

The effect of plant growth stimulating bacteria (*Bacillus amyloliquefaciens*) and (*Bacillus halotolerans*) on yield and fatty acids of camellia seeds under drought and dust stress

Hamid Golaraei¹, Asghar Mosleh Arani^{2*}, Hassan Etesami³ and Reza Dehghani Bidgoli⁴

1. Department of Arid Land and Desert Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran

2. Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd, Iran.

3. Department of Soil Science, University of Tehran, Karaj, Iran

4. Department of Nature Engineering, University of Kashan, Iran

* Corresponding author, Email: amosleh@yazd.ac.ir

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

Results: The results showed that low irrigation and dust significantly reduced seed weight, dry weight of aerial organs and roots, and oil content. Also, the profile of fatty acids changed under the influence of drought and dust stress, so that the amount of myristoleic acid, alpha-linolenic acid, and eicosatrienoic acid decreased in 33,21 and 28 percent respectively. The results of this research showed that the use of plant growth stimulating bacteria increased some fatty acids such as linoleic acid, alpha-linolenic acid and oleic acid, palmitic and stearic and decreased others such as palmitoleic and myristoleic and did not cause any change in other fatty acids. In total, the inoculation of the mentioned bacteria reduced the negative effects of stress; So that the growth of roots and aerial organs increased, the oil content was maintained and the ratio of monounsaturated and polyunsaturated fatty acids improved.

Conclusion: It was concluded that use of *B. amyloliquefaciens* and *B. halotolerans* is recommended 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.

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

حمید گل‌آرایی^۱، اصغر مصلح‌آرانی^{۲*}، حسن اعتصامی^۳ و رضا دهقانی بیدگلی^۴

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

۲- گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد

۳- گروه علوم خاک، دانشگاه تهران

۴- مهندسی طبیعت، دانشگاه کاشان

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

چکیده

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

روش‌ها: یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با تیمارهای مختلف در شرایط مزرعه انجام شد. تیمارهای این مطالعه شامل: باکتری‌های محرک رشد گیاه (در سه سطح شامل شاهد، تلقیح انفرادی با *B. amyloliquefaciens* و تلقیح با *B. halotolerans*)، سطوح مختلف آبیاری (در دو سطح با دوره‌های آبیاری ۴ و ۸ روز) و غبار (در دو سطح بدون غبار و با 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 از روش استخراج سیال فوق بحرانی استفاده شد.

نتایج: نتایج نشان داد که کم‌آبیاری و گرد و غبار به‌طور معنی‌داری وزن دانه و محتوای روغن را کاهش داد. پروفایل اسیدهای چرب نیز تحت تاثیر تنش خشکی و گرد و غبار تغییر یافت، بطوریکه مقدار اسید میریستولئیک، اسید آلفا لینولنیک و هموگاما-لینولنیک به ترتیب 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 پالمیتیک و اسید استاریک و کاهش برخی دیگر مانند اسید پالمیتولیک و اسید میریستولیک شد و در سایر اسیدهای چرب تغییری ایجاد نکرد. در مجموع تلقیح باکتری‌های مذکور اثرات منفی تنش‌ها را کاهش داد؛ به‌طوری که محتوای روغن حفظ و نسبت اسیدهای چرب غیر اشباع با یک یا چند پیوند دوگانه بهبود یافت.

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

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

۱- مقدمه

به دلیل 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). کاملینا (*Camelina sativa* (L.) Crantz) از خانواده شب‌بو یک منبع جدید روغن می باشد که اخیراً در صنعت استخراج روغن مورد توجه قرار گرفته است. کاملینا گیاهی با قابلیت سازگاری بالا و در انواع خاک‌ها و اقلیم‌ها رشد می‌کند. که کشت آن از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و نسبت به سایر دانه‌های روغنی نیاز کمتری به آب، کود و سم دارد (Piravi-vanak et al., 2022). علاوه بر این، دارای دوره رشد کوتاه (۸۰-۱۰۰ روز)، قابلیت تناوب با غلات ریزدانه، نیازهای کشت ساده و تحمل بالا به شرایط نامساعد است. که آن را به گزینه‌ای جذاب برای کشاورزان تبدیل می‌کند (Veljković et al., 2022). در دهه‌های اخیر گیاه کاملینا به علت نیاز کم به مواد مغذی، دوره رشد کوتاه مدت، حفظ مواد مغذی، مقاومت بالا در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی و ویژگی‌های کیفی بذر مورد توجه بوده است.

به طور متوسط، دانه‌های کاملینا حاوی ۵٪ اسید چرب امگا-۳، ۲۴-۳۱٪ پروتئین، دارای ویتامین E زیاد (۲۵.۸-۲۸.۲ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم) و منبع قوی آنتی‌اکسیدان و ۳۰-۴۵٪ 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 کاملینا دارای مقادیر بالایی از اسیدهای چرب غیر اشباع مانند اولئیک (۱۴-۱۶٪)، لینولئیک (۱۵-۲۳٪)، لینولنیک (۳۱-۴۰٪) و ایکوزانوئیک (۱۲-۱۵٪) می‌باشد (Yuan & Li, 2020) که کیفیت روغن آن را نسبت به سایر دانه‌های روغنی افزایش می‌دهد (Kim et al., 2019). سطح بالای اسیدهای چرب غیر اشباع، ارزش تجاری کاملینا را در صنایع مختلفی از جمله خوراک دام، تولید سوخت زیستی،

داروسازی افزایش داده است (Załuski et al., 2020). علاوه بر این، روغن کاملینا دارای مقادیر بالایی توکوفرول است که از آن در برابر اکسیداسیون محافظت می‌کند و استفاده از آن را در محصولات غذایی متنوع امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین، به دلیل محتوای بالای پروتئین، دانه‌های کاملینا 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 کاملینا در ایران حدود ۲۵ هزار هکتار بوده که تا حدود ۴۰ هزار هکتار در سال ۱۴۰۴ پیش‌بینی شده است (کهریزی، ۱۴۰۳).

