



Improving Quantitative and Qualitative Seed Yield of Camelina (*Camelina sativa* L.) through the Integrated Application of Chemical Fertilizers, Biofertilizers, and Nano-Chitosan under Rainfed and Supplementary Irrigation Conditions

Abdollah Javanmard^{1*}, Mohammad Haghaninia¹, Haniyeh Shabkhiz¹

1- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, East Azarbaijan, Iran
(*- Corresponding author's Email: a.javanmard@maragheh.ac.ir)

Received: 10-02-2026
Revised: 24-08-2026
Accepted: 06-09-2026
Available Online: 22-06-2026

How to cite this article:

Javanmard, A., Haghaninia, M., & Shabkhiz, H. (2026). Improving quantitative and qualitative seed yield of camelina (*Camelina sativa* L.) through the integrated application of chemical fertilizers, biofertilizers, and nano-chitosan under rainfed and supplementary irrigation conditions. *Journal of Agroecology*, 18(2), 183-212. (In Persian)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97784.1270>

Introduction

One of the most critical environmental factors affecting the distribution, spread, growth, and successful production of plant products is the amount of water available to the plant. Reducing water availability causes drought stress and triggers numerous morphological, physiological, and biochemical changes in plants (Farooq et al., 2009). Water deficiency stress leads to reduced growth, dry weight, stomatal closure, decreased height, smaller leaf area, cell growth inhibition, lower photosynthesis rates, protein degradation, enzyme destruction, toxic substance production, hormonal imbalances such as increased abscisic acid and decreased growth promoters, damage to plastids, and restricted root growth (Anwaar et al., 2020). Supplementary irrigation is an effective method for compensating for soil moisture deficiency, increasing water-use efficiency, preventing yield fluctuations, and promoting sustainable production in arid and semi-arid regions (Mohtashami et al., 2020). Moreover, using biofertilizers as environmentally friendly inputs is valuable because they rely on renewable energy sources, are cost-effective, and reduce dependence on chemical fertilizers. Various studies have shown that using chitosan nanoparticles can reduce the harmful effects of biotic and abiotic stresses and significantly improve the quantity and quality of agricultural products by enhancing nutrient availability (Mehmood et al., 2020).

Materials and Methods

To investigate the effects of different fertilizer sources under dryland and supplementary irrigation conditions on the quantity and quality of camelina (*Camelina sativa* L.) oil, an experiment was conducted using split plots based on a randomized complete block design with 16 treatments and three replications in the field of the



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97784.1270>

Faculty of Agriculture at the University of Maragheh during the crop years 2020 and 2021. The main factor was cultivation under rainfed conditions and with supplementary irrigation, while the sub-factor included various fertilizer sources: control (without fertilizer), 100% recommended chemical fertilizer (CF), biofertilizer (BF), chitosan nanoparticles (CS), a mixture of 50% chemical fertilizer and biofertilizer, 50% CF + CS nanoparticles, BF + CS nanoparticles, and a combination of 50% CF + BF + CS nanoparticles. Seeds used in this experiment were of the Soheil variety, with a germination rate of 98% and purity of 99%, obtained from Shafa Bisotun Company, Kermanshah. Bed preparation involved plowing, disking, and leveling, based on soil conditions and moisture reaching field capacity. Subsequently, plots measuring 6 square meters with 8 rows of cultivation were prepared. The distances between crop lines and within crop lines were set at 10 cm and 5 cm, respectively. After confirming the normality of the data, the combined variance analysis was performed in the form of two-way split plots using statistical software (SAS version 9.1, Cary, NC, USA), and the graphs were generated using Excel software. Additionally, data means were compared using Duncan's test at a significance level of 5%.

Results and Discussion

The results showed that the combined application of 50% CF, growth- promoting bacteria, and CS nanoparticles increased seed yield by 32.22, 24.79, and 0.75%, respectively, under supplementary irrigation conditions, and by 26.11, 15.26, and 12.56%, respectively, under rainfed conditions, compared to the separate application of CF, growth- promoting bacteria, and CS nanoparticles. The maximum oil yield ($239.89 \text{ kg ha}^{-1}$) was achieved under supplementary irrigation conditions using 50% chemical fertilizer combined with growth-promoting bacteria and chitosan nanoparticles. Under rainfed conditions, the combined treatment of growth-promoting bacteria and chitosan nanoparticles increased the oil yield by 109.30% compared to the control. Additionally, the combined application of 50% fertilizer, growth- promoting bacteria, and CS nanoparticles under supplementary irrigation increased camelina oil yield by 73.9% compared to the control. The main components of camelina oil included saturated fatty acids such as palmitic (6.85-3.73%) and stearic acids (4.34-2.33%), and unsaturated fatty acids including oleic (16.43-14.46%), linoleic (25.14-19.19%), linolenic (36.79-31.92%), and eicosanoic acid (11.44-7.81%). The highest levels of palmitic and stearic acids were observed with supplementary irrigation combined with CF. Moreover, the results demonstrated that supplementary irrigation increased the relative water content by 33% compared to rainfed conditions. The combined application of 50% CF, growth- promoting bacteria, and CS nanoparticles under both rainfed and supplementary irrigation conditions raised the relative water content by 58.3 and 81.2%, respectively, compared to the control. Notably, the combined treatment of 50% CF, growth- promoting bacteria, and CS nanoparticles increased chlorophyll a, b, and carotenoid contents by 114.53, 137.88, and 121.51%, respectively, compared to no fertilizer use. Drought stress causes a decrease in grain yield by reducing leaf water, closing stomata, and lowering photosynthesis, as well as affecting enzyme activities and related processes. The use of chitosan nanoparticles enhances drought tolerance by reducing transpiration and maintaining relative water content. Additionally, the increase in oil yield with the application of plant growth- promoting bacteria plus CS nanoparticles is attributed to improved nutrient availability and higher grain and oil content. The use of 50% CF, growth- promoting bacteria, and CS nanoparticles significantly increased chlorophyll content compared to untreated plants. It appears that this combined application increases protein content and Rubisco active enzyme activity, enhancing Calvin cycle reactions, which boosts Rubisco carboxylation activity and improves photosynthesis. Furthermore, growth- promoting bacteria increase chlorophyll and carotenoid levels by improving nutrient availability, including potassium.

Conclusion

In general, the results showed that the integrated application of 50% recommended chemical fertilizer combined with biofertilizer and chitosan nanoparticles under supplemental irrigation is recommended as a sustainable, profitable, and farmer-advisable nutrient package to enhance the quantitative and qualitative yield of camelina in rainfed and water-limited regions. The use of these inputs improves the absorption of nutrients and increases the efficiency of fertilizer use, thereby improving the physiological indicators of the plant, increasing yield, and improving the quality and composition of Camelina oil. Also, this strategy can have positive effects on plant adaptation and production sustainability in rainfed conditions where environmental stresses, especially moisture limitation, exist.

Keywords: Chlorophyll content, Nanotechnology, Oil compounds, Water stress

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۲۱۲-۱۸۳

بهبود عملکرد کمی و کیفی دانه کاملینا (*Camelina sativa* L.) با کاربرد تلفیقی کودهای شیمیایی، زیستی و نانوکیتوزان در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

عبدالله جوانمرد^{۱*}، محمد حقانی‌نیا^۱، حانیه شب‌خیز^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

چکیده

به منظور ارزیابی اثرات کاربرد تلفیقی کودهای شیمیایی، زیستی و نانوذرات کیتوزان بر صفات فیزیولوژیک، عملکرد دانه، کمیت و کیفیت روغن گیاه کاملینا (*Camelina sativa* L.)، آزمایشی به صورت کرت‌های خردشده برپایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۱۶ تیمار و سه تکرار در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه طی دو سال زراعی اجرا گردید. عامل اصلی شامل شرایط آبیاری (دیم و آبیاری تکمیلی) و عامل فرعی شامل تیمارهای مختلف کودی (بدون کاربرد کود به عنوان شاهد، ۱۰۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده (CF)، کود زیستی (BF)، نانوذرات کیتوزان (CS)، ۵۰ درصد کود شیمیایی + کود زیستی، ۵۰ درصد کود شیمیایی + نانوذرات کیتوزان، کود زیستی + نانوذرات کیتوزان، ۵۰ درصد کود شیمیایی + کود زیستی + نانوذرات کیتوزان) بود. نتایج نشان داد که شرایط دیم با کاهش معنی‌دار محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، محتوای نسبی آب برگ و پایداری غشای سلولی موجب افزایش مالون‌دی‌آلدئید و در نهایت کاهش عملکرد دانه و روغن شد. این تغییرات فیزیولوژیک با افت کیفیت روغن، به‌ویژه کاهش نسبت اسیدهای چرب غیراشباع به اشباع همراه بود. در مقابل، آبیاری تکمیلی همراه با کاربرد تلفیقی کود زیستی و نانوذرات کیتوزان، به‌ویژه در ترکیب با ۵۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده، با بهبود وضعیت آبی گیاه، افزایش کلروفیل a، b، کاروتنوئیدها و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو، شرایط فیزیولوژیک مطلوب‌تری برای پُر شدن دانه فراهم کرد. به طوری که کاربرد تلفیقی تیمارهای کودی، محتوای کلروفیل a، b و کاروتنوئید را نسبت به عدم مصرف به ترتیب ۱۱۴/۵۳، ۱۳۷/۸۸ و ۱۲۱/۵۱ درصد افزایش داد. همچنین این بهبود فیزیولوژیک منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد دانه و روغن و همچنین ارتقای کیفیت روغن از طریق افزایش اسیدهای چرب غیراشباع گردید. افزون‌بر این، ترکیبات اصلی روغن کاملینا شامل اسیدهای چرب اشباع شده پالمیتیک (۳/۷۳-۶/۸۵ درصد)، اسیدهای استئاریک (۲/۳۳-۴/۳۴ درصد) و همچنین اسیدهای چرب غیراشباع اولئیک (۱۶/۴۳-۱۴/۴۶ درصد)، لینولئیک (۱۹/۱۹-۲۵/۱۴ درصد)، لینوئیک (۳۱/۹۲-۳۶/۷۹ درصد) و ایکوزنوئیک اسید (۷/۸۱-۱۱/۴۴ درصد) بود. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که بهبود عملکرد و کیفیت روغن کاملینا تحت مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی، به‌طور مستقیم با تقویت فرایندهای فیزیولوژیک، حفظ کارایی فتوسنتزی و کاهش تنش اکسیداتیو مرتبط است. کاربرد تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده همراه با کود زیستی و نانوذرات کیتوزان در شرایط آبیاری تکمیلی، به عنوان یک بسته تغذیه‌ای پایدار، سودمند و قابل توصیه به کشاورزان برای افزایش کمی و کیفی عملکرد کاملینا در مناطق دیم و دارای محدودیت آب پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ترکیبات روغن، تنش کم‌آبی، محتوای کلروفیل، نانو فناوری

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، آذربایجان شرقی، ایران

(Email: a.javanmard@maragheh.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97784.1270>

مقدمه

دانه‌های روغنی در بین گیاهان زراعی اهمیت خاصی داشته و بعد از غلات دومین ذخایر غذایی جهان را تشکیل می‌دهند. اراضی وسیعی در سرتاسر جهان به کشت این گیاهان باارزش اختصاص پیدا کرده است. این گیاهان حاوی ۲۰ الی ۵۰ درصد روغن هستند که در اغلب موارد حاوی ترکیبات متوازنی از اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع می‌باشند (Zafar et al., 2019). کاملینا (*Camelina sativa* L.) به‌عنوان یکی از این گیاهان به خانواده شب‌بوها تعلق داشته که به‌صورت علفی، دارای ساقه راست و کمی خشن، به ارتفاع ۳۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. منشأ اولیه آن نواحی استپی آسیا بوده و از آنجا به مناطق دیگر راه یافته است (Waraich et al., 2013). تولید جهانی این گیاه به‌ویژه در کشورهای کانادا و برخی کشورهای اروپایی به‌دلیل محتوای اسیدهای چرب امگا-۳ و مقاومت به تنش‌های محیطی رو به افزایش است. براساس آمارهای موجود، عملکرد دانه کاملینا در سطح جهانی به‌ترتیب در محدوده ۱۳۰۰ تا ۳۳۰۰ کیلوگرم در هکتار متغیر است (Zanetti et al., 2021). عملکرد و سطح زیرکشت کاملینا برخلاف گیاهان راهبردی (گندم و ...)، در آمار رسمی FAO به‌صورت مستقل و جهانی ثبت نمی‌شود و آمارها عمدتاً به‌صورت گزارش‌های موردی یا بررسی‌های پژوهشی هستند. برای مثال، سطح زیرکشت کشور روسیه در سال ۲۰۱۹ حدود ۷۵۶۰۰ هکتار، کشور کانادا در سال ۲۰۲۰ حدود ۴۰۵۰ هکتار و کل اروپا حدود ۱۰ هزار هکتار برآورد شده است. در ایران هم با توجه به سیاست‌های وزارت جهاد کشاورزی مبنی بر توسعه کشت دانه‌های روغنی و کاهش وابستگی به واردات، کشت کاملینا در مناطق سردسیر و معتدل گسترش یافته است. باین‌حال، گزارش‌های موجود نشان می‌دهد که میانگین عملکرد دانه در مزارع ایران (۵۰۰ کیلوگرم در هکتار) در مقایسه با پتانسیل ژنتیکی این گیاه، به‌دلیل محدودیت‌های مدیریتی و تغذیه‌ای، پایین‌تر از میانگین جهانی (۱۴۱۰ کیلوگرم در هکتار) برآورد می‌شود. متأسفانه آمار رسمی سطح زیرکشت که تمام استان‌ها را برای سال ۱۴۰۳ یا ۱۴۰۴ در یک گزارش رسمی تجمیع کرده باشد، در دسترس نیست. داده‌ها به‌صورت استانی و موردی است. به‌عنوان مثال، در استان خراسان شمالی، سطح زیرکشت در سال ۱۴۰۴ حدود ۳۶۵۰ هکتار گزارش شده است. همچنین سطح زیرکشت در سال ۱۴۰۲ حدود ۱۳ هزار هکتار تخمین زده شده است

(Arshad et al., 2022; Neupane et al., 2022). کاملینا می‌تواند به‌خوبی در آب‌وهوای معتدل با خاک سبک و متوسط به‌خصوص در خاک‌های لومی و شنی با کمترین حاصلخیزی و بدون استفاده از آفت‌کش‌ها رشد نماید. این گیاه تحمل بالایی به گرما و خشکی داشته و در تناوب با گندم و دیگر غلات جهت افزایش کیفیت خاک استفاده می‌گردد. پژوهش‌ها نشان داده که کارایی کاملینا در شرایط غرقابی، بسیار پایین است. شرایط شدید غرقابی در اوایل فصل رشد منجر به تلف شدن ۲۷ تا ۳۲ درصد گیاهان در زمان برداشت می‌شود (Gugel & Falk, 2006). روغن کاملینا در بازارهای جهانی به‌عنوان یک روغن باارزش و باکیفیت بالا شناخته‌شده که علاوه‌بر مصارف غذایی در صنایع آرایشی، بهداشتی و صنعتی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Sentís-Moré et al., 2023).

