Plant Prod., 2026, 49(1), 45-64
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.49344.2265
Received: 12 April 2025
Accepted: 24 September 2025

Plant Productions

Research Article

The effect of plant growth-promoting rhizobacteria on yield of *Camelina sativa* L. under irrigation cut-off conditions

Laleh Parvin[1], Aydin Khodaei Joghan[1*], Ahmad Kouchekzadeh[1], Mohammadreza Moradi Telavat[1], Mohammad Hamed Ghodoum Parizipour [2], Aria Dolatabadian[3]

1. Department of Plant Production and Genetics Engineering, Agriculture faculty, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran
2. Department of Plant Protection, Agriculture faculty, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran
3. Research Fellow, School of Biological Sciences, The University of Western Australia, Perth, Australia

Citation: Parvin, L., Khodaei Joghan, A., Kouchekzadeh, A., Moradi Telavat, M., Ghodoum Parizipour, M.H., Dolatabadian, A. (2026). The effects of plant growth-promoting rhizobacteria on yield of *Camelina sativa* L. under irrigation cut-off conditions. *Plant Productions,* 49(1), 45-64.

Abstract

Introduction

Iran has an arid and semi-arid climate, making the cultivation of stress-tolerant crops and the use of strategies to mitigate water stress particularly important. Camelina, an oilseed crop from the Brassicaceae family, is tolerant to unfavorable environmental conditions, and its seeds possess desirable nutritional qualities for both human consumption and animal feed. The use of plant growth-promoting rhizobacteria represents an environmentally friendly approach to alleviating the adverse effects of water stress in plants. This study aimed to evaluate the ability of plant growth-promoting rhizobacteria to improve the growth and yield performance of camelina under drought stress conditions.

Materials and Methods

The experiment was conducted as a split-plot arrangement within a randomized complete block design with three replications at the research farm of the Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan during the 2021–2022 growing season. The experimental factors included different irrigation levels (A: normal irrigation as the control, B: irrigation cut off at the flowering stage, and C: irrigation cut off at the pod formation stage) in the main plots, and different bacterial applications (non-application, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens*, and mixtures of *Pseudomonas* and *Bacillus* strains) in the subplots.

Results and Discussion

Analysis of variance showed that the interaction between irrigation and bacterial treatments was significant for plant height, number of siliques per plant, seed yield, biological yield, seed oil percentage, and oil yield. As water stress intensified, both seed and biological yields decreased.

* **Corresponding Author:** Aydin Khodaei Joghan
E-mail: a.khodaei@asnrukh.ac.ir

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Irrigation cut off at the flowering stage reduced seed and biological yields by 40% and 36.7%, respectively, while irrigation cut off at the pod formation stage reduced them by 18.4% and 14.5% compared with normal irrigation. The highest seed yield (1285 kg ha^{-1}) and biological yield (5832 kg ha^{-1}) were obtained with *Bacillus subtilis* under normal irrigation. Under irrigation cut off at the flowering stage, application of the bacterial mixture increased seed yield to 813 kg ha^{-1} and biological yield to 3882 kg ha^{-1}, representing a 27% improvement compared with the control. In the same treatment, the highest oil yield (286 kg ha^{-1}) was achieved with the bacterial mixture, corresponding to a 34.2% increase over the control. Overall, *Bacillus subtilis* was more effective under normal irrigation and mild stress at the pod formation stage, whereas the bacterial mixture proved more effective under severe stress (flowering stage), enhancing the tolerance of camelina to irrigation withholding more than individual bacterial strains.

Conclusion

The results suggest that under normal irrigation and irrigation cut off at the podding stage, inoculation with *Bacillus subtilis* significantly increased camelina seed and biological yields compared with other treatments. Under irrigation cut off at the flowering stage, the bacterial mixture produced the highest increases in seed and biological yields. Overall, the use of a mixture of plant growth-promoting rhizobacteria was more effective in enhancing tolerance to severe drought stress than the application of individual strains. These findings highlight the potential of plant growth-promoting rhizobacteria as a sustainable and eco-friendly approach for improving camelina productivity under water-limited conditions, offering valuable implications for arid and semi-arid regions.

Keywords: Drought stress, Microbial biostimulants, Oil seed crops, Seed yield

تولیدات گیاهی، ۱۴۰۵، ۴۹(۱)، ۴۵- ۶۴
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.49344.2265
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

اثر باکتری‌های محرک رشد بر عملکرد کاملینا (*Camelina sativa* L.) در شرایط قطع آبیاری

لاله پروین[۱]، آیدین خدایی جوقان[۱*]، احمد کوچک زاده [۱]، محمدرضا مرادی تلاوت[۱] محمد حامد قدوم پاریزی پور[۲]، آریا دولت آبادیان[۳]

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران
۲- گروه گیاهپزشکی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران
۳- پژوهشگر، دانشکدهٔ علوم زیستی، دانشگاه استرالیای غربی، پرت، استرالیا

چکیده

ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است که کشت و کار گیاهان متحمل و استفاده از روش‌های مقابله با تنش کم‌آبی در آن دارای اهمیت فراوانی است. کاملینا، گیاه دانه روغنی از خانوادهٔ براسیکاسه و متحمل به شرایط نامناسب محیطی است که دانه‌های آن دارای کیفیت مطلوبی در تغذیهٔ انسان و خوراک دام می‌باشد. کاربرد باکتری‌های محرک رشد، روشی سازگار با محیط‌زیست جهت بهبود اثرهای نامطلوب حاصل از تنش کم‌آبی در گیاهان می‌باشد. این مطالعه باهدف بررسی توانایی باکتری‌های محرک رشد در بهبود شرایط رشدی کاملینا تحت شرایط قطع آبیاری انجام شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعهٔ پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ اجرا شد. فاکتورهای آزمایشی شامل آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد، قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی و قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی) در کرت‌های اصلی و شش سطح باکتری (عدم کاربرد باکتری، *Pseudomonas aeruginosa*، *Pseudomonas fluorescens*، *Bacillus subtilis* : *Bacillus amyloliquefaciens* مخلوط باکتری‌ها) در کرت‌های فرعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهم‌کنش باکتری و آبیاری بر صفات ارتفاع بوته، تعداد خورجین در بوته، عملکرد دانه، عملکرد زیست توده، درصد و عملکرد روغن معنی‌دار بود. مقایسه میانگین عملکرد دانه و زیست توده نشان داد که با افزایش شدت تنش آبی، عملکرد دانه و عملکرد زیست توده کاهش یافت و در قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی، به ترتیب ۴۰ و ۳۶/۷ درصد و در قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی، به ترتیب ۱۸/۴ و ۱۴/۵ درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش مشاهده شد. بیشترین عملکرد دانه (۱۲۸۵کیلوگرم در هکتار) و عملکرد زیست توده (۵۸۳۲ کیلوگرم در هکتار) ازکاربرد باکتری *Bacillus subtilis* در شرایط آبیاری کامل به دست آمد. در شرایط قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی، کاربرد مخلوط باکتری‌ها با عملکرد دانه ۸۱۳ کیلوگرم در هکتار و عملکرد زیست توده۳۸۸۲ کیلوگرم در هکتار نسبت به عدم کاربرد باکتری، برتری ۲۷ درصدی داشت. همچنین در شرایط قطع

نویسنده مسئول: آیدین خدایی جوقان
رایانامه: a.khodaei@asnrukh.ac.ir

آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی، بیشترین عملکرد روغن (۲۸۶ کیلوگرم در هکتار) از کاربرد مخلوط باکتری‌ها حاصل شد که نسبت به شاهد افزایش ۳۴/۲ درصدی داشت. بر اساس نتایج این پژوهش، کاربرد باکتری *Bacillus subtilis* در شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی مؤثرتر از سایر تیمارها عمل کرد و در شرایط قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی، مخلوط باکتری‌های محرک رشد گیاه نسبت به کاربرد به تنهایی آن‌ها اثر بیشتری در تحمل به شرایط قطع آبیاری در زراعت کاملینا داشت.

کلید واژه‌ها: تنش کم‌آبی، دانه‌های روغنی، زیست محرک‌ها، عملکرد دانه

مقدمه

کاملینا (*Camelina sativa* L.) یک محصول دانه روغنی از خانواده Brassicaceae و بومی اروپا و آسیای مرکزی است که به دلیل سازگاری بالا نسبت به شرایط مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد توجه قرار گرفته است (Ghidoli *et al.*, 2024). روغن به‌دست آمده از آن دارای مصرف خوراکی برای انسان، دام و همچنین مصرف صنعتی است (Berzuini *et al.*, 2024; Delver and Smith, 2024). دانهٔ کاملینا حاوی مقدار زیادی اسید چرب غیراشباع است و مهم‌ترین اسید چرب آن آلفا لینولنیک اسید است (Nadakuduti *et al.*, 2023; Pradebon *et al.*, 2024). گیاه کاملینا پتانسیل کشت در مناطق حاشیه‌ای را دارد (Zanetti *et al.*, 2024). زمین‌های حاشیه‌ای به‌عنوان زمینی با ویژگی‌های خاک ضعیف، بهره‌وری پایین محصول و بدون پتانسیل سود تعریف می‌شود که به‌شدت در واکنش به تغییرات اقلیمی و تنش‌های غیر زیستی قرار می‌گیرد (Ramakrishna *et al.*, 2020).