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 کاملینا نیازهای زراعی کمی دارد، عملکرد گیاه بسته به عوامل ژنتیکی، شرایط محیطی و پاسخ به اقدامات کشاورزی 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 کاملینا محسوب می‌شود. اقلیم خشک و نیمه‌خشک منجر به اتلاف بالای آب در طول آبیاری می‌شود (Randhawa et al., 2017). آب نقش مهمی در شکل‌دهی فعالیت‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی 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. گزارشات فراوان نشان می‌دهد که شدت تنش، مدت زمان اعمال خشکی و زمان وقوع آن می‌تواند بر صفات کمی 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 بخش‌های هوایی است (Yang et al., 2021). تنش خشکی با کاهش هدایت روزنه‌ای، جریان آب از ریشه به بخش‌های هوایی 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 قابل‌توجهی کیفیت و کمیت عملکرد محصول را کاهش می‌دهد. تنش کم‌آبی باعث کاهش معنی‌دار عملکرد دانه و روغن به ترتیب 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 می‌بخشد. گردوغبار می‌تواند سطح برگ‌ها را بپوشاند، روزنه‌ها را مسدود کند، انتقال نور را کاهش دهد و تبادلات گازی را محدود سازد که این امر باعث تشدید تنش خشکی می‌شود (Najafi Zilaie et al., 2023). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تنش ترکیبی خشکی و گردوغبار تأثیر منفی بیشتری بر صفات فیزیولوژیکی مانند کلروفیل، ظرفیت فتوسنتز II و افزایش پراکسیداسیون لیپیدها در اغلب گیاهان می‌شود (Najafi

Zilaie et al., 2022). تلاش‌های زیادی در زمینه توسعه راهکارهای پایدار برای افزایش مقاومت گیاهان نسبت به تنش‌های محیطی در حال اجراست. استفاده از روش‌های نوین اصلاح نباتات، اصلاح خاک و فناوری‌های زیستی به یکی از اولویت‌های مهم پژوهشی در سطح جهانی تبدیل شده است. بدلیل اهمیت کاملینا راهکارهای متعددی برای افزایش محصول و تحمل گیاه به تنش خشکی انجام شده است. بعنوان 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 بطور گسترده‌ای بکار رفته است (Najafi Zilaie et al., 2023). ریزوسفر گیاه، محل تجمع میکروارگانیسم‌های مفید است، نقش مهمی در حفظ سلامت و افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌ها دارد. باکتری‌های $PGPR$ از گروه‌های مهم میکروارگانیسم‌ها هستند که با تأثیر بر رشد و مقاومت گیاهان، نقش مؤثری در افزایش عملکرد دارند (Etesami and Glick, 2020). این باکتری‌ها از طریق مکانیسم‌های مختلفی مانند تولید هورمون‌های رشد (اکسین، سیتوکینین، جبرلین)، تثبیت نیتروژن، انحلال فسفات، تولید آنزیم ACC دی‌آمیناز جهت کاهش تنش اتیلن، تولید سیدروفورها و افزایش جذب عناصر غذایی، موجب بهبود رشد ریشه و اندام هوایی می‌شوند (Hajiabadi et al., 2022; Kumar et al., 2020). سویه‌های *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* به دلیل سازگاری با شرایط بیابانی و توانایی تولید اسپور، مقاومت بالا در برابر شرایط نامساعد محیطی و تولید متابولیت‌های ضدباکتری و ضدقارچ، به عنوان باکتری‌های محرک رشد مؤثر شناخته شده‌اند (Yang et al., 2024). تأثیر باکتری *B. amyloliquefaciens* بر روی رشد گیاه یونجه تحت شرایط تنش خشکی بررسی شد. کاربرد این باکتری به طور قابل‌توجهی طول

1. Plant Growth Promoting Rhizobacteria

کل ریشه، قطر متوسط ریشه و محتوای پتاسیم و آهن را در برگ‌ها، ریشه‌ها و خاک 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. به طور کلی، نتیجه گیری شد که *B. amyloliquefaciens* می‌تواند به عنوان 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 مطالعه Bisht و همکاران (۲۰۲۵) و برای باکتری *B. halotolerans* در مطالعات Tanveer و همکاران (۲۰۲۴) نشان داده شده است.

با توجه به خشکسالی‌های سالهای اخیر، شدت و مدت پدیده‌های گردوغبار بشدت افزایش یافته است، بطوریکه گرد و غبار و خشکی با همبستگی بالا، بطور همزمان در مناطق خشک و نیمه خشک بروز کرده و کشاورزی را تحت تاثیر قرار داده است. هیچ تحقیقی که تاثیر توأم خشکی و گرد و غبار را بر روی کاملینا بررسی کرده باشد، وجود ندارد. در این راستا، با توجه به اهمیت دانه های روغنی، این پژوهش با هدف بررسی کارایی و نقش باکتری‌های مقاوم به خشکی *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* بر روی 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 تیمار

در این پژوهش تاثیر سویه‌های *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* بر خصوصیات ترکیبات روغن و عملکرد گونه کاملینا تحت تنش خشکی و گردوغبار به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با تیمارهای مختلف اجرا شد. به این منظور کرت ۱ متر مربعی در مزرعه خواجه شاه منصور در شهرستان آران و بیدگل با موقعیت جغرافیایی UTM ۳۵۶۰ و ۳۷.۷۴۸۷۲ آماده شد. جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل کشت را نشان می‌دهد. تیمارهای این تحقیق شامل فاکتور اول: باکتری محرک رشد گیاه (در سه سطح

شامل شاهد بدون باکتری، تلقیح با باکتری *B. amyloliquefaciens* و تلقیح با باکتری *B. halotolerans*)، فاکتور دوم: سطوح مختلف آبیاری (در دو سطح با دوره آبیاری ۴ و ۸ روزه)، و فاکتور سوم: گرد و غبار (در دو سطح بدون گردوغبار و اعمال گردوغبار) صورت گرفت.

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 منطقه ای کلکسیون قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی ایران تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. 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. بذور سالم کاملینا که از اداره جهاد کشاورزی یزد تهیه شده بود قبل از کشت بمدت دو ساعت در مایه تلقیح قرار گرفت. ۱۶ عدد بذر تلقیح شده در هر کرت با فواصل یکسان کشت و طبق طرح آبیاری گردید.

اعمال سطوح آبیاری

در هر کرت یک متر مربعی تعداد ۱۶ بذر کاشته شد. این تعداد بر اساس تحقیق Shirani Rad و همکاران (۲۰۱۷) که نشان دادند با این تراکم بیشترین محصول کاملینا بدست می‌آید، انتخاب شد. بذرها در فواصل مساوی کشت شدند. آبیاری نهالها بر اساس شرایط اقلیمی منطقه هر ۴ روز یکبار، به عنوان شاهد (مطابق با عرف زارعین محلی) و آبیاری ۸ روزه به عنوان اعمال کم آبیاری شدید اعمال گردید. آبیاری تا زمان استقرار نهالها (یکماه بعد از کاشت) هر ۴ روزه یکبار انجام شد.