از جمله مهم‌ترین عوامل محیطی که پراکنش، رشد و تولید موفق گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، میزان آب در دسترس گیاه است. کاهش میزان آب در دسترس گیاه موجب بروز تنش خشکی و ایجاد تغییرات موفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی متعددی در گیاهان می‌شود (Farooq et al., 2009). با توجه به اینکه تنش خشکی نسبت به سایر تنش‌های محیطی کمیت و کیفیت گیاهان را بیشتر محدود می‌کند، در ایران نیز تنش خشکی یکی از اصلی‌ترین عوامل کاهش عملکرد گیاهان زراعی و باغی محسوب می‌شود (Ebrahimian et al., 2019). تنش ناشی از کمبود آب موجب کاهش رشد، وزن خشک، بسته شدن روزنه‌ها و افت سطح برگ، تخریب رشد سلولی، کاهش فتوسنتز، تخریب و کاهش پروتئین‌ها، تخریب آنزیم‌ها، تولید مواد سمی، اختلالات هورمونی نظیر افزایش اسید آبسزیک و کاهش تشدیدکننده‌های رشد، آسیب به پلاستیدها و رنگیزه‌ها، کاهش کلروفیل و کاهش رشد ریشه می‌شود (Anwaar et al., 2020). در تحقیقی که روی کاملینا تحت رژیم‌های آبیاری مختلف انجام شد، پژوهشگران نتیجه گرفتند که هر دو رژیم آبیاری محدود، بر ویژگی‌های فیزیولوژیک (محتوای آب نسبی، مقاومت روزنه‌ها، دمای تاج‌پوشش و محتوای کلروفیل کل) و زراعی (تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف، وزن هزار دانه و عملکرد دانه) تأثیر منفی می‌گذارند و راندمان مصرف آب و همچنین محتوای روغن را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند (Rad et al., 2024). در پژوهش دیگری، ارزیابی عملکرد و ترکیبات روغن کاملینا

ترین راه برای جبران کمبود مواد غذایی و حاصلخیزی خاک، لازم به نظر می‌رسد. ولی هزینه‌های زیاد کودهای شیمیایی در مقادیر پیشنهادی و آلودگی خاک و آب ناشی از مواد شیمیایی ساخت بشر، تقاضای بیشتر را برای مصرف کودهای ارگانیک طلب می‌کند (Bano et al., 2024). به‌طور کلی، محصولاتی که شامل سلول‌های زنده از گونه‌های مختلف ریزجانداران هستند که توانایی تبدیل عناصر غذایی از شکل غیرقابل جذب به فرم جذب برای استفاده گیاهان را داشته و یا می‌توانند ترکیبات محرک رشد گیاه را تولید کنند و باعث جوانه‌زنی بهتر بذر و توسعه بهتر ریشه در خاک می‌شود، به‌عنوان کودهای زیستی محسوب می‌گردد (Maqic et al., 2020). از جمله مهم‌ترین ریزجاندارهایی که به‌عنوان کودهای زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرند می‌توان به *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Rhizobia*، باکتری‌های حل‌کننده فسفات، میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد گیاه^۱ اشاره کرد. این ریزجانداران توسط سازوکارهایی همچون افزایش جذب آب و مواد غذایی، تثبیت نیتروژن، تبدیل فسفات معدنی به آلی، تولید سیدروفور، آزاد کردن متابولیت‌ها و تولید هورمون‌های گیاهی از قبیل اکسین و جیبرلین موجب تحریک رشد گیاه می‌گردند (Giri et al., 2019). نصرالله‌زاده و همکاران (Nasrollahzadeh et al., 2023) نتیجه گرفتند که کاربرد کودهای شیمیایی بر کیفیت روغن کلزا (*Brassica napus* L.) تأثیر منفی گذاشت. در مقابل، کاربرد باکتری‌های محرک رشد به‌ویژه در ترکیب با کودهای شیمیایی، عملکرد دانه، محتوای روغن و کیفیت و همچنین تولید بیودیزل را با بهبود جذب مواد مغذی افزایش داد. همچنین این پژوهشگران مشاهده کردند که استفاده از باکتری‌های محرک رشد نه‌تنها عملکرد و کیفیت روغن کلزا را افزایش داد، بلکه استفاده از کودهای شیمیایی را به حداقل رساند. در پژوهشی دیگری که با هدف بررسی اثرات کودهای زیستی و شیمیایی بر صفات کمی و کیفی سیاهدانه (*Nigella sativa*) انجام شد، مشاهده گردید که بیشترین اسید اولئیک (۲۷/۸۵ درصد) و اسید لینولئیک (۵۶/۶ درصد) روغن سیاهدانه در تیمارهای تلفیقی به دست آمد. همچنین بالاترین محتوای نیتروژن، فسفر، پتاسیم و در نهایت عملکرد دانه و روغن در تیمار تلفیقی حاصل شد (Moradzadeh et al., 2021).

اخیراً نانوفناوری در بخش کشاورزی کاربردهای بسیار زیادی داشته و در آینده نزدیک میزان این کاربردها افزایش خواهد یافت

(*Camelina sativa* L.) نشان داد که در شرایط آبیاری نرمال، محتوای روغن دانه به‌میزان ۳۱/۰۲ درصد به دست آمد که در مقایسه با سایر رژیم‌های آبیاری (تنش کم‌آبی) بیشتر بود. تنش کم‌آبی اگرچه منجر به افزایش اسیدهای چرب اشباع (پالمیتیک، استئاریک و آراشیدیک) شد، اما ترکیب اسیدهای چرب غیراشباع شامل اولئیک، لینولئیک و لینولنیک را به‌صورت معنی‌دار کاهش داد (Shiranirad et al., 2023).

آبیاری تکمیلی یکی از روش‌های مؤثر در جبران کمبود رطوبت خاک و بالا بردن کارایی مصرف آب و جلوگیری از نوسان عملکرد و دستیابی به تولید پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Mohtashami et al., 2020). آبیاری تکمیلی به مفهوم کاربرد مقدار محدودی آب در گیاه زراعی در زمان نبود بارندگی می‌باشد تا آب کافی برای رشد گیاه به‌منظور افزایش و یا ثبات عملکرد را تأمین نماید. به‌طور کلی اثر مهم آبیاری تکمیلی شامل بهبود عملکرد، ثبات تولید در سال‌های مختلف و بهبود شرایط جهت استفاده از ارقام اصلاح‌شده، کودهای شیمیایی و علف‌کش‌ها بدون توجه به پراکنش بارندگی‌های فصلی می‌باشد (Reddy & Reddy, 2016). اعمال آبیاری تکمیلی در مرحله بحرانی نیاز آبی گیاه، یکی از روش‌های مؤثر در جلوگیری از نوسان عملکرد و دستیابی به تولید پایدار محصولات کشت دیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در این روش، اثرات خشکی بر گیاه کاهش و رطوبت نسبتاً مناسبی برای گیاه به‌ویژه در مراحل حساس رشد فراهم می‌شود و به‌دنبال آن عملکرد بهبود می‌یابد (Alkatb & Geosciences, 2022). در تحقیقی که روی کلزا (*Brassica napus* L.) انجام شد، استفاده از آبیاری تکمیلی باعث افزایش عملکرد، اجزای عملکرد، درصد روغن، شاخص برداشت و بهره‌وری آب گردید. این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که آبیاری تکمیلی در دو مرحله گل‌دهی و پُر شدن دانه می‌تواند باعث افزایش قابل توجهی در کمیت و کیفیت روغن گیاه نسبت به شرایط دیم گردد (Mohtashami et al., 2020).

در بوم‌نظام‌های کشاورزی، آب و کود دو عامل کلیدی و تعیین‌کننده هستند که رشد و عملکرد گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. کاهش حاصلخیزی خاک در بسیاری از کشورهای در حال توسعه و استفاده دائم گیاهان از ذخایر غذایی خاک بدون جایگزین مناسب و کافی باعث کاهش توان تولیدی مواد غذایی توسط خاک شده است. در این مورد، استفاده از کودهای شیمیایی به‌عنوان سریع-

(Pramanik et al., 2020). با استفاده از نانو فناوری می‌توان کمیت و کیفیت گیاهان را افزایش داد (Sathiyabama & Manikandan, 2021). نانومواد به‌عنوان موادی با اندازه ۱ تا ۱۰۰ نانومتر تعریف می‌شوند که به‌راحتی وارد گیاه و جذب آن می‌شوند. بر همین اساس، نانوذرات، موادی بوده که می‌توانند یک یا چند عنصر غذایی را در اختیار گیاه قرار دهند و کارایی بیشتری نسبت به کودهای شیمیایی داشته باشند. استفاده از نانوذره‌هایی که ویژگی‌هایی همچون غلظت مؤثر، قابلیت حل‌پذیری مناسب، ثبات و تأثیرگذاری بالا و رهايش کنترل‌شده را دارند سبب افزایش کارایی عناصر غذایی می‌شوند، به‌طوری که علاوه بر رها سازی تدریجی عناصر غذایی، جذب و انتقال آن‌ها از طریق برگ نیز به‌سهولت انجام می‌گیرد (Ekim et al., 2024). نانوذرات به‌راحتی وارد گیاه می‌شوند و باعث ایجاد تغییراتی در ویژگی‌های موفولوژیک و فیزیولوژیک گیاهان می‌شوند. به‌عنوان مثال، در بعضی از پژوهش‌ها گزارش شده که نانوذرات باعث افزایش بنیه بذر، هم‌زمانی جوانه‌زنی بذر، افزایش درصد جوانه‌زنی، افزایش طول ریشه و ساقه، بهبود وزن تر و خشک، ارتفاع گیاه، تعداد گره و محتوای کلروفیل شده و در نهایت منجر به بهبود رشد گیاه در بسیاری از محصولات می‌شوند (Afshari et al., 2021). امروزه کاربرد مواد فعال زیستی و سازگار با محیط‌زیست برای افزایش رشد گیاه و حفظ نباتات به‌عنوان یک بخش مهم نظام کشاورزی مدرن محسوب می‌گردد. کیتوزان یک ماده غیرسمی، زیست‌تخریب‌پذیر، آب‌دوست، ضدباکتری بوده که با محیط زیست سازگار است (Narasimhamurthy et al., 2022). پژوهش‌های مختلف نشان دادند که کاربرد کیتوزان موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های کلیدی متابولیسم نیتروژن (نیترات رودک‌تاز و گلوتامین سنتتاز) و همچنین بهبود نقل و انتقال نیتروژن در شرایط تنش می‌گردد که این موضوع موجب بهبود رشد و عملکرد گیاه می‌شود (Balusamy et al., 2022). کاربرد کیتوزان می‌تواند اثرات زیان‌بار تنش‌های زیستی و غیرزیستی را کاهش داده و از طرفی به‌دلیل فراهمی برخی از عناصر غذایی در بهبود کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی به‌طور چشمگیری مؤثر واقع می‌شود (Mehmood et al., 2020). در مطالعه‌ای به‌منظور ارزیابی اثرات نانوذرات کیتوزان بر عملکرد، ویژگی‌های بیوشیمیایی و مشخصات اسیدهای چرب لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) تحت تنش خشکی، مشاهده شد که کاربرد نانوذرات کیتوزان، اثرات تنش خشکی را تعدیل و باعث بهبود

محتوای نسبی آب، شاخص کلروفیل، عملکرد دانه و بیولوژیک در مقایسه با شاهد شده است. همچنین این پژوهشگران مشاهده کردند که استفاده از نانوذرات کیتوزان، کیفیت اسیدهای چرب را از طریق کاهش اسیدهای چرب اشباع و افزایش اسیدهای چرب غیراشباع بهبود بخشید (Dolatkhah Dashtman et al., 2023). بنابراین، هدف از این پژوهش، ارزیابی پتانسیل کاربرد تلفیقی منابع کودی (شیمیایی، زیستی و نانوکیتوزان) به‌عنوان یک راهبرد جایگزین و پایدار برای کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی و مقابله با محدودیت‌های آبی است. این مطالعه با تمرکز بر بررسی هم‌افزایی این منابع، به‌دنبال تحلیل دقیق اثرات آن‌ها بر بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک، افزایش عملکرد دانه و همچنین بهبود پروفایل اسیدهای چرب روغن کاملینا تحت دو رژیم رطوبتی دیم و آبیاری تکمیلی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال‌های زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه با طول جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی و عرض ۳۷ درجه و ۲۳ دقیقه شمالی با ارتفاع ۱۴۸۵ متر از سطح دریا اجرا شد. پیش از شروع آزمایش، سه نمونه خاک به‌صورت تصادفی از نواحی مختلف کرت‌های آزمایشی انتخاب و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. داده‌های تکمیلی در جدول ۱ ارائه شده است. علاوه بر این، مشخصات اقلیمی منطقه مورد آزمایش (میانگین دما و بارش ماهیانه) در جدول ۲ ارائه شده است. آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۱۶ تیمار و سه تکرار اجرا گردید. عامل اصلی در دو سطح شامل کشت دیم و آبیاری تکمیلی و عامل فرعی شامل منابع مختلف کودی (شاهد، کود شیمیایی توصیه شده (نیتروژن، فسفر، پتاسیم و گوگرد)، باکتری‌های محرک رشد (ازتوبارور ۱ + سولفات بارور ۱ + فسفات بارور ۲ + پتابارور ۲)، نانوذرات کیتوزان، ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، ۵۰ درصد کود شیمیایی + نانوذرات کیتوزان، باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان) بود. بذره‌ای مورد استفاده در این آزمایش رقم سهیل با درصد جوانه‌زنی ۹۸ درصد و خلوص ۹۹ درصد بود که از شرکت شفا بیستون کرمانشاه تهیه شدند.

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش
Table 1- Some physical and chemical properties of the soil where the experiment was conducted

بافت Texture	شن Sand	سیلت Silt	رمل Clay	ظرفیت زراعی Field capacity (%)	نقطه پژمردگی دائم Permanent wilting point (%)	نیتروژن کل Total nitrogen (g.kg ⁻¹)	فسفر قابل جذب Absorbable phosphorus (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم قابل جذب Absorbable potassium (mg.kg ⁻¹)	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity (cmol.kg ⁻¹)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	ماده آلی Organic matter (g.kg ⁻¹)
شنی رسی لومی Sandy clay loam	57	16	27	26.9	13.7	0.91	8.8	558.36	26.5	7.95	1.14	1.8

جدول ۱- میانگین دمای ماهانه و کل بارندگی ماهانه در فصول رشد ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ و میانگین بلندمدت

Table 2- Average monthly temperature and total monthly precipitation during the 2020 and 2021 growing seasons and the long-term average

سال Year	اسفند March	فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July
میانگین دمای ماهانه Average monthly temperature (°C)					
2020	7.8	11.8	19.01	24.2	28
2021	8.74	16.29	21.26	27.21	28.26
میانگین دو ساله Two-years average	8.27	14.05	20.18	25.71	28.13
میانگین ۱۰ ساله Ten-years average	8.32	11.5	18.35	24.9	27.85
مجموع بارندگی ماهانه Total monthly rainfall (mm)					
2020	49.94	63.3	12	2.6	0.1
2021	32.92	12.01	13.33	0.01	3.1
میانگین دو ساله Two-years average	41.43	37.66	12.67	1.31	1.60
میانگین ۱۰ ساله Ten-years average	36.33	48.05	29.2	2.95	0.25

گوگرد بنتونیتی در هکتار بود. همچنین باکتری‌های محرک رشد مورد استفاده در این پژوهش شامل: ۱- کود زیستی از توبارور^۱ حاوی 10^7 تا 10^8 CFU g⁻¹ باکتری تثبیت‌کننده نیتروژن *Pantoea agglomerans* سویه O₄، ۲- کود زیستی فسفات بارور^۲، حاوی 10^7 تا 10^8 CFU g⁻¹ باکتری‌های *Pseudomonas putida strain* P₁₃ و *Pantoea agglomerans strain* P₅، ۳- کود زیستی پتارور^۳ حاوی 10^7 تا 10^8 CFU g⁻¹ باکتری‌های *Pseudomonas koreensis strain* S₁₄ و *Pseudomonas vancouverensis strain* S₁₉ و کود زیستی سولفورور^۱ حاوی 10^7 تا 10^8 CFU g⁻¹ باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد *Thiobacillus strain* T₄₀، بودند. کودهای زیستی مورد استفاده از شرکت زیست فناوری سبز تهیه شدند. کودهای زیستی به‌روش بذر مال و با نسبت ۱۰۰ گرم برای یک هکتار مورد استفاده قرار گرفتند. کودهای زیستی قبل از کاشت و دور از تابش مستقیم خورشید با بذر آغشته شدند. برای این کار، بذرها را در سایه روی نایلون و سطح تمیزی ریخته و به‌ازای هر هکتار زراعت، یک بسته از کود زیستی را در حجم مناسبی از آب فاقد کلر حل و پس از صاف کردن محلول کودی توسط پارچه‌ای نازک، آن را به‌وسیله آب‌پاش روی بذرها پاشیده و به‌خوبی مخلوط نموده تا تمامی

عملیات تهیه بستر شامل شخم، دیسک و تسطیح با توجه به شرایط زمین و رسیدن رطوبت زمین به حد ظرفیت زراعی انجام گردید. در ادامه، کرت‌هایی با ابعاد شش مترمربع و شامل هشت ردیف کشت ایجاد شد. لازم به ذکر است که فواصل بین خطوط کشت و روی خطوط کشت به‌ترتیب ۱۰ و ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بذرها در اواخر اسفند ماه به‌میزان هفت کیلوگرم در هکتار و با تراکم ۸۰ بوته در مترمربع و در عمق یک سانتی‌متری خاک کشت شدند. به‌منظور جلوگیری از تداخل تیمارها، فاصله هر کرت با کرت مجاور ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین بلوک‌ها دو متر در نظر گرفته شد. در طول این پژوهش، از هیچ‌گونه مواد شیمیایی از قبیل علف‌کش، آفت‌کش و ... استفاده نشده و جهت مبارزه با علف‌های هرز نیز در دو نوبت وجین دستی صورت پذیرفت.

