب اشباع در گیاهان دچار خشکی عمدتاً به‌دلیل افزایش اسیدهای پالمیتیک، استئاریک، آراشیدیک و بهنیک است، در حالی که کاهش اسیدهای چرب اشباع ناشی از کاهش اسیدهای لینولئیک و لینولنیک است. با افزایش شدت تنش آبی، میزان تنفس گیاه افزایش می‌یابد و به این ترتیب، انرژی پایه گیاه از ذخایر چربی گیاه کاهش می‌یابد و در نتیجه اسیدهای چرب کاهش می‌یابند (Sibi et al., 2011).

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که باکتری‌های محرک رشد گیاه (*Bacillus halotolerans* و *B. Amyloliquefaciens*) می‌توانند آثار متفاوتی تحت تنش‌های آبی و گرد و غبار بر ترکیب اسیدهای چرب گیاه کاملینا داشته باشند. بررسی‌ها نشان داد که *B. halotolerans* به‌طور ویژه مقدار اسید پالمتیک و اسید میریستولئیک را در شرایط کم‌آبیاری و گرد و غبار افزایش داد، در حالی که *B. amyloliquefaciens* در برخی شرایط سبب افزایش اسید اولئیک و اسید میریستولئیک شد. همچنین، هر دو باکتری توانستند مقدار اسید لینولئیک و هموگاما–لینولنیت را در شرایط کم‌تنش افزایش دهند، در حالی که تحت اعمال گرد و غبار، تغییرات متفاوتی در اسیدهای چرب مشاهده شد. کاهش قابل‌توجه اسید آلفا–لینولنیک تحت تأثیر کم‌آبیاری و گرد و غبار بیانگر حساسیت این اسید به شرایط تنش محیطی است. یافته‌ها نشان می‌دهد که برهمکنش میان نوع باکتری، شدت تنش آبی و حضور گرد و غبار می‌تواند نقش کلیدی در تنظیم ترکیب اسیدهای چرب داشته باشد و استفاده همزمان از باکتری‌های

محرک رشد گیاه می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش آثار منفی تنش‌های محیطی بر کیفیت روغن و عملکرد کاملینا باشد. Borzoo et al. (2023) تأثیر تنش کم‌آبی در سه سطح آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰٪ گنجایش مزرعه‌ای) و در حضور باکتری محرک رشد *Micrococcus yunnanensis* در مرحله زایشی را بر بیوشیمی بذر کاملینا بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از باکتری محرک رشد گیاه باعث افزایش محتوای پروتئین در رطوبت خاک ۵۰٪ گنجایش مزرعه‌ای شد. به‌طور کلی، تنش کم‌آبی و باکتری‌های محرک رشد گیاه تأثیر قابل‌توجهی بر جابجایی مواد مغذی از خاک به بذر در حال رشد داشتند. مشابه نتایج پژوهش حاضر، آنها نشان دادند که در حضور باکتری‌های محرک رشد افزایش در اجزای اصلی اسیدهای چرب غیراشباع با چند پیوند دوگانه شامل اسید لینولئیک افزایش معنی‌دار در اسید اولئیک به‌عنوان یک اسید چرب غیراشباع با یک پیوند دوگانه مشاهده شد. همچنین تغییر در یکی دیگر از اجزای اصلی یعنی اسید گادولئیک تحت تنش کم‌آبی و یا تلقیح با باکتری محرک رشد مشاهده شد. مشابه این پژوهش آن‌ها پاسخ‌های متفاوتی در غلظت اسیدهای چرب در تلقیح با باکتری بدست آوردند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه باعث افزایش برخی از اسیدهای چرب مانند اسید لینولئیک، اسید آلفا-لینولنیک، اسید اولیک، اسید پالمتیک و اسید استاریک و کاهش برخی دیگر مانند اسید پالمیتولیک و اسید میریستولیک شد ولی در سایر اسیدهای چرب تغییر ایجاد نکرد. نتایج همچنین نشان داد که باکتری *B. amyloliquefaciens* در شرایط گرد و غبار و آبیاری ۴ روزه، شاخص نسبت هیپوکلسترولمی به هیپرکلسترلمی را افزایش داد. این موضوع نشان داد که این باکتری شاخص تغذیه‌ای روغن کاملینا را افزایش داد.