اعمال تیمار گرد و غبار

با توجه به منشاء یابی انجام شده و تعیین کانون‌های بحرانی گرد و غبار استان اصفهان - شهرستان آران و بیدگل، برای تهیه گرد

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه (در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی دار ندارند)

Table 1. Physical and chemical properties of farm soil (In each column, numbers with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$)

اسیدیته pH	شوری EC (dS/m)	درصد مواد خنثی شونده TNV (%)	کربن آلی OC (%)	ماده آلی OM (%)	نیتروژن N (%)	پتاسیم K (mg.kg)	فسفر P (mg.kg)
7.7	6	19.4	0.18	0.38	0.02	104	49
درصد اشباع Saturation percentage (v/v%)	ظرفیت زراعی Field capacity (V%)	رطوبت پژمردگی دائم گیاه Permanent Wilting Point of Plant (V%)	آب قابل دسترس گیاه P.A.W (V%)	درصد گوگرد S (%)	درصد سیلیسیم SI (%)	درصد کربن C (%)	بافت Texture
40	20	9	0.5	91.4	4	0.22	Sandy loam

استری سازی آنها طبق پروتوکل مربوطه انجام شد (Kangani et al., 2008).

شاخص کیفیت تغذیه‌ای روغن

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

اولئیک اسید + لینولینیک اسید + لینولئیک اسید) HH=

/(استئاریدونیک اسید + آراشیدونیک اسید

(۱) (میرستیک اسید + پالمیتیک اسید)

محاسبات آماری

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از پارامترهای مختلف اندازه‌گیری شده از نرم افزار SPSS استفاده شد و نمودارها نیز در نرم افزار Excel رسم گردید. پس از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف - اسمیرنوف، اختلاف بین سطوح مختلف تیمارها به صورت آنالیز داده‌ها با آزمون تجزیه واریانس و در نهایت مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن ($\alpha=0.05$) انجام شد.

نتایج

نتایج نشان داد اثر متقابل باکتری، گرد و غبار و آبیاری بجز برای درصد روغن و اسیدهای چرب غیراشباع برای سایر صفات اندازه‌گیری شده معنی دار بود.

و غبار از نمونه خاک کانون گرد و غبار استفاده شد. از آنجایی که اندازه ذرات گرد و غبار اندازه گیری شده در استان اصفهان بین ۱ میکرومتر تا ۱۰۰ میکرومتر می‌باشد، مقداری از نمونه خاک‌های منطقه برداشته و داخل دستگاه الک ریخته شده و از ذرات زیر میکرومتر ۱۰۰ برای اعمال گرد و غبار استفاده شد. بر اساس مطالعه‌ی میدانی انجام‌شده توسط Ranjbar Fordoeil و همکاران (1397) در منطقه‌ی بیابانی کاشان (دشت مرنجاب)، میزان رسوب گرد و غبار ریزشی بر سطح برگ‌های گیاه دم‌گاو (Smirnovia iranica) در بازه‌ی زمانی (آوریل تا ژوئن) مطابق با اواسط فروردین تا اوایل تیر، بین ۰.۵۷ تا ۰.۱۱۳ میلی گرم بر سانتی متر مربع در روز گزارش شده است؛ که معادل ۰.۵۷ تا ۱.۱۳ گرم بر متر مربع در روز می‌باشد. با توجه به این که دوره‌ی اجرای آزمایش حاضر نیز در همین بازه‌ی زمانی انجام شده، مقدار گرد و غبار اعمال‌شده بر پایه‌ی همین مقادیر منطقه‌ای تعیین گردید. بدین منظور مقدار مشخص از گرد و غبار بصورت هفتگی وزن و توسط بلوور دمنده به داخل پلاستیک مکعب شکل (برابر با ابعاد هر کرت) که بدین منظور ساخته شده بود دمیده شد. نمونه برداری از گیاه کاملینا جهت آنالیز عملکرد و ترکیبات روغن دانه پس از رسیدن کامل دانه انجام شد.

استخراج روغن به روش سیال فوق بحرانی (SFE)

برای استخراج روغن از روش استخراج با سیال فوق بحرانی (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 گردید، تا ضمن افزایش راندمان استخراج امکان جداسازی بهتر ترکیبات زیست‌فعال مانند اسیدهای چرب غیراشباع فراهم شود.

متیل استری کردن اسیدهای چرب

جهت فرار شدن اسیدهای چرب و تزریق آنها به دستگاه کروماتوگرافی گازی (مدل CP7489 GC، کمپانی Agilent) متیل

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

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

	Lin لینولئیک	Oleic اولئیک	Pal پالمئیک	Ste استئاریک	Myr میریستیک	Mrysto میریستولئیک	Palm پالمیتولئیک	Alpha آلفالینولئیک	Eic اکاسترونوئیک	Homo هموگاما- لینولئیت	Unsa اسید چرب غیراشباع	Sa اسید چرب اشباع	Fat اسید چرب	هیپوکلسترولمی به هیپرکلسترولمی HH	وزن دانه Seed W
Bacteria (B)	1.4**	31**	.39ns	41**	0.001**	0.002**	1.6**	145**	0.36**	0.002ns	69ns	47**	65ns	0.99ns	4**
Dust (D)	1.8*	108**	0.007ns	178**	0.0002ns	0.002**	4.8**	772**	4**	0.004*	32ns	235**	92ns	3*	0.9**
Irrigation (I)	30**	55**	7**	163**	0.004**	0.005**	4.7**	226**	10**	0.25**	5.6ns	175**	118ns	1.3ns	21**
Block	3.3**	38**	2.3*	2.6**	0.001**	0.003**	0.03*	59**	11**	0.018**	371**	46**	680**	0.26ns	0.01ns
B*D	14**	46**	3.5**	47**	0.002**	0.002**	1.2**	207**	6**	0.04**	2ns	43**	64ns	3.8**	0.19**
B*I	6**	32**	3.4**	47**	0.002**	0.01**	1.2**	245**	1.1**	0.2**	5ns	52**	31ns	3.4**	0.78**
D*I	9**	138**	2.7*	188**	0.002**	0.002**	5.6**	878**	0.8*	0.002ns	148ns	124*	1ns	7**	0.001ns
B*D*I	2*	25**	4.5**	45**	0.002**	0.008**	0.9**	184**	2.5**	0.9**	117ns	62**	39ns	3.5**	0.3**
Error	0.38	0.17	0.49	0.27	0.0003	0.0001	0.008	1.1	0.1	0.001	38	1	44	0.4	0.008

اصلاح نشده

اسید استتاریک

halotolerans در آبیاری ۴ و ۸ روزه باعث افزایش بترتیب ۱۵ و ۱۹ درصدی مقدار اسید میریستیک شد (شکل ۶).

