University of Birjand

Environmental Stresses in Crop Sciences

Journal homepage: https://escs.birjand.ac.ir

19(2), 393-408 (2026)

https://doi.org/10.22077/escs.2026.8964.2344

Original article

Effects of different zeolite levels on agronomic and physiological traits of camelina (*Camelina sativa* L.) under full and cut-off irrigation

Amir Hossein ShiraniRad[1*], Hamed Eyni-Nargeseh[2], Seyed Ahmad KalantarAhmadi[3]

1. *Professor of Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran*
2. *Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran*
3. *Associate Professor, Department of Agronomy and Horticultural Science, Safiabad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)*

Received 15 February 2025; Revised 10 April 2025; Accepted 12 April 2025

Extended abstract

Introduction

Oilseed crops play a vital role in human life by supplying a substantial portion of nutritional requirements and serving as raw materials for various industries. Camelina (Camelina sativa L.) is an oilseed crop with high cultivation potential compared with other oilseed species, owing to its relatively short growth period, moderate to low nutrient requirements, and high tolerance to a wide range of biotic and abiotic stresses. Developing drought-resistant crops such as camelina, along with strategies to conserve water and enhance water use efficiency under drought stress conditions, can contribute to increasing total oilseed production. In this context, the application of soil amendment materials such as zeolite can improve plant growth under drought stress conditions. Zeolite is an environmentally friendly material that has been widely used to improve soil physical and chemical properties due to its unique characteristics. Accordingly, the present study aimed to investigate the effects of different zeolite application rates on seed yield, oil content, and fatty acid composition of camelina under optimal irrigation and drought stress conditions in Karaj, Iran.

Materials and methods

A factorial experiment was conducted during two growing seasons (2018–2019 and 2019–2020) with three replications to investigate the effects of zeolite application rates (0, 5, 10, and 15 t ha^{-1}) on camelina under three irrigation regimes (full irrigation, restricted irrigation from the silique formation stage, and restricted irrigation from the beginning of flowering). A 2-m separation distance was maintained between experimental plots to minimize lateral water movement and prevent inter-plot water penetration. Each experimental plot consisted of six rows, each 6 m long, with a row spacing of 30 cm and a plant spacing of 5 cm within rows. Camelina seeds (Soheil cultivar) were sown on 27 September in both growing seasons. Irrigation was applied using a surface (flood) irrigation system, and irrigation intervals across treatments were determined based on 80 mm of cumulative evaporation measured with a Class A evaporation pan. The volume of irrigation water applied to each main plot was measured using water meters installed separately for each main plot across all three replications. Accordingly, total irrigation volumes of 5120, 3840, and 2560 m^3 ha^{-1} were applied under full irrigation, restricted irrigation from the silique formation stage, and restricted irrigation from the beginning of flowering, respectively.

* Corresponding author: Amir Hossein Shirani Rad; E-Mail: shirani.rad@gmail.com

© 2026, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Results and discussion

The results indicated that drought stress significantly reduced relative water content (RWC), chlorophyll content (a, b, and total), oil content, and seed yield of camelina, whereas stomatal resistance and carbohydrate and proline contents in camelina leaves increased under conditions of irrigation withholding from the silique formation and flowering stages compared with full irrigation. Zeolite application under three irrigation regimes resulted in decreased stomatal resistance and carbohydrate and proline contents in camelina, whereas relative water content (RWC), chlorophyll content (a, b, and total), oil content, and seed yield increased in response to zeolite application under different irrigation regimes. The highest seed yield (2209 kg ha^{-1}) was obtained under full irrigation with zeolite application at a rate of 15 t ha^{-1}, whereas the highest camelina oil content (31%) was obtained under full irrigation with zeolite application at a rate of 10 t ha^{-1}.

Conclusion

Overall, the findings demonstrated that applying zeolite, particularly under irrigation withholding during the silique formation and flowering stages, reduced the adverse effects of drought stress, improved camelina plant growth, and ultimately increased total production. Therefore, the application of 10 t ha^{-1} of zeolite under full irrigation conditions and 15 t ha^{-1} under irrigation withholding from the silique formation and flowering stages is recommended for achieving the highest seed and oil yields.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the support provided by the Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Karaj, Iran.

Keywords: Oil content, Photosynthesis, Seed yield, Stomatal resistance, Water-limited irrigation

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد نوزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۵

https://doi.org/10.22077/escs.2026.8964.2344

مقاله پژوهشی

تأثیر سطوح مختلف زئولیت بر خصوصیات فیزیولوژیک و زراعی کاملینا (*Camelina sativa* L.) تحت دوره‌های آبیاری کامل و تنش قطع آبیاری

امیر حسین شیرانی‌راد[1*]، حامد عینی نرگسه[2*]، سیداحمد کلانتراحمدی[3]

۱. استاد موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج
۲. استادیار گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه ملی مهارت، تهران
۳. دانشیار بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی‌آباد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
روغن
عملکرد دانه
فتوسنتز
کم‌آبیاری
مقاومت روزنه‌ای

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

تاریخ انتشار:
تابستان ۱۴۰۵
۱۹(۲): ۳۹۳-۴۰۸

چکیده

تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر کاربرد مقادیر مختلف زئولیت بر خصوصیات فیزیولوژیک و زراعی کاملینا تحت شرایط آبیاری مطلوب و تنش خشکی در شرایط آب‌وهوایی کرج در سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۸ و ۱۳۹۹-۱۳۹۸ انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمار زئولیت در چهار سطح (صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار) و آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل، قطع آبیاری از مرحله کپسول‌دهی و قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی) بودند. نتایج نشان داد هر دو تیمار قطع آبیاری باعث کاهش محتوای نسبی آب، محتوای کلروفیل (a و b و کل)، درصد روغن و عملکرد دانه کاملینا شد درحالی‌که مقاومت روزنه‌ای، میزان کربوهیدرات و پرولین برگ کاملینا تحت شرایط قطع آبیاری از مراحل کپسول‌دهی و گل‌دهی نسبت به آبیاری کامل به طور معنی‌داری افزایش یافتند. کاربرد زئولیت در هر سه رژیم آبیاری کاهش میزان مقاومت روزنه‌ای، کربوهیدرات و پرولین برگ را در کاملینا در پی داشت درحالی‌که میزان محتوای نسبی آب برگ، محتوای کلروفیل (a و b و کل)، درصد روغن و عملکرد دانه در پاسخ به کاربرد زئولیت تحت رژیم‌های مختلف آبیاری افزایش نشان داد. بیشترین میزان عملکرد دانه (۲۰۵۷ کیلوگرم در هکتار) و محتوی روغن (۳۰/۵۵ درصد) کاملینا در تیمار کاربرد ۱۵ تن زئولیت تحت شرایط آبیاری کامل به دست آمد درحالی‌که کمترین مقدار عملکرد دانه (۳۹۰/۶۷ کیلوگرم در هکتار) و محتوی روغن (۲۵/۲۲ درصد) به تیمار قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی و عدم کاربرد زئولیت تعلق داشت. به‌طورکلی یافته‌های این تحقیق نشان داد کاربرد زئولیت بخصوص تحت شرایط قطع آبیاری با کاهش اثرات مخرب تنش خشکی، موجب بهبود رشد بوته‌های کاملینا و افزایش تولید می‌شود؛ درنهایت کاربرد ۱۰ تن زئولیت در هکتار تحت شرایط آبیاری کامل و ۱۵ تن زئولیت در هکتار تحت شرایط قطع آبیاری از مراحل گل‌دهی و کپسول‌دهی توصیه می‌گردد.

مقدمه

کاملینا (*Camelina sativa* L.) گیاهی علفی با ساقه راست و کمی خشن است که برگ‌هایی ساده با آرایش متناوب، فاقد گوشوارک و کرک‌دار دارد. ارتفاع آن ۱۲۰-۳۰ سانتی‌متر است و برگ‌های باریک و درازش به حالت ساقه آغوش و پهنک منتهی به دو زائده در محل اتصال به ساقه قرار دارند. تولید مثل کاملینا به روش جنسی و وزن هزار دانه آن از ۰/۸ تا ۲ گرم متغیر است (Bakhshi et al., 2021). کاملینا گیاهی دانه روغنی است و به‌دلیل دوره رشد نسبتا کوتاه، نیاز غذایی متوسط تا کم و تحمل بالا در برابر طیف وسیعی از تنش‌های زنده و غیرزنده در مقایسه با سایر محصولات دانه روغنی از پتانسیل بالایی جهت کشت برخوردار می‌باشد (Borzoo et al., 2021; Shiranirad et al., 2023). علاوه بر این، نیاز کمتر به نهاده‌ها، سازگاری با شرایط آب و هوایی متنوع، تحمل در برابر آفات و بیماری‌ها و استفاده برای اهدافی مانند

* نگارنده پاسخگو: امیرحسین شیرانی‌راد. پست الکترونیک: shirani.rad@gmail.com

غذای انسان، خوراک دام و سوخت زیستی، تمایل محققان و کشاورزان را به کشت کاملینا افزایش داده است (Zanetti et al., 2021).

