University of Birjand

Environmental Stresses in Crop Sciences

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

18(3), 465-482 (2025)
https://doi.org/10.22077/escs.2025.7415.2276

Original article

Investigating of water use efficiency, physiological characteristics, oil, and grain yield of camelina (*Camelina sativa* L.) in deficit water conditions, using zeolite, and wood vinegar foliar spraying

Amir Mohammad Abedi[1], Seyed Ali Mohammad Modarres-Sanavy[2*], Ali Heidarzadeh[3]

1. M.Sc. Graduate of Agronomy, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2. Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
3. Graduated Ph.D. from the Department of Agronomy, Faculty of Agronomy, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received 11 March 2024; Revised 13 May 2024; Accepted 20 May 2024

Extended abstract

Introduction

Due to the water crisis, the import of oil and oilseeds and the outflow of foreign currency, the need to cultivate oilseeds with low input consumption is felt. Camelina (*Camelina sativa* L.) is considered as a superior option as an oilseed crop with high growth capacity under stress conditions, in infertile soils and in temperate climate. This plant, with a short life cycle between 85 and 100 days, is suitable for cultivation in different agricultural and environmental conditions.Camelina seeds are rich in oil and protein. Camelina oil contains essential fatty acids such as omega-3 and omega-6, tocopherols, phytosterols, and phenolic compounds. Its applications include human nutrition, livestock and poultry feed, biodiesel production, and use in the biopolymer industry. Zeolites are three-dimensional aluminosilicate minerals that contain cations necessary to balance the electrostatic charge of the framework's tetrahedral aluminum and silicon units. They can effectively combat soil pollution, water contamination, and heavy metal pollution. Additionally, zeolites can enhance water use efficiency and prevent food wastage in dryland areas, leading to increased crop yield. Wood vinegar, also known as pyroligneous acid, is a raw liquid with a reddish-brown hue produced through the biochar pyrolysis process. It mainly contains compounds such as acetic acid, butyric acid, catechol, and phenol. Wood vinegar has properties similar to plant growth regulators and is environmentally friendly. It can also enhance crop resistance to biological and abiotic stress factors.

Materials and methods

This design was implemented in the form of factorial split plots in the form of a randomized complete block design in three replications. The investigated factors include irrigation regimes at four levels (optimum irrigation, mild water deficit, moderate water deficit and severe water deficit) as main plots, natural zeolite (clinoptilolite) factorial at two levels (zero and eight tons per hectare) and wood vinegar at four levels (0, 5000, 10000, and 15000 ppm) were as sub-plots.

Results and discussion

The results of the experiment indicate that irrigation regimes, the application of zeolite, and wood vinegar foliar spray have a significant impact on the morphological, physiological, and yield-related traits of the Camelina plant. The highest leaf area index was achieved in the treatment combining mild water deficit, zeolite application, and wood vinegar foliar spray with a concentration of 5,000 ppm.

* Corresponding author: Seyed Ali Mohammad Modarres-Sanavy; E-Mail: modaresa@modares.ac.ir

© 2025, 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).

Additionally, the treatment involving wood vinegar foliar spray of 15,000 ppm and zeolite under optimal irrigation conditions resulted in the highest oil yield. The maximum water use efficiency based on seed and oil yield was observed in the treatment with severe water deficit, no zeolite application, and wood vinegar foliar spray at a concentration of 10,000 ppm. Furthermore, the photosynthetic rate was also higher in the treatment with optimal irrigation, zeolite application, and wood vinegar foliar spray of 15,000 ppm compared to other treatments. Based on the findings of this study, the use of zeolite and wood vinegar foliar spray at 15,000 ppm is recommended as the best treatment due to increased performance. Additionally, under mild and moderate water deficit conditions, the application of zeolite and wood vinegar foliar spray of 15,000 ppm is advised, while severe water deficit conditions do not warrant the use of zeolite and wood vinegar foliar spray of 10,000 ppm.

Conclusion

According to the results of this research, the use of zeolite and foliar spraying of 15000 ppm of wood vinegar is introduced as the best treatment due to the increase in seed and oil yield. Also, in mild and medium low water conditions, the use of zeolite and foliar spraying of 15000 ppm of wood vinegar is recommended, and in severe water deficit stress conditions, it is recommended not to use zeolite and foliar spraying of 10000 ppm.

Keywords: Grain yield, Leaf area index, Oil yield, Photosynthesis rate, Water efficiency

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد هجدهم، شماره سوم، پائیز ۱۴۰۴

https://doi.org/10.22077/escs.2025.7415.2276

مقاله پژوهشی

بررسی بهره‌وری آب، خصوصیات فیزیولوژیک، عملکرد دانه و روغن کامل‌ینا (*Camelina sativa* L.) در شرایط کم‌آبی، کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب

امیرمحمد عابدی[۱]، سید علی‌محمد مدرس‌ثانوی[۲*]، علی حیدرزاده[۳]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲. استاد تمام گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳. دانش‌آموخته دکتری گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
بهره‌وری آب
سرعت فتوسنتز
شاخص سطح برگ
عملکرد دانه
عملکرد روغن

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۳۱

تاریخ انتشار:
پائیز ۱۴۰۴
۱۸(۳): ۴۶۵-۴۸۲

چکیده

این آزمایش به‌منظور بررسی کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه‌چوب در شرایط تنش کم‌آبی روی بهره‌وری آب، خصوصیات فیزیولوژیک و عملکرد روغن کامل‌ینا به‌صورت کرت‌های خردشده فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس در سال زراعی ۰۲-۱۴۰۱ در سه تکرار اجرا شد. عوامل موردبررسی شامل رژیم‌های آبیاری (آبیاری مطلوب، کم‌آبیاری ملایم، متوسط و شدید به ترتیب بعد از تخلیه ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد آب قابل‌استفاده و سپس آبیاری تا حد ظرفیت مزرعه) به‌عنوان فاکتور اصلی، زئولیت در دو سطح (صفر و هشت تن بر هکتار) و سرکه‌چوب در چهار سطح (صفر، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام) که به‌منظور اثربخشی بهینه‌تر، در چهار مرحله مختلف از رشد گیاه انجام شد به‌صورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که رژیم‌های آبیاری، کاربرد زئولیت و سرکه چوب تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر صفات عملکرد دانه، عملکرد روغن، سرعت فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای کامل‌ینا دارند. بیشترین عملکرد دانه با ۱۳۹۶ کیلوگرم در هکتار در آبیاری مطلوب + کاربرد زئولیت + عدم کاربرد سرکه چوب تولید شد که با تیمار آبیاری مطلوب + کاربرد زئولیت + محلول‌پاشی ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام سرکه چوب در یک گروه آماری قرار داشت. همچنین، در تیمار کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام سرکه چوب در شرایط آبیاری مطلوب با ۴۵۰/۶۹ کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد روغن مشاهده شد. بالاترین بهره‌وری آب بر اساس عملکرد دانه (تولید ۰/۳۳۰ کیلوگرم دانه از هر مترمکعب آب) از تیمار کم‌آبیاری شدید، عدم کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام به دست آمد. با توجه به نتایج ، استفاده از زئولیت و محلول‌پاشی ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام به دلیل افزایش عملکرد به‌عنوان بهترین تیمار معرفی می‌شود. در شرایط کم‌آبیاری ملایم و متوسط نیز کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام و در کم‌آبیاری شدید عدم کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام توصیه می‌شود.

مقدمه

وجود بحران آب، همراه با واردات قابل‌توجه روغن و دانه‌های روغنی و خروج قابل‌توجه ارز، نیاز فوری برای معرفی گیاه دانه روغنی با مصرف کم نهاده ایجاد کرده است. کامل‌ینا (*Camelina sativa* L.) در سراسر جهان به‌عنوان یک محصول دانه روغنی کم‌نهاده که در طیف وسیعی از شرایط زراعی و محیطی کشت می‌شود، شناخته شده است. کشور ایران ازنظر جغرافیایی در منطقه خشک و نیمه‌خشک واقع‌شده و درنتیجه کمبود منابع آب را تجربه می‌کند. کشاورزان مناطق مختلف کشور، به‌ویژه در طول فصل رشد کامل‌ینا که در اواخر اردیبهشت و اوایل خرداد است (Shirani Rad et al., 2013) و هم‌زمان با مراحل بحرانی توسعه محصول و پر کردن دانه در گیاه کامل‌ینا است، آب را به زراعت‌های بهاره و تابستانه تخصیص می‌دهند. این دسترسی محدود منابع آب درنتیجه منجر به کمبود آب برای گیاه

* نگارنده پاسخگو: سیدعلی‌محمد مدرس‌ثانوی. پست الکترونیک: modaresa@modares.ac.ir

کاملینا شده و باعث آسیب تنش کم‌آبی به گیاه و کاهش عملکرد محصول می‌شود. تنش خشکی منجر به خروج آب از سیتوپلاسم به سمت فضای بیرون سلول و به دنبال آن تغییر حجم سیتوپلاسمی و واکوئل سلول، از دست رفتن فشار تورژسانس سلول، تغییر سیالیت غشاها، تغییر ترکیب غشاها و تغییرات اسمزی سلول می‌گردد. این تغییرات سبب تخریب ساختار کلی غشا، خاصیت انتخابی غشا و درنهایت از بین رفتن سلول می‌شود (Wang et al., 2018). تنش خشکی باعث القای کمبود آب در گیاه، تغییر در وضعیت تغذیه‌ای گیاه، تغییر pH شیره‌ی آوند چوبی، هدایت هیدرولیکی آوند چوبی و کاهش اختلاف فشار بخار بین برگ و هوا شده و براثر این تغییرات روزنه‌های برگ بسته می‌شوند؛ بنابراین، در شرایط تنش خشکی دستگاه فتوسنتزی تحت تأثیر قرار گرفته و فعالیت فتوسیستم II نیز در گیاه کاهش می‌یابد (Jianguo et al., 2018).