تیمارهای کودی

کودهای شیمیایی براساس نتایج آزمایش خاک شامل ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره (یک سوم از کود نیتروژن در هنگام تهیه بستر به زمین داده شد و دو سوم باقی‌مانده کود نیتروژن بعد از کاشت به صورت سرک در دو مرحله تا قبل از گل‌دهی توزیع شد)، ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل به‌صورت پیش‌کاشت، پتاسیم سولفات ۵۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت پیش‌کاشت و ۵۰ کیلوگرم

1- Azeto BARVAR. 1

2- Phosphate BARVAR. 2

3- Pota BARVAR. 2

آن‌ها به‌طور یکنواخت به کود آغشته شوند.

تهیه نانو کیتوزان

کیتوزان با وزن مولکولی پایین (۱۰۰ کیلو دالتون) و درجه استیل زدایی (DD) ۸۵ درصد از شرکت سبزگستر آذین ترکان- مراغه و تری‌پلی فسفات (TPP) با درجه تحلیلی از شرکت مرک آلمان تهیه شد. محلول نانو کیتوزان به‌روش احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2018) آماده گردید. محلول همگن کیتوزان (۰/۱ درصد وزنی) با افزودن یک گرم کیتوزان به ۱۰۰۰ میلی‌لیتر از محلول اسید استیک ۰/۱ درصد وزنی آماده شد. پس از انحلال کامل، محلول کیتوزان با افزودن تدریجی محلول TPP (۰/۴ گرم در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر) همراه با هم‌زدن شدید، تهیه شد. یک محلول ابری همگن نشان-دهنده تشکیل نانوذرات کیتوزان از طریق روش ژل‌سازی به دست آمد. علاوه بر این، pH نانو کیتوزان با افزودن KOH ۰/۱ مولار در حدود ۶/۵ تنظیم شد. لازم به ذکر است که دُز مؤثر نانو کیتوزان براساس آزمایش اولیه با طیف وسیعی از غلظت‌ها (۰/۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۱ w.v⁻¹) برای مؤثرترین دُز روی گیاهان کاملینا انتخاب شد. در نهایت، قبل از گل‌دهی به‌منظور افزایش راندمان نفوذ محلول در گیاه، محلول پاشی کیتوزان در زمان عدم وجود باد و باران و قبل از طلوع آفتاب که منافذ گیاه باز بود به‌گونه‌ای که گیاه کاملاً خیس شود، صورت پذیرفت.

سنتز و خصوصیات نانو کیتوزان

طیف FTIR کیتوزان و نانوذرات کیتوزان خشک‌شده برای بررسی خصوصیات ساختاری ثبت شد (شکل ۱a). ارتعاش کششی گروه عاملی-OH در هر دو نانوذرات کیتوزان و کیتوزان توسط نوار ظاهر شده در حدود ۳۵۰۰ سانتی‌متر در شکل ۱ تأیید شده است. همچنین، در طیف FTIR کیتوزان، پیکی در ناحیه ۱۰۷۴ سانتی‌متر مشاهده می‌شود که مربوط به ارتعاش حلقه پیرانوز در زنجیره اصلی (ستون فقرات) کیتوزان است. قله‌های ۱۶۳۹ و ۱۵۶۰ سانتی‌متر به‌ترتیب از کشش C=O به‌دلیل خمش میانی I و N-H به‌دلیل وجود گروه آمین اولیه روی کیتوزان به وجود می‌آیند. پس از فرآیند اتصال عرضی برای رسیدن به نانوذرات کیتوزان، یک پیک جدید به‌دلیل کشش

ضدمتقارن P-O-P جزء TPP ظاهر می‌شود. در طیف نانوذرات، پیک‌های مشخصه کیتوزان تغییر نسبی به فرکانس‌های پایین‌تر را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده برهم‌کنش کیتوزان-TPP است. پیک مشخصه کیتوزان در الگوی XRD در حدود $2\theta = 20^\circ$ ظاهر می‌شود که ساختار کریستالی کیتوزان را نشان می‌دهد (شکل ۱b). تغییر در ساختار کریستالی کیتوزان پس از اتصال عرضی یونی با ناپدید شدن پیک مشخصه آن در دمای $2\theta = 20^\circ$ تأیید می‌شود. یک پیک وسیع در $2\theta = 22/1^\circ$ در الگوی XRD نانوذرات کیتوزان، پیک رایج پلی ساکاریدهای آمورف است. ریخت‌شناسی سطح نانوذرات کیتوزان با میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت که نشان‌دهنده تشکیل نانوذرات کروی است (شکل ۱c). میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM، شکل ۱d)، نانوذرات کیتوزان کروی تولیدشده را با اندازه قطر حدود ۲۰۰ نانومتر تأیید کرد.

آبیاری تکمیلی

آبیاری تکمیلی در دو دوره رشد حساس کاملینا شامل مرحله گل‌دهی^۳ و مرحله غلاف‌دهی^۴ با سیستم آبیاری قطره‌ای انجام شد. برای تأمین آب مورد نیاز گیاه در آبیاری تکمیلی، مقدار رطوبت در خاک در حالت ظرفیت مزرعه در قطعه‌های مورد نظر قبلاً تعیین گردید. از روش وزن سنجی برای تعیین مقادیر آبیاری با استفاده از اندازه‌گیری رطوبت خاک از عمق رشد ریشه در مرکز هر کرت استفاده شد. بدین منظور در هر بار آبیاری تکمیلی، دو روز قبل از اعمال آبیاری، نمونه‌های خاک از کرت‌های آزمایشی اخذ گردید و پس از اندازه‌گیری وزن تر، به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس توزین گردید. سپس میزان آب آبیاری با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد (Katerji et al., 2008).

$$I_g = [(\theta_{fc} - \theta) \times p \times D \times A \times 100] / IE \quad (1)$$

که در آن، I_g : نیاز آبیاری (متر مکعب)، θ_{fc} : میزان رطوبت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه، θ : رطوبت خاک در طول نمونه‌برداری، p : وزن مخصوص ظاهری خاک (کیلوگرم بر متر مکعب)، D : عمق رشد ریشه، A : مساحت کرت (متر مربع) و IE : راندمان آبیاری در نظر گرفته شده است. در مرحله گل‌دهی و مرحله تشکیل غلاف، کمبود

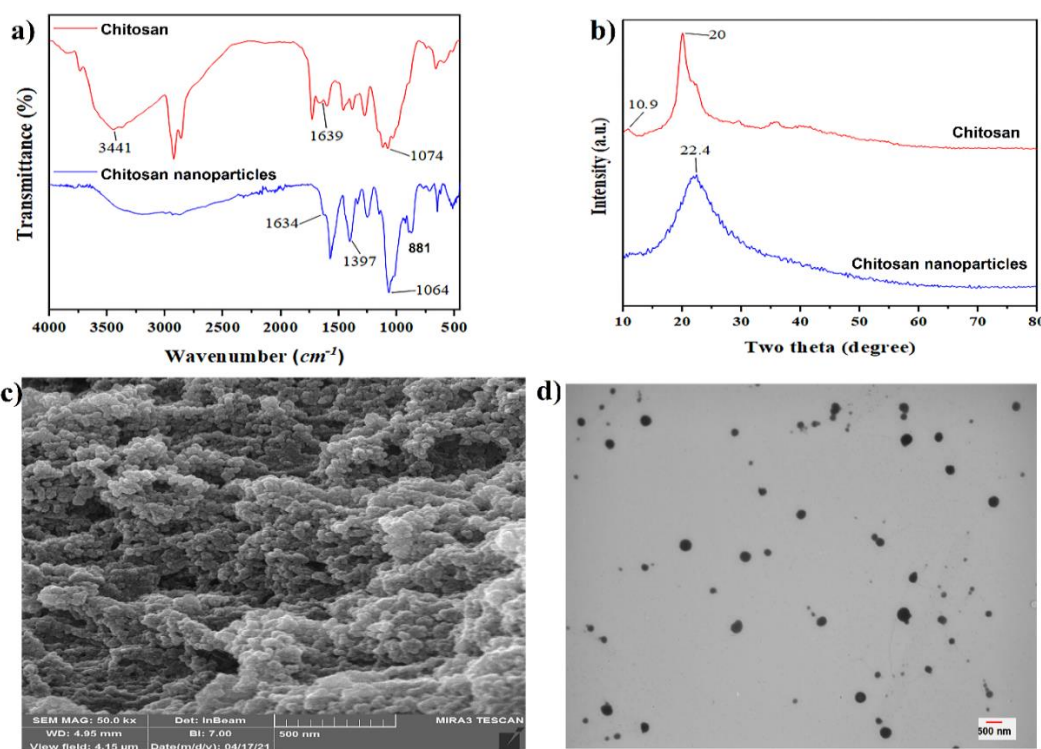
3- BBCH stage 64: Full flowering (approximately 50% of flowers open)

4- BBCH stage 71: Beginning of pod development (first pods have reached their final size)

1- Degree of Deacetylation

2- Tripolyphosphate

آبیاری تکمیلی انجام شد. علاوه بر این، برای اندازه‌گیری دبی از یک بشر با حجم مشخص استفاده گردید. مدت زمان لازم برای پُر شدن بشر به وسیله کورنومتر اندازه‌گیری و دبی از طریق معادله ۲ محاسبه گردید.



شکل ۱- تجزیه و تحلیل کیتوسان و نانوذرات کیتوزان؛ FT-IR (a)، XRD (b) SEM (c)، and TEM (d)

Fig. 1- Characterization of chitosan and chitosan nanoparticles: FT-IR (a), XRD (b), SEM (c), and TEM (d) spectra/images.

که برگ‌ها کاملاً سبز بودند از دستگاه کلروفیل سنسج (Instruments SPAD-502, Osaka, Japan) استفاده شد. در هر واحد آزمایشی، برگ‌های تازه بالغ‌شده انتخاب و ۱۰ نقطه روی برگ اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها برای هر واحد محاسبه گردید.

اندازه‌گیری کلروفیل و کاروتنوئید

کلروفیل و کاروتنوئید موجود در برگ‌های کاملینا به روش لیشنتالر (Lichtenthaler, 1987) مشخص گردید. بدین منظور، ۱۰۰ میلی گرم وزن تر برگ در داخل هاون چینی با ۱۰ میلی لیتر استون ۸۰ درصد خوب ساییده گردید. سپس لوله‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. حجم محلول فوقانی توسط استون ۸۰ درصد به ۲۵ میلی لیتر رسانده شد و مقدار کلروفیل و

آب مورد نیاز برای رساندن رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی محاسبه و به کرت‌های آزمایشی اضافه شد (Amiri-Darban et al., 2020). برای این منظور، در سال اول در تاریخ‌های ۴ خرداد و ۲۵ خردادماه و در سال دوم در تاریخ‌های ۲۶ اردیبهشت و ۲۷ خردادماه

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2)$$

که در آن، Q ، V و t : به ترتیب دبی آب برحسب مترمکعب در ثانیه، حجم ظرف برحسب مترمکعب و مدت زمان لازم برای پُر شدن ظرف برحسب ثانیه می‌باشد. با توجه به اینکه تعداد قطره چکان موجود در هر کرت و همچنین دبی آب ورودی به سطح هر کرت مشخص می‌باشد، زمان مورد نیاز برای رسیدن به حجم آبیاری مورد نظر برای هر کرت از طریق معادله ۳ محاسبه گردید.

$$\text{دبی آب ورودی} \times \text{تعداد قطره چکان در هر کرت} = \frac{\text{حجم آب مورد نیاز}}{\text{زمان مورد نیاز}} \quad (3)$$

اندازه‌گیری شاخص کلروفیل

به منظور اندازه‌گیری شاخص کلروفیل قبل از برداشت و هنگامی-

انتهایی کرت به عنوان اثر حاشیه‌ای حذف و سپس بوته‌های موجود از سطح یک مترمربع برداشت و پس از خرمن کوبی و بوجاری، دانه‌ها از کاه و کلش جدا و پس از آن عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

استخراج روغن

به منظور استخراج روغن موجود در بذور کاملینا، ۵۰ گرم از نمونه بذری هر تیمار به وسیله آسیاب به صورت کامل پودر شده و به آن ۲۵۰ میلی لیتر پترولیوم اتر به عنوان حلال اضافه گردید. پس از آن، نمونه‌ها به شیکر منتقل و با سرعت ۱۶۰ دور در دقیقه به مدت هشت ساعت شیک شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی گراد سانتریفیوژ گردید. در ادامه، لایه رویی به وسیله کاغذ صافی فیلتر شده و جداسازی انجام گردید. لازم به ذکر است که به منظور استخراج کامل روغن مراحل ذکر شده دو الی سه بار تکرار گردید (Amani Machiani et al., 2021).

درصد و عملکرد روغن

جهت تعیین درصد روغن پس از اتمام آزمایش نمونه‌ها، از تفاضل وزن اولیه نمونه و وزن ثانویه بر وزن اولیه نمونه، درصد روغن محاسبه شد. علاوه بر این، جهت تعیین عملکرد روغن، عملکرد دانه در درصد روغن ضرب گردید (Mohtashami et al., 2020).

شناسایی اسیدهای چرب روغن

شناسایی اسیدهای چرب موجود در روغن کاملینا براساس آماده سازی نمونه‌ها به صورت مشتق متیل استر (Fame) صورت گرفت. برای آماده سازی فیم، ۰/۱ گرم از روغن کاملینا با ۰/۲ میلی لیتر محلول متانولیک KOH دو نرمال (۱۱/۲) گرم پتاسیم هیدروکسید در ۱۰۰ میلی لیتر متانول و ۱/۵ میلی لیتر هگزان مخلوط شده و سپس با سرعت ۲۵۰۰ دور در دقیقه به مدت یک دقیقه سانتریفیوژ شدند. لایه بالایی (سطحی) هر نمونه جداسازی و جهت آنالیز ترکیبات اسید چرب مورد استفاده قرار گرفت (Rezigi et al., 2012).

برای شناسایی ترکیبات اسیدهای چرب موجود در روغن کاملینا، دستگاه کروماتوگرافی گازی مدل Agilent 5977A ساخت کشور آمریکا متصل شده به طیف سنجی جرمی (GC-MS) و ستون HP-5MS پنج درصد فیل متیل پلی سیلوکسان، به طول ۳۰ متر، قطر

کاروتنوئید توسط دستگاه اسپکتروفتومتر با میزان جذب در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۶۳/۲ و ۶۴۶/۸ تعیین و غلظت کلروفیل و کاروتنوئید مشخص گردید.

محتوای نسبی آب

جهت تعیین محتوای رطوبت نسبی برگ‌های کاملینا، قطعات برگ‌ها پس از تعیین وزن تر بین دو کاغذ صافی درون ظروف پتری محتوای آب مقطر قرار گرفتند. پتری‌ها به مدت ۲۰ ساعت در دمای چهار درجه سانتی گراد و در تاریکی قرار داده شدند. سپس وزن برگ‌ها که در حالت تورژسانس کامل بودند، اندازه گیری شدند. نمونه‌های تر برگ در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و پس از آن وزن خشک اندازه گیری گردید و در نهایت محتوای نسبی آب برگ‌ها با استفاده از معادله ۴ محاسبه گردید (Levitt, 1980):

$$RWC (\%) = \frac{FW - DW}{TW - DW} \times 100 \quad (4)$$

که در آن، FW، DW و TW: به ترتیب وزن تر، وزن خشک و وزن برگ متورم شده می باشد.

سنجش محتوای مالون دی آلدیید

جهت تعیین غلظت مالون دی آلدیید، ۰/۲ گرم از بافت تازه برگ‌های کاملینا به همراه چهار میلی لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی مولار مخلوط و به مدت ۲۰ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی گراد و دور ۱۲۰۰۰ سانتریفیوژ شدند. ۰/۴ میلی لیتر عصاره استخراج شده با ۱/۲ میلی لیتر از محلول واکنش (شامل اسید تری کلرواستیک ۰/۱ درصد و تیوباربیوتیک اسید ۲۰ درصد) مخلوط و در دمای ۹۵ درجه در حمام آب گرم به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده و به منظور توقف واکنش به مدت ۳۰ دقیقه در حمام یخ قرار داده شدند. مخلوط سرد شده به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۱۰۰۰۰ سانتریفیوژ گردید و سپس شدت جذب در طول موج ۵۳۲ نانومتر اندازه گیری و غلظت مالون دی آلدیید برحسب نانومول بر گرم وزن تر گیاه گزارش شد (Heath & Packer, 1968).