اسید لینولئیک

نتایج نشان داد که باکتری *B. amyloliquefaciens* در شرایط اعمال گرد و غبار در آبیاری ۸ روزه مقدار اسید لینولئیک را کاهش داد (شکل ۷).

هموگاما-لینولنیت

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

اسید اکاسترنوئیک

نتایج نشان داد که در شرایط اعمال گرد و غبار باکتری *halotolerans* در آبیاری ۸ روزه باعث کاهش و باکتری *amyloliquefaciens* باعث افزایش اسید اکاسترنوئیک شد (شکل ۹).

اسید آلفا لینولئیک

نتایج نشان داد که هر دو باکتری *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* مقدار اسید آلفا لینولئیک در شرایط بدون گرد و غبار در دوره آبیاری ۴ روزه به طور معنی داری کاهش داد. (شکل ۱۰).

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 ۱۱).

نتایج نشان داد که باکتری *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* مقدار اسید استتاریک را بترتیب بمقدار 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 باکتری *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* مقدار اسید پالمیتولئیک را بترتیب بمقدار ۸۵ و ۸۴ درصد در شرایط بدون گرد و غبار و آبیاری نرمال (آبیاری ۴ روزه) افزایش دادند (شکل ۲).

اسید پالمیتیک

نتایج نشان داد که باکتری *B. halotolerans* مقدار اسید پالمیتیک را در شرایط گرد و غبار و آبیاری ۸ روزه بمقدار ۲۳ درصد افزایش داد (شکل ۳).

اسید اولئیک

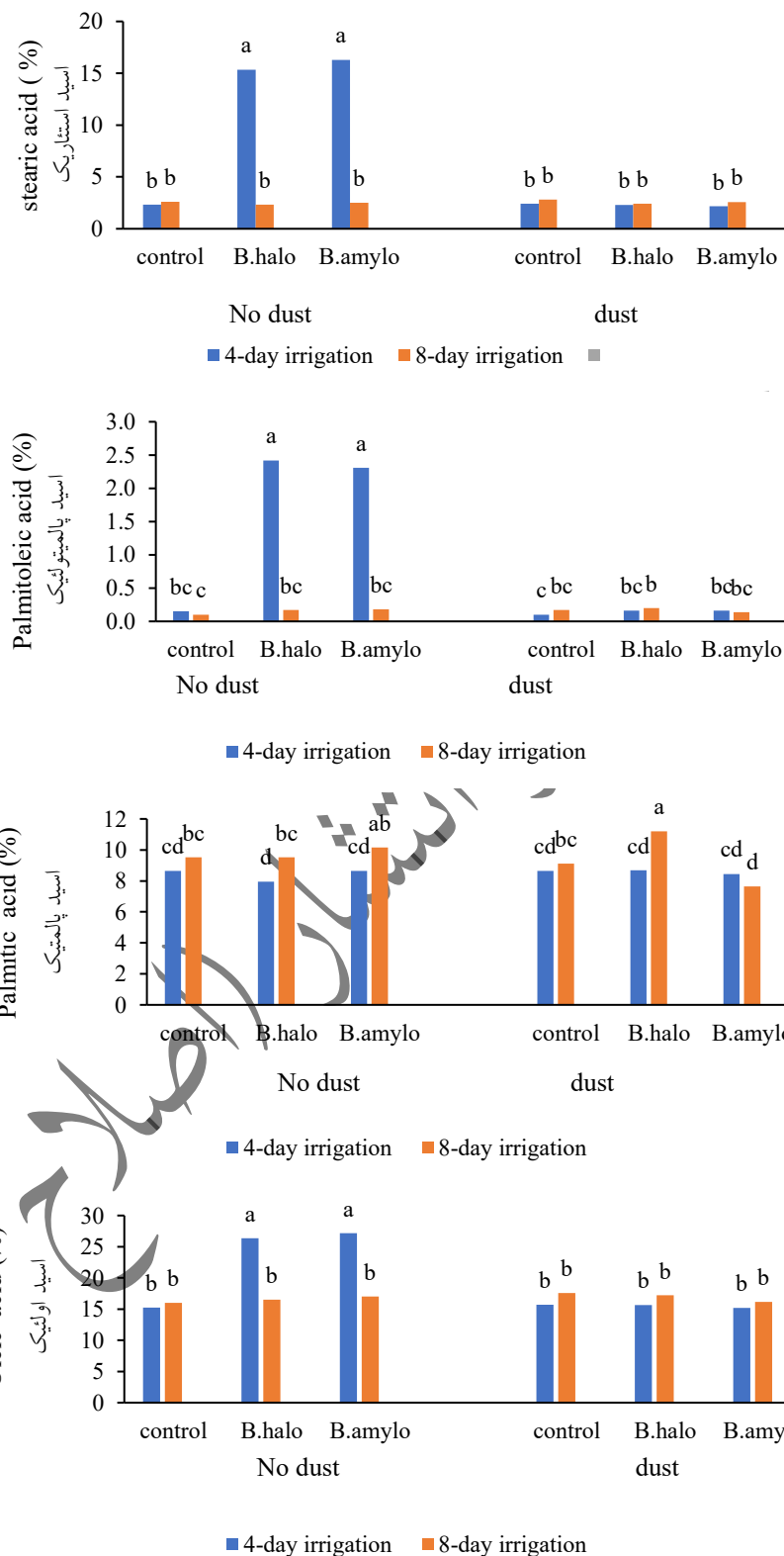
نتایج نشان داد که باکتری *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* مقدار اسید اولئیک را در شرایط بدون گرد و غبار و در آبیاری ۴ روزه بترتیب بمقدار ۴۳ و ۴۴ درصد افزایش دادند (شکل ۴).