کمبود آب یکی از مهم‌ترین شرایط تنش غیر زیستی است که با کاهش جذب آب و مواد مغذی، فتوسنتز را مختل و بر جنبه‌های مختلف رشد و متابولیسم گیاهان اثر می‌گذارد (Bistgani *et al.*, 2024). تنش کم‌آبی در گیاهان موجب تغییرات فیزیولوژیک، مورفولوژیک و بیوشیمیایی شده و کیفیت و کمیت عملکرد گیاهان را کاهش می‌دهد (Ahmad *et al.*, 2024). فرآیند تخریب اکسیداتیو ناشی از تنش آبی، باعث آسیب سلولی و کاهش مصرف مواد مغذی، سرعت فتوسنتز، سطح برگ، رطوبت نسبی برگ و بسته شدن روزنه می‌شود که ممکن است مسئول کاهش سرعت تعرق و کاهش ماده خشک گیاه باشد (Jarin *et al.*, 2024). در همین راستا، محققان گزارش کردند تنش خشکی عملکرد زیست توده و عملکرد دانهٔ کاملینا را به‌طور قابل‌توجهی در شرایط مزرعه کاهش داد (Ahmad *et al.*, 2020). واکنش گیاهان به تنش خشکی در واکنش به شدت و مدت تنش و مراحل رشد گیاه قرار می‌گیرد (Rady *et al.*, 2020; Zia *et al.*, 2021). در پژوهشی گزارش شد که قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی، با اثر بر روزنه‌های برگ، تبادلات گازی و فرایند فتوسنتز منجر به کاهش ۷۰ درصدی وزن خشک دانهٔ کلزا شد (Xiang *et al.*, 2022).

بهبود تحمل در برابر تنش خشکی می‌تواند راهکاری مؤثر برای افزایش عملکرد و ثبات تولید محصول باشد (Meng *et al.*, 2023). باکتری‌های محرک رشد، یکی از انواع کودهای زیستی است که تحمل گیاه را در برابر تنش‌های محیطی افزایش داده و یک راهکار برای کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. گزارش شده که گونه‌های سودوموناس و باسیلوس به‌عنوان باکتری‌های محرک رشد اثر مثبتی بر گیاهان دارند (Kaushal and Wani, 2016). استفاده از باکتری‌های محرک رشد اثرهای قابل‌توجهی بر رشد گیاه و سلامت اکوسیستم از طریق چرخهٔ مواد مغذی دارد (Moore *et al.*, 2022). این باکتری‌ها با افزایش آنزیم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی از جملهٔ پراکسیداز، پلی‌فنول اکسیداز و کاتالاز، آسیب ناشی از گونه‌های اکسیژن واکنش گر را کاهش می‌دهند و به‌طور گسترده‌ای موجب افزایش انعطاف‌پذیری گیاه به تنش‌های محیطی می‌گردند (Benidire *et al.*, 2021). در این راستا گزارش شده است که کاربرد جدایه‌های سودوموناس آئروژینوزا در فلفل قرمز موجب رشد مغذی‌دار و قابل‌توجهی در مقایسه با شاهد شد (Linu *et al.*, 2019). در تحقیق دیگری افزایش ارتفاع، زیست توده و عملکرد گیاه کلزا در اثر استفاده از سویه‌های مختلف باکتری محرک رشد سودوموناس فلورسنس گزارش شده است (Lally *et al.*, 2017). همچنین

پژوهشگران گزارش کردند که باکتری باسیلوس سوبتیلیس در رشد گوجه فرنگی، از طریق تولید ترکیبات آلی فرار اثر مثبت داشت و موجب تنظیم هورمونی و رشد گیاه شد (Tahir *et al.*, 2017). در تحقیق دیگری محققان ابراز داشتند باکتری باسیلوس با تولید لیپوپپتید و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، عملکرد گندم را تحت تنش زیستی افزایش داد (Yi *et al.*, 2021). همچنین مطالعه‌های پژوهشگران نشان داد که باکتری محرک رشد، موجب افزایش زیست‌توده و محتوای نیتروژن و فسفر ساقه در گیاه ذرت تحت تنش خشکی شد (Pereira *et al.*, 2020). نتایج مفید کاربرد باکتری محرک رشد در گیاه ارزن دم روباهی نیز در شرایط تنش خشکی گزارش شده است (Niu *et al.*, 2018). واکنش گیاهان به کاربرد باکتری‌های محرک رشد بسته به نوع گیاه، گونه باکتری و شرایط محیطی متفاوت است از این رو، مطالعه حاضر به‌منظور بررسی اثر باکتری محرک رشد بر عملکرد گیاه کاملینا در شرایط قطع آبیاری در مراحل مختلف رشد انجام گردید.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده و بر پایهٔ طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در مزرعهٔ پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان با عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۶ دقیقه، طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه و با ۲۲ متر ارتفاع از سطح دریا اجرا شد. اقلیم محل اجرای آزمایش در گروه اقلیم خشک و نیمه گرمسیری قرار می‌گیرد. شرایط آب و هوایی ایستگاه محل اجرای آزمایش در جدول ۱ و ویژگی‌های شیمیایی خاک محل آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است.

فاکتور اصلی شامل آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل (شاهد)، قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی و قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی) و فاکتور فرعی شامل کاربرد باکتری محرک رشد در شش سطح (عدم کاربرد، *Pseudomonas aeruginosa*، *Pseudomonas fluorescens*، *Bacillus subtilis*، *Bacillus amyloliquefaciens*، مخلوط باکتری‌های *Pseudomonas* و *Bacillus*) در کرت فرعی بود. بذرکاملینا (رقم سهیل) از شرکت پیشتون شفا و مایهٔ تلقیح باکتری‌ها از گروه گیاه‌پزشکی دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان تهیه شد. عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم با گاوآهن برگردان دار و دیسک در مهرماه قبل از کاشت انجام شد. جهت خرد کردن کامل کلوخه‌ها و تسطیح زمین در دو مرحلهٔ دیسک عمود بر هم انجام شد. قبل از عملیات دیسک مقدار ۷۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل به‌طور یکنواخت در سطح مزرعه توزیع شد. پس از کود دهی بر اساس نقشهٔ آزمایش، محل قرار گرفتن بلوک‌ها و نهرهای آب روی زمین مشخص و نهرها با استفاده از نهرکن ایجاد گردید. به‌منظور جلوگیری از تداخل تیمارها، فاصله بین کرت اصلی دو متر و نیم در نظر گرفته شد. روش کاشت به صورت خطی و مسطح و تراکم کاشت ۳۰۰ بوته در متر مربع در نظر گرفته‌شد (Hasani Balyani *et al.*, 2020). هر کرت فرعی به طول سه و عرض دو متر شامل ۱۰ خط به فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متری بود. عملیات کشت در تاریخ ۲۸ آبان انجام شد. بذور در عمق یک سانتی‌متر قرار داده شدند. مایهٔ تلقیح باکتری دارای 10^8 عدد باکتری زنده و فعال در هر میلی‌لیتر بود. به دلیل وجود موسیلاژ در بذرهای کاملینا، امکان کشت آن‌ها به‌صورت تلقیح شده با باکتری‌های محرک رشد فراهم نبود، بنابراین به‌منظور دستیابی به تلقیح موثر، محلول حاوی باکتری‌ها به‌صورت اسپری مستقیم بر روی بذرها در هنگام کاشت اعمال شد.

۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار از منبع اوره بر اساس نیاز گیاه در دو نوبت، هم‌زمان با کاشت به صورت پایه و مرحلهٔ دوم پس از استقرار کامل گیاه و شروع رشد طولی ساقه به خاک داده شد. به‌منظور اعمال تنش کم‌آبی، بر اساس تیمار مورد نظر زمانی که بوته‌ها به شروع گل‌دهی و ۱۰ درصد خورجین دهی رسیدند، آبیاری قطع شد و تا زمان برداشت آبیاری صورت نگرفت. برای جلوگیری از اثر آب بارندگی در کرت‌های تحت تنش خشکی، از پوشش پلاستیکی (شلتر) استفاده شد. قطع آبیاری در مرحلهٔ گل دهی و خورجین دهی بر اساس کد ۶۰ و ۷۱ کدبندی فنولوژیک (Martinelli and Galasso, 2011) انجام گردید. کنترل علف‌های هرز در طول دوره رشد گیاه به صورت دستی انجام شد.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1. Physical and chemical properties of soil at the experiment site

Total organic carbon (%)	N (%)	P (mg kg^{-1})	K (mg kg^{-1})	PH	EC (ds m^{-1})	Soil texture
0.4	0.05	8.1	120	8	4.1	Silty clay

جدول ۲. داده‌های هواشناسی ایستگاه تحقیقاتی اهواز در طول دورهٔ آزمایش

Table 2. Meteorological data from Ahvaz meteorological station during the experimet period

Meteorological Parameters	December	January	February	March	April	May
Minimum temperature (°C)	10.7	6.8	6.5	11.7	14.7	20.1
Maximum temperature (°C)	23.7	18.2	20.6	25.1	32.5	36.3
Precipitation (mm)	44.1	65.1	13.4	4.3	0	9.8

در زمان برداشت جهت بررسی ویژگی‌های رشدی کاملینا تعداد ۱۰ بوته در هر کرت به‌طور تصادفی انتخاب و در آن ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، قطر و طول خورجین اندازه‌گیری شد. جهت تعیین عملکرد دانه، نیم متر از ابتدا و انتهای هر ردیف به‌عنوان حاشیه حذف و چهار ردیف وسط در سطحی معادل یک مترمربع برداشت گردید. مقدار نیتروژن دانه کاملینا با روش کجلدال تعیین شد (Bremner, 1996) و از حاصل‌ضرب درصد نیتروژن در ضریب گیاهی (۶/۲۵) درصد پروتئین دانه به دست آمد. درصد روغن دانه‌های کاملینا پس‌از آسیاب شدن طبق روش (Aocs, 1993) با هگزان توسط دستگاه سوکسله اندازه‌گیری شد. همچنین عملکرد روغن از حاصل‌ضرب عملکرد دانه در درصد روغن محاسبه شد.