عملکرد دانه

برداشت در سال اول در شانزدهم تیرماه و در سال دوم در بیستم تیرماه در مرحله رسیدگی کامل و زمانی که دانه‌ها به رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز بودند، انجام شد. بدین منظور، ابتدا دو ردیف کناری و

داخلی ۰/۲۵ میلی‌متر و ضخامت ماده جاذب ۰/۲۵ میکرومتر مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای جداسازی ترکیبات از دستگاه نام-برده شده با آشکارساز یونیزاسیون شعله‌ای FID و ستون VF-5MS به طول ۳۰ متر، قطر داخلی ۰/۲۵ میلی‌متر و ضخامت ماده جاذب ۰/۵۰ میکرومتر استفاده شد. در برنامه‌ریزی دمایی آون، ابتدا دما به مدت یک دقیقه در ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد نگه‌داری شد، سپس به تدریج دما با سرعت چهار درجه سانتی‌گراد بر دقیقه افزایش یافت تا به دمای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد رسید و به مدت دو دقیقه در این دما نگه‌داری شد. هلیوم به‌عنوان گاز حامل با سرعت جریان یک میلی‌لیتر بر دقیقه استفاده گردید. دمای محفظه تزریق و خط انتقال به‌ترتیب روی ۲۶۰ و ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. محفظه تزریق در حالت تقسیم (نسبت تقسیم ۱:۳۰) تنظیم شده بود (Amani Machiani et al., 2022). در نهایت، نرم‌افزار Chemstation و مخلوط FAME Supelco 37 Component FAME Mix Bellefonte, PA, USA به‌عنوان رفرنس جهت شناسایی ترکیبات مورد استفاده قرار گرفت. کمی کردن ترکیبات روغن با استفاده از انتگرال‌گیری و محاسبه مساحت سطح زیر پیک انجام گردید (Rezig et al., 2012).

آنالیز آماری

بعد از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، تجزیه واریانس مرکب داده‌ها به‌صورت کورت‌های دو بار خردشده با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۳ انجام شد و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel صورت پذیرفت. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

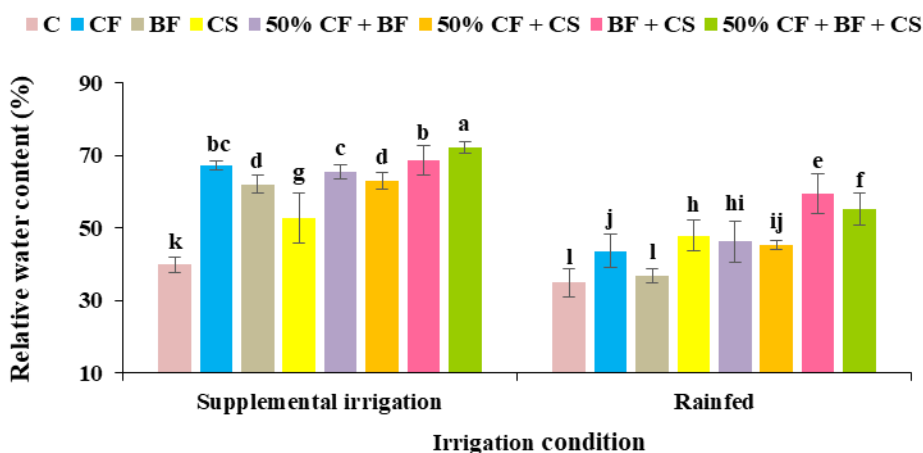
محتوای نسبی آب

اثر شرایط کشت، منابع کودی و اثر متقابل شرایط آبیاری و منابع کودی بر محتوای نسبی آب معنی‌دار بود. حداکثر محتوای نسبی آب برگ (۷۲/۲۶ درصد) در آبیاری تکمیلی با کاربرد ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان و کم‌ترین (۳۴/۹۴ درصد) محتوای نسبی آب در شرایط دیم بدون کاربرد کود مشاهده شد. آبیاری تکمیلی، محتوای نسبی آب را ۳۳ درصد نسبت به شرایط دیم افزایش داد. همچنین کاربرد تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان،

محتوای نسبی آب را در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی به‌ترتیب ۵۸/۳ و ۸۱/۲ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. علاوه‌بر این، در شرایط آبیاری تکمیلی، تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، محتوای نسبی آب را به‌ترتیب ۷/۳، ۱۶/۴ و ۳۶/۸ درصد در مقایسه با کاربرد جداگانه کود شیمیایی، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات کیتوزان افزایش داد، درحالی‌که در شرایط دیم استفاده از همین تیمار تلفیقی، محتوای نسبی آب را به‌ترتیب ۳۶/۴، ۶۲/۲ و ۲۴/۲ درصد نسبت به کاربرد انفرادی کودها افزایش داد (شکل ۲). محتوای نسبی آب، به وضعیت میزان آب در سلول‌های گیاهی به‌ویژه در شرایط تنش اشاره دارد. محتوای نسبی آب برگ به‌عنوان شاخص مهمی از وضعیت آب گیاه در نظر گرفته می‌شود که بیانگر تعادل بین آب جذب‌شده توسط گیاه و میزان تعرق آن است (Wasaya et al., 2021). کاهش محتوای نسبی آب برگ کاملینا در شرایط دیم به کاهش جذب آب توسط ریشه و همچنین افزایش تعرق نسبت داده می‌شود (Shemi et al., 2021). بر اثر خشکی، پتانسیل آب خاک کاهش می‌یابد که با کاهش پتانسیل آب خاک، گیاهان برای حفظ قدرت جذب آب و ایجاد جریان آب از خاک به ریشه‌ها باید پتانسیل آب درونی را با سازوکار تنظیم اسمزی کاهش دهند. سازوکار تنظیم اسمزی به حفظ رطوبت نسبی کمک کرده و از این طریق به بهبود رشد گیاه منجر خواهد شد (Al-Yasi et al., 2020). در طی این پدیده، غلظت برخی یون‌ها نظیر پتاسیم، سدیم و ... در واکوئل و نیز برخی متابولیت‌ها نظیر اسیدهای آمینه مثل پرولین، کربوهیدرات‌ها در سیتوسول افزایش می‌یابد و بدین ترتیب با تعادل پتانسیل اسمزی، فشار آماس سلول در سطح بالا حفظ و ادامه فعالیت‌های فیزیولوژیک گیاه امکان‌پذیر خواهد شد (Liao et al., 2022). در تأیید نتایج این پژوهش، اصلانی و همکاران (Aslani et al., 2023) گزارش کردند که محتوای نسبی آب تحت شرایط تنش خشکی به‌دلیل عدم تعادل اسمزی ایجادشده در ناحیه ریشه کاهش یافت. کاربرد تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، محتوای نسبی آب را در هر دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی بهبود بخشید. به نظر می‌رسد که استفاده از تیمار ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، با تجمع املاح اسمزی، پرولین، کربوهیدرات‌های غیرساختاری و تجمع یونی (پتاسیم، کلسیم و منیزیم)، تعادل اسمزی را حفظ و از این طریق به بهبود ظرفیت نگهداری آب توسط سلول‌ها،

(Khalilpour et al., 2021).

حفظ فعالیت‌های متابولیکی طبیعی سلول‌ها، تسهیل جذب آب کمک کرده و در نتیجه باعث بهبود مقاومت گیاه به شرایط خشکی می‌شود



شکل ۲- محتوای نسبی آب برگ کاملینا تحت تأثیر شرایط آبیاری و منابع مختلف کودی

Fig. 2- Camelina RWC influenced by irrigation conditions and fertilizer sources.

C: شاهد، CF: کود شیمیایی، BF: باکتری‌های محرک رشد، CS: نانوذرات کیتوزان، 50% CF + BF: 50% درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، 50% CF + CS: 50% درصد کود شیمیایی + نانوذرات کیتوزان، 50% CF + BF + CS: 50% درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، BF + CS: 50% درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، 50% CF + BF + CS: 50% درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان

C: control, CF: chemical fertilizer, BF: growth promoting bacteria, CS: chitosan nanoparticles, 50% CF + BF: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria, 50% CF + CS: 50% chemical fertilizer + chitosan nanoparticles, BF + CS: growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles, 50% CF + BF + CS: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles.

دو عامل قرار گرفت. بیشترین شاخص کلروفیل (۵۰/۹۳) در آبیاری تکمیلی با کاربرد تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان حاصل شد و کمترین آن (۲۸/۷) به شرایط دیم بدون استفاده از کود تعلق داشت. آبیاری تکمیلی در مقایسه با کشت دیم، شاخص کلروفیل را ۲۰ درصد افزایش داد. علاوه بر این، کاربرد تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان باعث افزایش ۵۹/۶ درصدی صفت مذکور در آبیاری تکمیلی و ۴۱/۵ درصدی در شرایط دیم نسبت به شاهد شد. لازم به ذکر است که تحت آبیاری تکمیلی، تیمار تلفیقی ذکر شده، شاخص کلروفیل برگ کاملینا را به ترتیب ۱۴، ۱۶/۲ و ۳۱/۱ درصد نسبت به کاربرد جداگانه تیمارهای کود شیمیایی، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات کیتوزان افزایش داد. در حالی که در شرایط دیم، میزان افزایش شاخص کلروفیل با کاربرد تیمار ترکیبی ذکر شده به ترتیب ۲۱/۶، ۱۲/۷ و ۳۰ درصد نسبت به کاربرد جداگانه تیمارها بود (شکل ۳). در شرایط دیم ممکن است که شاخص کلروفیل از طریق نشت الکترولیت‌ها از غشای تیلاکوئید و پراکسیداسیون لیپیدی،

علاوه بر این، کودهای زیستی با تولید هورمون‌هایی مانند اسید استیک ایندول (IAA) به گیاه کمک می‌کنند که آب بیشتری جذب کرده و با کاهش تعرق، میزان محتوای نسبی آب بهبود پیدا می‌کند (Azmat et al., 2022). همچنین کودهای زیستی می‌توانند از طریق تولید اگزوپلی ساکاریدها (EPS) با ذرات خاک جمع شوند و ساختار خاک و همچنین جذب آب را بهبود بخشند و در نتیجه نقش مهمی در بهبود محتوای نسبی آب ایفا کنند (Mishra et al., 2020) که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد. علاوه بر این، نانوذرات کیتوزان می‌توانند با تنظیم هدایت روزنه‌ای و تجمع پرولین، بر روابط آبی و محتوای نسبی آب برگ اثرگذاری مثبت داشته باشد (Dolatkhah, 2023).

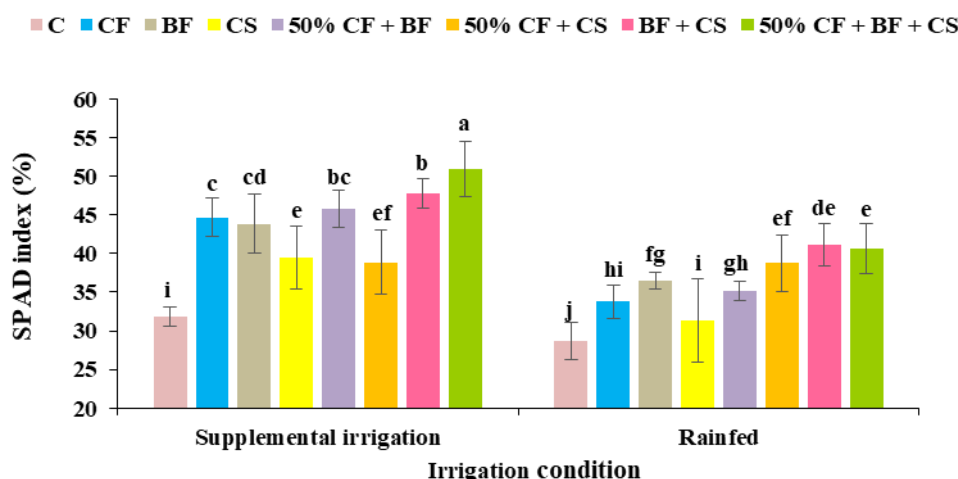
شاخص کلروفیل (SPAD)

شاخص اسپد تحت تأثیر شرایط کشت، منابع کودی و اثر متقابل

- 1- Indole-3-acetic acid
- 2- Exopolysaccharides

(Sharma et al., 2021). از طرفی، به نظر می‌رسد که استفاده از نانوذرات کیتوزان با افزایش سطوح درون‌زا سیتوکینین‌ها که سنتز و رشد کلروفیل یا در دسترس بودن ترکیبات آمینه آزاد شده از کیتوزان را تحریک می‌کنند، شاخص کلروفیل را در شرایط نامساعد بهبود می‌بخشد (Silva-Santos et al., 2023). علاوه بر این، دسترسی کافی به مواد ضروری می‌تواند محتوای کلروفیل را به میزان قابل توجهی افزایش دهد (Anwar et al., 2024). بنابراین، بهبود محتوای کلروفیل کاملینا با کاربرد ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان را می‌توان با افزایش در دسترس بودن عناصر غذایی که باعث افزایش فعالیت روبیسکو، سرعت فتوسنتز و شاخص‌های رشد گیاه می‌شود، توضیح داد (Hidangmayum et al., 2023).

کم‌آبی پروتوپلاسم و سطح کمتر جذب نور کاهش پیدا کند (Wei et al., 2023). گیاهانی که در معرض خشکی قرار می‌گیرند، انواع گونه‌های فعال اکسیژن تولید می‌کنند که باعث آسیب به بیومولکول‌هایی همچون کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، لیپیدها، اسیدهای نوکلئیک و ساختار کلوپلاست شده و در نتیجه منجر به کاهش فتوسنتز، تنفس و رشد گیاه می‌شوند (Jamshidi Zinab et al., 2023). کاربرد ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان به طور قابل توجهی شاخص کلروفیل را در مقایسه با گیاهان تیمار نشده افزایش داد. به نظر می‌رسد که کاربرد تلفیقی این کودها با افزایش میزان پروتئین و فعالیت آنزیم روبیسکو اکتیواز، سرعت واکنش‌های چرخه کالوین را افزایش و منجر به افزایش فعالیت کربوکسیلاسیون روبیسکو و بهبود فتوسنتز می‌شوند.



شکل ۳- شاخص کلروفیل کاملینا تحت تأثیر شرایط آبیاری و منابع مختلف کودی

Fig. 3- Camelina SPAD index influenced by irrigation conditions and fertilizer sources.

C: شاهد، CF: کود شیمیایی، BF: باکتری‌های محرک رشد، CS: نانوذرات کیتوزان، 50% CF + BF: 50% کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، 50% CF + CS: 50% کود شیمیایی + نانوذرات کیتوزان، BF + CS: باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، 50% CF + BF + CS: 50% کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان

C: control, CF: chemical fertilizer, BF: growth promoting bacteria, CS: chitosan nanoparticles, 50% CF + BF: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria, 50% CF + CS: 50% chemical fertilizer + chitosan nanoparticles, BF + CS: growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles, 50% CF + BF + CS: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles.

رنگیزه‌های فتوسنتزی

محتوای کلروفیل *a*، کلروفیل *b* و کارتنوئید کاملینا فقط تحت تأثیر اثرات جداگانه شرایط کشت و منابع کودی قرار گرفتند. بالاترین محتوای کلروفیل *a* (۵/۱۷ میلی گرم بر گرم وزن تر) با کاربرد تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان به دست آمد، درحالی که کمترین میزان کلروفیل *a*

(۲/۴۱ میلی گرم بر گرم وزن تر) به تیمار عدم مصرف کود تعلق داشت. تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، محتوای کلروفیل *a* را در مقایسه با عدم مصرف کود، ۱۱۴/۵۳ درصد افزایش داد. همچنین استفاده از تیمار تلفیقی مذکور، محتوای کلروفیل *a* را به ترتیب ۶۰/۱، ۴۹/۴۲ و ۷۷/۱ درصد نسبت به کاربرد جداگانه هر یک از کودها افزایش داد (جدول

اکسیژن و در نتیجه مهار بیوستنز کلروفیل، رنگیزه‌های فتوستنتزی کاهش می‌یابند (Yang et al., 2023). باین حال، محتوای کلروفیل و کاروتنوئید در کاملینا با کاربرد تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان بهبود یافت. با توجه به اینکه مولکول کلروفیل از دو بخش (یک سر پورفیرین و یک هیدروکربن طویل با دنباله فیتول) تشکیل شده است. پورفیرین از چهار حلقه پیرول حاوی نیتروژن که به صورت حلقوی قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. کامل کننده مولکول کلروفیل، یک یون منیزیم است که با چهار اتم نیتروژن در مرکز حلقه، تشکیل کلات می‌دهد (Mao et al., 2020). هر مولکول کلروفیل دارای چهار اتم نیتروژن می‌باشد و با توجه به همبستگی مثبت محتوای کلروفیل با میزان نیتروژن در دسترس گیاه (Ostadi et al., 2022) می‌توان بیان کرد که با کاربرد تلفیقی تیمارها و بهبود افزایش جذب مواد غذایی از جمله نیتروژن، میزان کلروفیل کاملینا افزایش پیدا کرده است. از سوی دیگر، عنصر پتاسیم، بسیاری از آنزیم‌های دخیل در فرآیند تنفس و فتوستنز را فعال کرده و یکی از مهم‌ترین نقش‌های پتاسیم، نقش کلیدی آن در فتوستنز می‌باشد (Munsif et al., 2022). از این رو، با افزایش مقدار پتاسیم در گیاه، احتمال تولید ATP افزایش یافته که سبب تسریع در انتقال مواد حاصل از فتوستنز می‌گردد و به همین دلیل می‌تواند در بهبود محتوای رنگیزه‌های فتوستنتزی محصول مؤثر واقع شود (Nawaz et al., 2023). بنابراین، باکتری‌های محرک رشد، میزان کلروفیل و کاروتنوئید را از طریق بهبود دسترسی به مواد مغذی از جمله پتاسیم افزایش داده‌اند (Abd-Elkader et al., 2022). علاوه بر این، مطابق با نتایج این پژوهش، اثرات مفید نانوذرات کیتوزان در بهبود محتوای رنگیزه‌های فتوستنتزی در تحقیقات پیشین نشان داده شده که در این راستا عطاران دووم و همکاران (Attaran Dowom et al., 2022) گزارش کردند که استفاده از نانوذرات کیتوزان، فعالیت آسکوربات پراکسیداز را افزایش داد که در نتیجه ROS را در تیلاکوئیدها از بین برد و متعاقب آن تجزیه رنگدانه‌های فتوستنتزی را کاهش و به تبع بهبود شاخص کلروفیل اتفاق افتاد.