کاملینا به دلیل چرخه عمر کوتاه بین ۸۵ تا ۱۰۰ روز و ظرفیت رشد بالا در شرایط تنش، در خاک‌های نابارور و در آب‌وهوای معتدل با محدودیت آب و کود، به‌عنوان یک محصول برتر در مقایسه با بسیاری دیگر از دانه‌های روغنی محسوب می‌شود (Yuan and Li, 2020). دانه کاملینا سرشار از روغن و پروتئین است. روغن کاملینا حاوی اسیدهای ω-3، اسیدهای ω-6، توکوفرول‌ها، فیتواسترول‌ها و ترکیبات فنلی است. تغذیه انسان، خوراک دام و طیور، تولید بیودیزل و استفاده در صنعت پلیمرهای زیستی ازجمله کاربردهای کاملینا به شمار می‌روند (Zanetti et al., 2021).

زئولیت‌ها تکتوسیلیکات‌هایی با ساختار سه‌بعدی هستند که شامل کاتیون‌های موردنیاز برای متعادل کردن بار الکترواستاتیک چارچوب واحدهای چهاروجهی آلومینیوم و سیلیکون است و می‌توانند با آلودگی خاک، آب و آلودگی فلزات سنگین مقابله کنند و همچنین با افزایش راندمان مصرف آب و جلوگیری از هدر رفت مواد غذایی در زمین‌های دیم، باعث افزایش عملکرد شوند (Cataldo et al., 2021). زئولیت در خاک، به جهت حفظ نیتروژن و به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک عمل می‌کند (He et al., 2021). زئولیت‌ها می‌توانند تخلخل خاک را افزایش داده و چگالی ظاهری را کاهش دهند و درنتیجه میزان آب خاک را افزایش دهند (Nakhli et al., 2017). افزایش دسترسی به نیتروژن به دلیل استفاده از زئولیت منجر به تنظیم نیازهای موجود در خاک و گیاه شده، همین سبب آزادسازی تدریجی نیتروژن از کود و درنهایت دسترسی بیشتر نیتروژن در اندام‌های تولیدمثلی می‌شود (Amiri et al., 2021). افزایش قابل‌توجه میزان فتوسنتز در مرحله گلدهی در پاسخ به کاربرد زئولیت ممکن است عملکرد دانه را به دلیل افزایش سنتز مواد جذب‌شده افزایش دهد (Jabran et al., 2017).

سرکه چوب یا اسید پیرولگنیوس نوعی مایع خام قرمز مایل به قهوه‌ای است که از تقطیر زیست‌توده گیاهی در طی فرآیند پیرولیز تولید می‌شود. این مایع شامل ترکیباتی ازجمله استون، فنل، اسید استیک، متانول، اتانول و اسید فورمیک است (Zhai et al., 2015). استفاده از سرکه چوب منجر به افزایش قابل‌توجه عملکرد دانه کلزا، با افزایش تعداد غلاف‌های تولیدی در گیاه و تعداد دانه‌ها در هر غلاف شد (Kunmiao et al., 2021). سرکه چوب می‌تواند از طریق افزایش محتوای کلروفیل و افزایش سرعت فتوسنتز و قدرت ریشه، رشد گیاهان را تحریک کند (Bass et al., 2016). استفاده از زئولیت و سرکه چوب می‌تواند به عنوان روشی مؤثر در بهبود عملکرد گیاهان به ویژه در شرایط کم آبیاری مورد استفاده قرار گیرد (Abedi et al., 2025).

باوجوداین، تاکنون مطالعاتی در رابطه با کاربرد توأم زئولیت و سرکه چوب روی کاملینا انجام نگرفته است. بنابراین، با توجه به کاهش بارندگی و کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک و نیاز روزافزون مصرف‌کنندگان به روغن، انجام مطالعات در راستای کاهش اثرات تنش خشکی به‌ویژه تنش آخر فصل ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس، در این پژوهش تأثیر تعدیل‌کننده کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب روی خصوصیات فیزیولوژیک، عملکرد روغن و بهره‌وری آب کاملینا در شرایط کم‌آبی موردبررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس واقع در کیلومتر ۱۷ اتوبان تهران -کرج اجرا شد. ارتفاع محل آزمایش از سطح دریا ۱۳۵۲ متر، طول و عرض جغرافیائی آن به ترتیب ´۱۰/°۵۱ طول شرقی و´۴۴/°۳۵ عرض شمالی است.

این آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. عوامل موردبررسی شامل رژیم‌های آبیاری در چهار سطح (آبیاری مطلوب، کم‌آبیاری ملایم، متوسط و شدید به ترتیب بعد از تخلیه (جذب در منطقه ریشه یا تبخیر) ۲۰، ۴۰، ۶۰

و ۸۰ درصد آب قابل‌استفاده و سپس آبیاری تا حد ظرفیت مزرعه) در کرت‌های اصلی و زئولیت طبیعی از نوع کلینوپتیلولیت تهیه‌شده از شرکت فتح البرز دامغان با دو سطح (۱- بدون کاربرد زئولیت، $0\ ton.ha^{-1}$؛ ۲- هشت تن بر هکتار، $8\ ton.ha^{-1}$) و سرکه چوب به دست آمده از روش پیرولیز با چهار سطح (۱- بدون کاربرد سرکه چوب، 0 ppm؛ ۲- کاربرد غلظت ۵۰۰۰ ppm؛ ۳- کاربرد غلظت ۱۰۰۰۰ ppm؛ و ۴- کاربرد غلظت ۱۵۰۰۰ ppm) به‌صورت ترکیب فاکتوریلی در کرت‌های فرعی قرار گرفتند.

جدول ۱. مشخصات فیزیکوشیمیایی زئولیت استفاده‌شده

Table 1. Physicochemical characteristics of the used Zeolite

منیزیم Mg	لیتیوم Li	لانتانیم La	پتاسیم K	آهن Fe	مس Cu	کادمیوم Cd	کلسیم Ca	برلیم Be	باریم Ba	آرسنیک As	آلومینیوم Al	نقره Ag
ppm												
4308	31	26	23435	5634	25	<0.1	8595	2.1	299	<0.5	53690	<0.5

جدول ۲. مشخصات فیزیکوشیمیایی سرکه چوب استفاده‌شده

Table 2. Physicochemical characteristics of the used Wood Vingar

بور B	آهن Fe	روی Zn	نسبت کربن به نیتروژن C/N	نیتروژن کل N total	اسید هیومیک Humic acid	کربن آلی OC	ماده آلی OM	اسید فولیک folic acid
ppm			-	%				
400	1404	54.8	10.52	0.95	0.55	10	17.24	8.12

از رقم اصلاحی داخلی سهیل (DH102)، شرکت دانش‌بنیان بیستون به‌عنوان بذر مورداستفاده در این آزمایش، استفاده شد. هر واحد آزمایشی شامل چهار خط کشت به طول دو متر با فاصله خطوط ۰/۳ متر (عرض کرت ۱/۲ متر) و فاصله بوته‌ها روی هر خط پنج سانتی‌متر و به‌منظور جلوگیری از اختلاط اثر هر یک از تیمارها، فاصله بین تکرارها (بلوک‌ها) دو متر و فاصله بین کرت‌های اصلی درون هر تکرار، یک متر در نظر گرفته شد. کاشت به‌صورت دستی در تاریخ ۲۰ مهرماه سال ۱۴۰۱ و بذرها در عمق یک سانتی‌متری خاک کاشته شد.

آبیاری به‌صورت نواری قطره‌ای با ضخامت حدود ۱۷۵ تا ۲۰۰ میکرون و فاصله روزنه قطره‌چکان ۲۰ سانتی‌متر انجام شد. برای تعیین زمان و حجم آبیاری و همچنین مقدار نفوذ عمقی آب از دستگاه Time- Domain Reflectometry یا TDR استفاده شد. زئولیت پس از اجرای عملیات شخم زمین، در محل انجام آزمایش و برای کرت‌هایی که بر اساس نقشه آزمایش دارای زئولیت هستند، به‌طور یکنواخت بر روی سطح خاک پخش و سپس با خاک مخلوط شد. محلول‌پاشی سرکه چوب به‌منظور اثربخشی بهینه‌تر، در چهار مرحله مختلف از رشد گیاه (۱- ده روز قبل از گلدهی ۲- ظهور گل‌آذین ۳- گلدهی کامل ۴- میوه‌دهی) انجام گرفت.