تجزیهٔ آماری داده‌ها شامل تجزیهٔ واریانس و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد. میانگین داده‌ها با آزمون LSD و در سطح احتمال خطای پنج درصد مقایسه شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر قطع آبیاری و برهم‌کنش قطع آبیاری و باکتری در سطح احتمال پنج درصد بر ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی و گل‌دهی به ترتیب موجب کاهش ارتفاع کاملینا به میزان ۱۲/۳ و ۲۵/۷ درصد در مقایسه با شرایط آبیاری کامل شد. در شرایط آبیاری کامل، بیشترین ارتفاع بوته با میانگین ۱۱۲ سانتی‌متر با کاربرد باکتری *B. subtilis* و کمترین ارتفاع بوته با میانگین ۸۵ سانتی‌متر با استفاده از باکتری *P. aeruginosa* به دست آمد (جدول ۴). در شرایط قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی، حداکثر ارتفاع بوته ۹۴ سانتی‌متر از مخلوط باکتری‌ها به دست آمد؛ و حداقل ارتفاع بوته ۷۸ سانتی‌متر در شاهد (عدم کاربرد باکتری) مشاهده گردید. همچنین در قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی، حداکثر ارتفاع بوته ۸۲ سانتی‌متر از مخلوط باکتری‌ها و حداقل ارتفاع بوته ۶۵ سانتی‌متر از باکتری *P. fluorescens* به دست آمد (جدول ۴). به نظر می‌رسد اثرهای هم‌افزایی این دو جنس باکتری از طریق سازوکارهای مکمل مانند تولید اکسین، ترشح سیدروفور و بهبود جذب عناصر غذایی، نقش مؤثری در افزایش تحمل به خشکی و حفظ رشد طولی گیاه ایفا کرده است.

تنش کم‌آبی با کاهش پتانسیل آب در سلول‌ها، منجر به کاهش فشار تورژسانس در سلول‌های گیاهی می‌گردد و فرآیند رشد و توسعهٔ سلولی را مختل کرده و سبب محدود شدن گسترش سلول‌ها در اندام رویشی گیاه می‌شود. در نتیجه، رشد طولی گیاه کاهش یافته و ارتفاع بوته را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Arafa *et al.*, 2021). باکتری محرک

رشد با جذب بهتر مواد مغذی، تولید هورمون‌های گیاهی به‌ویژه اکسین و همچنین ظرفیت‌های آنتی‌اکسیدانی در بهبود رشد گیاه و کاهش اثرهای منفی تنش‌های غیر زیستی باعث افزایش رشد و ارتفاع بوته می‌شوند (Kumar *et al.*, 2022). در مطالعه‌ای پژوهشگران گزارش کردند که افزایش ارتفاع بوته در اثر کاربرد باکتری باسیلوس سوبتیلیس به علت توانایی این باکتری در تولید هورمون اکسین، بهبود ساختار خاک از طریق ترشح پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی و افزایش ظرفیت نگهداری آب بوده است که در مجموع منجر به رشد طولی و افزایش ارتفاع بوته پنبه شده است (Bi *et al.*, 2024).

در این راستا برخی محققین بیان کردندکه علت اصلی افزایش ارتفاع بوته با کاربرد کودهای زیستی به این دلیل است که باکتری‌های محرک رشد، مواد مغذی بیشتری را برای گیاه فراهم و تولید اکسین را تحریک کرده و مانع از تولید اتیلن می‌شوند، بنابراین با حذف این ماده، مقدار اتیلن در گیاه کاهش یافته و به‌تبع آن، از اثرهای منفی آن بر ارتفاع کاسته می‌شود (Mandal *et al.*, 2007). محققان دیگر نیز بیان داشتند که اثر باکتری‌ها بر افزایش رشد ساقه و ریشه به تولید اکسین و جیبرلین تعمیم داده می‌شود (Gutierrez-Manero *et al.*, 2001). عدم اثربخشی باکتری سودوموناس آئروجینوسا در این آزمایش می‌تواند ناشی از ناسازگاری این باکتری با گیاه کاملینا و یا عدم تطابق ویژگی‌های این سویه با شرایط فیزیکی - شیمیایی خاک مورد آزمایش باشد. چنین ناسازگاری‌هایی می‌توانند منجر به کاهش کلونیزاسیون ریشه، فعالیت ضعیف‌تر در تولید متابولیت‌های محرک رشد و در نهایت کاهش اثربخشی در بهبود رشد گیاه گردد.

تعداد شاخهٔ فرعی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر قطع آبیاری و باکتری در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش قطع آبیاری و باکتری در سطح احتمال پنج درصد بر تعداد شاخه فرعی معنی‌دار شد (جدول ۳). بیشترین تعداد شاخهٔ فرعی (۹/۳۳) از کاربرد باکتری *B. subtilis* و در شرایط آبیاری کامل مشاهده شد و کمترین تعداد شاخهٔ فرعی (۵/۷۳) در شرایط عدم کاربرد باکتری و قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی حاصل شد. در اثر محدودیت مصرف آب، تعداد شاخه فرعی کاهش یافت (جدول ۴). به نظر می‌رسد تنش خشکی با محدود ساختن رشد رویشی و کاهش منابع فتوسنتزی، تعداد شاخه فرعی در گیاه را کاهش می‌دهد (Freitas *et al.*, 2016). طی تحقیقاتی مشاهده شد که تنش خشکی موجب کاهش تعداد شاخهٔ فرعی در کلزا و کاملینا می‌گردد (Ahmad *et al.*, 2020). باکتری‌های محرک رشد، مسیر سیگنال‌دهی هورمون‌های گیاهی از جمله اکسین را تحت تأثیر قرار داده و منجر به رشد و توسعه و بهبود شاخه فرعی می‌شوند (Orozco-Mosqueda *et al.*, 2023).

قطر و طول خورجین

نتایج تجزیه واریانس داده‌های آزمایش نشان داد که اثر قطع آبیاری بر قطر خوجین در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار و اثر قطع آبیاری، باکتری و برهم‌کنش آن‌ها بر طول خورجین از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۳). بیشترین قطر خورجین ۵/۰۷ میلی‌متر در تیمار آبیاری کامل مشاهده شد که نسبت تیمار قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی و خورجین‌دهی با میانگین ۴/۷۱ و ۴/۲۶ میلی‌متر اختلاف ۷/۱ و ۱۵/۹ درصد داشت (شکل ۱). محققان طی پژوهشی گزارش کردند خشکی در مرحلهٔ گل‌دهی و خورجین‌دهی، قطر غلاف لوبیا را ۳/۵ و ۰/۶ درصد کاهش داد (Beshir *et al.*, 2016). به نظر می‌رسد به دلیل کاهش فعالیت فتوسنتزی در برگ‌های کاملینا به علت بسته شدن روزنه‌ها، کاهش هدایت روزنه‌ای و کاهش نرخ تثبیت دی‌اکسید کربن، منجر به کاهش تولید کربوهیدرات‌های فتوسنتزی شده است. این محدودیت در تولید و انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی، موجب کاهش رشد سلولی در دیوارهای خورجین و در نهایت کاهش قطر خورجین می‌گردد. محققان در مطالعه‌ای روی کلزا، کاهش قطر غلاف را به‌عنوان یکی از پیامدهای تنش خشکی گزارش کردند (Wahab *et al.*, 2022).

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر آبیاری، باکتری و برهم‌کنش آن‌ها بر برخی صفات زراعی کاملینا

Table 3. Analysis of variance for effects of irrigation, bacteria and their interactions on some agronomic traits of camelina

S. O. V	df	Plant height	Sub-branches per plant	Siliques diameter	Length of silique	Siliques per plant	Seeds per silique	1000 seed weight
Block	2	187.08	0.1235	0.08	1.21	1198.4	2.33	0.0078
Irrigation (A)	2	2795.3*	19.21**	2.94*	0.3559^{ns}	15920.5**	14.44*	0.1336*
Error (a)	4	314.07	0.1741	0.55	0.6911	404.80	1.30	0.0175
Bacteria (B)	5	178.28^{ns}	2.21**	0.03^{ns}	0.2070^{ns}	1742.3**	1.79*	0.0016^{ns}
A×B	10	198.69*	0.5502*	0.05^{ns}	0.0584^{ns}	411.7*	0.26^{ns}	0.0004^{ns}
Error (b)	30	89.55	0.2569	0.16	0.1832	174.6	0.69	0.0139
CV (%)		11.16	6.83	8.51	5.00	7.50	8.02	11.65

*، ** و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و غیر معنی‌دار

.*, ** and ns: are significant at 5 and 1% probability levels and non-significant, respectively

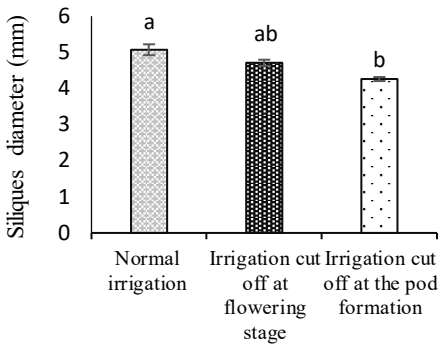
جدول ۴- مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش آبیاری و باکتری بر صفات زراعی کاملینا

Table 4. Mean comparison for the interaction between irrigation and bacteria on agronomic traits of camelina

Irrigation	Bacteria	Plant height (cm)	Sub-branches per plant (number)	Siliques per plant (number)
Normal irrigation	Non- inoculation	90.1^{c-e}	7.87^{b-d}	191.4^{b-e}
	B. amyloliquefaciens	95.2^{bc}	8.55^{ab}	209^{b}
	B. subtilis	111.9^{a}	9.33^{a}	246.8^{a}
	P. aeruginosa	84.7d^{c-f}	7.67^{cd}	185.7^{c-f}
	P. fluorescens	108.2^{ab}	8.57^{ab}	206.6^{bc}
	Bacterial mixture	92.3^{cd}	8.60^{ab}	194.3^{b-d}
Irrigation cut-off at flowering stage	Non- inoculation	64.7^{g}	5.93^{gh}	134.6^{j}
	B. amyloliquefaciens	73.4^{fg}	5.93^{gh}	138.4^{ij}
	B. subtilis	72.1^{fg}	6.50^{f-h}	152.6^{h-j}
	P. aeruginosa	76.1^{e-g}	6.63^{e-g}	135.9^{j}
	P. fluorescens	64.6^{g}	5.73^{h}	148.5^{h-j}
	Bacterial mixture	82.0^{c-f}	7.47^{c-e}	166.8^{f-h}
Irrigation cut-off at the pod formation	Non- inoculation	78.4^{d-g}	7.07^{d-f}	160.3^{g-i}
	B. amyloliquefaciens	80.7^{c-f}	7.23^{d-f}	174.8^{d-g}
	B. subtilis	84.9^{c-f}	8.30^{bc}	197.9^{bc}
	P. aeruginosa	89.6^{c-e}	7.07^{d-f}	167.2^{f-h}
	P. fluorescens	83.7^{c-f}	7.03^{d-f}	170.4^{e-h}
	Bacterial mixture	93.7^{b-d}	8.10^{bc}	191.49^{b-e}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، در سطح احتمال خطای پنج درصد در آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means with same letters in each column, are not significantly different based on the LSD test at the 5% probability level.