مالون‌دی‌آلدهید

نتایج حاکی از آن است که اثر شرایط کشت، منابع کودی و اثر متقابل شرایط آبیاری در منابع کودی بر محتوای مالون‌دی‌آلدهید

۵). علاوه بر این، محتوای کلروفیل a در شرایط دیم نسبت به آبیاری تکمیلی کاهش یافت، به طوری که در شرایط دیم، کلروفیل a در مقایسه با آبیاری تکمیلی ۶/۷ کمتر بود (شکل ۴).

همچنین بیشترین (۳/۸۳ میلی گرم بر گرم وزن تر) و کم‌ترین (۱/۶۱ میلی گرم بر گرم وزن تر) محتوای کلروفیل b به ترتیب با کاربرد ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان و عدم مصرف کود حاصل شد. کاربرد تلفیقی تیمارهای آزمایش در مقایسه با شاهد، محتوای کلروفیل b را ۱۳۷/۸۸ درصد افزایش داد. همچنین، کاربرد تلفیقی تیمارهای آزمایش، محتوای کلروفیل b را نسبت به کاربرد جداگانه کود شیمیایی، باکتری‌های محرک رشد گیاه و نانوذرات کیتوزان به ترتیب ۵۸/۲۶، ۸۳/۲۴ و ۷۰/۲۵ درصد افزایش داد (جدول ۵). علاوه بر این، محتوای کلروفیل b در شرایط دیم ۷/۳۲ درصد در مقایسه با آبیاری تکمیلی کاهش یافت (شکل ۵).

بیشترین محتوای کاروتنوئید (۱/۷۵ میلی گرم بر گرم وزن تر) با کاربرد تلفیقی تیمارها به دست آمد و کمترین (۰/۷۹ میلی گرم بر گرم وزن تر) آن نیز به تیمار عدم مصرف کود تعلق داشت. استفاده تلفیقی از تیمارها، محتوای کاروتنوئید را ۱۲۱/۵۱ درصد نسبت به عدم مصرف کود افزایش داد. از طرف دیگر، کاربرد تلفیقی تیمارهای آزمایش، محتوای کاروتنوئید را نسبت به کاربرد جداگانه کود شیمیایی، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات کیتوزان به ترتیب ۴۹/۵۷، ۳۳/۵۹ و ۲۶/۸۱ درصد افزایش داد (جدول ۳). شرایط دیم نیز محتوای کاروتنوئید کاملینا را کاهش داد؛ به طوری که در شرایط دیم، محتوای کاروتنوئید در مقایسه با آبیاری تکمیلی ۸/۴۶ درصد کاهش پیدا کرد (شکل ۶).

کلروفیل، جزء مهمی از رنگدانه‌های فتوستنتزی می‌باشد. محتوای کلروفیل در تاج پوشش گیاهان ارتباط نزدیکی با فتوستنز، میزان عناصر غذایی و بهره‌وری محصول دارد (Tashakorizadeh et al., 2022). کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوستنتزی در شرایط نامساعد محیطی ممکن است به دلیل تأثیر افزایش پراکسیداسیون لیپیدی روی غشاها در نتیجه تجمع ROS باشد که منجر به تجزیه کلروپلاست، کاهش فعالیت کلروفیل و تخریب پیش‌سازهای کلروفیل می‌شود (Bukhari et al., 2021). در این راستا، پژوهشگران اظهار داشتند که در خشکی به دلیل آسیب به ساختار کلروپلاست، تخریب پیش‌ساز کلروفیل و اکسیداسیون کلروفیل بر اثر افزایش رادیکال‌های فعال

بود. علاوه بر این، در آبیاری تکمیلی استفاده از ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، غلظت مالون‌دی‌آلدهید را ۲۸ درصد در مقایسه با بدون کود کاهش داد. همچنین در شرایط دیم، کاربرد تلفیقی باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، مالون‌دی‌آلدهید را ۳۰ درصد نسبت به شاهد کاهش داد.

کاملینا معنی‌دار گردید. بیشترین غلظت مالون‌دی‌آلدهید (۶/۴۲ میکرو مول بر گرم وزن تر) در شرایط دیم و بدون کود به دست آمد، در حالی که کم‌ترین (۳/۶۳ میکرو مول بر گرم وزن تر) محتوای مالون‌دی‌آلدهید تحت آبیاری تکمیلی با تیمار ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان مشاهده شد. محتوای مالون‌دی‌آلدهید در شرایط دیم ۱۸/۹۴ درصد بیشتر از آبیاری تکمیلی

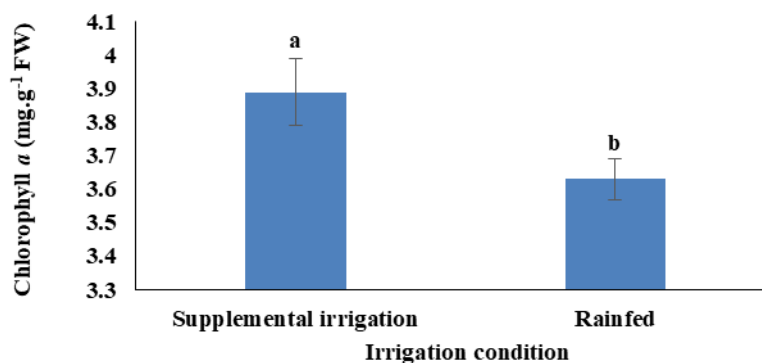
جدول ۳- اثر منابع مختلف کودی بر محتوای کلروفیل *a*، کلروفیل *b* و کاروتنوئید کاملینا

Table 3- Effect of fertilizer sources on chlorophyll *a*, chlorophyll *b* and carotenoid content of camelina

منابع کودی Fertilizer sources	کلروفیل <i>a</i> Chlorophyll <i>a</i> (mg g ⁻¹ FW)	کلروفیل <i>b</i> Chlorophyll <i>b</i> (mg g ⁻¹ FW)	کاروتنوئید Carotenoid (mg g ⁻¹ FW)
شاهد C	2.41g	1.61g	0.79f
کود شیمیایی CF	3.53de	2.42de	1.17e
باکتری‌های محرک رشد BF	3.46e	2.09f	1.31de
نانوذرات کیتوزان CS	2.92f	2.25ef	1.38cd
۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد 50% CF + BF	3.78d	3b	1.49bc
۵۰ درصد کود شیمیایی + نانوذرات کیتوزان 50% CF + CS	4.12c	2.78c	1.44bc
باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان BF + CS	4.17b	2.54d	1.57b
۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان 50% CF + BF + CS	5.17a	3.83a	1.75a

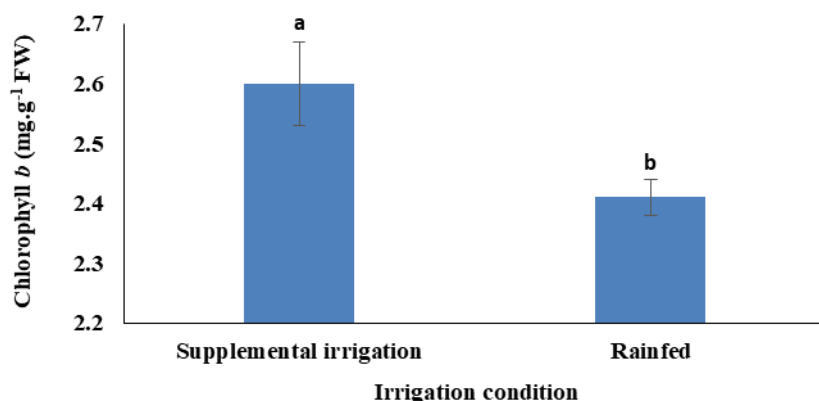
C: شاهد، CF: کود شیمیایی، BF: باکتری‌های محرک رشد، CS: نانوذرات کیتوزان، ۵۰% CF + BF: ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، ۵۰% CF + CS: ۵۰ درصد کود شیمیایی + نانوذرات کیتوزان، ۵۰% CF + BF + CS: ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان

C: control, CF: chemical fertilizer, BF: growth promoting bacteria, CS: chitosan nanoparticles, 50% CF + BF: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria, 50% CF + CS: 50% chemical fertilizer + chitosan nanoparticles, BF + CS: growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles, 50% CF + BF + CS: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles.



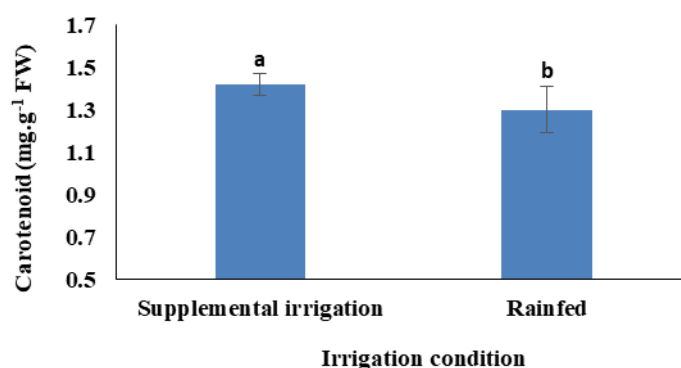
شکل ۴- محتوای کلروفیل *a* کاملینا تحت تأثیر شرایط مختلف آبیاری

Fig. 4- Chlorophyll *a* content of camelina under different irrigation conditions.



شکل ۵- محتوای کلروفیل *b* کاملینا تحت تأثیر شرایط مختلف آبیاری

Fig. 5- Chlorophyll *b* content of camelina under different irrigation conditions.



شکل ۶- محتوای کاروتنوئید کاملینا تحت تأثیر شرایط مختلف آبیاری

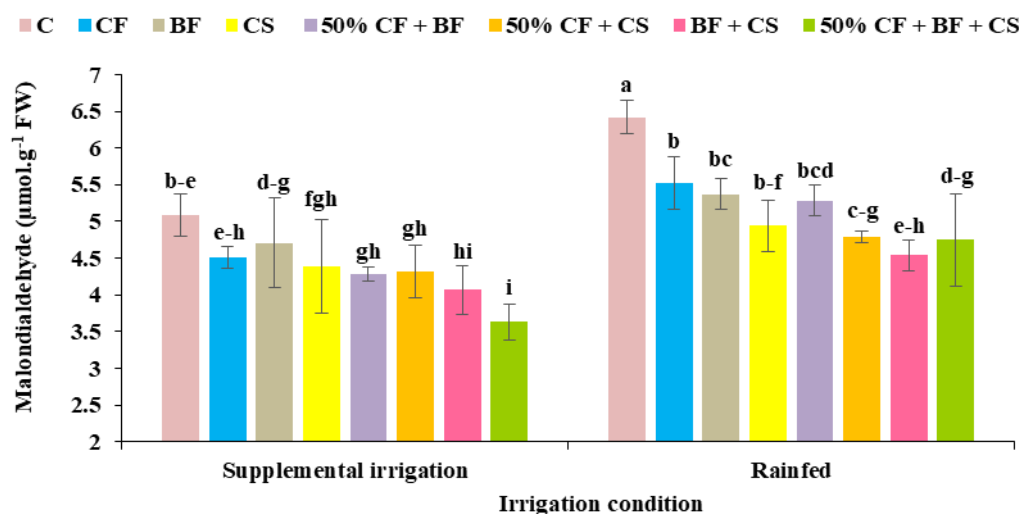
Fig. 6- Carotenoid content of camelina under different irrigation conditions.

پراکسیداسیون لیپیدی در گیاهان می‌شود که یک جزء اساسی برای تحمل به تنش محسوب می‌شوند (Naveen et al., 2021). در مطالعه حاضر، بیشترین میزان مالون‌دی‌آلدهید در شرایط دیم مشاهده شد. پژوهشگران بیان کردند که میزان تجمع مالون‌دی‌آلدهید، شاخصی از میزان خسارت تنش اکسیداتیو بوده و بیانگر آسیب به غشاء پلاسمایی سلول‌های گیاهی در شرایط تنش‌های محیطی است (Qayyum et al., 2021). از این رو، افزایش مالون‌دی‌آلدهید را می‌توان به افزایش رادیکال‌های فعال اکسیژن و پراکسیداسیون لیپیدی غشاها نسبت داد (Sima et al., 2023). همسو با نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، رضائیان و همکاران (Rezayian et al., 2020) با ارزیابی اثرات خشکی بر سویا (*Glycine max* (L.) Merr) اظهار داشتند که افزایش محتوای مالون‌دی‌آلدهید نشان‌دهنده تنش اکسیداتیو ناشی از خشکسالی در سویا بود. در مقابل، کاربرد تلفیقی تیمارها، محتوای مالون‌دی‌آلدهید را کاهش داد. نانوذرات کیتوزان

لازم به ذکر است که در شرایط آبیاری تکمیلی، استفاده تلفیقی از تیمارهای کودی نسبت به کاربرد جداگانه هر یک از تیمارهای کودی (کود شیمیایی، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات کیتوزان)، محتوای مالون‌دی‌آلدهید را به ترتیب ۲۱، ۱۳ و ۱۷ درصد کاهش داد. همچنین استفاده تلفیقی از تیمارهای کودی در شرایط دیم، مقدار مالون‌دی‌آلدهید را به ترتیب ۱۸، ۱۵ و ۸ درصد نسبت به کاربرد جداگانه کودها کاهش داد (شکل ۷). با وجودی که ROS در مراحل مختلف رشد نقش بسزایی در سازگاری با تنش‌ها و تنظیم رشد دارد، اما به علت واکنش‌پذیری بالا در غلظت‌های بیش از حد مجاز، یک مولکول‌های زیان‌بار به حساب می‌آید. بنابراین، در این شرایط می‌تواند به سرعت مولکول‌های دیگر را اکسید و منجر به پراکسیداسیون لیپیدها شود (Jothimani & Arulbalachandaran, 2020). از طرفی، پراکسیداسیون لیپیدی به صورت آنزیمی و غیرآنزیمی (در نتیجه ROS) باعث تشکیل مالون‌دی‌آلدهید و سایر محصولات

می‌توانند پایداری غشای سلولی را افزایش و محتوای مالون‌دی‌آلدهید را در تنش خشکی با افزایش سازوکار محافظتی در سلول‌های گیاهی کاهش دهند (Azmat et al., 2022). در این راستا، بیگم و همکاران (Begum et al., 2022)، کاهش میزان مالون‌دی‌آلدهید با استفاده از باکتری‌های محرک رشد را با کاهش اثرات مضر تنش خشکی به-وسیله بهبود جذب آب و مواد غذایی توسط این باکتری‌ها توضیح دادند.

می‌تواند فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش داده و نقش مهمی در پاک‌سازی ROS و کاهش میزان آسیب غشای پلاسمایی داشته باشد (Dolatkhah Dashtman et al., 2023). مولفورک و همکاران (Moolphuerk et al., 2022) گزارش کردند که استفاده از کیتوزان با حذف آسیب ROS و بهبود وضعیت دفاعی گیاه در شرایط خشکسالی باعث کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید در برنج (*Oryza sativa* L.) شد. علاوه بر این، کاربرد باکتری‌های محرک رشد نیز



شکل ۷- محتوای مالون‌دی‌آلدهید کاملینا تحت تأثیر شرایط آبیاری و منابع مختلف کودی

Fig. 7- Camelina malondialdehyde influenced by irrigation conditions and fertilizer sources.