نتیجه‌گیری

گرد و غبار و کم آبیاری تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد گیاه کاملینا داشت به‌طوری که باعث کاهش وزن بذر و تغییر در محتوای روغن آن شد. گرد و غبار و کم‌آبیاری تغییری در شاخص کیفیت تغذیه‌ای (نسبت هیپوکلسترولمی به هیپرکلسترلمی) روغن کاملینا ایجاد نکرد. کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه باعث افزایش برخی از اسیدهای چرب مانند اسید لینولئیک، اسید آلفا-لینولنیک، اسید اولیک، اسید پالمتیک و اسید استاریک و کاهش برخی دیگر مانند اسید پالمیتولیک و اسید میریستولیک شد ولی در سایر اسیدهای چرب تغییر ایجاد نکرد. کاربرد باکتری *B. amyloliquefaciens* نسبت هیپوکلسترولمی به هیپرکلسترلمی را افزایش داد که نشان‌دهنده افزایش کیفیت روغن است. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت تنش‌های محیطی و کاربرد ریزجانداران مفید در کشاورزی پایدار مناطق خشک و نیمه‌خشک تأکید می‌کند.

تشکر و سپاسگزاری

در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورداستفاده

References

1. Azhand, M., Saeidi, M., Beheshti Al-Agha, A., Kahrizi, D., 2023. Interaction of iron and zinc fortification and late-season water deficit on yield and fatty acid composition of dragon's head (*Lallemantia iberica* L.). Plant Physiol. Biochem. 201, 107882. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107882.
2. Azhand, M., Saeidi, M., Rezadoost, H., Beheshti-Al Agha, A., Kahrizi, D., 2025. Agro-physiological traits and fatty acids composition of camelina: Effects of late season water deficit and iron and zinc biofortification. J. Soil Sci. Plant Nutr. 25(1), 227–246. https://doi.org/10.1007/s42729-024-02129-6.
3. Berti, M., Gesch, R., Eynck, C., Anderson, J., Cermak, S., 2016. Camelina uses, genetics, genomics, production, and