یکی از مزیت‌های اصلی کاملینا نسبت به سایر گیاهان دانه روغنی، موسیلاژ اطراف پوشش بذر است که توانایی بالایی در جذب آب دارند و همین امر یکی از عوامل مؤثر بر تحمل به خشکی آن به‌شمار می‌رود (Čanak et al., 2020). به گزارش توسعه جهانی آب سازمان ملل متحد، حدود ۷۰ درصد منابع آب شیرین در دنیا برای تولید محصولات کشاورزی مصرف می‌شود (UNESCO, 2024) که بخش عمده‌ای از آن از طریق آبیاری‌های غیراصولی هدر می‌رود و این کم‌آبی می‌تواند تهدیدی برای امنیت غذایی در دنیا به‌شمار رود. بنابراین با توسعه کشت گیاهان متحمل در برابر تنش خشکی و ارائه راهکارهایی برای صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش کارایی مصرف آب تحت شرایط تنش می‌توان میزان تولید کل دانه‌های روغنی را افزایش داد.

کشاورزان بخصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌توانند با مدیریت بهینه در میزان مصرف آب آبیاری، علاوه بر کاهش چالش برای تأمین آب، تولید مناسب و پایداری نیز داشته باشند (Rahimi-Moghaddam et al., 2021). البته باید توجه داشت زمانی که گیاهی با تنش کم‌آبی مواجه می‌شود عملکرد محصول آن کاهش می‌یابد (Mir et al., 2024; Aboodeh et al., 2024)؛ در این میان، زمان وقوع تنش از اهمیت بیشتری نسبت به شدت تنش برخوردار می‌باشد. کاهش آب مصرفی و بدنبال آن تنش خشکی دوره رشد گیاه را کوتاه می‌کند و در نتیجه عملکرد دانه و روغن گیاهان دانه روغنی کاهش می‌یابد (Walia et al., 2021). عملکرد محصولات زراعی به میزان فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی وابسته است و هر دوی این موارد تحت تأثیر پدیده‌های مختلف فیزیولوژیک هستند (Reynolds et al., 2022). بنابراین، محتوای کلروفیل به‌عنوان شاخص ظرفیت فتوسنتز نقشی حیاتی در گیاهان ایفا می‌کند (Zhai et al., 2021). در بررسی تأثیر تنش خشکی بر خصوصیات فیزیولوژیک و زراعی کاملینا گزارش گردید که قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی و کپسول‌دهی به‌طور معنی‌داری میزان محتوای نسبی آب برگ، غلظت کلروفیل، عملکرد دانه و درصد روغن کاملینا را کاهش داد، در مقابل، میزان دمای کانوپی، مقاومت روزنه‌ای و محتوای پرولین در این شرایط افزایش یافت (Amiri-Darban et al., 2022).

گائو و همکاران (Gao et al., 2018) با بررسی تأثیر تنش خشکی بر کلزا و کاملینا دریافتند که اثر منفی تنش خشکی بر هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق و در نتیجه فتوسنتز خالص در گیاه کلزا را بیشتر از کاملینا تحت تأثیر منفی قرار داد؛ در واقع تحمل کاملینا بواسطه برتری در صفات مذکور بیشتر از کلزا بود. ناگفته پیداست تنش کم‌آبی با اثرات منفی بر رشد و عملکرد گیاهان موجب کاهش عملکرد نهایی شده و لازم است در این شرایط از راهکارهای مناسب برای کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر گیاهان بهره جست تا ضمن بهبود وضعیت رشدی گیاهان تحت تنش، عملکرد کمی و کیفی گیاه نیز در این شرایط افزایش یابد.

زئولیت یک ماده سازگار با محیط‌زیست است که به‌طور گسترده‌ای برای بهبود خواص خاک مورد توجه قرار گرفته است (Sun et al., 2020). زئولیت به دلیل ویژگی‌هایی مانند ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، توزیع یکنواخت اندازه ذرات و تخلخل داخلی بالا، آب و عناصر غذایی را تحت شرایط خشکی در ناحیه ریشه حفظ کرده و در نهایت اثر منفی تنش خشکی را بر گیاه زراعی کاهش می‌دهد (Hazrati et al., 2017). زئولیت‌ها سرعت رهاسازی مواد مغذی از کودهای آلی و معدنی را به حداقل می‌رسانند و امکان دسترسی بهتر مواد مغذی را در طول مراحل رشد محصول فراهم می‌کنند. علاوه بر این موارد، زئولیت می‌تواند به‌طور موثری فلزات سنگین مانند کادمیوم، سرب، نیکل، آنیون‌هایی مانند کرومات و آرسنات و آلاینده‌های آلی مانند ترکیبات آلی فرار را از خاک جذب کند (Mondal et al., 2021). در پژوهشی متقی و همکاران (Motaghi et al., 2019) کارایی زئولیت (۰ و ۱۰ تن در هکتار) را در کاهش اثرات مخرب تنش کم آبی (آبیاری پس از ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبتی) بر صفات زراعی کلزا در شرایط آب و هوایی کرج مورد بررسی قرار داده و بیان کردند تنش‌های متوسط و شدید در مقایسه با آبیاری کامل به‌ترتیب باعث کاهش ۵۹ و ۸۶ درصدی عملکرد دانه کلزا شد. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد که کاربرد زئولیت عملکرد دانه کلزا را تحت تیمارهای آبیاری پس از ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبتی به‌ترتیب ۲۷، ۶۴ و ۹۴ درصد افزایش داد. یافته‌های عابدی و همکاران (Abedi et al., 2024) از بررسی تأثیر کاربرد زئولیت و سرکه چوب بر عملکرد کاملینا تحت سطوح مختلف تنش خشکی نشان داد استفاده از زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب در شرایط آبیاری مطلوب، کم‌آبیاری ملایم، کم‌آبیاری متوسط و کم‌آبیاری شدید به‌ترتیب ۳۲/۱۹،

۳۶/۲۹، ۲۸/۳۷ و ۴۱/۰۴ درصد عملکرد دانه کاملینا را بهبود بخشید.

ازآنجایی‌که ایران در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار دارد، لذا ضروری است در بخش کشاورزی و بخصوص زراعت به انتخاب گیاه مناسب در هر منطقه و نیاز آبی آن توجه کافی شود. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، کاملینا به‌عنوان یک گیاه دانه روغنی با نیاز آبی کم، انتخاب مناسبی برای کشت در مناطق مختلف ایران به شمار می‌رود. از طرفی استفاده از مواد اصلاح‌کننده خاک مانند زئولیت می‌تواند رشد گیاه را تحت شرایط کم‌آبی بهبود دهد. بر همین اساس، تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر کاربرد مقادیر مختلف زئولیت بر رشد و نمو کاملینا تحت شرایط آبیاری مطلوب و تنش خشکی در شرایط آب‌وهوایی کرج انجام شد.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج با مختصات جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۵۴ دقیقه طول شرقی انجام شد. اطلاعات آب و هوایی منطقه (میانگین بارش و دماهای کمینه و بیشینه ماهانه) از سازمان هواشناسی کل کشور برای دو سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ و ۱۳۹۹-۱۳۹۸ اخذ شد (جدول ۱).

جدول ۱. میانگین دماهای کمینه و بیشینه هوا و بارش بصورت ماهانه در طول دوره رشد کاملینا در دو سال زراعی (۱۳۹۸-۱۳۹۷ و ۱۳۹۹-۱۳۹۸) در کرج.

Table 1. Average monthly minimum and maximum air temperatures and rainfall during the camelina growth period in two crop years (2018-2019 and 2019-2020) in Karaj.