جهت تعیین شاخص سطح برگ با حذف اثرات حاشیه، از هر کرت پنج بوته برداشت و با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ مدل DELTA-TDEVICES ساخت کشور انگلستان اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از معادله (۱)، سطح برگی که هر گیاه در زمین اشغال کرده محاسبه شد.

$$LAI=\frac{LA}{Ga} \qquad [۱]$$

LA نمایانگر سطح برگ اندازه‌گیری شده به واحد سانتیمترمربع است و Ga نمایانگر سطح زمینی است که از آن نمونه‌برداری انجام‌شده به واحد سانتیمترمربع است.

شاخص سبزینگی با استفاده از دستگاه SPAD مدل spad 502 plus ساخت کمپانی Konica Minolta کشور ژاپن، از چهارمین برگ کاملاً صاف از بالا به پایین در مرحله ۵۰ درصد گلدهی انجام شد. شاخص‌های تبادل گازی با استفاده از دستگاه LI-6400 (Li-Cor، ایالات‌متحده) اندازه‌گیری شدند. برای ارزیابی عملکرد دانه و روغن در انتهای فصل رشد با در نظر گرفتن اثر حاشیه، ۱۰ گیاه که نماینده هر کرت بودند به‌طور تصادفی انتخاب و مورد ارزیابی قرار

گرفتند. درصد روغن به‌وسیله دستگاه سوکسله با استفاده از حلال n-هگزان تعیین گردید.

درصد آب قابل‌استفاده (D) بر اساس معادله ۲ (Martin et al., 1990) تعیین و سپس با استفاده از معادله ۳ درصد تخلیه آب قابل‌استفاده محاسبه شد.

$$D\ (\%)=\frac{1}{n}\Sigma_1^n\frac{Fci-\theta i}{Fci-Wp}\times 100 \qquad [۲]$$

در این معادله n تعداد نمونه خاک گرفته‌شده از عمق مؤثر توسعه ریشه، FCi رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه در نمونه iام، θi رطوبت خاک در نمونه i ام و Wp رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم

$$100\text{-}D = \text{درصد تخلیه آب قابل استفاده} \qquad [۳]$$

از مقایسه رطوبت‌های اندازه‌گیری شده به‌وسیله حسگرها با روش نمونه‌برداری و توزین، اعتبارسنجی صورت گرفت (Vanclooster et al., 1994).

بهره‌وری آب (تولید دانه به کیلوگرم از هر مترمکعب آب مصرفی)، شامل اندازه‌گیری سه عامل ۱- عملکرد ۲- مقدار آب آبیاری و ۳- مقدار بارش در طی فصل است که با استفاده از معادله (۴) به دست آمد.

$$WP=\frac{Y}{I+P} \qquad [۴]$$

WP بهره‌وری آب برحسب کیلوگرم در مترمکعب، عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار Y و P و I به ترتیب عمق آب آبیاری و باران برحسب مترمکعب است (Kiani, 2015).

برای آنالیز واریانس از روش مدل خطی عمومی (GLM) استفاده شد. برای مقایسه اثرات اصلی آزمون LSD در سطح پنج درصد بکار برده شد. برای مقایسه اثرات متقابل، برش‌دهی بر اساس رژیم‌های آبیاری صورت گرفت و سپس آزمون LSD در سطح پنج درصد انجام شد. برای انجام آنالیز همبستگی از متد Corr و روش Pearson استفاده شد.

نتایج و بحث

شاخص سبزینگی

اثر متقابل آبیاری و محلول‌پاشی سرکه چوب در سطح احتمال پنج درصد و اثر اصلی کاربرد زئولیت در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری روی شاخص سبزینگی داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های اثر اصلی زئولیت نشان داد کاربرد زئولیت با ۴۹/۵۶ اسپد باعث افزایش شاخص سبزینگی نسبت به عدم کاربرد زئولیت (۴۷/۲۷) شد (شکل ۲).

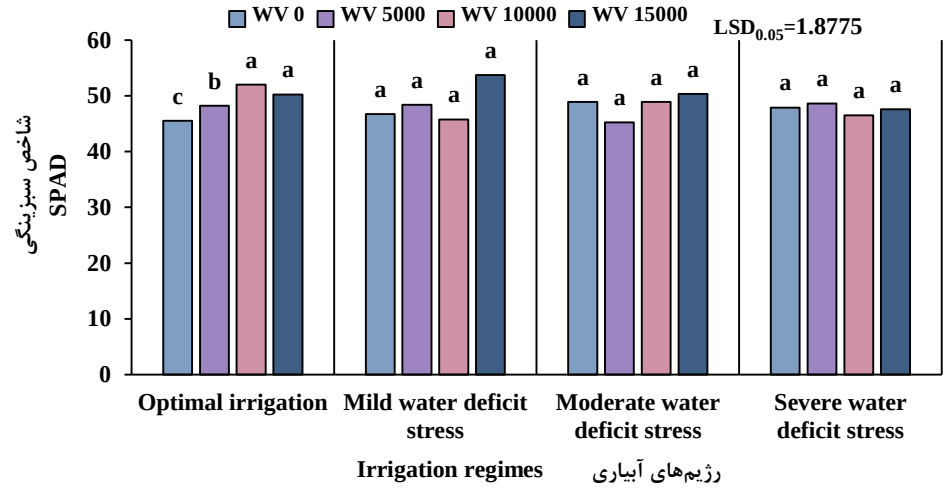
جدول ۳. آنالیز واریانس (میانگین مربعات) صفات فیزیولوژیکی، عملکرد دانه و بهره‌وری آب

Table 3. Variance analysis (Mean of squares) of physiological traits, oil yield and water use efficiency

S.O.V	منابع تغییرات	درجه آزادی df	شاخص سبزینگی SPAD	شاخص سطح برگ LAI	عملکرد دانه Grain yield	بهره‌وری آب بر اساس عملکرد دانه WUE
Block	**بلوک**	2	0.00038^{ns}	0.00078^{ns}	48239.88*	0.64*
Irrigation regimes (I)	**رژیم‌های آبیاری**	3	0.00095^{ns}	0.046**	913690.17**	5.829**
Error (a)	**خطای کرت اصلی**	6	0.00212^{ns}	0.0029^{ns}	5095.49^{ns}	0.115^{ns}
Zeolite (Z)	**زئولیت**	1	0.016**	0.03**	122864.94**	0.879*
Foliar Application (F)	**محلول‌پاشی**	3	0.0057*	0.0078**	100102.75**	1.556**
F*Z	**زئولیت × محلول‌پاشی**	3	0.00024^{ns}	0.0032^{ns}	63956.43**	0.464^{ns}
I*Z	**آبیاری×زئولیت**	9	0.0022^{ns}	0.0039^{ns}	28587.56^{ns}	0.148^{ns}
I*F	**آبیاری × محلول‌پاشی**	3	0.0042*	0.0092**	48769.01**	0.733**
I*Z*F	**آبیاری×زئولیت× محلول‌پاشی**	9	0.002^{ns}	0.0036*	43663.96**	0.499**
Error (b)	**خطای کرت فرعی**	56	0.0018^{ns}	0.0016^{ns}	15040.18^{ns}	0.176^{ns}
CV(٪)	**ضریب تغییرات**		*45.1*	*49.15*	*14.13*	*13.66*

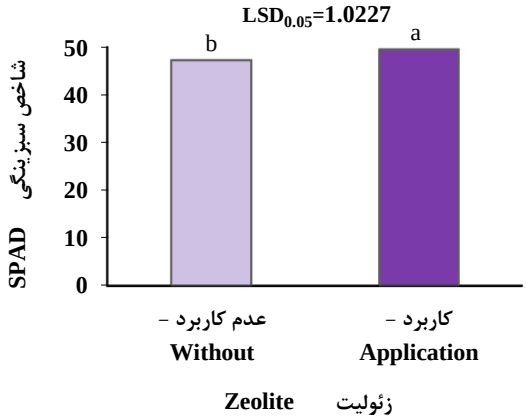
ns، * و **به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد

ns, *and ** show not significant and sigficant at 5% and 1% level, respectively



شکل ۱. مقایسه میانگین‌های شاخص سبزینگی کاملینا تحت تأثیر رژیم‌های آبیاری و محلول‌پاشی سرکه چوب

Fig. 1. Mean Comparisons of Camelina greenness index under irrigation regimes and foliar spraying of wood vinegar



شکل ۲. مقایسه میانگین‌های شاخص سبزینگی تحت تیمار زئولیت

Fig. 2. Mean Comparisons of greenness index under zeolite treatment

در سطح آبیاری مطلوب، بیشترین شاخص سبزینگی در محلول‌پاشی ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام سرکه چوب مشاهده شد که با محلول‌پاشی ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام در یک گروه آماری قرار گرفت درحالی‌که محلول‌پاشی سرکه چوب در سایر سطوح تنش کم‌آبی، اختلاف معنی‌داری نداشتند (شکل ۱). کمبود آب باعث کاهش جذب عناصر غذایی مانند نیتروژن و منیزیم می‌شود که منجر به کاهش سنتز کلروفیل و غلظت آن در برگ‌ها می‌گردد (Bista et al., 2018). مشخص شد که زئولیت با بهبود تأمین آب و نیتروژن باعث افزایش محتوای کلروفیل می‌شود (Bybordi et al., 2018). بهبود ویژگی‌های رشد رویشی ممکن است به اهمیت منیزیم به‌عنوان بخشی از رنگ‌دانه اصلی گیاه هم نسبت داده شود (Yaseen and Fahmy, 2021). سرکه چوب و ترکیبات آن می‌توانند روند رشد را تسریع کنند و همچنین تأثیراتی در به تأخیر انداختن پیری برگ‌ها دارند که باعث حفظ عملکرد برگ‌ها، محتوی کلروفیل و درنتیجه شاخص سبزینگی می‌شود (Zhu et al., 2021).