management. Ind. Crops Prod. 94, 690–710. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.034.
4. Bisht, N., Singh, T., Ansari, M.M., Joshi, H., Mishra, S.K., Chauhan, P.S., 2025. Plant growth-promoting *B. amyloliquefaciens* orchestrate homeostasis under nutrient deficiency exacerbated drought and salinity stress in *Oryza sativa* L. seedlings. Planta 261(1), 8. https://doi.org/10.1007/s00425-024-04585-x.
5. Bistgani, Z.E., Siadat, S.A., Bakhshandeh, A., Pirbalouti, A.G., Hashemi, M., 2017. Interactive effects of drought stress and chitosan application on physiological characteristics and essential oil yield of *Thymus daenensis* Celak. Crop J. 5(5), 407–415. https://doi.org/10.1016/j.cj. 2017.04.003.
6. Borzoo, S., Mohsenzadeh, S., Kahrizi, D., 2023. Influences of water deficit stress and symbiosis with growth-promoting bacteria on seed biochemistry of *Camelina sativa*. Asian Plant Res. J. 11(5), 1–10. https://doi.org/10.9734/aprj/2023/v11i5220.
7. Borzoo, S., Mohsenzadeh, S., Moradshahi, A., Kahrizi, D., Zamani, H., Zarei, M., 2021. Characterization of physiological responses and fatty acid compositions of *Camelina sativa* genotypes under water deficit stress and symbiosis with *Micrococcus yunnanensis*. Symbiosis 83(1), 79–90. https://doi.org/10.1007/s13199-020-00733-5.
8. Brock, J. R., Scott, T., Lee, A.Y., Mosyakin, S.L., Olsen, K.M., 2020. Interactions between genetics and environment shape Camelina seed oil composition. BMC Plant Biol. 20(1), 423. https://doi.org/10.1186/s12870-020-02641-8.
9. El Sabagh, A., Hossain, A., Barutcular, C., Gormus, O., Ahmad, Z., Hussain, S., Akdeniz, A., 2019. Effects of drought stress on the quality of major oilseed crops: Implication and possible mitigation strategies – A review. Appl. Ecol. Environ. Res. 17(2), 4019–4043. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1702_40194043.
10. Enjalbert, J.N., Zheng, S., Johnson, J.J., Mullen, J.L., Byrne, P.F., McKay, J.K., 2013. Brassicaceae germplasm diversity for agronomic and seed quality traits under drought stress. Ind. Crops Prod. 47, 176–185. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.02.037.
11. Etesami, H., Glick, B.R., 2020. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and their environmental applications: A review. Appl. Soil Ecol. 156, 103701. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103701.
12. Haghaninia, M., Javanmard, A., Kahrizi, D., Bahadori, M.B., Amani Machiani, M., 2024. Optimizing oil quantity and quality of camelina (*Camelina sativa* L.) with integrative application of chemical, nano and bio-fertilizers under supplementary irrigation and rainfed condition. Plant Stress 11, 100374. https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100374.
13. Haghaninia, M., Javanmard, A., Rasouli, F., Radicetti, E., Memarzadeh Mashhouri, S., 2025. Optimizing camelina performance under drought conditions through the combined action of nanochitosan-encapsulated rosemary oil and arbuscular mycorrhizal fungi. Biocatal. Agric. Biotechnol. 67, 103682. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103682.
14. Hashemi, S., 2023. Effects of drought stress on physiological and biochemical traits of oilseed crops in Iran. Plant Stress Biol. 15(2), 112–125.
15. Hajiabadi, A. A., Arani, A. M., Etesami, H., 2022. Salt-tolerant genotypes and halotolerant rhizobacteria: A potential synergistic alliance to endure high salinity conditions in wheat. Environ. Exp. Bot. 202, 105033. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105033.
16. Kahrisi, D., 2024. The areas under Camelina cultivation. ISNA.
17. Kangani, C.O., Kelley, D.E., DeLany, J.P., 2008. New method for GC/FID and GC–C-IRMS analysis of plasma free fatty acid concentration and isotopic enrichment. J. Chromatogr. B. 873(1), 95–101. https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2008.08.009.
18. Khatun, M., Sarkar, S., Era, F.M., Islam, A. K.M.M., Anwar, M.P., Fahad, S., Datta, R., Islam, A.K.M.A., 2021. Drought stress in grain legumes: Effects, tolerance mechanisms and management. Agron. J. 11(12), 2374. https://doi.org/10.3390/agronomy11122374.
19. Kim, R. J., Kim, H. U., Suh, M.C., 2019. Development of camelina enhanced with drought stress resistance and seed oil production by co-overexpression of MYB96A and DGAT1C. Ind. Crops Prod. 138, 111475. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111475.
20. Kostik, V., Memeti, S., Bauer, B., 2013. Fatty acid composition of edible oils and fats. J. Hyg. Eng. Des. 4, 112–116.
21. Kumar, A., Singh, S., Gaurav, A.K., Srivastava, S., Verma, J.P., 2020. Plant growth-promoting bacteria: Biological tools for the mitigation of salinity stress in plants. Front. Microbiol. 11, 1216. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01216.
22. Maqsood, M.F., Shahbaz, M., Kanwal, S., Kaleem, M., Shah, S.M.R., Luqman, M., Iftikhar, I., Zulfiqar, U., Tariq, A., Naveed, S.A., Inayat, N., 2022. Methionine promotes the growth and yield of wheat under water deficit conditions by regulating the antioxidant enzymes, reactive oxygen species, and ions. Life 12(7), 969. https://doi.org/10.3390/life12070969.
23. Menard, G.N., Moreno, J.M., Bryant, F.M., Munoz-Azcarate, O., Kelly, A.A., Hassani-Pak, K., 2017. Genome wide analysis of fatty acid desaturation and its response to temperature. Plant Physiol. 173(3), 1594–1605. https://doi.org/10.1104/pp.16.01907.
24. Mohamed, H.I., Latif, H.H., 2017. Improvement of drought tolerance of soybean plants by using methyl jasmonate. Physiol. Mol. Biol. Plants. 23(3), 545–556. https://doi.org/10.1007/s12298-017-0451-x.
25. Mokhtassi-Bidgoli, A., AghaAlikhani, M., Eyni-Nargeseh, H., 2022. Effects of nitrogen and water on nutrient uptake,