ماه Month	2018-2019 ۱۳۹۷-۱۳۹۸			2019-2020 ۱۳۹۸-۱۳۹۹		
	دمای کمینه Minimum temperature	دمای بیشینه Maximum temperature	بارش Rainfall	دمای کمینه Minimum temperature	دمای بیشینه Maximum temperature	بارش Rainfall
	---------- °C ----------		mm	---------- °C ----------		mm
مهر-آبان October	11.19	22.7	28.51	11.16	23.03	110.91
آبان-آذر November	5.45	13.04	64.6	3.03	12.43	21.71
آذر-دی December	3.88	11.20	38.61	2.36	10.50	40.32
دی-بهمن January	0.58	9.21	68.61	-1.55	6.29	39.4
بهمن-اسفند February	0.88	10.32	12.41	0.9	10.08	112.11
اسفند-فروردین March	3.6	13.11	81.61	5.29	16.03	36.52
فروردین-اردیبهشت April	6.68	18.29	39.33	6.85	17.95	90.9
اردیبهشت-خرداد May	12.81	27.99	12.61	13.01	27.14	34.9
خرداد-تیر June	18.85	34.68	0.01	16.96	34.01	0

طرح آماری و نحوه اجزای آزمایش

به‌منظور بررسی تأثیر کاربرد مقادیر مختلف زئولیت بر عملکرد دانه، درصد روغن و صفات زراعی و فیزیولوژیک کاملینا تحت شرایط آبیاری مطلوب و تنش خشکی، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طراحی شد. در این آزمایش تیمار زئولیت در چهار سطح (صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار) و آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل در طول دوره رشد بر اساس ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشت تبخیر کلاس A آمریکایی، قطع آبیاری از مرحله کپسول‌دهی تا انتهای دوره رشد و قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی تا انتهای دوره رشد) بودند. لازم به ذکر است، به‌منظور جلوگیری از نفوذ آب و همچنین عدم تأثیر زئولیت بر کرت‌های کناری، فاصله ۲ متری بین کرت‌ها در نظر گرفته شد.

در این تحقیق، هر کرت آزمایشی شامل ۶ ردیف ۶ متری بود که فاصله بین ردیف و روی ردیف‌ها برای بوته‌های کاملینا (رقم سهیل) به‌ترتیب ۳۰ و ۵ سانتی‌متر درنظر گرفته شد. به‌منظور تعیین برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش، نمونه‌های خاکی از دو عمق ۳۰-۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متر به‌طور تصادفی گرفته شد (جدول ۲).

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش.

Table 2. Physical and chemical characteristics of the soil at the experiment site.

سال Year	عمق خاک Soil depth	پتاسیم قابل‌جذب Available K	فسفر قابل‌جذب Avaiable P	نیتروژن Nitrogen	کربن آلی Organic carbon	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC
	cm	ppm		%-			$dS.m^{-1}$
۱۳۹۷-۱۳۹۸	0-30	255	11.7	0.07	0.54	7.3	3.97
2018–2019	30-60	189	8.9	0 .08	0.58	7.6	1.22
۱۳۹۸-۱۳۹۹	0-30	236	12.5	0.08	0.61	7.1	3.81
2019–2020	30-60	212	10.1	0.09	0.72	7.4	1.75

کاربرد کودهای شیمیایی بر اساس نتایج آزمون خاک و توصیه‌های کودی صورت پذیرفت. بر همین اساس، ۲۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار در سه نوبت (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت پیش‌کاشت، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در مرحله طویل شدن ساقه و ۵۰ کیلوگرم در هکتار در مرحله غنچه‌دهی)، ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل و ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم به‌صورت پیش‌کاشت مصرف شد. بذرهای کاملینا (رقم سهیل) در تاریخ ۶ مهر در هر دو سال کاشته شد. علف‌های هرز در طول دوره رشد گیاه به‌صورت دستی وجین شدند. آبیاری نیز بر اساس ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشت تبخیر انجام شد، به‌طوری‌که رژیم‌های آبیاری کامل، قطع آبیاری از مرحله کپسول‌دهی و قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی به‌ترتیب ۵۱۲۰، ۳۸۴۰ و ۲۵۶۰ متر مکعب آب دریافت کردند. برداشت نهایی در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک انجام شد.

صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی

در این تحقیق، تمامی نمونه‌های گیاهی استفاده شده برای تعیین صفات مورد فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در مرحله کپسول‌دهی کامل اندازه‌گیری شدند. به‌منظور اندازه‌گیری محتوای نسبی آب، نمونه‌ها از برگ‌های جوان و به طور کامل توسعه‌یافته در قسمت بالایی بوته انتخاب شدند و بعد از توزین برای اندازه‌گیری وزن آماس، برگ‌ها در دمای اتاق به‌مدت ۲۴ ساعت درون آب مقطر قرار گرفتند و پس از خشک کردن آب روی برگ‌ها، وزن هر نمونه توسط ترازوی دیجیتال دقیق تعیین گردید. در ادامه برگ‌ها در آون (به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد) خشک و وزن آن‌ها تعیین شد. محتوای نسبی آب برگ با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد (Ferrat and Loval, 1999).

$$RWC\ (\%)=[(FW-DW)/(TW-DW)]\times 100 \qquad [۱]$$

در این معادله FW، DW و TW به ترتیب وزن تر، وزن خشک و وزن آماس می‌باشند.

اندازه‌گیری دمای کانوپی با استفاده از یک دماسنج مادون قرمز (ضریب گسیلندگی ۰/۹۹) و مقاومت روزنه‌ای با استفاده از یک دستگاه پرومتر (Automic Prometer AP4) انجام شدند. محتوای کربوهیدرات‌های محلول برگ با استفاده از روش شلیگل (Sheligel, 1986)، کلروفیل با استفاده از روش آرنون (Arnon, 1949) و پرولین با استفاده از روش بیتس (Bates et al., 1973) اندازه‌گیری شدند.

اجزای عملکرد، عملکرد دانه و محتوای روغن

عملکرد دانه از طریق برداشت بوته‌ها از یک سطح ۴/۵ متر مربعی از هر کرت در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک انجام شد. اجزای عملکرد شامل تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه با استفاده از ۱۰ بوته که به‌طور تصادفی انتخاب شده بودند تعیین شدند. برای تعیین تعداد کپسول، تعداد کپسول‌های ۱۰ بوته به طور جداگانه شمارش و میانگین آن‌ها به‌عنوان تعداد کپسول در بوته درنظر گرفته شد. برای تعداد دانه در کپسول، از هر بوته ۱۰ کپسول (در مجموع برای هر تیمار ۱۰۰ کپسول) به طور تصادفی انتخاب

و تعداد دانه‌های هر کپسول به طور جداگانه شمارش شد و در نهایت میانگین آن‌ها به‌عنوان تعداد دانه در کپسول لحاظ گردید. برای وزن هزار دانه نیز ۵ تکرار ۱۰۰۰ تایی بصورت تصادفی از بذرهای ۱۰ بوته انتخاب شده گرفته و توزین شدند و میانگین وزن ۵ تکرار به‌عنوان وزن هزار دانه کاملینا درنظر گرفته شد. محتوای روغن بذرها نیز با استفاده از ۱۰ گرم بذر آسیاب شده در دستگاه سوکسله اندازه‌گیری شد (AOCS, 1993).

تجزیه‌وتحلیل‌های آماری

در نهایت، پس از انجام آزمون بارتلت (جدول ۳) و اطمینان از همگنی واریانس خطا آزمایشی، تجزیه مرکب واریانس با استفاده از نرم افزار SAS (نسخه ۹/۲) انجام شد. میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال خطای پنج درصد مقایسه شدند. تجزیه و تحلیل همبستگی بین صفات نیز با استفاده از نرم افزار SAS انجام شد. تمامی شکل‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار Origin Pro 2019 ترسیم شدند.

جدول ۳. نتایج آزمون بارتلت برای صفات مورد مطالعه کاملینا در فصل‌های رشد ۱۳۹۸-۱۳۹۷ و ۱۳۹۹-۱۳۹۸.

Table 3. Results of Bartlett's test for studied traits of camelina in 2018-2019 and 2019-2020 growing seasons.