اسید میریستولئیک

نتایج نشان داد که باکتری *B. halotolerans* در شرایط اعمال گرد و غبار در کم آبیاری ۸ روزه مقدار اسید میریستولئیک را افزایش داد. این افزایش برای باکتری *B. amyloliquefaciens* در آبیاری ۴ روزه مشاهده شد (شکل ۵).

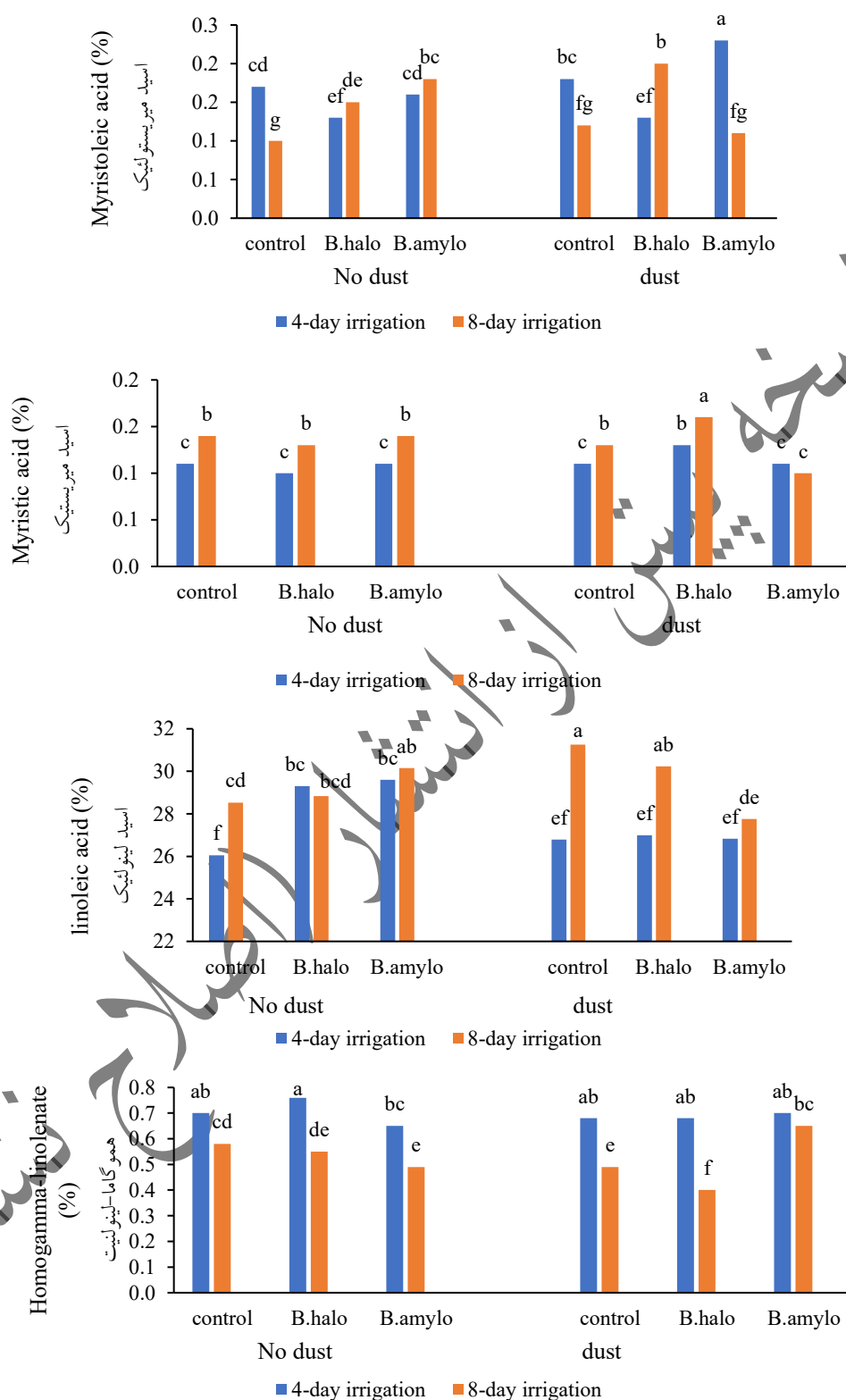
اسید میریستیک

نتایج نشان داد که در شرایط اعمال گرد و غبار باکتری *B.*



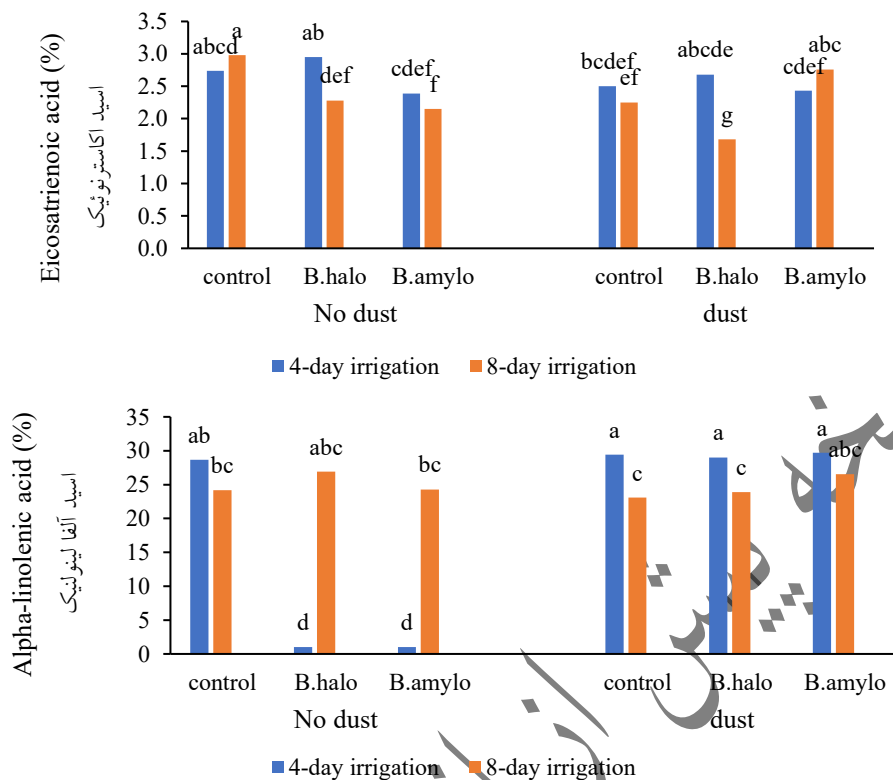
شکل ۱. اثر متقابل باکتری، گرد و غبار و دوره آبیاری بر مقدار اسید استئاریک، اسید پالمیتوئیک، اسید پالمیتیک، اسید اولئیک در بذر کاملینا. ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی دار ندارند.