شاخص سطح برگ

شاخص سطح برگ تحت تأثیر سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، زئولیت و سرکه چوب در سطح احتمال پنج درصد قرار گرفت (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های اثر سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، زئولیت و سرکه چوب نشان داد بیشترین مقدار شاخص سطح برگ در آبیاری مطلوب مربوط به کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۵۰۰۰ پی‌پی‌ام به دست آمد، همچنین در کم‌آبیاری ملایم این شاخص با ۰/۳۹ مربوط به کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام حاصل شد. سایر سطوح آبیاری ازلحاظ آماری تفاوت معناداری نداشتند (جدول ۶). تنش خشکی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای سطح برگ را نسبت به شرایط شاهد کاهش می‌دهد (Tanveer et al., 2023). یکی از دلایل اصلی کاهش سطح برگ در شرایط کمبود آب، کاهش هدایت هیدرولیکی سلول برگ است که به‌نوبه خود باعث عدم انتقال آب به سلول‌ها شده و درنتیجه از بزرگ شدن سلول‌ها و رشد برگ جلوگیری می‌کند. ازاین‌رو زئولیت به دلیل توانایی ذخیره و نگهداشت آب در ساختار خود، قادر به بهبود سطح برگ در زمان تنش کم‌آبی است (Gholamhoseini et al., 2013).

کاربرد زئولیت به‌طور قابل‌توجهی باعث افزایش شاخص سطح برگ (LAI) می‌شود (Zheng et al., 2018). یکی از ویژگی‌های سرکه چوب، وجود ترکیبات متانول و فرفورال در آن است که می‌توانند سرعت رشد گیاه را بهبود ببخشند. درواقع افزایش سطح برگ در زمان تنش را می‌توان به ترکیبات سرکه چوب که باعث تحریک رشد رویشی می‌شوند نسبت داد (Nurhayati et al., 2023). کاربرد سرکه چوب باعث افزایش سطح برگ و وزن خشک گیاه جو شد (Zahdi and Sharghi, 2019).

عملکرد دانه

عملکرد دانه تحت تأثیر اثر سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، زئولیت و سرکه چوب در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های اثر سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، زئولیت و سرکه چوب نشان داد که در آبیاری مطلوب بیشترین عملکرد دانه، در کاربرد زئولیت و عدم کاربرد سرکه چوب به دست آمد که با کاربرد زئولیت، محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام در همین تیمار آبیاری (۱۳۵۰/۸۹ کیلوگرم در هکتار) تفاوت معنی‌داری نداشت. در کم‌آبیاری شدید با ۹۵۱/۳۶ کیلوگرم در هکتار، عدم کاربرد زئولیت، محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام بیشترین عملکرد را به دست آورد. سایر رژیم‌های آبیاری ازلحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۶). هنگامی‌که گیاه در مرحله رشد خورجین‌ها، با کمبود آب مواجه گردد، انتقال مواد غذایی از منابع به دانه‌ها کم شده و باعث کاهش عملکرد می‌شود که این کاهش عملکرد متأثر از تعداد و اندازه خورجین‌ها است. درواقع می‌توان گفت که این کاهش عملکرد ناشی از کاهش اجزای عملکرد ازجمله تعداد خورجین، تعداد دانه در خورجین، ارتفاع بوته و وزن هزار دانه است. عملکرد دانه با تنش خشکی در تمامی ارقام کاهش یافت (Safari et al., 2023). سطوح زئولیت با نیتروژن نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی‌داری در عملکرد دانه نشان دادند (Kavoosi, 2007). استفاده از سرکه چوب پوسته نارگیل با غلظت ۱:۲۰ باعث بهبود عملکرد دانه و کاهش شدت آفت و بیماری شد (Ahadiyat et al., 2018).

جدول ۴. آنالیز واریانس (میانگین مربعات) درصد روغن، عملکرد روغن و بهره‌وری آب

Table 4. Variance analysis (Mean of squares) of oil percenta, oil yield and water use efficiency

S.O.V	منابع تغییرات	درجه آزادی df	درصد روغن Oil percent	عملکرد روغن Oil yield	بهره‌وری آب بر اساس عملکرد روغن WUE
Block	**بلوک**	2	2.70 ^{ns}	5186.20*	0.00041*
Irrigation regimes (I)	**رژیم‌های آبیاری**	3	272.68**	167954.58**	0.0004*
Error (a)	**خطای کرت اصلی**	6	6.11 ^{ns}	835.08 ^{ns}	0.00006 ^{ns}
Zeolite (Z)	**زئولیت**	1	61.88**	30920.67**	0.00129**
Foliar Application (F)	**محلول‌پاشی**	3	38.64**	17082.90**	0.00077**
F*Z	**زئولیت × محلول‌پاشی**	3	2.64 ^{ns}	5586.01*	0.00021 ^{ns}
I*Z	**آبیاری×زئولیت**	9	2.84 ^{ns}	4971.12*	0.00016 ^{ns}
I*F	**آبیاری × محلول‌پاشی**	3	9.42 ^{ns}	2810.75 ^{ns}	0.00023*
I*Z*F	**آبیاری×زئولیت× محلول‌پاشی**	9	3.07 ^{ns}	4616.46**	0.00021*
Error (b)	**خطای کرت فرعی**	56	6.25 ^{ns}	1476.55 ^{ns}	0.00009 ^{ns}
CV (%)	**ضریب تغییرات**		*9.29*	*16.08*	*19.79*

ns، * و **به‌ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد

ns, *and ** show not significant and sigficant at 5% and 1% level, respectively

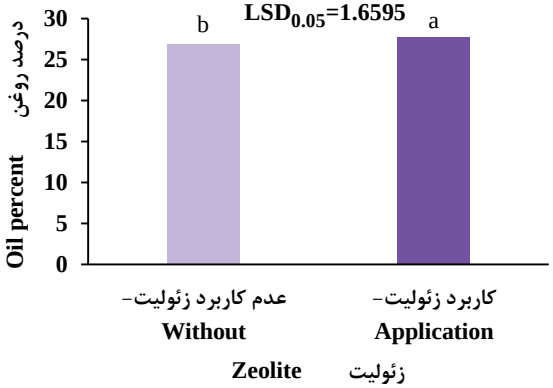
بهره‌وری آب بر اساس عملکرد دانه

بر اساس جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، زئولیت و سرکه چوب در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). جدول مقایسه میانگین‌های اثر سه‌گانه تنش کم‌آبی، زئولیت و سرکه چوب مشخص کرد که در آبیاری مطلوب بیشترین بهره‌وری آب مختص به کاربرد زئولیت و عدم محلول‌پاشی سرکه چوب با ۰/۱۹۹ کیلوگرم دانه در مترمکعب آب و بعدازآن کاربرد

زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام که ازلحاظ آماری در یک گروه قرار می‌گیرند. میانگین‌های کم‌آبیاری ملایم و متوسط ازنظر آماری اختلافی باهم نداشتند اما در کم‌آبیاری شدید بیشترین بهره‌وری آب در عدم کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام دیده شد (جدول ۶). تنش خشکی موجب افزایش کارایی مصرف آب می‌شود. زئولیت‌ها می‌توانند توسط جذب آب حاصل از آبیاری و بارندگی، از هدر رفت عمقی آب جلوگیری کرده و با کاهش دور آبیاری و کاهش میزان آب مصرفی، کارایی آب مصرفی را افزایش دهند (Varga et al., 2015; Rahimi et al., 2019). دلیل افزایش کارایی مصرف آب با کاربرد سرکه چوب به افزایش غلظت پتاسیم برگ به دلیل دسترسی بیشتر به نسبت داده شده است مقادیر کافی پتاسیم برگ مقاومت گیاه در برابر تنش خشکی را افزایش داده و با تنظیم روابط آبی، کارایی مصرف آب و شرایط رشد گیاه در شرایط تنش خشکی را بهبود می‌بخشد همچنین کاربرد زئولیت با جلوگیری از هدر رفت نیتروژن باعث دسترسی طولانی‌مدت این عنصر و بهبود رشد گیاه و افزایش عملکرد علوفه و درنهایت افزایش راندمان مصرف آب شد (Karami et al., 2020).