	محتوای نسبی آب برگ Relative water content	مقاومت روزنه‌ای Stomatal resistance	دمای کانوپی Canopy temperature	محتوای پرولین Proline content	محتوای کربوهیدرات Carbohydrate content
میانگین مربعات خطا (۱۳۹۸-۱۳۹۷) EMS (2018-2019)	1.44	0.83	1.94	1.72	3.07
میانگین مربعات خطا (۱۳۹۹-۱۳۹۸) EMS (2019-2020)	1.43	0.84	1.94	1.71	3.06
Chi-Square	0.0003	0.0006	0.00002	0.0003	0.00004
P value	0.98	0.97	0.99	0.98	0.99

جدول ۳. ادامه

Table 3. Continued

	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll	محتوی روغن Oil content	عملکرد دانه Seed yield
میانگین مربعات خطا (۱۳۹۸-۱۳۹۷) EMS (2018-2019)	0.013	0.003	0.015	0.29	23153
میانگین مربعات خطا (۱۳۹۹-۱۳۹۸) EMS (2019-2020)	0.013	0.003	0.016	0.28	23425
Chi-Square	0.006	0.016	0.004	0.0001	0.0007
P value	0.93	0.89	0.94	0.99	0.97

نتایج و بحث

نتایج تجزیه مرکب نشان داد که اثر سال بر محتوای نسبی آب برگ، مقاومت روزنه‌ای، کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، محتوی روغن و عملکرد دانه معنی‌دار بود. دمای کانوپی فقط تحت‌تأثیر اثرات اصلی آبیاری و کاربرد زئولیت قرار گرفت. اثر متقابل آبیاری × زئولیت نیز برای تمامی صفات مورد بررسی بجز دمای کانوپی معنی دار گردید (جدول ۴).

محتوی نسبی آب برگ

نتایج مقایسه میانگین اثر سال بر محتوای نسبی آب برگ نشان داد که میزان این صفت در سال اول (۸۹/۶۹ درصد) بیشتر از سال دوم آزمایش بود (جدول ۵).

مقایسه میانگین‌های اثر متقابل آبیاری × زئولیت بر محتوای نسبی آب برگ نشان داد که کاربرد زئولیت باعث روند افزایشی در میزان محتوای نسبی آب برگ شد درحالی‌که افزایش شدت تنش خشکی کاهش محتوای نسبی آب را در پی داشت؛ بیشترین میزان محتوای آب نسبی به تیمار آبیاری کامل و کاربرد زئولیت به میزان ۱۰ تن در هکتار اختصاص یافت.

جدول ۴. تجزیه واریانس مرکب صفات اندازه‌گیری شده کاملینا تحت تأثیر رژیم‌های آبیاری و کاربرد زئولیت.

Table 4. Combined analysis of variance measured camelina traits as affected by irrigation regimes and application of zeolite.

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	محتوای نسبی آب برگ Relative water content	مقاومت روزنه‌ای Stomatal resistance	دمای کانوپی Canopy temperature	محتوای پرولین Proline content	محتوای کربوهیدرات Carbohydrate content
سال Year (Y)	1	147.9**	3.42*	4.7^{ns}	3.4^{ns}	6.24^{ns}
سال (بلوک) Year (Block)	4	0.64	0.35	0.70	0.69	1.33
آبیاری Irrigation (I)	2	1051.4**	1237.5**	187.7**	632**	1177.7**
زئولیت Zeolit (Z)	3	198.2**	179.2**	32.6**	87.3**	222.6**
سال×آبیاری Y × I	2	0.21^{ns}	0.04^{ns}	0.09^{ns}	0.19^{ns}	0.16^{ns}
سال×زئولیت Y × Z	3	0.45^{ns}	0.03^{ns}	0.02^{ns}	0.02^{ns}	0.01^{ns}
آبیاری×زئولیت I × Z	6	28.2**	20.3**	3.88^{ns}	16.8**	18.8**
سال×آبیاری×زئولیت Y × I × Z	6	2.85^{ns}	0.04^{ns}	0.03^{ns}	0.02^{ns}	0.13^{ns}
خطا Error	44	1.82	1.7	2.16	1.63	2.7
ضریب تغییرات CV (%)		*1.53*	*8.32*	*4.07*	*7.55*	*4.85*

Table 4. Continued **جدول ۴. ادامه**

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll	محتوی روغن Oil content	عملکرد دانه Seed yield
سال Year (Y)	1	0.28**	0.008*	0.19**	14.2**	914628.12**
سال (بلوک) Year (Block)	4	0.003	0.001	0.002	0.35	3551.19
آبیاری Irrigation (I)	2	1.9**	0.63**	0.45**	79.27**	11007583.68**
زئولیت Zeolit (Z)	3	0.23**	0.13**	0.02^{ns}	15.33**	1081986.98**
سال×آبیاری Y × I	2	0.03^{ns}	0.0009^{ns}	0.04^{ns}	0.97^{ns}	10994.54^{ns}
سال×زئولیت Y × Z	3	0.002^{ns}	0.0002^{ns}	0.001^{ns}	0.14^{ns}	1153.46^{ns}
آبیاری×زئولیت I × Z	6	0.04**	0.02**	0.08**	1.78**	63465.81*
سال×آبیاری×زئولیت Y × I × Z	6	0.004^{ns}	0.0004^{ns}	0.005^{ns}	0.05^{ns}	9227.04^{ns}
خطا Error	44	0.01	0.003	0.02	0.49	21019.5
ضریب تغییرات CV (%)		*10.01*	*13.31*	*7.90*	*2.45*	*12.23*

ns: عدم معنی داری، *: معنی‌دار در سطح احتمال خطای پنج درصد، **: معنی‌دار در سطح احتمال خطای یک درصد.

ns not significant, * significant at the 0.05 probability level, ** significant at the 0.01 probability level.

جدول ۵. اثر اصلی سال بر برخی از صفات اندازه‌گیری شده کاملینا

Table 5. Main effect of year on some measured camelina traits.

سال Year	محتوای نسبی آب برگ Relative water content	مقاومت روزنه‌ای Stomatal resistance	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll	میزان روغن Oil content	عملکرد دانه Seed yield
	%	s cm^{-1}	----------mg g^{-1} FW----------			%	kg ha^{-1}
۱۳۹۷-۱۳۹۸ 2018-2019	89.69[a]	15.41[b]	1.20[a]	0.44[b]	1.64[a]	29.05[a]	1298.14[a]
۱۳۹۸-۱۳۹۹ 2019-2020	83.82[b]	15.82[a]	1.07[b]	0.46[a]	1.53[b]	28.16[b]	1072.72[b]

با قطع آبیاری در مراحل گل‌دهی و کپسول‌دهی میزان محتوای نسبی آب برگ نیز کاهش یافت و کمترین میزان آن (۷۶/۸ درصد) به تیمار قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی و عدم کاربرد زئولیت اختصاص یافت (جدول ۶). محتوای نسبی آب معیاری برای وضعیت آب گیاه می باشد و میزان آن را می‌توان به تفاوت در توانایی گیاه در جذب بیشتر آب از خاک و یا کنترل اتلاف آب از روزنه‌ها نسبت داد (Bayoumi et al., 2008). کاربرد موادی مانند زئولیت به بهبود محتوای رطوبت نسبی آب برگ کمک کرده و تأثیر مثبت زئولیت در بهبود محتوای نسبی آب برگ نشان‌دهنده توانایی آن در ذخیره و نگهداری آب خاک می‌باشد که در نهایت منجر به دسترسی بیشتر گیاه به آب می‌شود (Zahedi et al., 2009; Karimzadeh Asl, 2019).

مقاومت روزنه‌ای

مقایسه میانگین اثر سال بر مقاومت روزنه‌ای نشان داد میزان این صفت در سال اول کمتر از سال دوم آزمایش بود (جدول ۵). برهمکنش دوگانه آبیاری و زئولیت نشان داد مقاومت روزنه‌ای در شرایط کاربرد زئولیت روند کاهشی داشت اما تنش خشکی موجب افزایش این صفت شد. بر اساس مقایسه میانگین‌های اثر متقابل آبیاری × زئولیت، کمترین مقاومت روزنه‌ای (۶/۴۸ ثانیه بر سانتی‌متر) به شرایط آبیاری کامل و کاربرد ۱۰ تن زئولیت در هکتار اختصاص یافت. بیشینه مقاومت روزنه‌ای (۲۶/۲۵ ثانیه بر سانتی‌متر) نیز در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی و عدم کاربرد زئولیت مشاهده گردید (جدول ۶).