C: شاهد، CF: کود شیمیایی، BF: باکتری‌های محرک رشد، CS: نانوذرات کیتوزان، 50% CF + BF: 50% کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، 50% CF + CS: 50% کود شیمیایی + نانوذرات کیتوزان، BF + CS: باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، 50% CF + BF + CS: 50% کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان

C: control, CF: chemical fertilizer, BF: growth promoting bacteria, CS: chitosan nanoparticles, 50% CF + BF: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria, 50% CF + CS: 50% chemical fertilizer + chitosan nanoparticles, BF + CS: growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles, 50% CF + BF + CS: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles.

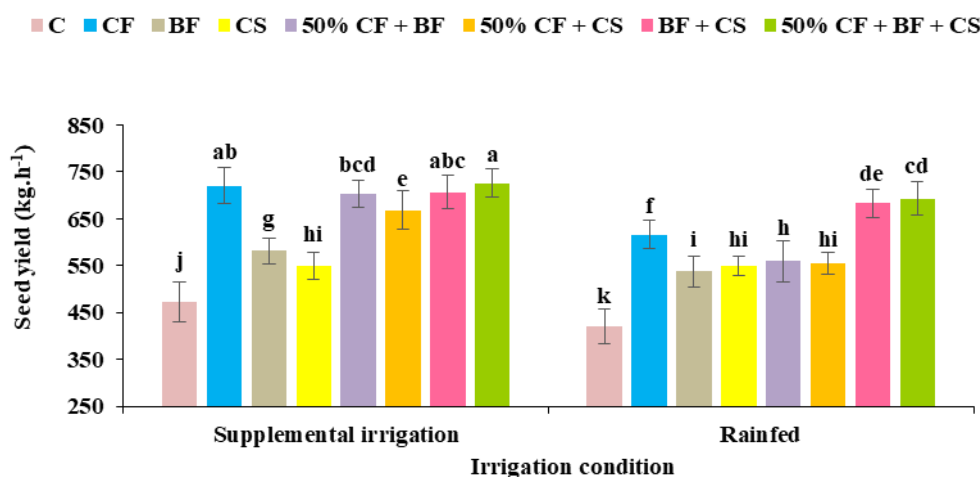
عملکرد دانه

و ۷۸/۹۵ درصد افزایش داد. علاوه بر این، تیمار تلفیقی مذکور توانست عملکرد دانه را در شرایط آبیاری تکمیلی به‌میزان ۳۲/۲۲، ۲۴/۷۹ و ۰/۷۵ درصد و در کشت دیم به‌میزان ۲۶/۱۱، ۱۵/۲۶ و ۱۲/۵۶ درصد نسبت به کاربرد انفرادی کودشیمیایی، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات کیتوزان افزایش دهد. جالب اینکه استفاده از کود شیمیایی در شرایط آبیاری تکمیلی توانست عملکرد دانه کاملینا را ۲۰ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد، درحالی‌که در شرایط دیم عملکرد دانه ۱۵ درصد با کاربرد کود شیمیایی افزایش یافت. در کشت دیم، کاربرد تیمار باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان شرایط بهتری را در مقایسه با کود شیمیایی کامل برای رشد و بهبود عملکرد کاملینا

عملکرد دانه کاملینا تحت تأثیر شرایط آبیاری و منابع کودی و اثر متقابل دو عامل قرار گرفت. بیشترین عملکرد دانه (۷۲۵/۵۴ کیلوگرم در هکتار) به تیمار آبیاری تکمیلی و با کاربرد ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان تعلق داشت. از سوی دیگر، کمترین عملکرد دانه (۳۸۷/۵ کیلوگرم در هکتار) در شرایط دیم بدون کاربرد کود مشاهده شد. عملکرد دانه کاملینا در تیمار آبیاری تکمیلی ۱۱/۹ درصد بیشتر از شرایط دیم بود. تیمار ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی، عملکرد دانه را نسبت به شاهد به‌میزان ۵۳/۷۶

در دسترس، حفظ و تعادل عناصر غذایی حیاتی است، زیرا این عناصر در کاهش تلفات آب از گیاهان ضروری هستند (Ostadi et al., 2022). در این راستا، دسترسی کافی گیاه به عناصر غذایی از جمله پتاسیم باعث افزایش تحمل گیاه در شرایط نامطلوب محیطی می‌شود (Imtiaz et al., 2023). کودهای زیستی در این شرایط می‌توانند رشد گیاه را با حل کردن پتاسیم و فسفر، تولید سیدروفورها (برای جذب آهن) و تثبیت بیولوژیک نیتروژن بهبود بخشند (Khalilpour et al., 2021). علاوه بر این، کودهای زیستی می‌توانند با تنظیم جریان آب از طریق تغییر معماری ریشه، به رشد گیاهان در شرایط نامساعد دیم کمک کنند (Chieb & Gachomo, 2023). لازم به ذکر است که تولید گونه‌های اکسیژن فعال طی تنش‌های محیطی افزایش می‌یابد، اما باکتری‌های محرک رشد می‌توانند تولید چنین گونه‌هایی را با فعال‌سازی مسیرهای سیگنالینگ مختلف از جمله تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی که گونه‌های اکسیژن فعال تولیدشده را از بین می‌برد، کاهش دهند (Bouremani et al., 2023). از طرفی، افزایش عملکرد با تیمار کودهای شیمیایی به دلیل اثرگذاری بر فعل و انفعالات بیوشیمیایی، فتوسنتز، افزایش طول دوره رویش و تجمع ماده خشک اندام‌های هوایی (بیولوژیک) و عملکرد دانه بدیهی است (Shah et al., 2023).

فراهم کرد و توانست عملکرد دانه کاملینا را به میزان ۳۵ درصد نسبت به شاهد و ۱۵ درصد نسبت به تیمار کود شیمیایی بهبود بخشد (شکل ۸). به طور کلی، عملکرد دانه کاملینا در شرایط دیم نسبت به آبیاری تکمیلی به طور قابل توجهی کاهش یافت. تنش خشکی در گیاه با کاهش آب برگ، بسته شدن روزنه‌ها و افت فتوسنتز از یک طرف و متأثر کردن فعالیت‌های آنزیمی و فرآیندهای مربوطه از سوی دیگر، موجب افت عملکرد دانه شده است (Secchi et al., 2023). همچنین تخریب رنگدانه‌های کلروفیل و کاهش سنتز آن‌ها، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش ورود CO_2 و اختلال در سرعت فتوسنتز از جمله دلایل احتمالی کاهش عملکرد دانه کاملینا (*Camelina sativa* L.) در شرایط دیم می‌باشد (Mulugeta et al., 2023). مواجه شدن گیاه با تنش رطوبتی در طول دوره گل‌دهی و یا حتی قبل از گل‌دهی به دلیل عرضه کمتر مواد فتوسنتزی منجر به ریزش گل و خورجین‌های در حال رشد می‌گردد که بر کاهش تعداد دانه‌ها در غلاف و در نتیجه کاهش عملکرد دانه مؤثر است (Shah et al., 2023). از طرف دیگر، با تداوم تنش خشکی، چرخه زندگی گیاه کوتاه‌تر شده و گیاه فرصت کافی برای پر شدن غلاف‌ها و تولید کافی مواد پرورده نخواهد داشت که ضمن تأثیر بر وزن دانه‌ها می‌تواند باعث کاهش عملکرد دانه گردد (Amiri-Darban et al., 2020). علاوه بر این، در شرایط کاهش آب



شکل ۸- عملکرد دانه کاملینا تحت تأثیر شرایط آبیاری و منابع مختلف کودی

Fig. 8- Camelina seed yield affected by irrigation conditions and fertilizer sources.

C: شاهد، CF: کود شیمیایی، BF: باکتری‌های محرک رشد، CS: نانوذرات کیتوزان، ۵۰٪ CF + BF: ۵۰٪ کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، ۵۰٪ CF + CS: ۵۰٪ کود شیمیایی + نانوذرات کیتوزان، ۵۰٪ CF + BF + CS: ۵۰٪ کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، ۵۰٪ CF + BF + CS: ۵۰٪ کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان

C: control, CF: chemical fertilizer, BF: growth promoting bacteria, CS: chitosan nanoparticles, 50% CF + BF: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria, 50% CF + CS: 50% chemical fertilizer + chitosan nanoparticles, BF + CS: growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles, 50% CF + BF + CS: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles.

علاوه بر این، ممکن است که نانوذرات کیتوزان با کاهش تعرق و حفظ محتوای نسبی آب، تحمل به کم‌آبی را در گیاه افزایش دهد (Shehzad et al., 2020). به نظر می‌رسد که نانوذرات کیتوزان عملکرد را با افزایش جذب آب و عناصر ضروری و همچنین کاهش تجمع رادیکال‌های اکسیژن را با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بهبود می‌بخشد (Ali et al., 2021). همسو با نتایج این تحقیق، پژوهشگران دریافتند که استفاده از کیتوزان، عملکرد دانه کلزا (*Brassica napus* L.) را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد (Monfared et al., 2020).

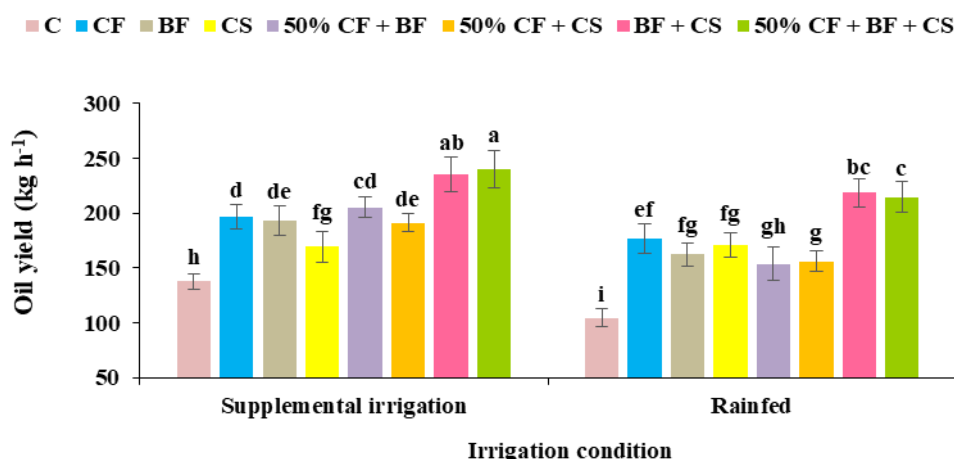
عملکرد روغن

عملکرد روغن کاملینا تحت تأثیر شرایط کشت، منابع کودی و اثر متقابل شرایط کشت با منابع کودی قرار گرفت. حداکثر عملکرد روغن (۲۳۹/۸۹ کیلوگرم در هکتار) در تیمار آبیاری تکمیلی با کاربرد ۵۰ درصد کودشیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان حاصل شد. کمترین (۹۶/۲۱ کیلوگرم در هکتار) عملکرد روغن کاملینا نیز مربوط به تیمار بدون کود در شرایط دیم بود. همچنین عملکرد روغن کاملینا تحت آبیاری تکمیلی ۱۶/۲ درصد بیشتر از شرایط دیم بود. علاوه بر این، تیمار باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان در شرایط دیم، عملکرد روغن را در مقایسه با تیمار بدون کود ۱۰۹/۳ درصد افزایش داد. همین تیمار تلفیقی مذکور، عملکرد روغن را به‌میزان ۲۳/۷، ۳۴/۴ و ۲۷/۶ درصد نسبت به کاربرد جداگانه کود شیمیایی، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات کیتوزان در کشت دیم افزایش داد. همچنین در شرایط آبیاری تکمیلی، تیمار ۵۰ درصد کودشیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، عملکرد روغن کاملینا را ۷۳/۹ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. این تیمار، عملکرد روغن را به‌ترتیب ۲۲، ۲۴/۳ و ۴۱/۶ درصد نسبت به کاربرد جداگانه کود شیمیایی، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات کیتوزان بهبود بخشید. (شکل ۹). به‌طور کلی عملکرد روغن کاملینا در شرایط دیم در مقایسه با آبیاری تکمیلی کاهش یافت. کاهش روغن تولیدی در شرایط نامساعد محیطی ممکن است به دلیل اکسیداسیون برخی از اسیدهای چرب غیراشباع چندانگانه و کاهش تبدیل کربوهیدرات‌ها به روغن در شرایط تنش به دلیل کاهش فعالیت آنزیم‌های بیوسنتز اسیدهای چرب مانند قبیل استیل کوآ کربوکسیلاز، ۳-کتوسیل

ردوکتاز و ... باشد (Ebrahimian et al., 2019). همچنین به‌نظر می‌رسد که تنش خشکی به‌ویژه در هنگام رسیدگی دانه به دلیل تسریع در مرحله رسیدگی، درصد روغن را کاهش می‌دهد. زیرا هر اندازه که طول دوره پُر شدن دانه کوتاه‌تر باشد، فرصت کافی برای سنتز روغن از پروتئین‌های ذخیره‌شده وجود ندارد و همین عامل می‌تواند درصد روغن را کاهش دهد (Amani Machiani et al., 2021). همچنین ممکن است که در شرایط کشت دیم، بهره‌وری روغن به دلیل تخریب رنگدانه‌های فتوسنتزی و کاهش جذب عناصر غذایی کاهش یابد (Secchi et al., 2023). اقدسی و همکاران (Aghdasi et al., 2021) دریافتند که محتوای روغن کاملینا به‌ترتیب ۸ و ۱۲ درصد در پاسخ به کمبود آب طی مراحل گل‌دهی و تشکیل غلاف کاهش یافت. در مقابل، استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه + نانوذرات کیتوزان باعث افزایش درصد و عملکرد روغن کاملینا شد. عملکرد روغن به‌طور مستقیم به عملکرد دانه و روغن تولیدشده توسط گیاه بستگی دارد. بنابراین، هر عاملی که تأثیر مثبتی بر عوامل ذکرشده داشته باشد باعث افزایش عملکرد روغن نیز می‌شود (Farahani et al., 2022). از این‌رو، افزایش عملکرد روغن با کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه + نانوذرات کیتوزان به دسترسی بهتر به مواد مغذی و افزایش عملکرد دانه و محتوای روغن نسبت داده می‌شود (Nasrollahzadeh et al., 2023). همچنین نتایج نشان داد که کاربرد جداگانه کود شیمیایی بر میزان روغن کاملینا تأثیر منفی داشته است. کاهش محتوای روغن با استفاده از کود شیمیایی را می‌توان با این واقعیت توضیح داد که گیاه برای رسیدن به حداکثر درصد روغن و در شرایط محیطی مختلف به یک حد مطلوب از نیتروژن نیاز دارد و هرگاه مقدار نیتروژن خارج از این محدوده باشد، درصد روغن با کاهش مواجه خواهد شد (Jankowski et al., 2019). بنابراین، ممکن است با کاربرد کود شیمیایی کامل، تولید بالقوه مواد هیدروکربنه کاهش یافته و نسبت بیشتری از مواد فتوسنتزی به تشکیل پروتئین اختصاص پیدا کرده و منجر به کاهش درصد روغن کاملینا شده باشد. علاوه بر این، تولید روغن در گیاهان دانه روغنی مانند کاملینا تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و محیطی قرار دارد (Zhang et al., 2021) از این‌رو، گیاه باید دسترسی کافی به عناصر را داشته باشد تا بتواند سطح قابل‌قبولی از روغن تولید کند. در این رابطه، امیری‌دربان و همکاران (Amiri-Darban et al., 2020) و فراهانی و همکاران

بهبود محتوای روغن و عملکرد روغن داشته باشد (Farhat et al., 2023). علاوه بر این، استفاده از نانوذرات کیتوزان با کنترل مسیرهای هدررفت آب و افزایش سطح ریشه، به افزایش فعالیت بیولوژیک سلول کمک کرده و در نتیجه در بهبود درصد و عملکرد روغن مؤثر بوده است (Shehzad et al., 2020).

(Farahani et al., 2022) مشاهده کردند که وقتی از پتاسیم و گوگرد در طول فصل رشد استفاده شد، محتوای روغن و عملکرد گیاه کاملینا (*Camelina sativa* L.) و کلزا (*Brassica napus* L.) افزایش یافت. بنابراین، به نظر می‌رسد که استفاده از کودهای زیستی حاوی باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد و باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم و فسفر می‌تواند با تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، نقش مهمی در



شکل ۹- عملکرد روغن کاملینا تحت تأثیر شرایط آبیاری و منابع مختلف کودی

Fig. 9- Camelina oil yield affected by irrigation conditions and fertilizer sources.

C: شاهد، CF: کود شیمیایی، BF: باکتری‌های محرک رشد، CS: نانوذرات کیتوزان، 50% CF + BF: 50% کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، 50% CF + CS: 50% کود شیمیایی + نانوذرات کیتوزان، 50% CF + BF + CS: 50% کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، 50% CF + BF + CS: 50% کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان

C: control, CF: chemical fertilizer, BF: growth promoting bacteria, CS: chitosan nanoparticles, 50% CF + BF: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria, 50% CF + CS: 50% chemical fertilizer + chitosan nanoparticles, BF + CS: growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles, 50% CF + BF + CS: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles.