درصد روغن

جدول تجزیه واریانس نشان داد، اثرات اصلی رژیم‌های آبیاری، زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب در سطح معنی‌داری یک درصد برای صفت درصد روغن معنی‌دار شدند (جدول ۴). جدول مقایسه میانگین‌های اثر اصلی زئولیت نشان داد که کاربرد زئولیت می‌تواند تا ۵/۸۱ درصد، موجب بهبود درصد روغن در کاملینا شود (شکل ۳). بررسی جدول مقایسه میانگین‌های اثر اصلی تنش کم‌آبی مشخص کرد بیشترین درصد روغن در آبیاری مطلوب با ۳۱/۰۶ درصد و از طرفی کمترین درصد روغن در کم‌آبیاری شدید با ۲۲/۹ درصد به دست آمد (جدول ۹). همچنین از مقایسه میانگین‌های اثر اصلی محلول‌پاشی سرکه چوب مشخص شد که محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام بالاترین درصد روغن را با ۲۸/۱۲ درصد به خود اختصاص داده که ازنظر آماری با غلظت‌های ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ در یک گروه آماری قرار می‌گیرند (جدول ۸). مهم‌ترین عاملی که برای کاهش درصد روغن دانه در تنش خشکی می‌توان عنوان کرد این است که تنش خشکی، باعث بروز اختلال در پر شدن دانه‌ها می‌شود و طول دوره پر شدن دانه‌ها را کاهش می‌دهد؛ بنابراین فرصت برای تجمع پروتئین در دانه فراهم می‌شود و درنتیجه درصد روغن کاهش می‌یابد (Maleki Nejad and Majidi, 2015). درواقع توازن رطوبت در محیط ریشه به دلیل توانایی زئولیت در جذب آب بیشتر است. درنتیجه رشد و عملکرد گیاه افزایش می‌یابد (Ayan et al., 2005). در شرایط تنش کمبود آب، حداکثر سطح برگ بوته و عملکردهای بیولوژیک، دانه و روغن گیاه با کاربرد سرکه چوب مشاهده شد (Amini-Pak et al., 2022).



شکل ۳. مقایسه میانگین‌های درصد روغن تحت تأثیر اصلی زئولیت

Fig. 3. Mean Comparisons of oil percent under zeolite effect

عملکرد روغن

برهمکنش رژیم‌های آبیاری، زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب تأثیر معناداری روی عملکرد روغن در سطح احتمال یک درصد گذاشت (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های اثر سه‌گانه تنش کم‌آبی، زئولیت و سرکه چوب مشخص کرد که بیشترین عملکرد روغن در آبیاری مطلوب در تیمار کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام به دست آمد. در کم‌آبیاری شدید عدم کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام بالاترین عملکرد روغن (۲۱۲/۰۷ کیلوگرم در هکتار) را ثبت کرد. سایر سطوح کم‌آبیاری ازلحاظ آماری تفاوت معنادار باهم نداشتند (جدول ۷). کمبود آب باعث کاهش معنی‌دار عملکرد روغن شد. به‌طورکلی استفاده سرکه چوب در شرایط تنش کمبود آب موجب بهبود عملکرد و اجزای عملکرد گیاه به تنش شده است (Amini-Pak et al., 2022). عملکرد روغن کاملینا در شرایط کم آبیاری ملایم و متوسط نسبت به شاهد آبیاری مطلوب به ترتیب ۴۲/۴ و ۲۳/۲۱ درصد کاهش داشت

(Momeni-Shijani et al., 2024). کم بودن مقدار روغن دانه به دلیل تنش خشکی ممکن است ناشی از کوتاه شدن دوره پر شدن دانه و کاهش وزن دانه‌ها باشد (Ghassemi-Golezani and Lotfi, 2013). حضور زئولیت در شرایط محدودیت رطوبت خاک سبب افزایش عملکرد روغن شد که دلیل آن را تأثیر مثبت زئولیت بر رطوبت خاک و نگهداری مواد غذایی عنوان کردند (Mottaghi et al., 2015).

بهره‌وری آب بر اساس عملکرد روغن

بر اساس جدول تجزیه واریانس، بهره‌وری آب بر اساس عملکرد روغن تحت تأثیر اثر سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، زئولیت و سرکه چوب در سطح احتمال پنج درصد قرار گرفت (جدول ۴). جدول مقایسه میانگین‌های اثر سه‌گانه تنش کم‌آبی، زئولیت و سرکه چوب نشان داد که در آبیاری مطلوب بیشترین بهره‌وری آب مختص به کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام (۰/۰۶۴ کیلوگرم روغن در مترمکعب آب) به دست آمد. مقایسه میانگین‌های کم‌آبیاری ملایم و کم‌آبیاری متوسط ازنظر آماری اختلافی باهم نداشتند اما در کم‌آبیاری شدید بیشترین بهره‌وری آب در تیمار عدم کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام دیده شد (جدول ۷). یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در برنامه‌ریزی آبیاری، کارایی مصرف آب یا مقدار ماده خشک تولیدی به ازای واحد آب مصرفی است که عملکرد و میزان آب مصرفی از عوامل تعیین‌کننده آن هستند. به‌طورکلی میزان کارایی مصرف آب با کاهش مصرف آب افزایش یافت این در حالی است که معمولاً در شرایط کم‌آبیاری میزان بهره‌وری آب بالا خواهد رفت. کودهای آلی به علت تأمین آب کافی گیاه موجب بهبود فتوسنتز و کارایی مصرف آب گیاه می‌شوند. سرکه چوب با افزایش سرعت فتوسنتز باعث افزایش کارایی آب مصرفی در خاک‌های شنی می‌شود.

سرعت فتوسنتز

برهمکنش اثر سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب تأثیر معناداری روی میزان فتوسنتز در سطح احتمال یک درصد گذاشت (جدول ۵).

مقایسه میانگین‌های اثر سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، زئولیت و سرکه چوب نشان داد که بالاترین میزان فتوسنتز در آبیاری مطلوب و کم‌آبیاری متوسط، در تیمار کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام دیده شد و سایر سطوح کم‌آبیاری ازلحاظ آماری تفاوت معنادار با یکدیگر نداشتند (جدول ۷). شرایط خشکی باعث بسته شدن روزنه‌های برگ گیاه می‌شود و مقدار CO_2 واردشده به روزنه‌ها، کمتر از مقدار موردنیاز برای فتوسنتز خواهد بود درنهایت، این امر منجر به کاهش فتوسنتز و تولید محصول می‌شود که با ادامه خشک‌سالی، باعث آسیب به اندام‌های فتوسنتزی گیاه می‌گردد (Song et al., 2021). فنل‌های موجود در سرکه چوب ممکن است نقش آنتی‌اکسیدانی داشته و با مهار گونه‌های اکسیژن فعال باعث افزایش نرخ فتوسنتز شوند.

هدایت روزنه‌ای

هدایت روزنه‌ای تحت تأثیر اثر سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، زئولیت و سرکه چوب در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۵).

جدول مقایسه میانگین‌های اثر سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، زئولیت و سرکه چوب مشخص کرد، در کم‌آبیاری ملایم با میزان هدایت آب ۰/۰۸۵ مول H_2O در مترمربع در ثانیه، تیمار عدم کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام بالاترین هدایت آب را نسبت به سایر تیمارها ثبت کرد. مابقی رژیم‌های آبیاری تفاوت معنی‌دار ازنظر آماری با یکدیگر نداشتند (جدول ۷). بسته شدن روزنه باعث کاهش فتوسنتز و تعرق می‌شود که درعین‌حال کارایی مصرف آب را به دلیل سازگاری تحت تنش خشکی بهبود می‌بخشد (Feller, 2016; Lamaoui et al., 2018). سرکه چوب از طریق افزایش مقدار آنزیم گایاکول پراکسیداز (آنزیم از بین برنده H_2O_2) و سوپراکسید دیسموتاز (آنزیم حذف‌کننده رادیکال‌های آزاد اکسیژن) سطح پراکسید و در نتیجه تنش اکسیداتیو را در گیاه کاهش می‌دهد (Dissatian et al., 2018). نتایج نشان داد که تراکم روزنه کلزا تیمار شده با سرکه چوب، در مقایسه با شاهد، شش درصد افزایش یافت (Zhu et al., 2022).

CO_2 بین سلولی

جدول تجزیه واریانس نشان داد، اثر اصلی محلول‌پاشی سرکه چوب برای این در سطح پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). جدول مقایسه میانگین‌های اثر اصلی محلول‌پاشی سرکه چوب مشخص کرد که بیشترین غلظت CO_2 بین سلولی در

عدم محلول‌پاشی سرکه چوب با ۱۸۷/۱۱ میکرومول CO_2 در مول است از طرفی کمترین مقدار آن با ۱۶۵/۹۴ میکرومول CO_2 در مول در محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام است (جدول ۸). تنش خشکی باعث بسته شدن روزنه‌ها می‌شود که در نتیجه، نسبت CO_2 به O2 را در برگ‌ها کاهش داده و از تثبیت CO_2 ممانعت می‌کند کاهش CO_2 بین سلولی، محدودیت CO_2 برای فتوسنتز را افزایش و سرعت فتوسنتز را کاهش می‌دهد (Akpinar and Cansev, 2022). سرکه چوب با افزایش سرعت فتوسنتز نسبت CO_2 به O_2 را در برگ‌ها کاهش داده و باعث کاهش غلظت CO_2 بین سلولی در برگ‌ها شده است.