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



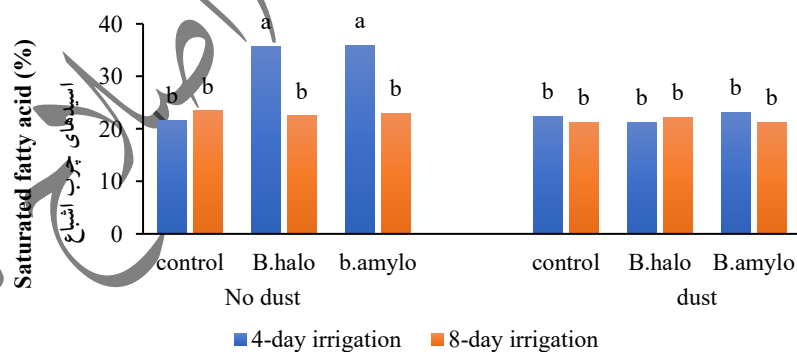
شکل ۲. اثر متقابل باکتری، گرد و غبار و دوره آبیاری بر مقدار میریستولئیک، میریستیک اسید، اسید لینولئیک، هموگاما-لینولئیک، در بذر کاملینا. ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی دار ندارند.

Fig. 2. Interaction 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 متقابل باکتری، گرد و غبار و دوره آبیاری بر مقدار اسید اکاسترنوئیک، اسید آلفا لینولنیک در بذر کاملینا. ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی دار ندارند.

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

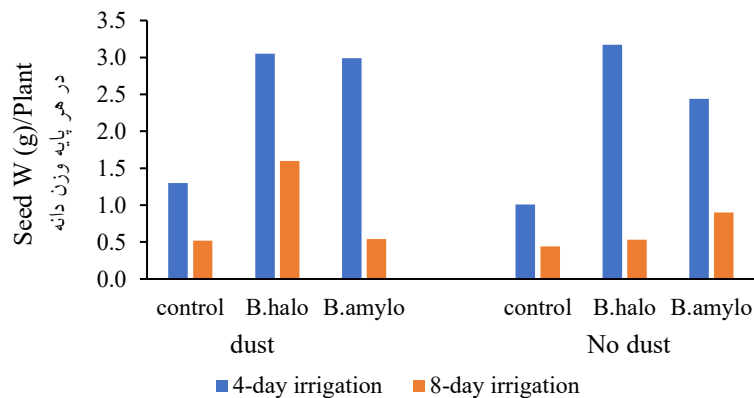


شکل ۴. اثر متقابل باکتری، گرد و غبار و دوره آبیاری بر مقدار اسیدهای چرب اشباع در کاملینا. ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی دار ندارند.

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, $p < 0.05$).

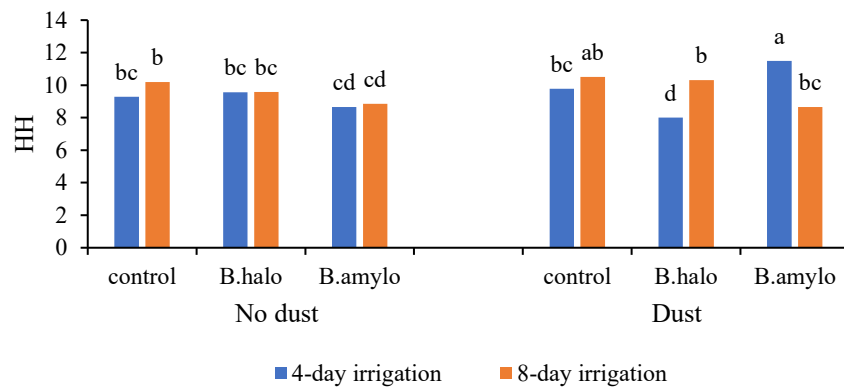
وزن دانه در هر پایه

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



شکل ۵. اثر متقابل 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 اختلاف معنی دار ندارند.

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



شکل ۶. اثر متقابل 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 اختلاف معنی دار ندارند.

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

بحث

شرایط اعمال گرد و غبار در آبیاری ۸ روزه نیز وزن دانه را به مقدار ۴۸ درصد افزایش داد (شکل ۱۲)

شاخص‌ها نسبت هیپوکلیسترومی به هیپرکلیسترومی (HH)

نتایج نشان داد که باکتری *B. amyloliquefaciens* در شرایط گرد و غبار در آبیاری ۴ روزه شاخص‌ها نسبت هیپوکلیسترومی به هیپرکلیسترومی را افزایش درحالی که *B. halotolerans* این شاخص را کاهش داد (شکل ۱۳)

نتایج این تحقیق نشان داد که وزن بذر شدیداً تحت تاثیر خشکی و گرد و غبار قرار گرفت و مقدار آن به طور معنی داری کاهش یافت. حساس ترین مرحله رشد و نمو کاملینا، مرحله گلدهی است که به شدت نسبت به خشکی حساس است. کمبود آب در این مرحله باعث کاهش قابل توجه تعداد گل، خوشه و دانه می شود؛ کم آبیاری باعث می شود گلدهی کند، و به دلیل دمای بالای محیط، گیاهان سریع تر به نیازهای حرارتی خود برسند و