شکل ۱- اثر سطوح مختلف آبیاری بر قطر خورجین کاملینا. میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار ندارند.

Figure 1. Effect of different irrigation levels on silique diameter of camelina. Means with the same letters are not significantly different at $P \leq 0.05$ (LSD test).

تعداد خورجین در بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر قطع آبیاری و باکتری در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش قطع آبیاری و باکتری در سطح احتمال پنج درصد بر صفت تعداد خورجین در بوته معنی‌دار است (جدول ۳). در بررسی نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش قطع آبیاری و باکتری مشخص گردید که بیشترین تعداد خورجین در بوته (۲۴۷ عدد) در شرایط آبیاری کامل و باکتری *B. subtilis* مشاهده شد. در شرایط قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی و عدم استفاده از باکتری کمترین تعداد خورجین در بوته (۱۳۶) با کاهش ۴۵ درصدی، ثبت گردید (جدول ۴). تنش خشکی باعث افزایش ریزش گل‌ها و در نهایت عملکرد گیاه می‌شود. این اثر ناشی از تغییرات هورمونی، مانند افزایش اتیلن و اسید آبسزیک است که پایداری گل‌ها را مختل می‌کنند. همچنین تنش خشکی بیان ژن‌های مرتبط با حفظ گل‌ها را تغییر داده و فتوسنتز و انتقال مواد غذایی را کاهش داده که در نهایت منجر به کاهش تولید بذر می‌شود (Wilmowicz *et al.*, 2019). در این مطالعه در شرایط عدم استفاده از باکتری در مرحلهٔ قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی و گل‌دهی نسبت به آبیاری کامل تعداد خورجین در بوته ۱۶/۲ و ۲۹ درصد کاهش یافت. در تأیید نتایج حاضر، محققان گزارش کردند تعداد خورجین در بوته کلزا در اثر تنش خشکی شدید ۱۸۰ میلی‌متر تبخیر (تنش شدید) نسبت به تنش خشکی کم (۸۰ میلی‌متر) ۵۴/۹ درصد کاهش یافت (Safari *et al.*, 2023).

در سطح آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی، کاربرد باکتری *B. subtilis* با افزایش ۲۸/۹ و ۱۸/۹ درصدی نسبت به عدم کاربرد باکتری موثر واقع شد؛ اما در قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی کاربرد مخلوط باکتری‌ها با میانگین ۱۶۷ عدد نسبت به سایر تیمارها برتری داشت.

باکتری *B. subtilis* با استقرار در ریزوسفر و تعامل با گیاه، می‌تواند از طریق القای بیان ژن‌های مرتبط با پاسخ به تنش خشکی، تولید اسمولیت‌هایی مانند پرولین، قندهای محلول و بتائین را در سلول‌های گیاهی افزایش دهد. این اسمولیت‌ها با تنظیم فشار اسمزی سلول، نقش مهمی در حفظ ساختار سلولی و جلوگیری از آسیب‌های ناشی از تنش خشکی ایفا می‌کنند (Vardharajula *et al.*, 2011). در مطالعه‌ای کاربرد باکتری باسیلوس سوبتلیس به‌تنهایی و همراه با کودهای زیستی دیگر تعداد غلاف در بوته کلزا را افزایش داد (Muhammad *et al.*, 2025). در پژوهشی گلخانه‌ای محققان گزارش کردند که در واکنش به باکتری باسیلوس سوبتلیس تعداد غلاف در بوته کلزا افزایش یافت (Farhat *et al.*, 2023). در مطالعه‌ای دیگر روی گندم، تلقیح مخلوط باکتری نسبت به تلقیح منفرد در شرایط تنش موثرتر بود. به نظر می‌رسد که همکاری سینژیک مخلوط باکتری‌ها که شامل گونه‌هایی با توانایی مکمل است منجر به اثر بهتر می‌شود (Wang *et al.*, 2021).

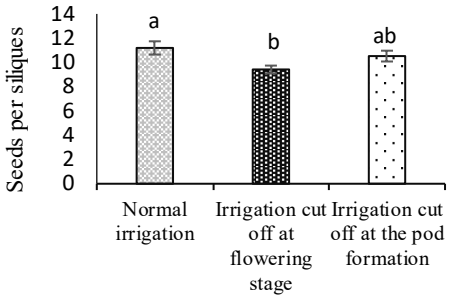
تعداد دانه در خورجین

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر قطع آبیاری و باکتری بر تعداد دانه در خورجین در سطح احتمال پنج

درصد معنی‌دار است (جدول ۳). مقایسه میانگین بین سطوح مختلف قطع آبیاری بیانگر آن است که بیشترین تعداد دانه (۱۱/۲ عدد) در شرایط آبیاری کامل مشاهده شد و کمترین آن (۹/۴ عدد) در قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی حاصل گردید (شکل ۲). کاهش تعداد دانه در خورجین در طی قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی و گل‌دهی می‌تواند به دلیل افزایش تولید پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپیدها باشد که به سلول‌های گیاهی آسیب می‌رساند و رشد و توسعه دانه‌ها را مختل می‌کند (Moloi and Van der Merwe, 2021). آزمایش‌های متعددی کاهش تعداد دانه در غلاف در گیاه کلزا و کاملینا را در طی تنش خشکی گزارش کرده‌اند که با نتایج آزمایش حاضر مطابقت دارد (Mazhar *et al.*, 2022; Shirani Rad *et al.*, 2023;Teimoori *et al.*, 2023).

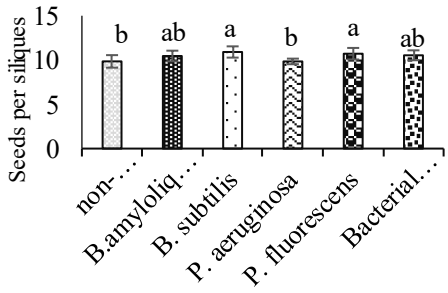
نتایج مقایسه میانگین اثر باکتری نشان داد که بیشترین تعداد دانه در خورجین (۱۰/۹ عدد) با کاربرد باکتری *B. subtilis* مشاهده شد؛ که نسبت به عدم کاربرد باکتری ۹/۸ درصد افزایش داشت. با این حال، این تفاوت از نظر آماری با تیمارهای *p. fluorescens* و مخلوط باکتری‌ها معنی‌دار نبود (شکل ۳). این یافته‌ها نشان می‌دهد که هر سه تیمار باکتریایی اثر نسبت مشابهی بر افزایش تعداد دانه در خورجین داشته‌اند.

باکتری *B. subtilis* با تولید ایندول استیک اسید و تولید اگزوپلی‌ساکاریدها، به بهبود توسعه ریشه‌ها و کمک به کلونیزاسیون بهتر، همچنین افزایش تولید سیدروفور و حلالیت بیشتر مواد مغذی منجر به جذب بهتر آب و مواد مغذی می‌شود که بر تعداد دانه در بوته اثرگذار است (De Oliveira-Paiva *et al.*, 2024). در این راستا، محققان گزارش کردند که تعداد دانه در غلاف در لوبیا با کاربرد باکتری *B. subtilis* افزایش یافت (Markova *et al.*, 2024).



شکل ۲- اثر سطوح مختلف آبیاری بر تعداد دانه در خورجین کاملینا. میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار ندارند.

Figure 2. Effect of irrigation levels on number of seeds per silique of camelina. Means with the same letters are not significantly different at P ≤ 0.05 (LSD test).

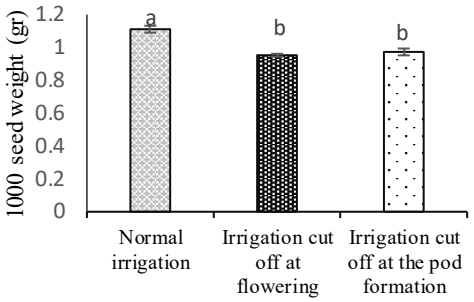


شکل ۳- اثر باکتری بر تعداد دانه در خورجین کاملینا. میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار ندارند.

Figure 3. Effect of bacteria on number of seeds per silique of camelina. Means with the same letters are not significantly different at P ≤ 0.05 (LSD test).

وزن هزار دانه

وزن هزار دانه یکی از اجزای عملکرد است که تحت تاثیر سرعت و دورهٔ پر شدن دانه قرار می‌گیرد (Song *et al.*, 2023). نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر قطع آبیاری در سطح احتمال پنج درصد بر این صفت معنی‌دار است (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین وزن هزار دانه (۱/۱۱ گرم) در سطح آبیاری کامل و کمترین وزن هزار دانه (۰/۹۵ گرم) از قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی به دست آمد (شکل ۴). نتایج مشابهی توسط یعقوبی و همکاران، مبنی بر کاهش وزن هزار دانه کاملینا در اثر تنش خشکی گزارش شده است (Yaghoubi Nejad *et al.*, 2023).