میزان تعرق

بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی محلول‌پاشی سرکه چوب و رژیم‌های آبیاری برای این صفت در سطح یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۵). بر اساس جدول مقایسه میانگین‌های اثر اصلی رژیم‌های آبیاری بالاترین نرخ تعرق، در آبیاری مطلوب با ۱/۴۶ میلی‌مول H_2O در مترمربع در ثانیه ثبت شد و کمترین میزان تعرق نیز در کم‌آبیاری شدید با ۱/۰۲ میلی‌مول H_2O در مترمربع در ثانیه به دست آمد (جدول ۹). جدول مقایسه میانگین‌های اثر اصلی محلول‌پاشی سرکه چوب مشخص کرد که بالاترین نرخ تعرق با ۱/۳۵ میلی‌مول H_2O در مترمربع در ثانیه در تیمار محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام مشاهده شد که با تیمارهای محلول‌پاشی ۵۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ در یک گروه ازلحاظ آماری قرار گرفت (جدول ۸). تنش خشکی جذب مواد غذایی را از طریق ریشه‌ها و انتقال آن‌ها به اندام هوایی را کاهش می‌دهد که علت آن نیز محدود نمودن تعرق و آسیب به انتقال فعال و تراوایی غشا است (Nakabayashi and Saito, 2015). ازآنجایی‌که میزان تعرق کاملاً وابسته به هدایت روزنه‌ای است سرکه چوب از طریق افزایش سرعت فتوسنتز و پتانسیل آماس می‌تواند میزان تعرق را در برگ گیاه افزایش دهد.

جدول ۵. آنالیز واریانس (میانگین مربعات) صفات تبادل گاز فتوسنتزی

Table 5. Variance analysis (Mean of squares) of of photosynthetic gas exchange traits

S.O.V منابع تغییرات	درجه آزادی df	سرعت فتوسنتز Photosynthetic rate	هدایت روزنه Conductance to H_2O	CO_2 بین‌سلولی Intercellular CO_2 concentration	میزان تعرق Transpiration rate	کمبود فشار بخار بر اساس دمای برگ Vapor pressure deficit
Block بلوک	2	0.56 ^{ns}	0.00451 **	10689.91 ^{ns}	0.165 ^{ns}	39.781 ^{ns}
Irrigation regimes (I) رژیم‌های آبیاری	3	18.72 **	0.00531 **	10335.54 ^{ns}	0.837 **	27.928 ^{ns}
Error (a) خطای کرت اصلی	6	0.55 ^{ns}	0.00025 ^{ns}	2275.99 ^{ns}	0.062 ^{ns}	67.722 ^{ns}
Zeolite (Z) زئولیت	1	2.47 **	0.00030 *	1054.30 ^{ns}	0.141 ^{ns}	3.322 ^{ns}
Foliar Application (F) محلول‌پاشی	3	3.29 **	0.00016 ^{ns}	2117.31 *	0.168 **	8.941 **
F*Z زئولیت × محلول‌پاشی	3	0.07 ^{ns}	0.00021 *	1531.05 ^{ns}	0.064 ^{ns}	1.118 ^{ns}
I*Z آبیاری×زئولیت	9	0.92 **	0.00026 *	405.43 ^{ns}	0.044 ^{ns}	0.291 ^{ns}
I*F آبیاری × محلول‌پاشی	3	0.76 **	0.00009 ^{ns}	469.71 ^{ns}	0.024 ^{ns}	0.708 ^{ns}
I*Z*F آبیاری×زئولیت× محلول‌پاشی	9	0.85 **	0.00019 **	1112.93 ^{ns}	0.027 ^{ns}	0.705 ^{ns}
Error (b) خطای کرت فرعی	56	0.21 ^{ns}	0.00006 ^{ns}	619.85 ^{ns}	0.039 ^{ns}	1.428 ^{ns}
CV (%) ضریب تغییرات		*9.95*	*13.06*	*14.11*	*15.66*	*5.54*

ns، * و **به‌ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد

ns, *and ** show not significant and sigficant at 5% and 1% level, respectively

جدول ۶. مقایسه میانگین برهمکنش سه‌گانه زئولیت، محلول‌پاشی سرکه چوب و رژیم‌های آبیاری بر صفات فیزیولوژیکی، عملکرد دانه و بهره‌وری آب

Table 6. Mean comparison of the triple interaction of zeolite, wood vinegar solution and irrigation regimes on physiological traits, grain yield and water efficiency

آبیاری Irrigation	زئولیت Zeolite	سرکه چوب Wood vingar	شاخص سطح برگ LAI	عملکرد دانه Grain yield	بهره‌وری آب (عملکرد دانه) WUE
	ton.ha^{-1}	ppm	-	Kg.ha^{-1}	Kg.m^{-3}
آبیاری مطلوب Optimal irrigation	0	0	0.23	1021.88	0.146
		5000	0.38	1042.15	0.149
		10000	0.35	1074.13	0.153
		15000	0.23	1138.71	0.163
	8	0	0.34	1396.76	0.199
		5000	0.40	910.24	0.130
		10000	0.32	1168.37	0.167
		15000	0.37	1350.89	0.193
	$LSD_{0.05}$		*0.0387*	*155.98*	*0.0091*
تنش کم‌آبیاری ملایم Mild water deficit stress	0	0	0.20	776.04	0.138
		5000	0.24	850.69	0.151
		10000	0.25	911.43	0.162
		15000	0.30	730.02	0.130
	8	0	0.28	823.90	0.146
		5000	0.26	794.30	0.141
		10000	0.30	934.68	0.166
		15000	0.39	1057.74	0.188
	$LSD_{0.05}$		*0.0246*	*313.54*	*0.0237*
تنش کم آبیاری متوسط Moderate water deficit stress	0	0	0.24	711.04	0.167
		5000	0.23	673.97	0.158
		10000	0.20	755.40	0.178
		15000	0.28	860.98	0.202
	8	0	0.21	880.38	0.207
		5000	0.25	771.29	0.181
		10000	0.27	792.82	0.186
		15000	0.30	912.77	0.215
	$LSD_{0.05}$		*0.0994*	*138.32*	*0.0133*
تنش کم آبیاری شدید Severe water deficit stress	0	0	0.18	427.36	0.148
		5000	0.18	623.28	0.216
		10000	0.25	951.36	0.330
		15000	0.18	763.04	0.265
	8	0	0.23	528.11	0.183
		5000	0.18	796.55	0.277
		10000	0.23	604.34	0.210
		15000	0.19	733.10	0.255
	$LSD_{0.05}$		*0.0915*	*206.7*	*0.0189*

جدول ۷. مقایسه میانگین بر همکنش سه‌گانه زئولیت، محلول‌پاشی سرکه چوب و رژیم‌های آبیاری بر عملکرد روغن، بهره‌وری آب، سرعت فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای

Table 7. Mean comparison of the triple interaction of zeolite, wood vinegar solution and irrigation regimes on oil yield, water efficiency, photosynthesis rate and stomatal conductance.

آبیاری Irrigation	زئولیت Zeolite	سرکه چوب Wood vingar	عملکرد روغن oil yield	بهره‌وری آب (عملکرد روغن) WUE	سرعت فتوسنتز Photosynthetic rate	هدایت روزنه‌ای Conductance to H_2O
	ton.ha^{-1}	ppm	kg.ha^{-1}	kg.m^{-3}	μmol.CO_2.m^{-2} s^{-1}	mol.H_2O.m^{-2}.s^{-1}
آبیاری مطلوب Optimal irrigation	0	0	247.52	0.035	3.89	0.069
		5000	335.13	0.048	6.28	0.074
		10000	330.76	0.047	6.11	0.080
		15000	363.21	0.052	5.10	0.072
	8	0	419.00	0.060	5.45	0.082
		5000	298.20	0.043	6.19	0.091
		10000	386.79	0.055	6.12	0.084
		15000	450.69	0.064	6.53	0.086
	$LSD_{0.05}$		*63.68*	*0.0232*	*0.9369*	*0.0175*
تنش کم‌آبیاری ملایم Mild water deficit stress	0	0	198.62	0.035	4.75	0.066
		5000	221.19	0.039	4.44	0.062
		10000	239.95	0.043	5.10	0.062
		15000	207.78	0.037	5.01	0.085
	8	0	215.39	0.038	5.03	0.082
		5000	216.47	0.056	4.82	0.063
		10000	277.79	0.049	5.83	0.083
		15000	315.67	0.056	5.63	0.058
	$LSD_{0.05}$		*88.80*	*0.0557*	*1.0427*	*0.0195*
تنش کم آبیاری متوسط Moderate water deficit stress	0	0	178.45	0.042	4.18	0.052
		5000	173.32	0.041	3.65	0.055
		10000	187.14	0.044	4.37	0.055
		15000	228.32	0.054	4.85	0.062
	8	0	233.96	0.055	3.87	0.056
		5000	199.34	0.047	4.75	0.055
		10000	213.84	0.050	4.52	0.064
		15000	261.56	0.061	4.89	0.064
	$LSD_{0.05}$		*56.72*	*0.0325*	*0.6768*	*0.0083*
تنش کم آبیاری شدید Severe water deficit stress	0	0	88.80	0.031	3.32	0.042
		5000	148.31	0.052	3.92	0.045
		10000	212.07	0.074	3.90	0.047
		15000	175.74	0.061	3.88	0.057
	8	0	114.73	0.040	2.91	0.039
		5000	197.67	0.069	3.88	0.045
		10000	135.89	0.047	3.80	0.044
		15000	173.63	0.060	3.68	0.047
	$LSD_{0.05}$		*54.34*	*0.0718*	*0.5228*	*0.0092*

کمبود فشار بخار بر اساس دمای برگ

جدول تجزیه واریانس نشان داد اثر اصلی محلول‌پاشی سرکه چوب برای صفت مذکور در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۵). جدول مقایسه میانگین اثر اصلی محلول‌پاشی سرکه مشخص کرد بیشترین کمبود فشار بخار بر اساس دمای برگ با ۲۲/۲۱ کیلوپاسکال در تیمار عدم محلول‌پاشی حاصل شد از طرف دیگر کمترین میزان کمبود فشار بخار بر اساس دمای برگ با ۲۰/۷۹ کیلوپاسکال در محلول‌پاشی با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام ثبت شد (جدول ۸). با افزایش غلظت سرکه چوب کمبود فشار بخار کاهش‌یافته درنتیجه دمای برگ در اثر افزایش میزان فتوسنتز افزایش‌یافته که مشخص می‌کند، سرکه چوب سرعت فتوسنتز در برگ را افزایش می‌دهد.