بنابراین، مرحله گلدهی کوتاه‌تر می‌شود 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 اقدامات جبرانی، نمی‌تواند این 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; Haghani et al., 2024; Haghani et al., 2025; Shirani Rad et al., 2024). Borzoo و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای 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. در مطالعات Haghani et al. (۲۰۲۵) در گیاه کاملینا نشان داد که تنش خشکی به‌ویژه زمانی که از گلدهی آغاز می‌شود، به‌طور قابل توجهی 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 طریق تولید ایندول-۳-استیک اسید، سایتوکینین‌ها و جیبرلین‌ها موجب افزایش توسعه ریشه، طویل شدن سلول‌ها، افزایش سطح برگ و رشد کل گیاه می‌شود. این هورمون‌ها در مراحل مختلف نمو گیاه به‌ویژه در دوره‌های تنش‌زا مانند خشکی یا کم‌غذایی نقش کلیدی ایفا می‌کنند (Sheteiwy et al. 2021). نتایج مشابه افزایش عملکرد در تلقیح *B. amyloliquefaciens* در گیاه سویا تحت تنش خشکی (Sheteiwy et al., 2021) بدست آمد. این باکتری با تعدیل سنتز فیتوهورمون‌ها و تنظیم تعادل اسمزی، هموستاز یونی و بیان ژن، از رشد گیاه محافظت می‌کند. *B. halotolerans* نیز مشابه سویه قبلی، در گیاه گندم (Wu et al., 2022) مقدار عملکرد را افزایش داد. نتایج این تحقیق نشان داد که روغن استخراج شده از دانه

کاملینا از نظر اسیدهای چرب غیر اشباع بسیار غنی بوده و مقدار آن به حداکثر ۷۳.۸۶ درصد رسید. گزارش مشابه توسط Haghani et al. (۲۰۲۴) و همکاران (۲۰۲۴) بدست آمد که نشان دادند ترکیبات اصلی روغن کاملینا شامل اسیدهای چرب اشباع مانند پالمیتیک و استئاریک و اسیدهای چرب غیر اشباع شامل اولئیک، لینولئیک، لینولنیک و ایکوزنئیک بودند. گزارش Piravi-vanak و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که اسید لینولنیک (۲۹.۹۶-۳۲.۷۳٪)، اسید لینولئیک (۱۸.۱۸-۱۸.۵۲٪)، اولئیک (۱۹.۷۷-۲۰.۴۷٪) و ایکوزنئیک (۱۱.۵۱-۱۳.۰۶٪)، پالمیتیک (۶.۰۵-۶.۳۰٪)، استئاریک (۳.۲۷-۳.۴۲٪) و اروسیک (۱.۵۲-۲.۳۳٪) در روغن گیاه کاملینا اندازه‌گیری شد. گزارش Borzoo و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که بالاترین نسبت اسیدهای چرب با اسیدهای چرب غیر اشباع با چند پیوند دوگانه، به‌ویژه اسید لینولنیک در روغن گیاه کاملینا، رابطه معنی‌داری دارد. این نتایج نسبت بالای اسیدهای چرب غیر اشباع به اسیدهای چرب اشباع شده (Khali et al., 2017d) را در روغن کاملینا نشان می‌دهند که طبق گفته Wood و همکاران (2003)، معیار تعیین‌کننده‌ای برای ارزیابی کیفیت تغذیه‌ای روغن‌های غذایی است.

نتایج این تحقیق نشان داد مقدار اسید لینولئیک تحت تنش گرد و غبار و تنش کم آبیاری به‌طور معنی‌داری افزایش، ولی مقدار اسید میریستولئیک، آلفا لینولئیک، هموگاما-لینولنیت و اکاسترنوئیک کاهش یافت. اسید اولئیک، اسید لینولئیک، میریستولئیک و اسید لینولنیک به‌عنوان اسیدهای چرب غیر اشباع طبقه‌بندی 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 مکانیزم‌های اساسی مقاومت گیاه در برابر کم‌آبی، تغییر ساختار و سیالیت غشا و بازسازی محتوای روغن و پروفایل اسیدهای چرب است. (Mohamed & 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. (Borzo et al., 2023). افزایش اسیدهای چرب غیراشباع (لینولئیک) ممکن است به دلیل فعال شدن آنزیم لیپاز و ایجاد سیالیت بیشتر غشا برای سازگاری با کم آبی باشد (Upchurch, 2008). آنزیم‌های غیر اشباع‌کننده فعال در سنتز اسیدهای چرب غیراشباع تحت تنش‌های زیستی و غیرزیستی پایدار هستند (Nayeri & Yarizade, 2014).

نتایج همچنین نشان داد که تحت تنش گرد و غبار و تنش کم آبیاری مقدار اسید میرستیک افزایش و تغییری در مقدار اسید پالمیتیک، استتاریک ایجاد نشد. اسید پالمیتیک، استتاریک و میرستیک به عنوان اسید چرب اشباع طبقه‌بندی می‌شوند (Kostik et al., 2013). محتوا و عملکرد روغن، به عنوان ویژگی‌های بنیادی دانه‌های روغنی، همواره تحت تأثیر تعامل پارامترهای محیطی و مدیریت کشاورزی قرار دارند (Brock et al., 2020; Shiranirad et al., 2023). نتایج ما نشان داد که وقتی گیاهان کاملینا به طور کامل آبیاری می‌شوند، محتوا و عملکرد روغن در بیشینه باقی می‌ماند، در حالی که تنش‌های ناشی از خشکی باعث کاهش محتوای روغن و عملکرد آن می‌شوند. Singh و Sinha (2005) گزارش کردند که کاهش محتوای روغن در گیاهان دچار خشکی ممکن است به دلیل 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 (از مراحل تشکیل غلاف، گل‌دهی و بیشینه طول ساقه) نسبت به شرایط آبیاری کامل کمتر بود. کاهش محتوای روغن در دانه کاملینا نیز توسط Neupane et al. (2019) گزارش شده است.

ترکیب اسیدهای چرب در روغن دانه به شدت 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، استتاریک، 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، لینولئیک و لینولنیک، پاسخ معکوسی نسبت به تنش خشکی و تیمار سیلیکات پتاسیم نشان دادند.