ازآنجاکه محدودیت آبیاری موجب کاهش محتوای نسبی آب برگ گردید (Kalantar Ahmadi and Daneshian, 2024)، لذا افزایش مقاومت روزنه‌ای و دمای کانوپی در اثر قطع آبیاری دور از انتظار نیست؛ زیرا گیاه زمانی که با کم آبی مواجه می‌شود در اولین اقدام روزنه‌های سطح برگ را می‌بندد و همین امر باعث افزایش مقاومت روزنه‌ای و به‌دنبال آن کاهش میزان تعرق و حفظ آب در بافت‌ها می‌شود. زئولیت بدلیل دارا بودن ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، به‌عنوان مخزنی برای عناصر غذایی از جمله آمونیوم و دیگر کاتیون‌ها عمل کرده (ShiraniRad, 2012) و می‌تواند در کاهش مقاومت روزنه‌ای اثرگذار باشد. از طرفی، کاربرد زئولیت در خاک می‌تواند باعث افزایش ذخیره رطوبت خاک شده و گیاه کمتر دچار تنش کم آبی شود؛ که این موضوع می‌تواند در کاهش مقاومت روزنه‌ای نقش موثری را ایفا کند.

دمای کانوپی

روند تغییرات دمای کانوپی با کاربرد زئولیت کاهش بود در حالی‌که تنش خشکی افزایش دمای کانوپی را در پی داشت (شکل ۱). مقایسه میانگین‌های اثر آبیاری بر دمای کانوپی نشان داد بیشترین (۳۸/۸۷ درجه سانتی‌گراد) و کمترین (۳۳/۲۸ درجه سانتی‌گراد) دمای کانوپی به ترتیب به قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی و آبیاری کامل اختصاص یافت (شکل a۱).

دمای کانوپی یکی از متغیرهای تعیین‌کننده وضعیت تنش خشکی در گیاهان می‌باشد. با توجه با اینکه بستن روزنه‌ها در شرایط تنش خشکی به‌منظور جلوگیری از اتلاف آب می‌باشد، گیاه نسبت به بستن روزنه‌ها اقدام نموده و در نتیجه با کاهش میزان تعرق به‌عنوان یک عمل خنک‌کننده در گیاهان، دمای کانوپی افزایش می‌یابد (Karimzadeh Soureshjani et al., 2011). نتایج این آزمایش با دیگر تحقیقات انجام شده مبنی بر تأثیر تنش خشکی بر افزایش دمای کانوپی مطابقت داشت (Shahsavari and

(Dadrasnia, 2016; Pasban Eslam et al., 2000). کاربرد زئولیت کاهش دمای کانوپی را بدنبال داشت و کمترین دمای کانوپی (۳۵/۰۲ درجه سانتی‌گراد) به تیمار مصرف زئولیت به میزان ۱۵ تن در هکتار اختصاص یافت (شکل ۱b). کاهش دمای کانوپی در اثر کاربرد زئولیت را می‌توان به افزایش جذب آب در خاک و به‌دنبال آن افزایش محتوای نسبی آب برگ و تعرق و کاهش مقاومت روزنه‌ای نسبت داد (Shahsavari and Dadrasnia, 2016).

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × زئولیت بر صفات اندازه‌گیری شده کاملینا.

Table 6. Mean comparison of interaction of irrigation × zeolite on measured traits of camelina.

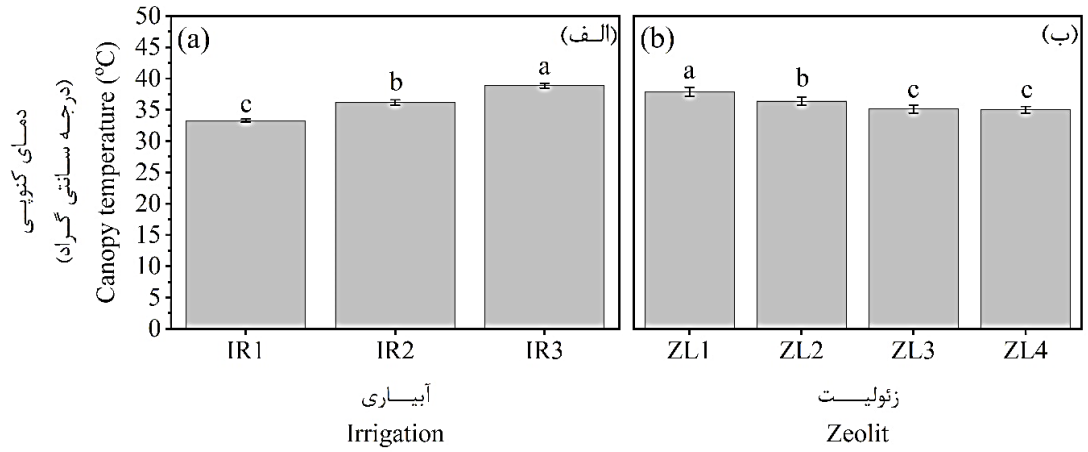
آبیاری Irrigation	زئولیت Zeolit	محتوای نسبی آب برگ Relative water content	مقاومت روزنه‌ای Stomatal resistance	محتوای پرولین Proline content	محتوای کربوهیدرات Carbohydrate content
		%	s cm^{-1}	µmol g^{-1} FW	mg g^{-1} FW
IR1	ZL1	93.2^{b}	10.13^{a}	12.65^{a}	29.46^{a}
	ZL2	93.85^{b}	8.85^{b}	11.96^{ab}	27.41^{b}
	ZL3	96.45^{a}	6.48^{d}	10.73^{b}	23.01^{d}
	ZL4	95.03^{ab}	7.51^{c}	11.51^{ab}	25.5^{c}
IR2	ZL1	81.96^{c}	22.43^{a}	22.18^{a}	41.13^{a}
	ZL2	89.25^{b}	16.45^{b}	16.66^{b}	33.33^{b}
	ZL3	91.26^{ab}	13.95^{c}	15.56^{bc}	32.13^{bc}
	ZL4	92.43^{a}	11.45^{d}	14.13^{c}	31.2^{c}
IR3	ZL1	76.8^{c}	26.25^{a}	24.58^{a}	44.76^{a}
	ZL2	79.45^{b}	24.68^{a}	23.83^{a}	42.01^{b}
	ZL3	83.65^{a}	20.56^{b}	20.53^{b}	38.53^{c}
	ZL4	86.08^{a}	18.85^{c}	18.96^{c}	35.88^{d}

Table 6. Continued **جدول ۶. ادامه**

آبیاری Irrigation	زئولیت Zeolit	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll	میزان روغن Oil content	عملکرد دانه Seed yield
		----------mg g^{-1} FW----------			%	kg ha^{-1}
IR1	ZL1	1.25^{c}	0.32^{a}	1.58^{b}	29.97^{b}	1623.3^{c}
	ZL2	1.34^{bc}	0.3^{ab}	1.65^{b}	30.33^{ab}	1852b^{c}
	ZL3	1.71^{a}	0.24^{c}	1.96^{a}	31^{a}	2209^{a}
	ZL4	1.51^{ab}	0.27^{bc}	1.79^{ab}	30.55^{ab}	2057^{ab}
IR2	ZL1	0.91^{b}	0.59^{a}	1.51^{a}	26.95^{c}	616^{c}
	ZL2	1.03^{a}	0.44^{b}	1.48^{a}	28.54^{b}	925.3^{b}
	ZL3	1.07^{a}	0.4^{bc}	1.48^{a}	28.96^{ab}	1105.2^{b}
	ZL4	1.13^{a}	0.35^{c}	1.49^{a}	29.61^{a}	1361.3^{a}
IR3	ZL1	0.83^{c}	0.76^{a}	1.6^{a}	25.22^{c}	390.67^{c}
	ZL2	0.88^{bc}	0.68^{a}	1.56^{ab}	26.38^{b}	542.17^{bc}
	ZL3	0.95^{ab}	0.52^{b}	1.47^{b}	27.62^{a}	696.17^{ab}
	ZL4	0.99^{a}	0.48^{b}	1.47^{b}	28.1^{a}	846.33^{a}

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون برای هر تیمار در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌دار ندارند. نکته: IR1: آبیاری کامل، IR2: قطع آبیاری از مرحله کپسول‌دهی، IR3: قطع آبیاری از مرحله گلدهی؛ ZL1 عدم کاربرد زئولیت (شاهد)، ZL2: ۵ تن در هکتار زئولیت، ZL3: ۱۰ تن در هکتار زئولیت، و ZL4: ۱۵ تن در هکتار زئولیت.