oil productivity, and composition of *Descurainia sophia*. J. Soil Sci. Plant Nutr. 22(1), 59–70. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00633-7.
26. Mondor, M., Hernández-Álvarez, A.J., 2022. *Camelina sativa* composition, attributes, and applications: A review. Eur. J. Lipid Sci. Technol. 124(3), 2100035. https://doi.org/10.1002/ejlt.202100035.
27. Najafi Zilaie, M., Mosleh Arani, A., Etesami, H., 2023. The importance of plant growth-promoting rhizobacteria to increase air pollution tolerance index (APTI) in the plants of green belt to control dust hazards. Front. Plant Sci. 14, 1098368. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1098368.
28. Najafi Zilaie, M., Mosleh Arani, A., Etesami, H., Dinarvand, M., 2022. Halotolerant rhizobacteria enhance the tolerance of the desert halophyte *Nitraria schoberi* to salinity and dust pollution by improving its physiological and nutritional status. Appl. Soil Ecol. 179, 104578. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104578.
29. Najib, R., Houri, T., Khairallah, Y., Khalil, M., 2022. Effect of dust accumulation on *Quercus cerris* L. leaves in the Ezer forest, Lebanon. iForest - Biogeosc. 15(4), 322-330. https://doi.org/10.3832/ifor3959-015.
30. Nayeri, F.D., Yarizade, K., 2014. Bioinformatics study of delta-12 fatty acid desaturase 2 (FAD2) gene in oilseeds. Mol. Biol. Rep. 41(8), 5077–5087. https://doi.org/10.1007/s11033-014-3373-5.
31. Nazim, M., Ali, M., Li, X., Anjum, S., Ahmad, F., Zulfiqar, U., Shahzad, K., Soufan, W., 2023. Unraveling the synergistic effects of microbes and selenium in alleviating drought stress in *Camelina sativa* L. Plant Stress 9, 100193. https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100193.
32. Neupane, D., Solomon, J.K., Mclennon, E., Davison, J., Lawry, T., 2019. Sowing date and sowing method influence on camelina cultivars grain yield, oil concentration, and biodiesel production. Food Energy Secur. 8(3), e00166. https://doi.org/10.1002/fes3.166.
33. Piravi-vanak, Z., Azadmard-Damirchi, S., Kahrizi, D., Mooraki, N., Ercisli, S., Savage, G.P., Ahmadvandi, H.R., Martinez, F., 2022. Physicochemical properties of oil extracted from camelina (*Camelina sativa*) seeds as a new source of vegetable oil in different regions of Iran. J. Mol. Liq. 345, 117043. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117043.
34. Randhawa, M.S., Maqsood, M., Shehzad, M.A., Chattha, M.U., Chattha, M.B., Nawaz, F., Yasin, S., Abbas, T., Nawaz, M.M., Khan, R.D., Zulfiqar, U., 2017. Light interception, radiation use efficiency and biomass accumulation response of maize to integrated nutrient management under drought stress conditions. Turk. J. Field Crops. 22(1), 134–142.
35. Ranjbar Fordoeil, A., Heydarnezhad, S., 2018. Impact of aeolian dust accumulation on some biochemical parameters of cow-tail shrubs (*Smirnovia iranica*) leaves in the desert regions of Kashan, Iran. Second International Dust International Conference, April 25–27, Ilam, Iran. https://civilica.com/doc/936104.
36. Ratusk, K., Symoniuk, E., Wroniak, M. Rudzinska, M., 2018. Bioactive compounds, nutritional quality and oxidative stability of cold-pressed (*Camelina sativa* L.) oils. Appl. Sci. 8 (12), 2606. https://doi.org/10.3390/app8122606.
37. Sheteiwy, M.S., Abd Elgawad, H., Xiong, Y.C., Macovei, A., Brestic, M., Skalicky, M., Shaghaleh, H., Alhaj Hamoud, Y., El-Sawah, A.M., 2021 Inoculation with *Bacillus amyloliquefaciens* and mycorrhiza confers tolerance to drought stress and improve seed yield and quality of soybean plant. Physiol. Plant. 172(4), 2153–2169. https://doi.org/10.1111/ppl.13454.
38. Shirani Rad, A.H., Eyni Nargeseh, H., 2025. Effect of application of zeolite on seed yield and oil quality of camelina (*Camelina sativa* L.) under drought stress conditions. Iran. J. Crop Sci. 26(3), 285–298. (In Persian with English abstract)
39. Shirani Rad, A.H., Malmir, M., Eyni-Nargeseh, H., 2024. The harmful effects of drought stress on the camelina oil content and fatty acid composition can be alleviated by using potassium silicate. Irrig. Drain. 74(3), 1296–1310. https://doi.org/10.1002/ird.3054.
40. Shiranirad, S., Eyni-Nargeseh, H., Shirani Rad, A.H., Malmir, M., 2023. Managing irrigation and sowing date can improve oil content and fatty acid composition of *Camelina sativa* L. Arch. Agron. Soil Sci. 69(14), 2847–2861. https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2177989.
41. Sibi, M., Mirzakhani, M., Gomarian, M., 2011. Effect of water stress, taking zeolite and salicylic acid on yield and yield components of spring safflower. New Find Agri. 3, 275–290. (In Persian with English abstract)
42. Sohrabi, Y., Heidari, G., Weisany, W., Golezani, K.G., Mohammadi, K., 2012. Changes of antioxidative enzymes, lipid peroxidation and chlorophyll content in chickpea types colonized by different Glomus species under drought stress. Symbiosis 56(1), 5–18. https://doi.org/10.1007/s13199-012-0152-8.
43. Tanveer, Y., Yasmin, H., Nosheen, A., Farah, M. A., Altaf, M.A., 2024. Synergizing *Bacillus halotolerans*, *Pseudomonas sihuiensis* and *Bacillus atrophaeus* with folic acid for enhanced drought resistance in wheat by metabolites and antioxidants. BMC Plant Biol. 24(1), 1003. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05609-0.
44. Upchurch, R.G., 2008. Fatty acid unsaturation, mobilization, and regulation in the response of plants to stress. Biotechnol. Lett. 30(6), 967–977. https://doi.org/10.1007/s10529-008-9639-z.
45. Veljković, V.B., Kostić, M.D., Stamenković, O.S., 2022. Camelina seed harvesting, storing, pretreating, and processing to recover oil: A review. Ind. Crops Prod. 178, 114539. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114539.
46. Waraich, E.A., Ahmad, R., Ahmad, R., Ahmed, Z., Ahmad, Z., Barutcular, C., Erman, M., Cig, F., Saneoka, H.,