نانوذرات کیتوزان در آبیاری تکمیلی حاصل شد (جدول ۴). کیفیت روغن دانه‌های روغنی به میزان اسیدهای چرب تولیدشده و همچنین نسبت اسیدهای چرب غیراشباع به اشباع بستگی دارد. افزایش محتوای اسیدهای چرب غیراشباع در مقایسه با اسیدهای چرب اشباع، کیفیت روغن استخراج‌شده در گیاهان دانه روغنی را بهبود می‌بخشد (Ghaffari et al., 2023). به‌طور کلی محتوای اسیدهای چرب غیراشباع در شرایط دیم از یک‌سو به دلیل کاهش غلظت روغن دانه و کاهش اندازه بذرها و از سوی دیگر به دلیل کاهش مقدار کربوهیدرات‌های قابل دسترس برای ارسال به اندام‌های ذخیره‌کننده کاهش پیدا کرد (Li et al., 2022). امانی و همکاران (Amani Machiani et al., 2021) اظهار داشتند که کیفیت روغن تولیدی سویا (*Glycine max* (L.) Merr) در شرایط تنش خشکی به دلیل

ترکیبات روغن

ترکیبات اصلی روغن کاملینا شامل اسیدهای چرب اشباع شده پالمیتیک (۳/۷۳-۶/۸۵ درصد)، اسید استئاریک (۲/۳۳-۴/۳۴ درصد)، و همچنین اسیدهای چرب غیراشباع اولئیک (۱۶/۴۳-۱۴/۴۶ درصد)، لینولئیک (۱۹/۱۹-۲۵/۱۴ درصد)، لینوئیک (۳۱/۹۲-۳۶/۷۹ درصد) و ایکوزنوئیک اسید (۷/۸۱-۱۱/۴۴ درصد) بود. بیشترین میزان اسیدهای پالمیتیک و استئاریک در آبیاری تکمیلی با مصرف کود شیمیایی به دست آمد. اما بیشترین محتوای اسیدهای اولئیک، لینولئیک و اروسیک اسید با کاربرد تیمار تلفیقی باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان تحت آبیاری تکمیلی مشاهده شد. علاوه بر این، حداکثر محتوای اسیدهای لینولئیک و ایکوزنوئیک با کاربرد تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کودهای شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد +

کاهش فعالیت تعدادی از آنزیم‌های سنتزکننده چربی نظیر لیپاز با کاهش مواجه شد. علاوه بر این، فعالیت آنزیم اولئویل ۱۲-Δ دساتوراز، یکی از آنزیم‌های اصلی در بیوسنتز اسیدهای چرب، در شرایط تنش آب کاهش می‌یابد که منجر به کاهش محتوای اسیدهای چرب، به‌ویژه اسیدهای چرب غیراشباع می‌شود (Li et al., 2022). مطابق یافته‌های حاصل از این پژوهش، امیری‌دریان و همکاران (Amiri-Darban et al., 2020) بیان کردند که کمبود آب باعث کاهش اولئیک، لینولئیک و لینولنیک در کاملینا (*Camelina sativa* L.) گردید. در پژوهش دیگری، محققان با ارزیابی اثرات خشکی بر کیفیت روغن کلزا (*Brassica napus* L.) نتیجه گرفتند که تنش خشکی، اسیدهای چرب غیراشباع لینولئیک و لینولنیک را کاهش، اما باعث افزایش اسیدهای چرب اشباع گردید که با یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد (Mabudi Bilasvar et al., 2022). در مقابل، نتایج نشان داد که آبیاری تکمیلی باعث افزایش اسیدهای چرب غیراشباع همچون اسید لینولئیک، اسید لینولنیک و اسید اولئیک شد و در نتیجه باعث بهبود کیفیت روغن استخراج‌شده گردید. در تصدیق نتایج حاصل‌شده، پاولیستا و همکاران (Pavlista et al., 2016) نشان دادند که محتوای اسیدهای چرب کاملینا با آبیاری در طول فصل تغییر پیدا کرد، محتوای اسید لینولنیک با افزایش مقادیر آبیاری از ۲۳ به ۳۵ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، کاربرد تلفیقی باکتری‌های محرک رشد گیاه + نانوذرات کیتوزان، کیفیت روغن کاملینا را با افزایش اسیدهای چرب غیراشباع بهبود بخشید. در شرایط در دسترس بودن مواد مغذی، رشد گیاه و سرعت فتوسنتز افزایش یافته که منجر به تولید منابع کربوهیدرات، ترکیبات پیش‌ساز اسیدهای چرب (لیپیدها) و ترکیبات رابط (از طریق تولید بیشتر ATP و NADPH) برای تبدیل لیپیدها به اسیدهای چرب می‌شود (Nasrollahzadeh et al., 2023). امانی و همکاران (Amani Machiani et al., 2021)، بهبود ترکیبات روغن سویا (*Glycine max* (L.) Merr) با استفاده از کودهای زیستی را گزارش کردند و اظهار داشتند که در دسترس قرار دادن عناصر غذایی ماکرو و میکرو با فعال کردن کوفاکتورهای مورد نیاز منجر به افزایش آنزیم‌های دخیل در فرآیند سنتز اسیدهای چرب شده و از این طریق باعث بهبود کیفیت روغن تولیدی می‌گردد. در

مطالعه دیگری، نصرالله زاده و همکاران (Nasrollahzadeh et al., 2023) به این نتیجه رسیدند که کاربرد کودهای زیستی در مقایسه با کودهای شیمیایی می‌تواند اثرات منفی تنش خشکی را کاهش و با افزایش میزان اسیدهای چرب غیراشباع، کیفیت اسیدهای چرب را بهبود دهد. همچنین رضایی چپانه و همکاران (Rezaei-Chiyaneh et al., 2020) گزارش کردند که حداکثر مقدار آلفا لینولنیک اسید (C18:3) با کاربرد باکتری‌های محرک رشد به دست آمد، درحالی‌که محتوای اروسیک اسید با استفاده از باکتری‌های محرک رشد به‌طور قابل توجهی کاهش یافت.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش کم‌آبی در شرایط دیم، با کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوای نسبی آب برگ موجب تشدید تنش اکسیداتیو و افزایش تجمع مالون‌دی‌آلدئید در گیاه کاملینا شد. این اختلالات فیزیولوژیک، به‌طور مستقیم فرآیند پُر شدن دانه را محدود کرده و در نهایت منجر به کاهش عملکرد دانه، عملکرد روغن و اُفت کیفیت روغن گردید؛ به‌گونه‌ای که نسبت اسیدهای چرب غیراشباع به اشباع کاهش یافت. این نتایج بیانگر وابستگی تنگاتنگ کمیت و کیفیت روغن کاملینا به وضعیت فیزیولوژیک گیاه تحت شرایط کم‌آبی است. در مقابل، اعمال آبیاری تکمیلی در مراحل حساس رشد، به‌ویژه در ترکیب با مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی توانست به‌طور مؤثری اثرات منفی تنش خشکی را تعدیل کند. کاربرد هم‌زمان کودهای زیستی و نانوذرات کیتوزان، به‌خصوص در ترکیب با مصرف کاهش‌یافته کود شیمیایی، با بهبود جذب آب و عناصر غذایی، افزایش ظرفیت فتوسنتزی و تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی منجر به کاهش آسیب‌های اکسیداتیو گردید. این بهبودهای فیزیولوژیک، شرایط مناسب‌تری برای سنتز، انتقال و تجمع مواد فتوسنتزی در دانه فراهم کرده و در نتیجه، افزایش معنی‌دار عملکرد دانه، عملکرد روغن و ارتقای کیفیت روغن کاملینا، به‌ویژه از طریق افزایش سهم اسیدهای چرب غیراشباع حاصل گردید. به‌طوری‌که، حداکثر محتوای اسیدهای لینولنیک، لینولئیک، ایکوزنئیک و اولئیک در آبیاری تکمیلی با کاربرد تلفیقی تیمارهای کودی به دست آمد.

و بهبود هم‌زمان کمیت و کیفیت روغن کاملینا در مناطق خشک و نیمه‌خشک توصیه شود. همچنین با توجه به نقش کلیدی این تیمارها در تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیک و ترکیب اسیدهای چرب، توسعه این راهبرد در مقیاس زراعی و بررسی پاسخ ارقام مختلف کاملینا، اثرات بلندمدت بر سلامت خاک و پایداری میکروبی، و سازوکارهای مولکولی مرتبط با سنتز روغن، می‌تواند به تدوین توصیه‌های دقیق‌تر و قابل‌تعمیم برای سامانه‌های تولید پایدار کاملینا کمک کند.

بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش پایدار عملکرد و کیفیت روغن کاملینا در شرایط کم‌آبی، بیش از آنکه به مصرف بالای نهاده‌های شیمیایی وابسته باشد، به حفظ تعادل فیزیولوژیک گیاه از طریق مدیریت هوشمند آب و تغذیه متکی است. از این رو، به‌کارگیری آبیاری تکمیلی هدفمند در مراحل گل‌دهی و پُر شدن دانه همراه با راهبرد تغذیه‌ای تلفیقی مبتنی بر کودهای زیستی و نانوذرات کیتوزان، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مدیریتی کارآمد، کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست برای افزایش بهره‌وری آب، کاهش مصرف کود شیمیایی

References

1. Abd-Elkader, D. Y., Mohamed, A. A., Feleafel, M. N., Al-Huqail, A. A., Salem, M. Z., Ali, H. M., & Hassan, H. S. (2022). Photosynthetic pigments and biochemical response of zucchini (*Cucurbita pepo* L.) to plant-derived extracts, microbial, and potassium silicate as biostimulants under greenhouse conditions. *Frontiers in Plant Science*, 13, 879545. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.879545>.
2. Afshari, M., Pazoki, A., & Sadeghipour, O. (2021). Foliar-applied silicon and its nanoparticles stimulate physio-chemical changes to improve growth, yield and active constituents of coriander (*Coriandrum sativum* L.) essential oil under different irrigation regimes. *Silicon*, 13, 4177–4188. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01101-8>.
3. Aghdasi, S., AghaAlikhani, M., Modarres-Sanavy, S. A. M., & Kahrizi, D. (2021). Exogenously used boron and 24-epibrassinolide improved oil quality and mitigate late-season water deficit stress in camelina. *Industrial Crops and Products*, 171, 113885. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113885>.
4. Ali, E., El-Shehawi, A. M., Ibrahim, O., Abdul-Hafeez, E., Moussa, M., & Hassan, F. (2021). A vital role of chitosan nanoparticles in improvisation the drought stress tolerance in *Catharanthus roseus* (L.) through biochemical and gene expression modulation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 161, 166-175. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.008>.
5. Alkatb, S. H. A. (2022). Improvement of irrigation water efficiency and productivity using supplementary irrigation: A review. *Journal of Water Resources and Geoscience*, 1, 53-69. <https://jwrg.gov.iq/index.php/jwrg/article/view/20>.
6. Al-Yasi, H., Attia, H., Alamer, K., Hassan, F., Ali, E., Elshazly, S., Siddique, K. H., & Hessini, K. (2020). Impact of drought on growth, photosynthesis, osmotic adjustment and cell wall elasticity in Damask rose. *Plant Physiology and Biochemistry*, 150, 133-139. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.038>.
7. Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedloo, M. R., Janmohammadi, M., & Maggi, F. (2021). Funneliformis mosseae application improves the oil quantity and quality and eco-physiological characteristics of soybean (*Glycine max* L.) under water stress conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 3076-3090. <https://doi.org/10.22034/saps.2023.55304.2993>.
8. Amiri-Darban, N., Nourmohammadi, G., Rad, A. H. S., Mirhadi, S. M. J., & Heravan, I. M. (2020). Potassium sulfate and ammonium sulfate affect quality and quantity of camelina oil grown with different irrigation regimes. *Industrial Crops and Products*, 148, 112308. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112308>.
9. Anwar, T., Qureshi, H., Gull, S., Siddiqi, E. H., Chaudhary, T., & Ali, H. M. (2024). Enhancing *Zea mays* growth and drought resilience by synergistic application of Rhizobacteria-Loaded Biochar (RBC) and externally applied Gibberellic Acid (GA). *Environmental Technology & Innovation*, 33(9), 103517. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103517>.
10. Arshad, M., Mohanty, A. K., Acker, R. V., Riddle, R., Todd, J., Khalilf, H., & Misra, M. (2022). Valorization of

- camelina oil to biobased materials and biofuels for new industrial uses: A review. *RSC Advances*, 12, 27230–27245. <https://doi.org/10.1039/d2ra03253h>.
11. Aslani, Z., Hassani, A., Mandoulakani, B. A., Barin, M., & Maleki, R. (2023). Effect of drought stress and inoculation treatments on nutrient uptake, essential oil and expression of genes related to monoterpenes in sage (*Salvia officinalis*). *Scientia Horticulturae*, 309, 111610. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111610>.
12. Attaran Dowom, S., Karimian, Z., Mostafaei Dehnavi, M., & Samiei, L. (2022). Chitosan nanoparticles improve physiological and biochemical responses of *Salvia abrotanoides* (Kar.) under drought stress. *BMC Plant Biology*, 22(1), 364. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03689-4>.
13. Azmat, A., Tanveer, Y., Yasmin, H., Hassan, M. N., Shahzad, A., Reddy, M., & Ahmad, A. (2022). Coactive role of zinc oxide nanoparticles and plant growth promoting rhizobacteria for mitigation of synchronized effects of heat and drought stress in wheat plants. *Chemosphere*, 297, 133982. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133982>.
14. Balusamy, S. R., Rahimi, S., Sukweenadhi, J., Sunderraj, S., Shanmugam, R., Thangavelu, L., Mijakovic, I., & Perumalsamy, H. (2022). Chitosan nanoparticles and modified chitosan biomaterials, a potential tool to combat salinity stress in plants. *Carbohydrate Polymers*, 284, 119189. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119189>.
15. Bano, N., Khan, S., Hamid, Y., Bano, F., Khan, A. G., Ullah, M. A., Li, T., Ullah, H., Bolan, N., & Rinklebe, J. (2024). Seed nano-priming with multiple nanoparticles enhanced the growth parameters of lettuce and mitigated cadmium (Cd) bio-toxicity: An advanced technique for remediation of Cd contaminated environments. *Environmental Pollution*, 1(344), 123300. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123300>.
16. Begum, N., Wang L., Ahmad, H., Akhtar, K., Roy, R., Khan, M. I., & Zhao, T. (2022). Co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and the plant growth-promoting rhizobacteria improve growth and photosynthesis in tobacco under drought stress by up-regulating antioxidant and mineral nutrition metabolism. *Microbial Ecology*, 83(4), 971-988. <https://doi.org/10.1007/s00248-021-01815-7>.
17. Bouremani, N., Cherif-Silini, H., Silini, A., Bouket, A. C., Luptakova, L., Alenezi, F. N., Baranov, O., & Belbahri, L. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): A rampart against the adverse effects of drought stress. *Water*, 15(3), 418. <https://doi.org/10.3390/w15030418>.
18. Bukhari, M. A., Ahmad, Z., Ashraf, M. Y., Afzal, M., Nawaz, F., Nafees, M., Jatoi, W. N., Malghani, N. A., Shah, A. N., & Manan, A. (2021). Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through improving photosynthetic pigments, biochemical and yield characters. *Silicon*, 13, 4757-4772. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00797-4>.
19. Chieb, M., & Gachomo, E. W. (2023). The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. *BMC Plant Biology*, 23(1), 407. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04403-8>.
20. Dolatkhan Dashtman, A., Hosseini Mazinani, S. M., & Pazoki, A. (2023). Exogenous chitosan nanoparticles modulated drought stress through changing yield, biochemical attributes, and fatty acid profile of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *Gesunde Pflanzen*, 75(6), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10343-023-00912-6>.
21. Ebrahimian, E., Seyyedi, S. M., Bybordi, A., & Damalas, C. A. (2019). Seed yield and oil quality of sunflower, safflower, and sesame under different levels of irrigation water availability. *Agricultural Water Management*, 218, 149-157. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.031>.
22. Ekim, R., Arikian, B., Alp-Turgut, F. N., Koyukan, B., Ozfidan-Konakci, C., & Yildiztugay, E. (2024). Polyvinylpyrrolidone-coated copper nanoparticles dose-dependently conferred tolerance to wheat under salinity and/or drought stress by improving photochemical activity and antioxidant system. *Environmental Research*, 241, 117681. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117681>.
23. Farahani, S., Majidi Heravan, E., Shirani Rad, A. H., & Nourmohammadi, G. (2022). Responses of canola morphological and agronomic characteristics to potassium sulfate fertilization under drought stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53, 1731-1743.