Means followed by similar letters for each treatment in columns are not significantly different at the 5% probability level. IR1: Full irrigation, IR2: Restricted irrigation from silicle formation, IR3: Restricted irrigation from flowering; ZL1: Non-application of zeolite (control), ZL2: 5 ton ha^{-1} zeolite, ZL3: 10 ton ha^{-1} zeolite, and ZL4: 15 ton ha^{-1} zeolite.



شکل ۱. مقایسه میانگین اثرات اصلی آبیاری (الف) و زئولیت (ب) بر دمای کانوپی کاملینا. میانگین‌های با حروف مشابه در ستون‌ها در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌دار ندارند. نکته: IR1: آبیاری کامل، IR2: قطع آبیاری از مرحله کپسول‌دهی، IR3: قطع آبیاری از مرحله گلدهی؛ ZL1 عدم کاربرد زئولیت (شاهد)، ZL2: 5 تن در هکتار زئولیت، ZL3: 10 تن در هکتار زئولیت، و ZL4: 15 تن در هکتار زئولیت.

Fig. 1. Mean comparison of main effects of irrigation regimes (a) and zeolite application (b) on camelina canopy temperature. Means followed by similar letters in columns are not significantly different at the 5% probability level. Note: IR1: Full irrigation, IR2: Restricted irrigation from silicle formation, IR3: Restricted irrigation from flowering; ZL1: Non-application of zeolite (control), ZL2: 5 ton ha^{-1} zeolite, ZL3: 10 ton ha^{-1} zeolite, and ZL4: 15 ton ha^{-1} zeolite.

پرولین

کاربرد زئولیت نسبت به عدم کاربرد آن تأثیر کاهشی روی میزان پرولین داشت اما درمقابل با اعمال تنش خشکی (قطع آبیاری از مرحله گلدهی و کپسول‌دهی) میزان پرولین در مقایسه با آبیاری کامل روند افزایش از خود نشان داد (جدول ۶). نتایج بدست آمده از مقایسه میانگین‌های اثر متقابل آبیاری × زئولیت آزمایش نشان داد بیشترین میزان پرولین (۲۴/۵۸ میکرومول در گرم وزن تر) به تیمار قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی و عدم کاربرد زئولیت اختصاص یافت. کمترین میزان پرولین (۶/۴۸ میکرومول در گرم وزن تر) نیز در شرایط آبیاری کامل و کاربرد ۱۰ تن زئولیت در هکتار مشاهده گردید (جدول ۶). تولید پرولین یکی از مکانیسم‌های دفاعی گیاهان در شرایط تنش خشکی می‌باشد و تجمع آن موجب تعادل آبی در گیاه و کاهش خسارت ناشی از رادیکال‌های آزاد می‌شود (Kalantar Ahmadi and Daneshian, 2024; Kalantar Ahmadi et al., 2015). به عبارت دیگر تجمع پرولین از طریق کاهش پتانسیل اسمزی، شرایط لازم جهت ادامه جذب آب توسط گیاه را فراهم می‌کند. افزایش میزان زئولیت موجب کاهش پرولین تولیدی گردید (جدول ۶) و می‌توان اظهار داشت که زئولیت به بهبود سیستم دفاعی گیاه کمک کرده و گیاه انرژی لازم برای تولید پرولین بیشتر در شرایط تنش را به مکانیسم‌های دفاعی دیگر اختصاص داده است (Karami et al., 2020). از سوی دیگر، کاربرد زئولیت موجب افزایش آب قابل دسترس برای بوته‌ها شده و همین موضوع موجب افزایش محتوی نسبی آب برگ‌ها و پتانسیل اسمزی بالاتر در سلول‌های برگی شده است.

کربوهیدرات

با اعمال تنش خشکی روند افزایشی میزان کربوهیدرات مشهود بود در حالی که کاربرد زئولیت در تمامی سطوح منتج به کاهش میزان کربوهیدارت در مقایسه با عدم کاربرد آن گردید (جدول ۶). مقایسه میانگین‌های اثر متقابل آبیاری × زئولیت نشان داد بیشترین محتوای کربوهیدرات (۴۴/۷۶ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در شرایط قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی و عدم کاربرد زئولیت مشاهده گردید و کمترین میزان (۲۳/۰۱ میلی‌گرم در گرم وزن تر) نیز به شرایط آبیاری کامل و کاربرد ۱۵ تن زئولیت در هکتار اختصاص یافت (جدول ۶). افزایش میزان قند تولیدی در شرایط تنش خشکی جهت بهبود مکانیسم‌های دفاعی گیاهان است (Agami et al., 2018). قندهای محلول از طریق جلوگیری از دهیدراته شدن پروتئین‌ها و غشای سلولی به حفظ پتانسیل فشاری برگ و افزایش تحمل گیاه به تنش کمک می‌کنند (Braun et al., 2016). بر اساس نتایج حاصله، کاربرد زئولیت در شرایط قطع آبیاری در مراحل گل‌دهی و کپسول‌دهی کاهش

میزان کربوهیدارت‌ها را بدنبال داشت (جدول ۶). استفاده از زئولیت باعث افزایش حفظ رطوبت در خاک و تأمین آب گیاه برای فرآیندهای متابولیکی می‌شود و همچنین نیاز به تنظیم را کاهش داده و در نهایت باعث کاهش غلظت قند می‌شود (Hazrati et al., 2017).

کلروفیل

مقادیر کلروفیل (a و b و کل) تحت شرایط تنش خشکی کاهش نشان دادند اما کاربرد زئولیت در تمامی سطوح منجر به افزایش میزان این رنگیزه‌ها شد (جدول ۶). بر اساس مقایسه میانگین‌های اثر متقابل آبیاری × زئولیت، بیشترین میزان کلروفیل a (۱/۵۱ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در شرایط آبیاری کامل و کاربرد زئولیت به میزان ۱۵ تن در هکتار اختصاص یافت. کمترین میزان کلروفیل a (۰/۸۳ میلی‌گرم در گرم وزن تر) نیز متعلق به قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی و عدم کاربرد زئولیت بود. روند کاروفیل b بر خلاف کلروفیل a بود و بالاترین میزان کلروفیل b (۰/۷۶ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در شرایط قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی و عدم کاربرد زئولیت مشاهده گردید (جدول ۶). بیشترین میزان کلروفیل کل (۱/۹۶ میلی‌گرم در گرم وزن تر) نیز به شرایط آبیاری کامل و مصرف ۱۰ تن زئولیت در هکتار اختصاص یافت (جدول ۶). کاهش مقدار کلروفیل در گیاهان جنبه سازگاری دارد، چون با این کار، میزان الکترون‌های برانگیخته در فرآیند فتوسنتز کاهش می‌یابند و در نتیجه خسارت ناشی از تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن کم می‌شود (Kranner et al., 2002). بیوسنتز کلروفیل به میزان عناصر جذب شده از خاک بستگی دارد و زئولیت نیز هر چند به طور مستقیم در سنتز کلروفیل نقش ندارد اما به طور غیرمستقیم اثرات کمبود آب و کمبود نیتروژن را با جذب رطوبت و همچنین جلوگیری از شستشوی نیتروژن جبران کرده و موجب افزایش میزان کلروفیل می‌شود (Karami et al., 2020). لذا می‌توان اظهار داشت که کاربرد موادی مانند زئولیت از طریق بهبود مکانیسم‌های دفاعی گیاه و کمک به جذب بیشتر آب می‌تواند موجب افزایش میزان کلروفیل شده باشد.