شکل ۴-اثر سطوح مختلف آبیاری بر وزن هزار دانه کاملینا. میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار ندارند.

Figure 4. Effect of different irrigation levels on 1000 seed weight of camelina. Means with the same letters are not significantly different at P ≤ 0.05 (LSD test).

عملکرد زیست توده

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر قطع آبیاری و باکتری در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش قطع آبیاری و باکتری در سطح احتمال پنج درصد بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار است (جدول ۵). مقایسه میانگین برهم‌کنش قطع آبیاری و باکتری نشان داد که با افزایش شدت تنش آبی، عملکرد زیست توده کاهش یافته و در قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی، ۳۶/۷ درصد و در قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی، ۱۴/۵ درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش عملکرد زیست توده مشاهده شد (جدول ۶). در شرایط خشکی، بسته شدن روزنه‌ها به‌منظور کاهش تبخیر و تعرق صورت می‌گیرد که در عین حال، جذب دی‌اکسید کربن را محدود می‌کند که این امر به کاهش فتوسنتز و در نتیجه کاهش تولید بیوماس منجر می‌شود. همچنین تنش اکسیداتیو ناشی از خشکی گونه‌های اکسیژن واکنش گر تولید می‌کند که به ساختارهای سلولی از جمله کلروپلاست‌ها آسیب می‌رساند و باعث کاهش بهره‌وری فتوسنتزی می‌شود (Qiao et al., 2024). بیشترین عملکرد زیست توده (۵۸۳۲ کیلوگرم در هکتار) در شرایط کاربرد باکتری *B. subtilis* و آبیاری کامل و کمترین عملکرد زیست توده (۲۸۰۲ کیلوگرم در هکتار) در قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی و کاربرد باکتری *B. amyloliquefaciens* به دست آمد. در قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی، بیشترین عملکرد زیست توده از کاربرد مخلوط باکتری‌ها ۳۸۸۲ کیلوگرم در هکتار به دست آمد و در قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی، *B. subtilis* با عملکرد ۴۸۲۶ کیلوگرم در هکتار نسبت به عدم استفاده باکتری ۲۱/۹ درصد عملکرد زیست توده را افزایش داد (جدول ۶). در نتایجی مشابه گزارش شده است باکتری‌های محرک رشد، با تولید هورمون‌های رشد اکسین و جیبرلین، بهبود ساختار خاک و افزایش جذب آب و مواد مغذی و اثر مثبت آن بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک گیاه تحت تنش خشکی، زیست تودهٔ گیاه ذرت و گندم را افزایش می‌دهد (Lastochkina *et al.*, 2023; Agunbiade et al., 2024).

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر قطع آبیاری و باکتری در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد بر این صفت معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که با دسترسی محدود آب، میزان عملکرد در قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی ۴۰ درصد و در قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی ۱۸/۴ درصد نسبت به آبیاری معمول کاهش یافت. بیشترین عملکرد دانه (۱۲۸۵ کیلوگرم در هکتار) در آبیاری کامل و کاربرد باکتری *B. subtilis* و کمترین میزان عملکرد دانه (۵۹۴ کیلوگرم در هکتار) در حالت عدم کاربرد باکتری و قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی مشاهده گردید (جدول ۶). نتایج نشان داد با کاربرد باکتری *B. subtilis* در شرایط آبیاری کامل، عملکرد دانه نسبت به عدم کاربرد باکتری ۱۲ درصد افزایش داشت. کمترین میزان عملکرد دانه (۹۳۰ کیلوگرم در هکتار) در شرایط آبیاری کامل در کاربرد باکتری *P. aeruginosa* به دست آمد که نسبت به عدم کاربرد باکتری کاهش ۲۱/۶ درصدی داشت (جدول ۶)، با وجود اینکه انتظار می‌رود باکتری‌های محرک رشد گیاه سبب بهبود رشد شوند، اما در برخی شرایط، ممکن است اثرهای معکوس نشان دهد که این موضوع می‌تواند ناشی از عدم سازگاری باکتری با میکروبیوم بومی ریزوسفری باشد. در پژوهشی محققین گزارش کردند که تلقیح بذر با

سویه‌ای از باکتری‌های محرک شد منجر به کاهش جوانه‌زنی و رشد گیاهچه جو و کلزا شد (Golkar *et al.*, 2019). اگر چه سویه مورد مطالعه آنان با باکتری حاضر در این تحقیق متفاوت بود؛ اما نتایج نشان می‌دهد سویه‌های باکتری‌های محرک رشد نیز می‌توانند تحت شرایط خاص، اثر منفی بر رشد داشته باشند.

در شرایط قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی بیشترین و کمترین عملکرد دانه (به ترتیب ۸۱۳ و ۵۹۴ کیلوگرم در هکتار) در شرایط عدم کاربرد باکتری به دست آمد که بین آن‌ها تفاوت ۲۶/۹ درصدی مشاهده شد. در قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی، بیشترین عملکرد دانه ۱۰۱۷ کیلوگرم در هکتار با کاربرد باکتری *B. subtilis* به دست آمد و در قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین دهی و عدم کاربرد باکتری کمترین میزان عملکرد (۸۱۶ کیلوگرم در هکتار) مشاهده گردید (جدول ۶). محققان یکی از عوامل کاهش عملکرد در اثر تنش خشکی را بسته شدن روزنه و کاهش جذب دی‌اکسید کربن و در نتیجه کاهش فتوسنتز گیاه می‌دانند (Raza *et al.*, 2024). در این راستا پژوهشگران کاهش عملکرد کلزا تحت تنش خشکی انتهای فصل را گزارش کرده اند (Aboodeh *et al.*, 2023; Fayaz *et al.*, 2024). گزارش شده است که باکتری‌های محرک رشد با بهبود جذب مواد مغذی، تنظیم هورمونی، افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی موجب بهبود رشد و عملکرد گیاهان می‌شوند (Al-Turki *et al.*, 2023). تلقیح باکتری محرک رشد در گیاه برنج میزان عملکرد دانه را ۱۷/۲ درصد در شرایط کم‌آبیاری نسبت به عدم کاربرد باکتری و کم‌آبیاری افزایش داد (Abd El-Mageed *et al.*, 2022).

شاخص برداشت

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر آبیاری، کاربرد باکتری و برهم‌کنش آبیاری و کاربرد باکتری بر شاخص برداشت معنی‌دار نشد (جدول ۵). هرچند برخی تیمارها کاهش و یا افزایش جزئی نشان دادند، اما این تفاوت‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبودند. به علت این که شاخص برداشت در واکنش به عوامل پیچیده‌ای مانند ژنتیک گیاه، مدیریت زراعی و محیط قرار دارد، استفاده از باکتری‌های محرک رشد نتوانست به‌صورت مستقیم اثر معنی‌داری بر صفت شاخص برداشت بگذارد. باکتری‌های محرک رشد اغلب از طریق بهبود رشد ریشه و جذب عناصر غذایی باعث افزایش تحمل به تنش می‌شوند. اما اگر افزایش زیست‌توده بخش‌های غیرقابل برداشت بیشتر از دانه باشد شاخص برداشت ممکن است بهبود نیابد.

درصد روغن دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر آبیاری و باکتری در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش قطع آبیاری و باکتری در سطح احتمال پنج درصد بر این صفت معنی‌دار است (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی و خورجین‌دهی، درصد روغن دانه را نسبت به شرایط آبیاری کامل ۲۴/۴ و ۹/۵ درصد کاهش داد (جدول ۶). تنش خشکی با ایجاد تغییر در بیان ژن‌های مرتبط با مسیرهای متابولیکی چربی، از جمله کاهش بیان ژن‌های دخیل در بیوسنتز لیپیدها و افزایش بیان ژن‌های مرتبط با تجزیه آن‌ها، می‌تواند به کاهش ذخیرهٔ چربی در دانه منجر شود، همچنین تنش خشکی از طریق ایجاد اختلال در تعادل هورمونی و کاهش انتقال مؤثر مواد فتوسنتزی به دانه، ممکن است به‌طور غیرمستقیم فرایند انباشت چربی در دانه را محدود کند (Sheteiwy *et al.*, 2021). در پژوهشی روی گیاه کلزا محققان گزارش کردند در تنش خشکی شدید، درصد روغن دانه نسبت به شرایط نرمال کاهش ۵/۵ درصدی داشت (Safari *et al.*, 2023). در همین راستا محققان دیگر هم کاهش درصد روغن را در گیاه کلزا تحت تنش خشکی گزارش نموده‌اند (Eyni Nargeseh *et al.*, 2019). در شرایط معمول آبیاری و قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی، کاربرد باکتری *B. subtilis* منجر به بیشترین درصد روغن دانه به ترتیب به میزان ۴۷/۷ و ۴۰/۹۶ درصد شد. قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی و کاربرد مخلوط باکتری با میانگین ۳۵/۲۳ درصد بیشترین محتوای روغن دانه را در این سطح داشت (جدول ۶).