- <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2063318>.
24. 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.). *Journal of Gesunde Pflanzen*, 75, 2075-2088. <https://doi.org/10.1007/s10343-023-00845-0>
 25. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. J. S. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 153-188. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_12
 26. Ghaffari, M., Gholizadeh, A., Rauf, S., & Shariati, F. (2023). Drought-stress induced changes of fatty acid composition affecting sunflower grain yield and oil quality. *Food Science & Nutrition*, 11(12), 7718-7731. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3690>.
 27. Giri, B., Prasad, R., Wu, Q. S., & Varma, A. (2019). *Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment*. Springer. 1-521. (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-18933-4>
 28. Gugel, R., & Falk, K. J. C. J. O. P. S. (2006). Agronomic and seed quality evaluation of *Camelina sativa* in western Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 86(4), 1047-1058. <https://doi.org/10.4141/P04-081>.
 29. Heath, R. L., & Packer, L. J. A. O. B. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125(1), 189-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1).
 30. Hidangmayum, A., Dwivedi, P., Kumar, P., & Upadhyay, S. K. (2023). Seed priming and foliar application of chitosan ameliorate drought stress responses in mungbean genotypes through modulation of morpho-physiological attributes and increased antioxidative defense mechanism. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42, 6137-6154. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10792-1>.
 31. Imtiaz, H., Mir, A. R., Corpas, F. J., & Hayat, S. (2023). Impact of potassium starvation on the uptake, transportation, photosynthesis, and abiotic stress tolerance. *Plant Growth Regulation*, 99, 429-448. <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00925-7>.
 32. Jamshidi Zinab, A., Hasanloo, T., Naji, A. M., Delangiz, N., Farhangi-Abriz, S., Asgari Lajayer, B., Hemati, A., Shobbar, Z. S., & Farooq, M. (2023). Physiological and biochemical evaluation of commercial oilseed rape (*Brassica napus* L.) cultivars under drought stress. *Gesunde Pflanzen*, 75, 847-860. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00755-7>
 33. Jankowski, K. J., Sokolski, M., & Kordan, B. (2019). Camelina: Yield and quality response to nitrogen and sulfur fertilization in Poland. *Industrial Crops and Products*, 141, 111776. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111776>.
 34. Jothimani, K., & Arulbalachandran, D. J. B. (2020). Physiological and biochemical studies of black gram (*Vigna mungo* (L.) Hepper) under polyethylene glycol induced drought stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 29, 101777. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101777>.
 35. Katerji, N., Mastrorilli, M., & Rana, G. J. E. J. O. A. (2008). Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: Review and analysis. *European Journal of Agronomy*, 28, 493-507. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.12.003>.
 36. Khalilpour, M., Mozafari, V., & Abbaszadeh-Dahaji, P. (2021). Tolerance to salinity and drought stresses in pistachio (*Pistacia vera* L.) seedlings inoculated with indigenous stress-tolerant PGPR isolates. *Scientia Horticulturae*, 289, 110440. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110440>.
 37. Levitt, J. (1980). Responses of plants to environmental stresses. Volume II. Water, radiation, salt, and other stresses. *Journal of Ecology*. 70(2), 696-697. <https://doi.org/10.2307/2259945>
 38. Li, Y., Zou, J., Zhu, H., He, J., Setter, T. L., Wang, Y., Meng, Y., Chen, B., Zhao, W., & Wang, S. (2022). Drought deteriorated the nutritional quality of cottonseed by altering fatty acids and amino acids compositions in cultivars with contrasting drought sensitivity. *Environmental and Experimental Botany*, 194, 104747.

- <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104747>.
39. Liao, Q., Gu, S., Kang, S., Du, T., Tong, L., Wood, J. D., & Ding, R. (2022). Mild water and salt stress improve water use efficiency by decreasing stomatal conductance via osmotic adjustment in field maize. *Science of the Total Environment*, 20(805), 150364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150364>.
 40. Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in enzymology*. Elsevier, 148, 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
 41. Mabudi Bilasvar, H., Ghassemi-Golezani, K., & Mohammadi Nassab, A. D. (2022). Seed development, oil accumulation and fatty acid composition of drought stressed rapeseed plants affected by salicylic acid and putrescine. *Gesunde Pflanzen*, 74, 333-345. <https://doi.org/10.1007/s10343-021-00612-z>.
 42. Maçik, M., Gryta, A., & Frac, M. J. A. I. A. (2020). Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. *Advanced in Agronomy*, 162, 31-87. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.001>.
 43. Mao, Z. H., Deng, L., Duan, F. Z., Li, X. J., & Qiao, D. Y. (2020). Angle effects of vegetation indices and the influence on prediction of SPAD values in soybean and maize *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 93, 102198. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102198>.
 44. Mehmood, S., Ahmed, W., Ikram, M., Imtiaz, M., Mahmood, S., Tu, S., & Chen, D. J. P. (2020). Chitosan modified biochar increases soybean (*Glycine max* L.) resistance to salt-stress by augmenting root morphology, antioxidant defense mechanisms and the expression of stress-responsive genes. *Plants*, 9, 1173. <https://doi.org/10.3390/plants9091173>.
 45. Mishra, S. K., Khan, M. H., Misra, S., Dixit, V. K., Gupta, S., Tiwari, S., Gupta, S. C., & Chauhan, P. S. (2020). Drought tolerant *Ochrobactrum* sp. inoculation performs multiple roles in maintaining the homeostasis in *Zea mays* L. subjected to deficit water stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 150, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.025>.
 46. Mohtashami, R., Dehnavi, M. M., Balouchi, H., & Faraji, H. (2020). Improving yield, oil content and water productivity of dryland canola by supplementary irrigation and selenium spraying. *Agricultural Water Management*, 232, 106046. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106046>.
 47. Monfared, B. B., Noormohamadi, G., Rad, A. H. S., & Hervan, E. M. (2020). Effects of sowing date and chitosan on some characters of canola (*Brassica napus* L.) genotypes. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 23, 65-71. <https://doi.org/10.1007/s12892-019-0177-0>.
 48. Moolphuerk, N., Lawson, T., & Pattanagul, W. J. J. O. C. I. (2022). Chitosan mitigates the adverse effects and improves photosynthetic activity in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings under drought condition. *Journal of Crop Improvement*, 36, 638-655. <https://doi.org/10.1080/15427528.2021.2000544>.
 49. Moradzadeh, S., Siavash Moghaddam, S., Rahimi, A., Pourakbar, L., El Enshasy, H. A., & Sayyed, R. J. H. (2021). Bio-chemical fertilizer improves the oil yield, fatty acid compositions, and macro-nutrient contents in *Nigella sativa* L. *Horticulturae*, 7(10), 345. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100345>.
 50. Mulugeta, S. M., Sárosi, S., & Radácsi, P. (2023). Physio-morphological trait and bioactive constituents of *Ocimum* species under drought stress. *Industrial Crops and Products*, 205, 117545. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117545>.
 51. Munsif, F., Shah, T., Arif, M., Jehangir, M., Afridi, M. Z., Ahmad, I., Jan, B. L., & Alansi, S. (2022). Combined effect of salicylic acid and potassium mitigates drought stress through the modulation of physio-biochemical attributes and key antioxidants in wheat. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29, 103294. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103294>.
 52. Narasimhamurthy, K., Udayashankar, A. C., De Britto, S., Lavanya, S. N., Abdelrahman, M., Soumya, K., Shetty, H. S., Srinivas, C., & Jogaiah, S. J. I. J. O. B. M. (2022). Chitosan and chitosan-derived nanoparticles modulate enhanced immune response in tomato against bacterial wilt disease. *International Journal of Biological*

- Macromolecules*, 220, 223-237. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.054>.
53. Nasrollahzadeh, S., Mamnabi, S., Ghassemi-Golezani, K., Raei, Y., & Weisany, W. (2023). PGPR and vermicompost with reduced chemical fertilizer enhances biodiesel production, nutrient uptake and improve oil composition of rapeseed grown under water deficit stress. *South African Journal of Botany*, 159, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.06.001>.
 54. Naveen, N., Kumari, N., Avtar, R., Jattan, M., Ahlawat, S., Rani, B., Malik, K., Sharma, A., & Singh, M. J. H. (2021). Evaluation of effect of brassinolide in *Brassica juncea* leaves under drought stress in field conditions. *Horticulturae*, 7, 514. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7110514>.
 55. Nawaz, F., Rafeeq, R., Majeed, S., Ismail, M. S., Ahsan, M., Ahmad, K. S., Akram, A., & Haider, G. (2023). Biochar amendment in combination with endophytic bacteria stimulates photosynthetic activity and antioxidant enzymes to improve soybean yield under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23, 746-760. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01079-1>.
 56. Neupane, D., Lohaus, R. H., Solomon, J. K. Q., & Cushman, J. C. (2022). Realizing the potential of *Camelina sativa* as a bioenergy crop for a changing global climate. *Plants*, 11(6), 1-31. <https://doi.org/10.3390/plants11060772>.
 57. Ostadi, A., Javanmard, A., Amani Machiani, M., Sadeghpour, A., Maggi, F., Nouraein, M., Morshedloo, M. R., Hano, C., & Lorenzo, J. M. (2022). Co-application of TiO₂ nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi improves essential oil quantity and quality of sage (*Salvia officinalis* L.) in drought stress conditions. *Plants*, 11(13), 1659. <https://doi.org/10.3390/plants11131659>.
 58. Pavlista, A., Hergert, G., Margheim, J., & Isbell, T. J. I. C. (2016). Growth of spring camelina (*Camelina sativa*) under deficit irrigation in Western Nebraska. *Industrial Crops and Products*, 83, 118-123. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2015.12017>.
 59. Pramanik, P., Krishnan, P., Maity, A., Mridha, N., Mukherjee, A., & Rai, V. J. E. N. V. (2020). Application of nanotechnology in agriculture. *Environmental Nanotechnology*, 4, 317-348. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26668-4_9.
 60. Qayyum, A., Al Ayoubi, S., Sher, A., Bibi, Y., Ahmad, S., Shen, Z., & Jenks, M. A. J. S. J. O. B. S. (2021). Improvement in drought tolerance in bread wheat is related to an improvement in osmolyte production, antioxidant enzyme activities, and gaseous exchange. *Saudi Journal Biological Science*, 28, 5238-5249. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.05.040>.
 61. Rad, A. H. S., Malmir, M., & Eyni-Nargeseh, H. (2024). Potassium silicate positively affects oil content, physiologic, and agronomic traits of *Camelina sativa* L. under optimal water supply and drought stress conditions. *Silicon*, 16, 1071–1082. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02741-8>.
 62. Reddy, P. P., & Reddy, P. P. J. S. I. O. C. P. (2016). Supplemental irrigation. *Sustainable Intensification of Crop Protection*, 253-265. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2702-4_17.
 63. Rezaei-Chiyaneh, E., Amirnia, R., Machiani, M. A., Javanmard, A., Maggi, F., & Morshedloo, M. R. (2020). Intercropping fennel (*Foeniculum vulgare* L.) with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by PGPR inoculation: A strategy for improving yield, essential oil and fatty acid composition. *Scientia Horticulturae*, 261, 108951. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108951>.
 64. Rezayian, M., Ebrahimzadeh, H., Niknam, V. J. J. O. S. S., & Nutrition, P. (2020). Nitric oxide stimulates antioxidant system and osmotic adjustment in soybean under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 1122-1132. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00198-x>.
 65. Rezig, L., Chouaibi, M., Msaada, K., & Hamdi, S. (2012). Chemical composition and profile characterisation of pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed oil. *Industrial Crops and Products*, 37, 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.12.004>.
 66. Sathiyabama, M., & Manikandan, A. J. C. P. (2021). Foliar application of chitosan nanoparticle improves yield,

- mineral content and boost innate immunity in finger millet plants. *Carbohydrate Polymers*, 258, 117691. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117691>.
67. Secchi, M. A., Fernandez, J. A., Stamm, M. J., Durrett, T., Prasad, P. V., Messina, C. D., & Ciampitti, I. A. (2023). Effects of heat and drought on canola (*Brassica napus* L.) yield, oil and protein: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 293, 108848. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108848>.
68. Sentís-Moré, P., Ortega-Olivé, N., Robles-Rodríguez, I., Royo-Esnal, A., & Romero-Fabregat, M. P. (2023). Protein hydrolysis of *Camelina sativa* meals: A study of molecular weight distribution and emulsifying properties. *Food Bioscience*, 56, 103062. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103062>.
69. Shah, M. N., Wright, D. L., Hussain, S., Koutroubas, S. D., Seepaul, R., George, S., Ali, S., Naveed, M., Khan, M., & Altaf, M. T. (2023). Organic fertilizer sources improve the yield and quality attributes of maize (*Zea mays* L.) hybrids by improving soil properties and nutrient uptake under drought stress. *Journal of King Saud University-Science*, 35, 102570.
70. Sharma, M., Delta, A. K., & Kaushik, P. (2021). *Glomus mosseae* and *Pseudomonas fluorescens* application sustains yield and promote tolerance to water stress in *Helianthus annuus* L. *Stresses*, 1, 305-316. <https://doi.org/10.3390/stresses1040022>.
71. Shemi, R., Wang, R., Gheith, E. S. M., Hussain, H. A., Hussain, S., Irfan, M., Cholidah, L., Zhang, K., Zhang, S., & Wang, L. (2021). Effects of salicylic acid, zinc and glycine betaine on morpho-physiological growth and yield of maize under drought stress. *Scientific Reports*, 11, 3195. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82264-7>.
72. 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. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 14, 2847-2861. <https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2177989>.
73. Silva-Santos, L., Neto, L. P., Corte-Real, N., Sperandio, M. V. L., Camara, C. A. G., Moraes, M. M., & Ulisses, C. (2023). Yeast extract and chitosan elicitation improves essential oil, regulates plant growth and antioxidative system in *Lippia alba* (Mill) NE Brown (Verbenaceae). *South African Journal of Botany*, 163, 756-769. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.10.024>.
74. Sima, N. A. K., Jabbari, H., Ebadi, A., Ghaffari, M. R., & Koobaz, P. J. J. O. S. S. (2023). Comparative analysis of exogenous hormone application on contrasting canola (*Brassica napus* L.) genotypes under drought stress conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24, 308-317. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01527-6>.
75. Tashakorizadeh, M., Vahabi, M. R., Golkar, P., & Mahdavian, K. (2022). The singular and combined effects of drought and copper stresses on the morphological traits, photosynthetic pigments, essential oils yield and copper concentration of *Fumaria parviflora* Lam. *Industrial Crops and Products*, 177, 114517. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114517>.
76. Waraich, E. A., Ahmed, Z., Ahmad, R., Ashraf, M. Y., Naeem, M. S., & Rengel, Z. J. A. J. O. C. S. (2013). *Camelina sativa*, a climate proof crop, has high nutritive value and multiple-uses: A review. *Australian Journal of Crop Science*, 7, 1551-1559.
77. Wasaya, A., Manzoor, S., Yasir, T. A., Sarwar, N., Mubeen, K., Ismail, I. A., Raza, A., Rehman, A., Hossain, A., & EL Sabagh, A. (2021). Evaluation of fourteen bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes by observing gas exchange parameters, relative water and chlorophyll content, and yield attributes under drought stress. *Sustainability*, 13, 4799. <https://doi.org/10.3390/su13094799>.
78. Wei, H., Geng, X., Zhu, W., Zhang, X., Zhang, X., Chen, Y., Huo, Z., Xu, K., Zhou, G., & Meng, T. (2023). Individual and combined influences of salinity and drought stress on the agro-physiological traits and grain yield of rice. *Field Crops Research*, 304, 109172. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109172>.
79. Yang, Q., Li, P., Zhang, D., Lin, W., Hao, X., & Zong, Y. (2023). Effects of elevated CO₂ on the photosynthesis, chlorophyll fluorescence and yield of two wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) under persistent drought stress. *Sustainability*, 15, 1593. <https://doi.org/10.3390/su15021593>

80. Zafar, S., Li, Y. L., Li, N. N., Zhu, K. M., & Tan, X. L. J. J. O. B. (2019). Recent advances in enhancement of oil content in oilseed crops. *Journal of Biotechnology*, 301, 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2019.05.307>.
81. Zanetti, F., Alberghini, B., Marjanović Jeromela, A., Grahovac, N., Rajković, D., Kiprovski, B., & Monti, A. (2021). Camelina, an ancient oilseed crop actively contributing to the rural renaissance in Europe. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00663-y>.
82. Zhang, C. J., Gao, Y., Jiang, C., Liu, L., Wang, Y., Kim, D. S., Yu, J., Yu, L., Li, F., & Fan, Y. (2021). Camelina seed yield and quality in different growing environments in northern China. *Industrial Crops and Products*, 172, 114071. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114071>.