میزان روغن

محتوی روغن بذر کاملینا در سال اول بیشتر از سال دوم آزمایش بود (جدول ۵). بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌های درصد روغن کاملینا تحت شرایط تنش خشکی نسبت به آبیاری کامل کاهش یافت اما کاربرد زئولیت تحت هر سه رژیم آبیاری باعث افزایش میزان روغن کاملینا شد (جدول ۶). اثر متقابل آبیاری × زئولیت، بیشترین میزان روغن (۳۱ درصد) به شرایط آبیاری کامل و کاربرد زئولیت به میزان ۱۰ تن در هکتار اختصاص یافت. کمترین میزان روغن (۲۵/۲۲ درصد) نیز متعلق به تیمار عدم کاربرد زئولیت در شرایط قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی بود (جدول ۶). بطورکلی کاربرد زئولیت هم در شرایط آبیاری مطلوب و هم قطع آبیاری افزایش میزان روغن را بدنبال داشت (جدول ۶). میزان روغن علاوه بر ویژگی‌های ژنتیکی (Brock et al., 2020)، تحت تأثیر شرایط محیطی و مدیریت زراعی نیز قرار دارد (Kalantarahmadi and Daneshian, 2023; Kalantar Ahmadi and Eyni-Nargeseh, 2023). قطع آبیاری در مراحل زایشی بدلیل کاهش ظرفیت دانه در جذب مواد فتوسنتزی و تبدیل آن‌ها به روغن، کاهش میزان روغن را بدنبال دارد (Elferjani and Soolanayakanahally, 2018). تأثیر مثبت زئولیت در افزایش میزان روغن در شرایط متفاوت رطوبتی با دیگر تحقیقات انجام شده مطابقت داشت (Karimzadeh Asl and Hatami, 2019; Shahsavari and Dadrasnia, 2016).

عملکرد دانه

مقایسه میانگین‌های اثر سال بر عملکرد دانه نشان داد که عملکرد دانه در سال اول بیشتر از سال دوم آزمایش بود (جدول ۵). پاسخ کاملینا از نظر عملکرد دانه به کاربرد زئولیت افزایشی بود در حالی که تأثیر تنش خشکی روی کاملینا موجب کاهش عملکرد دانه شد (جدول ۶). مقایسه میانگین‌های اثر متقابل آبیاری × زئولیت نشان داد که بیشترین عملکرد دانه (۲۲۰۹ کیلوگرم در هکتار) به شرایط آبیاری کامل و کاربرد زئولیت به میزان ۱۵ تن در هکتار اختصاص یافت. کمترین عملکرد دانه (۳۹۰/۶۷ کیلوگرم در هکتار) نیز در تیمار عدم کاربرد زئولیت و قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی مشاهده گردید (جدول ۶). تنش خشکی ناشی از قطع آبیاری از طریق تأثیر بر افزایش دمای برگ، ریزش برگ، کاهش جذب تشعشع فعال فتوسنتزی (Spitkó et al., 2014) و محتوای آب نسبی (Gholinezhad et al., 2009) سبب کاهش عملکرد دانه می‌شود (Salehi et al., 2021) که این امر در آزمایش حاضر نیز مشاهده گردید. تأثیر مثبت زئولیت بر رطوبت خاک و حفظ عناصر غذایی، افزایش

شاخص سطح برگ، میزان کلروفیل و فتوسنتز را می‌توان از اثرات مفید زئولیت در بهبود عملکرد دانه عنوان نمود (Zheng et al., 2018).

نتیجه‌گیری نهایی

یافته‌های این تحقیق نشان داد کاربرد زئولیت در هر سه رژیم آبیاری کاهش میزان مقاومت روزنه‌ای، کربوهیدرات و پرولین برگ را در کاملینا در پی داشت درحالی‌که میزان محتوای نسبی آب برگ، محتوای کلروفیل (a و b و کل)، درصد روغن و عملکرد دانه در پاسخ به کاربرد زئولیت تحت رژیم‌های مختلف آبیاری افزایش نشان داد. بیشترین عملکرد دانه (۲۲۰۹ کیلوگرم در هکتار) به شرایط آبیاری کامل و کاربرد زئولیت به میزان ۱۵ تن در هکتار اختصاص یافت درحالی‌که کاربرد ۱۰ تن زئولیت در هکتار تحت شرایط آبیاری کامل بالاترین درصد روغن کاملینا (۳۱ درصد) را تولید کرد. همچنین، کاربرد ۱۰ تن زئولیت در هکتار تحت شرایط آبیاری کامل و ۱۵ تن زئولیت در هکتار تحت شرایط قطع آبیاری از مراحل گل‌دهی و کپسول‌دهی برای دستیابی به بیشترین عملکرد دانه و روغن توصیه می‌گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت‌های انجام شده توسط مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج برای کمک در اجرای این تحقیق کمال تشکر و سپاسگزاری را دارند.

منابع

Abedi, A., Modares-Sanavy, S.A.M., Heidarzadeh, A., 2024. Study of yield and yield components of camelina (*Camelina sativa* L.) under water deficit stress conditions with the application of zeolite and wood vinegar. Plant Production. 48(1), 21-38. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22055/ppd.2024.46482.2155

Aboodeh, H., Bakhshandeh, A.M., Moradi Telavat, M.R., Siadat, S.A., Moosavi, S.A., 2024. Evaluation of the effect of interruption of irrigation on protein and seed oil content of rapeseed genotypes. Environmental Stresses in Crop Sciences. 16, 1089-1103. . [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22077/ESCS.2023.5279.2134

Agami, RA., Alamri, S.A.M., Abd El-Mageed, T.A., Abousekken, M.S.M., Hashem, M., 2018. Role of exogenous nitrogen supply in alleviating the deficit irrigation stress in wheat plants. Agricultural Water Management. 210, 261–270. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.034

American Oil Chemists' Society (AOCS)., 1993. Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society. 4th edn. (Methods Ag 1–65 and Ce 1–62). Champaign, IL: American Oil Chemists' Society Press.

Amiri-Darban, N., Nourmohammadi, G., Shirani Rad, A.H., Mirhadi, S.M.J., Heravan, I.M., 2022. Evaluation of the response of physiological and seed and oil yields of camelina (*Camelina sativa* L. Crantz) to the application of ammonium and potassium sulfates under late-season drought stress. Iranian Journal of Field Crops Research. 52, 87-99. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112308

Arnon, D.I., 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiology. 24, 1-15. https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1

Azadmard-Damirchi, S., Dutta, P.C., 2006. Novel solid-phase extraction method to separate 4 desmethyl-, 4 monomethyl-, and 4, 40-dimethylsterols in vegetable oils. Journal of Chromatography. 1108, 183–187. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.01.015

Bakhshi, B., Rostami Ahmadvandi, H., Kahrizi, D., Narooeerad, M.R., 2021. Camelina oilseed crop: Botany and agronomy in warm and dried regions. Dryland Agricultural Research Institute. 59133, 1-27. [In Persian].

Bates, L.S., Waldren, R.P., Teare, L.D., 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant and Soil. 39, 205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Bayoumi, T.Y., Eid, M.H., Metwali, E.M., 2008. Application of physiological and biochemical indices as a screening technique for drought tolerance in wheat genotypes. African Journal

of Biotechnology. 7, 2341-2352. https://doi.org/10.5897/AJB2008.000-5059

Borzoo, S., Mohsenzadeh, S., Moradshahi, A., Kahrizi, D., Zamani, H., Zarei, M., 2021. Characterization of physiological responses and fatty acid compositions of *Camelina sativa* genotypes under water deficit stress and symbiosis with *Micrococcus yunnanensis*. Symbiosis. 83, 79-90. https://doi.org/10.1007/s13199-020-00733-5

Braun, H., Fontes, P.C.R., da Silva, T.P., Finger, F., Cecon. P.R., Ferreira, A.P.S., 2016. Carbohydrates concentration in leaves of potato plants affected by nitrogen fertilization rates. Revista Ceres. 63(2), 241–248. https://doi.org/10.1590/0034-737X201663020016

Brock, J.R., Scott, T., Lee, A.Y., Mosyakin, S.L., Olsen, K.M., 2020. Interactions between genetics and environment shape Camelina seed oil composition. BMC Plant Biology. 20, 1-15. https://doi.org/10.1186/s12870-020-02641-8

Čanak, P., Jeromela, A. M., Vujošević, B., Kiprovski, B., Mitrović, B., Alberghini, B., Facciolla, E., Monti, A., Zanetti, F., 2020. Is drought stress tolerance affected by biotypes and seed size in the emerging oilseed crop camelina? Agronomy. 10, 1856. https://doi.org/10.3390/agronomy10121856

Elferjani, R., Soolanayakanahally, R., 2018. Canola responses to drought, heat, and combined stress: shared and specific effects on carbon assimilation, seed yield, and oil composition. Frontiers in Plant Science. 9, 1224. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01224

Ferrat, I.L., Loval, C.J., 1999. Relation between relative water content, nitrogen pools, and growth of P. vulgaris and P. acutifolius during water deficit. Crop Science. 39, 467-474. https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X0039000200028xDigital Object Identifier