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر آبیاری، باکتری و برهم‌کنش آن‌ها بر صفات کمی و کیفی کاملینا

Table 5. Analysis of variance for the effects of irrigation, bacteria and their interaction on quantitative and qualitative traits of camelina

S. O. V	df	Biological yield	Seed yield	Harvest index	Seed oil content	Oil yield	Seed protein content	Protein yield
Block	2	13976.7	7539.3	7.78	2.59	1228	0.22	96.9
Irrigation (A)	2	15279703**	819775**	5.03^{ns}	484.6**	284191**	36.14**	12692**
Error (a)	4	301097	6865	9.73	8.70	1002	14.37	342
Bacteria (B)	5	965216**	43705**	2.06^{ns}	30.10**	18511**	7.53^{ns}	1317^{ns}
B×A	10	351374*	20975*	2.66^{ns}	14.40*	8334**	6.17^{ns}	420^{ns}
Error (b)	30	159006	8697	8.33	6.37	1620	4.06	887
CV (%)		9.64	10.52	13.40	6.73	11.78	9.77	16.84

*، ** و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و غیر معنی‌دار

*, ** and ns: are significant at 5 and 1% probability levels and non-significant, respectively

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش آبیاری و باکتری بر صفات کمی و کیفی کاملینا

Table 6. Mean comparison for the interaction between irrigation and bacteria on quantitative and qualitative traits of camelina

Irrigation	Bacteria	Biological yield (kg ha^{-1})	Seed yield (kg ha^{-1})	Seed oil content (%)	Oil yield (kg ha^{-1})
Normal irrigation	Non- inoculation	4712^{b-e}	1131^{a-c}	40.08^{b-d}	453.2^{bc}
	B. amyloliquefaciens	5208^{ab}	1058^{b-d}	43.70^{ab}	459.6^{bc}
	B. subtilis	5832^{a}	1285^{a}	47.70^{a}	613^{a}
	P. aeruginosa	4327^{d-g}	931^{d-g}	38.81^{c-e}	361.5^{d-f}
	P. fluorescens	5099^{bc}	1163^{ab}	4358.24^{b}	503.7^{b}
	Bacterial mixture	4740^{b-e}	1009^{b-e}	40.21^{b-d}	405.4^{cd}
Irrigation cut-off at flowering stage	non- inoculation	2834^{j}	594^{i}	31.66^{gh}	188.1^{i}
	B. amyloliquefaciens	2802^{j}	623^{i}	29.02^{h}	179.6^{i}
	B. subtilis	3267^{h-j}	680^{hi}	32.41^{f-h}	219.7^{hi}
	P. aeruginosa	3109^{ij}	644^{i}	31.89^{gh}	205.2^{ij}
	P. fluorescens	3047^{j}	663^{h}	31.72^{gh}	210^{i}
	Bacterial mixture	3882^{f-h}	813^{gh}	35.23^{e-g}	286^{gh}
Irrigation cut-off at the pod formation	non- inoculation	3771^{g-i}	817^{gh}	35.29^{e-g}	288^{g}
	B. amyloliquefaciens	4172^{d-g}	850^{fg}	37.58^{c-e}	319.4^{fg}
	B. subtilis	4826^{b-d}	1017^{b-d}	40.96^{bc}	417.6^{cd}
	P. aeruginosa	4076^{e-g}	837^{fg}	36.38^{d-f}	304.8^{fg}
	P. fluorescens	4247^{d-g}	860^{e-g}	38.98^{c-e}	335.1^{e-g}
	Bacterial mixture	4481^{d-f}	985^{c-f}	40.37^{b-d}	397.5^{c-e}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، در سطح احتمال خطای پنج درصد در آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means with same letters in each column, are not significantly different based on the LSD test at the 5% probability level.

درصد پروتئین دانه

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر این صفت معنی‌دار شد اما اثر باکتری و برهم‌کنش قطع آبیاری و باکتری معنی‌دار نشد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین میزان پروتئین دانه (۲۲/۲ درصد) در قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی به دست آمد که تفاوت معنی‌دار با آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی داشت (شکل ۵). در این راستا یافته‌های پژوهشی نشان داد که در شرایط متعادل، کود نیتروژن فعالیت آنزیم‌های نیترات ردوکتاز و گلوتامین سنتاز را در دردانه‌ها تحت تنش افزایش می‌دهد که این امر به بهبود تجمع نیتروژن در دانه‌ها کمک می‌کند (Ru *et al.*, 2020). با این حال، در شرایط تنش، با کاهش اندازه دانه یا کاهش انباشت ترکیباتی مانند روغن، افزایش درصد پروتئین ممکن است بیشتر به دلیل تغییر در نسبت اجزای دانه باشد. همسو با پژوهش حاضر، پژوهش‌های دیگری نیز افزایش پروتئین دانه را تحت تنش خشکی را گزارش کرده‌اند که با پژوهش حاضر مطابقت دارد (Borzoo *et al.*, 2023).

عملکرد روغن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر آبیاری، باکتری و برهم‌کنش آبیاری و باکتری در سطح احتمال یک درصد بر عملکرد روغن معنی‌دار شد (جدول ۵).

در شرایط عدم تلقیح باکتری و قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی و گل‌دهی نسبت به آبیاری کامل عملکرد روغن ۲۶/۳ و ۵۴ درصد کاهش یافت. در این راستا محققان گزارش کردند عملکرد روغن گیاه خردل هندی در تنش خشکی کاهش یافت (Sharma and Sardana, 2022). بیشترین عملکرد روغن (۶۱۳ کیلوگرم در هکتار) در ترکیب تیماری کاربرد باکتری *B. subtilis* در شرایط عدم قطع آبیاری و کمترین آن (۱۷۹/۶) در ترکیب تیماری *B. amyloliquefaciens* و قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی به دست آمد (جدول ۶).

در آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی بیشترین عملکرد روغن (۶۱۳ و ۴۱۷/۶ کیلوگرم در هکتار) از کاربرد باکتری *B. subtilis* به دست آمد که نسبت به شاهد (عدم تلقیح باکتری) در این سطوح ۴۱ و ۳۱ درصد افزایش داشت. در قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی بیشترین عملکرد روغن (۲۸۶ کیلوگرم در هکتار) ازکاربرد مخلوط باکتری‌ها به دست آمد که نسبت به شاهد افزایش ۳۴/۲ درصدی داشت (جدول ۶). پژوهش‌های دیگری نیز افزایش میزان عملکرد روغن در واکنش به باکتری‌های محرک رشد در شرایط محدودیت آبی در کلزا گزارش کرده‌اند که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد (Nobakht *et al.*, 2021).

عملکرد پروتئین

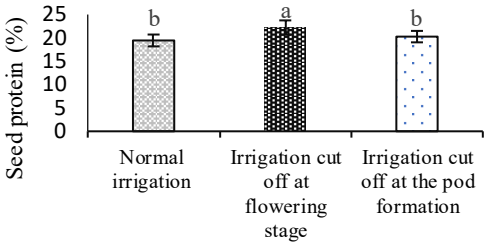
تجزیه واریانس نشان داد که اثر آبیاری بر عملکرد پروتئین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد اما اثر باکتری و برهم‌کنش آبیاری و باکتری بر این صفت معنی‌دار نشد (جدول ۵). در بررسی نتایج مقایسه میانگین قطع آبیاری مشخص گردید که بیشترین عملکرد پروتئین (۱۹۹/۶ کیلوگرم در هکتار) در شرایط آبیاری کامل مشاهده شد. در شرایط قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی کمترین عملکرد پروتئین (۱۴۷/۷ کیلوگرم در هکتار) با کاهش ۵۲ درصدی ثبت گردید (شکل ۶).در شرایط تنش، اگر چه غلظت عملکرد پروتئین دانه از حاصل‌ضرب عملکرد دانه در درصد پروتئین دانه حاصل می‌شود) ولی کاهش شدید عملکرد دانه در شرایط تنش در مرحلهٔ گل‌دهی، باعث کاهش عملکرد پروتئین کل در واحد سطح می‌شود. در تحقیقی بالاترین عملکرد پروتئین دانه کنجد از تیمار آبیاری معمول که بیشترین عملکرد دانه را داشت حاصل شد (Karamian Hasan Abadi *et al.*, 2021).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین عملکرد دانه (۱۲۸۵ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد زیست توده (۵۸۳۲ کیلوگرم در هکتار) با کاربرد باکتری *Bacillus subtilis* در شرایط آبیاری کامل به دست آمد. در شرایط قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی، کاربرد مخلوط باکتری‌ها با عملکرد دانه (۸۱۳ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد زیست توده (۳۸۸۲ کیلوگرم در هکتار) نسبت به عدم کاربرد باکتری برتری داشت. تیمار مخلوط باکتری‌های محرک رشد گیاه نسبت به کاربرد منفرد باکتری‌ها اثر بیشتری در تحمل به شرایط قطع آبیاری خشکی در زراعت کاملینا داشت. استفاده از باکتری *Bacillus subtilis* در شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحلهٔ خورجین‌دهی، عملکرد دانه را به ترتیب ۱۲ و ۲۰ درصد و عملکرد زیست توده را ۱۹/۲ و ۲۲ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. در شرایط قطع آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی، کاربرد مخلوط باکتری عملکرد دانه و عملکرد زیست توده را ۲۷ درصد نسبت به شاهد افزایش و اثر منفی تنش خشکی در این مرحلهٔ را تعدیل بخشید.

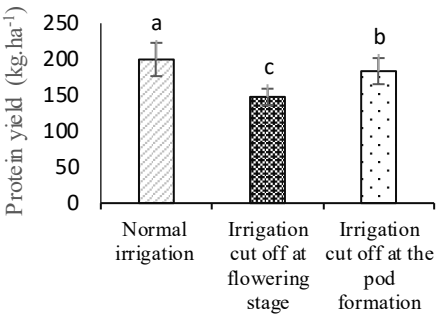
سپاس‌گزاری

از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان و جناب آقای دکتر دانیال کهریزی که با حمایت‌های ارزشمند خود نقش مهمی در پیشبرد تحقیق داشتند صمیمانه سپاس‌گزاری می‌گردد.



شکل ۵- اثر سطوح مختلف آبیاری بر میزان پروتئین دانه کاملینا. میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار ندارند.

Figure 2. Effect of irrigation levels on seed protein content of camelina. Means with the same letters are not significantly different at P ≤ 0.05 (LSD test).



شکل ۶- اثر سطوح مختلف آبیاری بر عملکرد پروتئین کاملینا. میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار ندارند.

Figure 6. Effect of irrigation levels on protein yield of camelina. Means with the same letters are not significantly different at P ≤ 0.05 (LSD test).