Öztürk, F., 2020. Comparative study of growth, physiology and yield attributes of camelina (*Camelina sativa* L.) and canola (*Brassica napus* L.) under different irrigation regimes. Pak. J. Bot. 52(5), 1537–1544. http://dx.doi.org/10.30848/PJB2020-5(2).
47. Wood, J.D., Richardson, G.R., Fisher, A.V., 2004. Effects of fatty acids on meat quality: a review. Meat Sci. 66(1), 21–32. https://doi.org/10.1016/S0309-1740(03)00022-6.
48. Wu, X., Fan, Y., Wang, R., Zhao, Q., Ali, Q., Wu, H., Gu, Q., Borriss, R., Xie, Y., Gao, X., 2022. *B. halotolerans* KKD1induces physiological, metabolic and molecular reprogramming in wheat under saline condition. Front. Plant Sci. 13, 978066. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.978066.
49. Yadav, T., Kumar, A., Yadav, R.K., Yadav, G., Kumar, R., Kushwaha, M., 2020. Salicylic acid and thioureamitigate the salinity and drought stress on physiological traits governing yield in pearl millet-wheat. Saudi J. Biol. Sci. 27(8), 2010–2017. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.06.030.
50. Yang, X., Xie, Y., Qiao, Y., Chang, F., Wang, T., Li, J., Wu, L., Li, C., Gao, Y., 2024. Drought stress tolerance and metabolomics of *Medicago sativa* induced by *B. amyloliquefaciens* DGL1. Front. Plant Sci. 15, 1378707. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1378707.
51. Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., Chen, S., 2021. Response mechanism of plants to drought stress. Horticulturae 7(3), 50. https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050.
52. You, J., Zhang, Y., Liu, A., Li, D., Wang, X., Dossa, K., Zhou, R., Yu, J., Zhang, Y., Wang, L., Zhang, X., 2019. Transcriptomic and metabolomics profiling of drought-tolerant and susceptible sesame genotypes in response to drought stress. BMC Plant Biol. 19(1), 267. https://doi.org/10.1186/s12870-019-1880-1.
53. Yuan, L., Li, R., 2020. Metabolic engineering a model oilseed *Camelina sativa* for the sustainable production of high-value designed oils. Front Plant Sci. 11, 11. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00011.
54. Załuski, D., Tworkowski, J., Krzyżaniak, M., Stolarski, M.J., Kwiatkowski, J., 2020. The characterization of 10 spring Camelina genotypes grown in environmental conditions in north-eastern Poland. Agronomy 10(1), 64. https://doi.org/10.3390/agronomy10010064.