جدول ۸. مقایسه میانگین‌های اثر اصلی محلول‌پاشی سرکه چوب روی صفات درصد روغن، CO_2 بین سلولی، میزان تعرق و کمبود فشار بخار بر اساس دمای برگ

Table 8. Mean comparison of the main effect of wood vinegar spraying on oil percentages, Intercellular CO_2 concentration, Transpiration rate and Vapor pressure deficit based on Leaf temp.

سرکه چوب Wood vingar	درصد روغن oil percentages	CO_2 بین سلولی Intercellular CO_2 concentration	میزان تعرق Transpiration rate	کمبود فشار بخار بر اساس دمای برگ Vapor pressure deficit based on Leaf temp
ppm	%	mmol CO_2.mol^{-1}	mmol H_2O.m^{-2}.s^{-1}	kPa
0	25.13	187.11	1.150	22.21
5000	27.35	180.78	1.288	21.84
10000	26.98	171.77	1.350	21.39
15000	28.12	165.94	1.277	20.79
$LSD_{0.05}$	1.4463	14.398	0.1147	0.6911

جدول ۹. مقایسه میانگین‌های اثر اصلی رژیم‌های آبیاری روی صفات درصد روغن و میزان تعرق

Table 9. Mean comparison of the main effect of irrigation regimes on the oil percentages and Transpiration rate.

رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	درصد روغن oil percentages	میزان تعرق Transpiration rate
	%	mmol H_2O.m^{-2}.s^{-1}
آبیاری مطلوب **Optimal irrigation**	31.06	1.46
تنش کم‌آبیاری ملایم **Mild water deficit stress**	27.42	1.35
تنش کم آبیاری متوسط **Moderate water deficit stress**	26.21	1.23
تنش کم آبیاری شدید **Severe water deficit stress**	22.90	1.02
$LSD_{0.05}$	*1.7474*	*0.1767*

همبستگی بین صفات کاملینا

آنالیز همبستگی بین صفات کاملینا مشخص کرد که عملکرد دانه با شاخص سطح برگ **۰/۶۵، درصد روغن **۰/۷۷، عملکرد روغن **۰/۹۶، میزان فتوسنتز **۰/۷۴، هدایت روزنه **۰/۶۸، میزان تعرق **۰/۶۵ و بهره‌وری آب بر اساس عملکرد دانه ۰/۴۳ همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد و از طرفی با CO_2 بین سلولی **۰/۷۹- و کمبود فشار بخار بر اساس دمای برگ **۰/۷۲- همبستگی منفی معنی‌دار نشان داد. در شرایط نرمال و تنش خشکی عملکرد دانه با وزن خشک ساقه، میزان توزیع مجدد و میزان فتوسنتز جاری همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد (Nouriyani, 2015).

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج نشان داد که رژیم‌های آبیاری، کاربرد زئولیت و سرکه چوب تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر صفات عملکرد دانه، عملکرد روغن، سرعت فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای کاملینا دارند. بیشترین شاخص سطح برگ با ۰/۴۰ در تیمار آبیاری مطلوب، کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۵۰۰۰ پی‌پی‌ام به دست آمد. بالاترین بهره‌وری آب بر اساس عملکرد دانه و روغن در تیمار کم‌آبیاری شدید، عدم کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام مشاهده شد. میزان سرعت فتوسنتز نیز در تیمار آبیاری مطلوب، کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام بیشتر از سایر تیمارها بود. با توجه به نتایج این پژوهش، استفاده از زئولیت و محلول‌پاشی ۱۵۰۰۰

پی‌پی‌ام سرکه چوب به دلیل افزایش عملکرد به‌عنوان بهترین تیمار معرفی می‌شود. همچنین، در شرایط کم‌آبیاری ملایم و متوسط نیز کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام سرکه چوب و کم‌آبیاری شدید عدم کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام توصیه می‌شود.

جدول ۱۰. ضرایب همبستگی بین صفات کاملینا

Table 10. Correlation coefficient between Camelina traits

	Traits	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	شاخص سبزینگی SPAD	1.00										
2	شاخص سطح برگ LAI	0.49**	1.00									
3	عملکرد دانه Grain yield	0.27	0.65**	1.00								
4	درصد روغن Oil percent	0.45**	0.82**	0.77**	1.00							
5	عملکرد روغن Oil yield	0.36*	0.74**	0.96**	0.89**	1.00						
6	سرعت فتوسنتز Photosynthetic rate	0.42*	0.86**	0.74**	0.91**	0.84**	1.00					
7	هدایت روزنه‌ای Conductance to H_2O	0.22	0.72**	0.68**	0.83**	0.76**	0.85**	1.00				
8	CO_2 بین سلولی Intercellular CO_2 concentration	-0.40*	-0.67**	-0.79**	-0.77**	-0.83**	-0.74**	-0.67**	1.00			
9	میزان تعرق Transpiration rate	0.34	0.73**	0.65**	0.87**	0.76**	0.89**	0.79**	-0.67**	1.00		
10	کمبود فشار بخار Vapor pressure deficit	-0.31	-0.62**	-0.72**	-0.81**	-0.79**	-0.75**	-0.74**	0.68**	0.70**	1.00	
11	بهره‌وری آب بر اساس عملکرد دانه WUE (Grain yield)	0.25	0.10	0.43**	0.15	0.35*	0.12	-0.08	-0.27	0.01	-0.08	1.00
12	بهره‌وری آب بر اساس عملکرد روغن WUE (Oil yield)	0.00	-0.33	-0.01	-0.39*	-0.15	-0.37*	-0.51**	0.12	-0.46**	0.36*	0.79**

عدم معنی‌داری، * و **به‌ترتیب معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد

No sign, *and ** show no correlation and correlation at 5% and 1% level, respectively.

منابع

Abedi, A.M., Modarres-Sanavy, S.A.M., Heidarzadeh, A. 2025. Study of yield and yield components of camelina (*Camelina sativa* L.) under water deficit stress with the application of zeolite and wood vinegar. Journal of Plant Productions. 48(1), 21-38. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22055/ppd.2024.46482.2155

Ahadiyat, Y.R., Hadi, S.N., Herliana, O. 2018. Application of wood vinegar coconut shell and NPK fertilizer to maintain sustainable agriculture of upland rice production. Journal of Degraded and Mining Lands Management. 5(3), 1245. https://doi.org/10.15243/jdmlm.2018.053.1245

Akpinar, A., Cansev, A., 2022. Physiological and molecular responses of roots differ from those of leaves in spinach plants subjected to short-term drought stress. South African Journal of Botany. 151, 9-17. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.09.032

Amini-Pak Soltani, S., Modarres-Sanavy, S. A. M., Sadat Asylan, K., 2022. The effect of wood

vinegar and biochar on the quantitative and qualitative yield of soybean in water shortage condition. Environmental Stresses in Crop Sciences, 15, 907-920. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22077/escs.2021.4142.1977

Amiri, H., Ghalavand, A., Mokhtassi-Bidgoli, A., 2021. Growth, seed yield and quality of soybean as affected by integrated fertilizer managements and zeolite application. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 52, 1834-1851. https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1900222

Ayan, S., Yahyaoglu, Z., Gercek, V., Şahin, A., 2005. Utilization of zeolite as a substrate for containerized oriental spruce (*Picea orientalis* L.) seedlings propagation. pp. 583-590. International Symposium on Growing Media. 4 Sep 2005. Angers, France. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.779.75

Bass, A. M., Bird, M. I., Kay, G., Muirhead, B., 2016. Soil properties, greenhouse gas emissions and crop yield under compost, biochar and co-composted biochar in two tropical agronomic systems. Science of the Total Environment. 550, 459-470. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.143

Bista, D.R., Heckathorn, S.A., Jayawardena, D.M., Mishra, S., Boldt, J.K., 2018. Effects of drought on nutrient uptake and the levels of nutrient-uptake proteins in roots of drought-sensitive and-tolerant grasses. Plants. 7, 28. https://doi.org/10.3390/plants7020028

Bybordi, A., Saadat, S., Zargaripour, P., 2018. The effect of zeolite, selenium and silicon on qualitative and quantitative traits of onion grown under salinity conditions. Archives of Agronomy and Soil Science. 64, 520-530. https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1373278

Cataldo, E., Salvi, L., Paoli, F., Fucile, M., Masciandaro, G., Manzi, D., Mattii, G.B., 2021. Application of zeolites in agriculture and other potential uses: A review. Agronomy. 11, 1547. https://doi.org/10.3390/agronomy11081547

Dissatian, A., Sanitchon, J., Pongdontri, P., Jongrungklang, N., Jothityangkoon, D., 2018. Potential of wood vinegar for enhancing seed germination of three upland rice varieties by suppressing malondialdehyde production. Journal of Agricultural Science. 40, 371-380. https://doi.org/10.17503/agrivita.v40i2.1332

Feller, U., 2016. Drought stress and carbon assimilation in a warming climate: Reversible and irreversible impacts. Journal of Plant Physiology. 203, 84-94. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.04.002

Ghassemi-Golezani, K., Lotfi, R., 2013. Influence of water stress and pod position on oil and protein accumulation in soybean grains. International Journal of Agronomy and Plant Production. 4, 2341-2345.

Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Khodaei-Joghan, A., Dolatabadian, A., Zakikhani, H., Farmanbar, E., 2013. Zeolite-amended cattle manure effects on sunflower yield, seed quality, water use efficiency and nutrient leaching. Soil and Tillage Research. 126, 193-202. https://doi.org/10.1016/j.still.2012.08.002

He, Z.L., Calvert, D.V., Alva, A.K., Li, Y.C., Banks, D.J. 2002. Clinoptilolite zeolite and cellulose amendments to reduce ammonia volatilization in a calcareous sandy soil. Plant and Soil. 247, 253-260. https://doi.org/10.1023/A:1021584300322

Jabran, K., Ullah, E., Akbar, N., Yasin, M., Zaman, U., Nasim, W., Hussain, M., 2017. Growth and physiology of basmati rice under conventional and water-saving production systems. Archives of Agronomy and Soil Science. 63, 1465-1476. https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1285014

JianGuo Qi, J., Sun, S., Yang, L., Li, M., Ma, F., Zou, Y. 2019. Potassium uptake and transport in apple roots under drought stress. Horticultural Plant Journal. 5(1), 10-16. https://doi.org/10.1016/j.hpj.2018.10.001

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

Kavoosi, M., 2007. Effects of zeolite application on rice yield, nitrogen recovery, and nitrogen use efficiency. Communications in Soil Science and Plant analysis, 38, 69-76.

Khalil, N., Fekry, M., Bishr, M., El-Zalabani, S., Salama, O., 2018. Foliar spraying of salicylic

acid induced accumulation of phenolics, increased radical scavenging activity and modified the composition of the essential oil of water stressed (*Thymus vulgari* L.) Plant Physiology and Biochemistry. 123, 65-74. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.12.007

Kiani, A., 2015. Guidelines for Water Efficiency In farms, Agricultural Research, Education and Promotion Organization, Tehran. [In Persian]

Kunmiao, Z., Sicheng, G., Jiahuan, L., Tao, L., Zaid, K., Kangkang, Z., Liyong, H., 2021. Wood vinegar as a complex growth regulator promotes the growth, yield, and quality of rapeseed. Agronomy. 11, 510. https://doi.org/10.3390/agronomy11030510

Lamaoui, M., Jemo, M., Datla, R., Bekkaoui, F., 2018. Heat and drought stresses in crops and approaches for their mitigation. Frontiers in Chemistry. 6, 26. https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00026

Maleki Nejad, R. Majidi, M.M., 2015. Evaluation of Iranian and foreign safflower germplasms under normal and drought stress conditions. Journal of Crop Breeding. 7, 1-13. [In Persian with English Summary]. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286128.1394.7.15.1.1

Martin, G.A., Viskoohil, D., Bollag, G., McCabe, P.C., Crosier, W.J., Haubruck, H., McCormick, F., 1990. The GAP-related domain of the neurofibromatosis type 1 gene product interacts with ras p21. Cell. 63, 843-849.

Momeni-Shijani, K. , Modarres-Sanavy, S.A.M., Heidarzadeh, A., Abedi, A.M., 2024. Study of photosynthetic pigments, seed yield and oil compositions of camelina (*Camelina sativa* L.) under the influence of urea foliar application and irrigation regimes in Tehran. Plant Productions. 47(3), 387-403. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22055/ppd.2024.46765.2161

Mottaghi, L., Allahdadi, I., Shirani-rad, A.H., Akbari, G.A., Hasanloo, T., 2014. The effect of zeolite on yield and yield components of rapeseed under drought conditions. Journal of Crops Improvement, 16, 381-397. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22059/jci.2014.53050

Nakabayashi, R., Saito, K., 2015. Integrated metabolomics for abiotic stress responses in plants. Current Opinion in Plant Biology. 24, 10–16. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.01.003

Nakhli, S.A.A., Delkash, M., Bakhshayesh, B.E., Kazemian, H., 2017. Application of zeolites for sustainable agriculture: a review on water and nutrient retention. Water, Air, and Soil Pollution. 228, 1-34. https://doi.org/10.1007/s11270-017-3649-1

Nouriyani, H., 2015. Effect of Paclobutrazol on the redistribution of assimilates to seed in three varieties of wheat (*Triticum aestivum* L.) under heat stress conditions. Journal of Crop Physiology. 7, 89-104. [In Persian with English Summary]. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008403.1394.7.25.7.2

Nurhayati, T., Roliadi, H., Bermawie, N., 2005. Production of mangium (*Acacia mangium*) wood vinegar and its utilization. Indonesian Journal of Forestry Research. 2, 13-25. https://doi.org/10.20886/ijfr.2005.2.1.13-25

Rahimi, T., Kahrizi, D., Feyzi, M., Ahmadvandi, H.R., Mostafaei, M., 2021. Catalytic performance of MgO/Fe_2O_3-SiO_2 core-shell magnetic nanocatalyst for biodiesel production of *Camelina sativa* seed oil: Optimization by RSM-CCD method. Industrial Crops and Products. 159, 113065. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113065

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

Shirani Rad, A.H., Jabbari, H., Dehshiri, A., 2013. Evaluation of spring rapeseed cultivars response to spring and autumn planting seasons. Iranian Journal of Field Crops Research. 11, 493. 2527-2532. [In Persian with English Summary].

Song, X., Zhou, G., He, Q., 2021. Critical leaf water content for maize photosynthesis under drought stress and its response to rewatering. Sustainability. 13, 7218. https://doi.org/10.3390/su13137218

Tanveer, S., Akhtar, N., Ilyas, N., Sayyed, R.Z., Fitriatin, B.N., Perveen, K., Bukhari, N.A., 2023. Interactive effects of *Pseudomonas putida* and salicylic acid for mitigating drought tolerance in canola (*Brassica napus* L.). Heliyon. 9(3) , 14193-14193. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14193

Vanclooster, M., Viaene, P., Diels, J. Chistiaens, K., 1994. WAVE, A Mathematical Model for Simulating Water and Agrochemicals in the Soil and Vadose Environment. Release 2.1. Katholieke Universiteit Leuven. 154 p.

Varga, B., Vida, G., Varga- László, E., Bencze, S., Veisz, O., 2015. Effect of simulating drought in various phenophases on the water use efficiency of winter wheat. Journal of Agronomy and Crop Science. 201, 1-9. https://doi.org/10.1111/jac.12087

Wang, Q., Awasthi, M.K., Ren, X., Zhao, J., Li, R., Wang, Z., Zhang, Z., 2018. Combining biochar, zeolite and wood vinegar for composting of pig manure: The effect on greenhouse gas emission and nitrogen conservation. Waste Management. 74, 221-230. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.015

Yaseen, M. E., Fahmy, F. I., 2021. Effect of some soil amendments on productivity of olive trees incalcareous soil. Middle East Journal of Agriculture Research. 10(04), 1378-1394. https://doi.org/10.36632/mejar/2021.10.4.94

Yuan, L., Li, R., 2020. Metabolic engineering a model oilseed *Camelina sativa* for the sustainable production of high-value designed oils. Frontiers in Plant Science. 11, 11–24. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00011

Zahedi, H., Sharghi, Y., 2019. Effect of some organic fertilizers on yield and yield components of barley. Agroecology Journal. 15 [In Persian with English summary] https://doi.org/10.22034/aej.2019.1873806.1106

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

Zhai, M., Shi, G., Wang, Y., Mao, G., Wang, D., Wang, Z., 2015. Chemical compositions and biological activities of pyroligneous acids from walnut shell. BioResources. 10, 1715–1729. https://doi.org/10.15376/biores.10.1.1715-1729

Zheng, J., Chen, T., Xia, G., Chen, W., Liu, G., Chi, D., 2018. Effects of zeolite application on grain yield, water use and nitrogen uptake of rice under alternate wetting and drying irrigation. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 11, 157-164. DOI: 10.25165/j.ijabe.20181101.3064

Zhu, K., Gu, S., Liu, J., Luo, T., Khan, Z., Zhang, K., Hu, L., 2021. Wood vinegar as a complex growth regulator promotes the growth, yield, and quality of rapeseed. Agronomy. 11, 510.

https://doi.org/10.3390/agronomy11030510

Zhu, K., Liu, J., Luo, T., Zhang, K., Khan, Z., Zhou, Y., Hu, L. 2022. Wood vinegar impact on the growth and low-temperature tolerance of rapeseed seedlings. Agronomy. 12(10), 2453. https://doi.org/10.3390/agronomy12102453