References

Abd El-Mageed, T.A., Abd El-Mageed, S.A., El-Saadony, M.T., Abdelaziz, S., & Abdou, N.M. (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria improve growth, morph-physiological responses, water productivity, and yield of rice plants under full and deficit drip irrigation. *Rice*, 15(1), 16. https://doi.org/10.1186/s12284-022-00564-6

Aboodeh, H., Bakhshandeh, A., Moradi Telavat, M., Siadat, S. A., & Moosavi, S. (2023). Evaluation of drought tolerance and susceptibility indices of rapeseed genotypes under conditions of late irrigation interruption of growing season. *Journal of Crops Improvement*, 25(1), 17-32. https://doi.org/10.22059/jci.2022.335213.2651 [In Persian].

Agunbiade, V.F., Fadiji, A.E., Agbodjato, N.A., & Babalola, O.O. (2024). Isolation and characterization of plant-growth-promoting, drought-tolerant rhizobacteria for improved maize productivity. *Plants*, 13(10), 1298. https://doi.org/10.3390/plants13101298

Ahmad, A., Aslam, Z., Ahmad, M., Zulfiqar, U., Yaqoob, S., Hussain, S., Niazi, N.K., Gastelbondo, M., Al-Ashkar, I., & Elshikh, M.S. (2024). Vermicompost application upregulates morpho-physiological and antioxidant defense to conferring drought tolerance in wheat. *Plant Stress (Amsterdam)*, 11(5), 100360. https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100360

Ahmad, Z., Waraich, E.A., Barutcular, C., Alharby, H., Bamagoos, A., Kizilgeci, F., Ozturk, F., Hossain, A., Bayoumi, Y., & El Sabagh, A. (2020). Enhancing drought tolerance in Camelina

sativa L. and canola (Brassica napus L.) through application of selenium. *Pakistan Journal of Botany,* 52(6), 1927-1939. https://doi.org/10.30848/PJB2020-6(31)

Al-Turki, A., Murali, M., Omar, A.F., Rehan, M., & Sayyed, R. (2023). Recent advances in PGPR-mediated resilience toward interactive effects of drought and salt stress in plants. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1214845. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1214845

Aocs. (1993). Official Methods and Recommended Practices. AOCS Press, Champaign, IL, pp.113-168.

Arafa, S.A., Attia, K.A., Niedbała, G., Piekutowska, M., Alamery, S., Abdelaal, K., Alateeq, T. K., AM Ali, M., Elkelish, A., & Attallah, S.Y. (2021). Seed priming boost adaptation in pea plants under drought stress. *Plants*, 10(10), 2201. https://doi.org/10.3390/plants10102201

Benidire, L., Madline, A., Pereira, S., Castro, P., & Boularbah, A. (2021). Synergistic effect of organo-mineral amendments and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on the establishment of vegetation cover and amelioration of mine tailings. *Chemosphere*, 262, 127803. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127803

Berzuini, S., Zanetti, F., Alberghini, B., Leon, P., Prieto, J., Yambanis, Y.H., Trabelsi, I., Hannachi, A., Udupa, S., & Monti, A. (2024). Assessing the productivity potential of camelina (*Camelina sativa* L. Crantz) in the Mediterranean basin: Results from multi-year and multi-location trials in Europe and Africa. *Industrial Crops and Products*, 219(1), 119080. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119080

Beshir, H., Bueckert, R., & Tar'An, B. (2016). Effect of temporary drought at different growth stages on snap bean pod quality and yield. *African Crop Science Journal*, 24(3), 317-330. https://doi.org/10.4314/acsj.v24i3.8

Bi, Y., Zhou, B., Ren, P., Chen, X., Zhou, D., Yao, S., Fan, D., & Chen, X. (2024). Effects of Bacillus subtilis on cotton physiology and growth under water and salt stress. *Agricultural Water Management*, 303(1), 109038. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109038

Bistgani, Z.E., Barker, A.V., & Hashemi, M. (2024). Physiology of medicinal and aromatic plants under drought stress. *The Crop Journal*, 12(2), 330-339. https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.12.003

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 Research Journal*, 11(5), 1-10. https://doi.org/10.9734/aprj/2023/v11i5220

Bremner, J.M. (1996) Nitrogen Total. In: Sparks, D.L., Ed., Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods, SSSA Book Series 5, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, pp. 1085-1122. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37

de Oliveira-Paiva, C.A., Bini, D., de Sousa, S.M., Ribeiro, V.P., Dos Santos, F.C., de Paula Lana, U.G., de Souza, F.F., Gomes, E.A., & Marriel, I.E. (2024). Inoculation with Bacillus megaterium CNPMS B119 and Bacillus subtilis CNPMS B2084 improve P-acquisition and maize yield in brazil. *Frontiers in Microbiology*, *15*, 1426166. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1426166

Delver, J.J., & Smith, Z.K. (2024). Opportunities for camelina meal as a livestock feed ingredient. *Agriculture*, 14(1), 116. https://doi.org/10.3390/agriculture14010116

Eyni Nargeseh, H., Aghaalikhani, M., Shirani Rad, A.H., Mokhtasi-Bidgoli, A., & Modares Sanavy, S.A.M. (2019). Response of new genotypes of rapeseed (*Brassica napus*) to late season withholding irrigation under semi-arid climate. *Plant Production*, 41(4), 55-68. https://doi.org/10.22055/ppd.2018.22672.1491 [In Persian].

Farhat, F., Tariq, A., Waseem, M., Masood, A., Raja, S., Ajmal, W., Iftikhar, I., Zulfiqar, U., & Maqsood, M.F. (2023). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) induced improvements in the growth, photosynthesis, antioxidants, and nutrient uptake of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Gesunde Pflanzen*, 75(5), 2075-2088. https://doi.org/10.1007/s10343-023-00845-0

Fayaz, E., Sorooshzadeh, A., & Heidarzadeh, A. (2024). Effect of foliar application of amino acids on some physiological processes of oil rapeseed (Brassica Napus L.) under late-season

drought stress conditions. *Plant Productions*, 47(1), 65-83. https://doi.org/10.22055/ppd.2024.45873.2138 [In Persian]

Freitas, M.E., de Souza, L.C.F., Salton, J.C., Serra, A.P., Mauad, M., Cortez, J.W., & Marchetti, M.E. (2016). Crop rotation affects soybean performance in no-tillage system under optimal and dry cropping seasons. *Australian Journal of Crop Science*, 10(3), 353-361. https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.03.p7177

Ghidoli, M., Geuna, F., De Benedetti, S., Frazzini, S., Landoni, M., Cassani, E., Scarafoni, A., Rossi, L., & Pilu, S.R. (2024). Genetic study of camelina sativa oilseed crop and selection of a new variety by the bulk method. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1385332. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1385332

Golkar, P., Tabatabaei, S., & Mosavat, N. (2019). A comparative study on the effect of gram negative and positive bacterial strains on germination and seedling growth of cereals and oil seed crops. *Microbial biology*, 8(32), 139-151. https://doi.org/10.22108/bjm.2019.114798.1176 [In Persian].

Gutierrez-Manero, F.J., Ramos-Solano, B., Probanza, A.N., Mehouachi, J.R., Tadeo, F., & Talon, M. (2001). The plant-growth-promoting rhizobacteria Bacillus pumilus and Bacillus licheniformis produce high amounts of physiologically active gibberellins. *Physiologia Plantarum*, 111(2), 206-211. https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2001.1110211.x

Hasani Balyani, M., Tadayon, M., & Fadaei Tehrani, A. (2020). Evaluation of some growth and yield traits of Camelina sativa L. under the influence of biological and chemical fertilizers. *Isfahan University of Technology-Journal of Crop Production and Processing*, 10(1), 39-51. https://doi.org/10.47176/jcpp.10.1.209111 [In Persian].

Jarin, A.S., Islam, M.M., Rahat, A., Ahmed, S., Ghosh, P., & Murata, Y. (2024). Drought stress tolerance in rice: physiological and biochemical insights. *International Journal of Plant Biology*, 15(3), 692-718. https://doi.org/10.3390/ijpb15030051

Karamian Hasan Abadi, Z., Eisvand, H.R., Daneshvar, M., and Akbarpour, O. (2021). Study the effect of drought stress and iron oxide nanoparticle foliar application on quantitative and qualitative traits of sesame (*Sesamum indicum* L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences.*, 14(2), 375-386. https://doi.org/10.22077/escs.2019.2645.1687 [In Persian].

Kaushal, M., & Wani, S.P. (2016). Rhizobacterial-plant interactions: strategies ensuring plant growth promotion under drought and salinity stress. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *231*, 68-78. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.031

Kumar, R., Swapnil, P., Meena, M., Selpair, S., & Yadav, B.G. (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): approaches to alleviate abiotic stresses for enhancement of growth and development of medicinal plants. *Sustainability*, 14(23), 15514. https://doi.org/10.3390/su142315514

Lally, R.D., Galbally, P., Moreira, A.S., Spink, J., Ryan, D., Germaine, K.J., & Dowling, D.N. (2017). Application of endophytic Pseudomonas fluorescens and a bacterial consortium to Brassica napus can increase plant height and biomass under greenhouse and field conditions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2193. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02193

Lastochkina, O., Yuldashev, R., Avalbaev, A., Allagulova, C., & Veselova, S. (2023). The contribution of hormonal changes to the protective effect of endophytic bacterium Bacillus subtilis on two wheat genotypes with contrasting drought sensitivities under osmotic stress. *Microorganisms*, 11(12), 2955. https://doi.org/10.3390/microorganisms11122955

Linu, M., Asok, A.K., Thampi, M., Sreekumar, J., & Jisha, M. (2019). Plant growth promoting traits of indigenous phosphate solubilizing Pseudomonas aeruginosa isolates from chilli (*Capsicum annuum* L.) rhizosphere. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(4), 444-457. https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1566469

Mandal, A., Patra, A.K., Singh, D., Swarup, A., & Masto, R.E. (2007). Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages. *Bioresource Technology*, 98(18), 3585-3592. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.027