مطالعات قبلی 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 به دلیل افزایش اسیدهای پالمیتیک، استتاریک، آراشیدیک و بهنیک است، در حالی که کاهش اسیدهای چرب اشباع ناشی از کاهش 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 مطالعه حاضر نشان داد که باکتری‌های محرک رشد گیاه *Bacillus halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* می‌توانند اثرات متفاوتی تحت تنش‌های آبی و گرد و غبار را بر ترکیب اسیدهای چرب گیاه کاملینا داشت. بررسی‌ها نشان داد که *B. halotolerans* به طور ویژه مقدار اسید پالمیتیک و میریستولئیک را در شرایط کم آبیاری و گرد و غبار افزایش می‌دهد، در حالی که *B. amyloliquefaciens* در برخی شرایط سبب افزایش اسید اولئیک و میریستولئیک شد. همچنین، هر دو باکتری توانستند مقدار اسید لینولئیک و هموگاما-لینولنیت را در شرایط کم تنش افزایش دهند، در حالی که تحت اعمال گرد و غبار، تغییرات متفاوتی در اسیدهای چرب نشان داده شد. کاهش قابل توجه اسید آلفا-لینولنیک تحت تأثیر کم آبیاری و گرد و غبار بیانگر حساسیت این اسید به شرایط تنش محیطی است. یافته‌ها نشان می‌دهد که تعامل میان نوع باکتری، شدت تنش آبی و حضور گرد و غبار می‌تواند نقش کلیدی در تنظیم ترکیب اسیدهای چرب

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

تشکر و سپاسگزاری

تضاد منافع

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.
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, 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.

داشته باشد و استفاده همزمان از باکتری‌های محرک رشد گیاه می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش اثرات منفی استرس‌های محیطی بر کیفیت روغن و عملکرد کاملینا باشد Borzoo . و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر تنش کم‌آبی در سه سطح آبیاری (۱۰۰٪، ۷۵٪ و ۵۰٪ ظرفیت زراعی) و در حضور باکتری محرک رشد *Micrococcus yunnanensis* در مرحله زایشی 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٪ ظرفیت زراعی شد. به‌طور کلی، تنش کم‌آبی و باکتری‌های محرک رشد گیاه تأثیر قابل توجهی بر جابجایی مواد مغذی از خاک به بذر در حال رشد داشتند. مشابه نتایج تحقیق حاضر، آنها نشان دادند که در حضور باکتری‌های محرک رشد افزایش در اجزای اصلی اسیدهای چرب غیراشباع با چند پیوند دوگانه شامل لینولئیک همچنین 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 گردید. مشابه این تحقیق آنها پاسخ‌های متفاوتی در غلظت اسیدهای چرب در تلقیح با باکتری بدست آوردند. نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه باعث افزایش برخی از اسیدهای چرب مانند اسید لینولئیک، اسید آلفا لینولئیک و اولیک اسید، پالمیتیک و استاریک و کاهش برخی دیگر مانند پالمیتولیک و میریستولیک و در سایر اسیدهای چرب تغییر ایجاد نکرد. نتایج همچنین نشان داد که باکتری *B. amyloliquefaciens* در شرایط گرد و غبار در آبیاری ۴ روزه شاخص‌ها نسبت

منابع مورد استفاده

کهریزی، دانیال (۱۴۰۳). سطح زیر کشت کاملینا در ایران، خبرگزاری جوان (ایسنا)

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.
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.* 5:407–415. <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.
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, 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, 4019–4043.
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.
16. 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. *Chromatogr. A.* 2008. 873(1): p. 95–101.
17. 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. *Agronomy*, 11, 2374.
18. 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.
19. Kostik, V., Memeti, S., Bauer, B. 2013. Fatty acid composition of edible oils and fats. *J Hyg Eng Des* 4:112–116.
20. 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.
21. 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>
22. 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>
23. 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.
24. 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.* 12(1), 59–70. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00633-7>
25. Mondor, M., Hernández-Álvarez, A. J. 2022. *Camelina sativa* composition, attributes, and applications: A review. *European Journal of Lipid Science and Technology*. John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/ejlt.202100035>
26. 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.

27. 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.
28. Najib, R., Hourri, T., Khairallah, Y., Khalil, M. 2022. Effect of dust accumulation on *Quercus cerris* L. leaves in the Ezer forest, Lebanon. *iForest* 15: 322-330. doi: 10.3832/for3959-015.
29. 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.
30. 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>
31. 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>
32. 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.
33. 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.
34. Ranjbar Fordoeil, A. Heydarnezhad, S. 1397. 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, Ilam, <https://civilica.com/doc/936104>.
35. Ratusk, K., Symoniuk, E., Wroniak, M. Rudzinska, M. 2018. Bioactive compounds, Nutritional quality and oxidative stability of cold-pressed (*Camelina sativa* L.) oils. *Applied Sciences*, 8 (12), p.2606.
36. Sheteiwy, Mohamed S., 2021. "Inoculation with *B. amyloliquefaciens* and mycorrhiza confers tolerance to drought stress and improve seed yield and quality of soybean plant." *Physiol Plant.* 172.4 : 2153-2169.
37. 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(1), 285–298. (In Persian)
38. 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), 3054. <https://doi.org/10.1002/ird.3054>
39. 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>
40. Sibi, M., Mirzakhani, M., Gomanian, 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.
41. 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, 5–18.
42. Tanveer, Y., Yasmin, H., Nosheen, A., Farah, M. A., Altaf, M.A. 2024. Synergizing *B. 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.
43. Upchurch, R.G. 2008. Fatty acid unsaturation, mobilization, and regulation in the response of plants to stress. *Biotechnol. Lett.* 30, 967–977.
44. 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>
45. 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.
46. Wood, J.D.; Richardson, G.R.; Fisher, A.V. Effects of fatty acids on meat quality: A review. *Meat Sci.* 2003, 66, 21–32
47. Wu, X., Fan, Y., Wang, R., Zhao, Q., Ali, Q., Wu, H., Gu, Q., Borriss, R., Xie, Y., Gao, X. (2022). *B. halotolerans* KKD1 induces physiological, metabolic and molecular reprogramming in wheat under saline condition *Front. Plant Sci.* 13:978066 doi: 10.3389/fpls.2022.978066.
48. Yadav, T., Kumar, A., Yadav, R.K., Yadav, G., Kumar, R., Kushwaha, M. 2020 Salicylic acid and thiourea mitigate

- the salinity and drought stress on physiological traits governing yield in pearl millet-wheat. Saudi J Biol Sci 27:2010–2017. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.06.030>
49. 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 doi: 10.3389/fpls.2024.1378707.
50. Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., Chen, S. 2021. Response mechanism of plants to drought stress. Horticulturae, 7, 50. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>
51. 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, 267–283.
52. 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.
53. Załuski, D., Tworowski, 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.
- Zhang, H., Wu, X., Li, G., 2022. Drought tolerance conferred by *B. amyloliquefaciens* via modulation of antioxidant enzymes and hormone balance. Rhizosphere, 21, 100498. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100498>.

پیش از انتشار (اصلاح نشده)