Gao, L., Caldwell, C.D., Jiang, Y., 2018. Photosynthesis and growth of camelina and canola in response to water deficit and applied nitrogen. Crop Sciences. 58, 393–401. https://doi.org/10.2135/cropsci2017.07.0406

Gholinezhad, E., Aynaband, A., Ghorthapeh, A.H., Noormohamadi, G., Bernousi, I., 2009. Study of the effect of drought stress on yield, yield components and harvest index of sunflower hybrid Iroflor at different levels of nitrogen and plant population. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 37, 85-94. https://doi.org/10.15835/nbha3723255

Hazrati, S., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Modarres-sanavy, S.A.M., Mokhtassi-Bidgoli, A., Mohammadi, H., Nicola, S., 2017. Effects of zeolite and water stress on growth: yield and chemical compositions of *Aloe vera* L. Agricultural Water Management. 181, 66–72. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.026

Kalantar Ahmadi, S.A., Daneshian, J., 2024. Improving canola (*Brassica napus* L.) seed yield through micronutrients sprays: Effects on enzymatic and non-enzymatic defense under different irrigation regimes. Russian Journal of Plant Physiology. 71, 144. https://doi.org/10.1134/S1021443724605378

Kalantar Ahmadi, S.A., Ebadi, A., Daneshian, J., Jahanbakhsh, S., Siadat, S.A., Tavakoli, H., 2015. Effects of irrigation deficit and application of some growth regulators on defense mechanisms of canola. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 43, 124-130. https://doi.org/10.15835/nbha4319668

Kalantar Ahmadi, S.A., Eyni-Nargeseh, H., 2023. Foliar application of growth regulators mitigates harmful effects of drought stress and improves seed yield and oil quality of rapeseed (*Brassica napus* L.). Gesunde Pflanzen. 75, 2449–2462. https://doi.org/10.1007/s10343-023-00907-3

Kalantar Ahmadi, S., Daneshian, J., 2023. Improving of Canola (*Brassica napus* L.) yield and oil quality by foliar application of micro-nutrients under high-temperature stress. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 23, 351-367. https://doi.org/10.1007/s42729-022-01016-2

Karami, S., Hadi, H., Tajbaksh, M., Modarres-Sanavy, S.A.M., 2020. Effect of zeolite on nitrogen use efficiency and physiological and biomass traits of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) under water-deficit stress conditions. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 20, 1427-1441. https://doi.org/10.1007/s42729-020-00223-z

Karimzadeh Asl, K., Hatami, M., 2019. Application of zeolite and bacterial fertilizers modulates physiological performance and essential oil production in dragonhead under different irrigation regimes. Acta Physiologiae Plantarum. 41, 17. https://doi.org/10.1007/s11738-018-2801-x

Karimzadeh Soureshjani, H., Emam, Y., Moori, S., 2011. Effect of post-anthesis drought stress on yield, yield components and canopy temperature of bread wheat cultivars. Journal of Plant Process and Function. 1, 38-56. [In Persian with English Summary].

Kranner, I., Beckett, R.P., Wornik, S., Zorn, M., Pfeifhofer, H.W., 2002. Revival of a resurrection plant correlates with its antioxidant status. The Plant Journal. 31, 13-24. https://doi.org/10.1046/j.1365-313x.2002.01329.x

Mir, Y., Khosravi, H., Daneshvar, M., Ismaili, A., 2024. Foliar application of micronutrients and salicylic acid to improve some quality traits and yield of canola (*Brassica napus* L.) under water deficit stress. Environmental Stresses in Crop Sciences. 17, 31-45. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22077/ESCS.2023.5357.2141

Mondal, M., Biswas, B., Garai, S., Sarkar, S., Banerjee, H., Brahmachari, K., Bandyopadhyay, P.K., Maitra, S., Brestic, M., Skalicky, M., Ondrisik, P., Hossain, A., 2021. Zeolites enhance soil health, crop productivity and environmental safety. Agronomy. 11, 448. https://doi.org/10.3390/agronomy11030448

Mottaghi, S., Mottaghi, L., Shiranirad, A., Lotfifar, O., 2019. Study the efficiency of zeolite in reduce the effect of drought stress on agronomical traits and seed yield of rapeseed in Karaj region. Plant Ecophysiology. 11, 256-271. [In Persian with English Summary].

Pasban Eslam, B., Shakiba, M.R., Neyshabori, M.R., Moghaddam, M., Ahmadi, M.R. 2000. Evaluation of physiological indices as a screening technique for drought resistance in oilseed rape. Pakistan Academy of Science. 3, 143–52.

Rahimi-Moghaddam, S., Eyni-Nargeseh, H., Kalantar Ahmadi, S.A., Azizi, K.H., 2021. Towards withholding irrigation regimes and resistant genotypes as strategies to increase canola production in drought-prone environments: a modeling approach. Agricultural Water Management. 243, 106487. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106487

Reynolds, M.P., Slafer, G.A., Foulkes, J.M., Griffiths, S., Murchie, E.H., Carmo-Silva, E., Asseng, S., Chapman, S.C., Sawkins, M., Gwyn, J., Flavell, R.B., 2022. A wiring diagram to integrate physiological traits of wheat yield potential. Nature Food. 3, 318–324. https://doi.org/10.1038/s43016-022-00512-z

Salehi, M., Zare, M., Bazrafshan, F., Aien, A., Amiri, B., 2021. Effects of zeolite on agronomic and biochemical traits and yield components of *Zea mays* L. cv Simone under drought stress condition. Philippine Agricultural Scientist. 104, 157-166.

Shahsavari, N., Dadrasnia, A., 2016. Effect of zeolites and zinc on the physiological characteristics of canola under late-season drought stress. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 47, 2077-2087. https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1228940

Sheligl, H.Q., 1986. The utilization of organic acids by chlorella light. Planta Journal. 47, 510-526.

Shiranirad, A.H., 2012. Winter rapeseed response to zeolite and nitrogen rates under different irrigation regimes. International Journal of Science and Advanced Technology. 2, 108–15.

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. Archive of Agronomy Soil Science. 69, 2847–2861. https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2177989

Spitkó, T., Nagy, Z., Tóthné Zsubori, Z., Halmos, G., Bányai, J., Marton, L.C., 2014. Effect of drought on yield components of maize hybrids: *Zea mays* L. Maydica: A Journal Devoted to Maize and Allied Species. 59, 161-169.

Sun, Y., He, Z., Wu, Q., Zheng, J., Li, Y., Wang, Y., Chi, D., 2020. Zeolite amendment enhances rice production, nitrogen accumulation and translocation in wetFting and drying irrigation paddy field. Agricultural Water Management. 235, 106126. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106126

UNESCO, 2024. United Nations World Water Development Report. Retrieved April 10, 2025, From https://www.unesco.org/reports/wwdr/en/2024/s

Walia, M.K., Zanetti, F., Gesch, R.W., Krzyżaniak, M., Eynck, C., Puttick, D., Alexopoulou, E., Royo-Esnal, A., Stolarski, M.J., Isbell, T., Monti, A., 2021. Winter camelina seed quality in different growing environments across Northern America and

Europe. Industrial Crops and Products. 169, 113639. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113639

Zahedi, H., Noor-Mohamadi, G.H., Shirani Rad, A.H., Habibi D., Mashhadi Akbar Boojar, M., 2009. The effects of zeolite and foliar applications of selenium on growth, yield and yield components of three canola cultivars under drought stress. World applied Sciences Journal. 1(1), 73-80. https://doi.org/10.15835/nsb113500

Zanetti, F., Alberghini, B., Marjanovi´c Jeromela, A., Grahovac, N., Rajkovi´c, 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, 2. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00663-y

Zhai, L., Wang, Z., Song, S., Zhang, L., Zhang, Z., Jia, X., 2021 Tillage practices affects the grain filling of inferior kernel of summer maize by regulating soil water content and photosynthetic capacity. Agricultural Water Management. 245, 106600. https://doi.org/10.1016/j. agwat.2020.106600

Zheng, J., Chen, T., Wu, Q., Yu, J., Chen, W., Chen, Y., Siddique, K.H.M., Meng, W., Chi, D., Xia, G., 2018. Effect of zeolite application on phenology, grain yield and grain quality in rice under water stress. Agricultural Water Management. 206, 241-251. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.008