Markova, O., Garipova, S., Chistoedova, A., Matyunina, V., Lubyanova, A., Lastochkina, O., Garipov, A., Shpirnaya, I., & Pusenkova, L. (2024). Predicting field effectiveness of

endophytic Bacillus subtilis inoculants for common bean using morphometric and biochemical markers. *Plants*, 13(13), 1769. https://doi.org/10.3390/plants13131769

Martinelli, T., & Galasso, I. (2011). Phenological growth stages of camelina sativa according to the extended BBCH scale. *Annals of applied Biology*, 158(1), 87-94. https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2010.00444.x

Mazhar, M. W., Ishtiaq, M., Maqbool, M., & Akram, R. (2022). Seed priming with Calcium oxide nanoparticles improves germination, biomass, antioxidant defence and yield traits of canola plants under drought stress. *South African Journal of Botany*, 151, 889-899. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.11.017

Meng, X., Liu, S., Zhang, C., He, J., Ma, D., Wang, X., Dong, T., Guo, F., Cai, J., & Long, T. (2023). The unique sweet potato NAC transcription factor IbNAC3 modulates combined salt and drought stresses. *Plant Physiology*, 191(1), 747-771. https://doi.org/10.1093/plphys/kiac508

Moloi, M.J., & Van der Merwe, R. (2021). Drought tolerance responses in vegetable-type soybean involve a network of biochemical mechanisms at flowering and pod-filling stages. *Plants*, 10(8), 1502. https://doi.org/10.3390/plants10081502

Moore, J.A., Abraham, P.E., Michener, J.K., Muchero, W., & Cregger, M.A. (2022). Ecosystem consequences of introducing plant growth promoting rhizobacteria to managed systems and potential legacy effects. *New Phytologist*, 234(6), 1914-1918. https://doi.org/10.1111/nph.18010

Muhammad, H., Ijaz, M., Sattar, A., Ul-Allah, S., Sher, A., Asif, M., Dilshad, M., Mahmood, K., Riaz, M.W., & Zaheer, M.S. (2025). Synergistic effects of PGPRs and fertilizer amendments on improving the yield and productivity of Canola (*Brassica napus* L.). *BMC Plant Biology*, 25(1), 50. https://doi.org/10.1186/s12870-025-06062-3

Nadakuduti, S.S., Laforest, L.C., Tachev, M., Decker, A.N., Egesa, A.O., Shirazi, A.S., Begcy, K., Sarnoski, P.J., & Buell, C.R. (2023). Heat stress during seed development leads to impaired physiological function and plasticity in seed oil accumulation in *Camelina sativa*. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1284573. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1284573

Niu, X., Song, L., Xiao, Y., & Ge, W. (2018). Drought-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria associated with foxtail millet in a semi-arid agroecosystem and their potential in alleviating drought stress. *Frontiers in Microbiology*, *8*, 2580. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02580

Nobakht, S., Sarikhani, M.R., & Najafi, N.A. (2021). The effects of solid inocula of enterobacter cloacae on grain and oil yield of rapeseed. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(1), 103-123. https://doi.org/10.22034/saps.2021.12801 [In Persian].

Orozco-Mosqueda, M.D.C., Santoyo, G., & Glick, B.R. (2023). Recent advances in the bacterial phytohormone modulation of plant growth. *Plants*, 12(3), 606. https://doi.org/10.3390/plants12030606

Pereira, S., Abreu, D., Moreira, H., Vega, A., & Castro, P. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) improve the growth and nutrient use efficiency in maize (*Zea mays* L.) under water deficit conditions. *Heliyon*, 6(10), https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05106

Pradebon, L.C., Carvalho, I.R., Loro, M.V., Colet, C.F., Silva, J.A.G., Hoffmann, J.F., Foscarini, S.C., & Ziembowicz, J.E. (2024). Contrast between brazil and other countries in nutraceutical components of Camelina sativa grains. *Agronomy Science and Biotechnology*, *10*, 1-14. https://doi.org/10.33158/ASB.r201.v10.2024

Qiao, M., Hong, C., Jiao, Y., Hou, S., & Gao, H. (2024). Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought. *Plants*, *13*(13), 1808. https://doi.org/10.3390/plants13131808

Rady, M.O., Semida, W.M., El-Mageed, T.A.A., Howladar, S.M., & Shaaban, A. (2020). Foliage applied selenium improves photosynthetic efficiency, antioxidant potential and wheat productivity under drought stress. *International Journal of Agriculture and Biology*, 24(5), 1293-1300. https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1562

Ramakrishna, W., Rathore, P., Kumari, R., & Yadav, R. (2020). Brown gold of marginal soil: Plant growth promoting bacteria to overcome plant abiotic stress for agriculture, biofuels and carbon sequestration. *Science of the Total Environment*, *711*, 135062. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135062

Raza, M.A.S., Aslam, M.U., Valipour, M., Iqbal, R., Haider, I., Mustafa, A. E.-Z. M., Elshikh, M. S., Ali, I., Roy, R., & Elshamly, A. M. (2024). seed priming with selenium improves growth and yield of quinoa plants suffering drought. *Scientific Reports*, 14(1), 886. https://doi.org/10.1038/s41598-024-51371-6.

Ru, C., Hu, X., Chen, D., Song, T., Wang, W., Lv, M., & Hansen, N.C. (2020). Nitrogen modulates the effects of short-term heat, drought and combined stresses after anthesis on photosynthesis, nitrogen metabolism, yield, and water and nitrogen use efficiency of wheat. *Water*, 14(9), 1407. https://doi.org/10.3390/w14091407

Safari, M.R., Dadashi, M.R., Faraji, A., & Armin, M. (2023). Effect of biofertilizer and drought stress on quantitative and qualitative traits in some winter rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars. *Romanian Agricultural Research*, 40, 1563-1578. https://doi.org/10.59665/rar4038

Sharma, P., & Sardana, V. (2022). Physiological and biochemical traits of drought tolerance in *Brassica juncea* (L.) czern & coss. *South African Journal of Botany*, 146, 509-520. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.11.019

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. *Physiologia Plantarum*, 172(4), 2153-2169. https://doi.org/10.1111/ppl.13454

Shirani Rad, A., Malmir, M., & Eyni-Nargeseh, H. (2023). Appropriate irrigation Regime and sowing date boost camelina seed yield and oil content by improving physiologic and agronomic traits. *Russian Journal of Plant Physiology*, 70(5), 108. https://doi.org/10.1134/S1021443723600095

Song, W., Song, R., Zhao, Y., & Zhao, Y. (2023). Research on the characteristics of drought stress state based on plant stem water content. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56(6), 103080. https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103080

Tahir, H.A., Gu, Q., Wu, H., Raza, W., Hanif, A., Wu, L., Colman, M. V., & Gao, X. (2017). Plant growth promotion by volatile organic compounds produced by Bacillus subtilis SYST2. *Frontiers in Microbiology*, 8, 171. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00171

Teimoori, N., Ghobadi, M., & Kahrizi, D. (2023). Improving the growth characteristics and grain production of camelina (*Camelina sativa* L.) under salinity stress by silicon foliar application. *Agrotechniques in Industrial Crops*, 3(1), 1-13. https://doi.org/10.22126/ATIC.2023.8681.1081

Vardharajula, S., Zulfikar Ali, S., Grover, M., Reddy, G., & Bandi, V. (2011). Drought-tolerant plant growth promoting Bacillus spp.: effect on growth, osmolytes, and antioxidant status of maize under drought stress. *Journal of Plant Interactions*, 6(1), 1-14. https://doi.org/10.1080/17429145.2010.535178

Wahab, A., Abdi, G., Saleem, M.H., Ali, B., Ullah, S., Shah, W., Mumtaz, S., Yasin, G., Muresan, C.C., & Marc, R.A. (2022). Plants' physio-biochemical and phyto-hormonal responses to alleviate the adverse effects of drought stress: a comprehensive review. *Plants*, 11(13), 1620. https://doi.org/10.3390/plants11131620

Wang, R., Wang, C., Feng, Q., Liou, R.M., & Lin, Y.F. (2021). Biological inoculant of salt-tolerant bacteria for plant growth stimulation under different saline soil conditions. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(3), 398-407. https://doi.org/10.4014/jmb.2009.09032.

Wilmowicz, E., Kucko, A., Burchardt, S., & Przywieczerski, T. (2019). Molecular and hormonal aspects of drought-triggered flower shedding in yellow lupine. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(15), 3731. https://doi.org/10.3390/ijms20153731

Xiang, J., Vickers, L.H., Hare, M.C., & Kettlewell, P.S. (2022). Evaluation of the concentration-response relationship between film antitranspirant and yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) under drought. *Agricultural Water Management*, 270, 107732. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107732

Yaghoubi Nejad, S., Andarzian, B., Javanmard, H.R., Naderi Darbaghshahi, M., & Shokuhfar, A. (2023). The effect of water deficit stress and planting dates on the quantitative and qualitative yield of camelina (*Camelina sativa* L.) in Ahvaz. *Crop Physiology Journal*, 16(62), 43-59. http://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-1589-fa.html [In Persian].

Yi, Y., Shan, Y., Liu, S., Yang, Y., Liu, Y., Yin, Y., Hou, Z., Luan, P., & Li, R. (2021). Antagonistic strain Bacillus amyloliquefaciens XZ34-1 for controlling *bipolaris sorokiniana* and promoting growth in wheat. *Pathogens*, 10(11), 1526. https://doi.org/10.3390/pathogens10111526

Zanetti, F., Peroni, P., Pagani, E., von Cossel, M., Greiner, B.E., Krzyżaniak, M., Stolarski, M. J., Lewandowski, I., Alexopoulou, E., & Stefanoni, W. (2024). The opportunities and potential of camelina in marginal land in Europe. *Industrial Crops and Products*, 211, 118224. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118224

Zia, R., Nawaz, M.S., Siddique, M.J., Hakim, S., & Imran, A. (2021). Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiological Research*, 242, 126626. https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626