

## 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

A. M. Abedi<sup>1</sup>, S.A.M. Modarres-Sanavy<sup>2\*</sup>, A. Heidarzadeh<sup>3</sup>

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; 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

\* Corresponding author: Seyed Ali Mohammad Modarres-Sanavy; E-Mail: [modaresa@modares.ac.ir](mailto:modaresa@modares.ac.ir)



water deficit, zeolite application, and wood vinegar foliar spray with a concentration of 5,000 ppm. 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

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

امیرمحمد عابدی<sup>۱</sup>، سید علی محمد مدرس‌ثانوی<sup>۲\*</sup>، علی حیدرزاده<sup>۳</sup>

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    | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| واژه‌های کلیدی: | این آزمایش به منظور بررسی کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب در شرایط تنش کم‌آبی روی بهره‌وری آب، خصوصیات فیزیولوژیک و عملکرد روغن کاملینا به صورت کرت‌های خردشده فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس در سال زراعی ۱۴۰۱-۰۲ در سه تکرار اجرا شد. عوامل مورد بررسی شامل رژیم‌های آبیاری (آبیاری مطلوب، کم‌آبیاری ملایم، متوسط و شدید به ترتیب بعد از تخلیه ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد آب قابل استفاده و سپس آبیاری تا حد ظرفیت مزرعه) به عنوان فاکتور اصلی، زئولیت در دو سطح (صفر و هشت تن بر هکتار) و سرکه چوب در چهار سطح (صفر، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام) که به منظور اثربخشی بهینه‌تر، در چهار مرحله مختلف از رشد گیاه انجام شد به صورت 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 مترمربع 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 به عنوان 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. |
| بهره‌وری آب     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| سرعت فتوسنتز    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| شاخص سطح برگ    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| عملکرد دانه     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| عملکرد روغن     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| تاریخ دریافت:   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| ۱۴۰۲/۱۲/۲۱      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| تاریخ پذیرش:    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| ۱۴۰۳/۰۲/۳۱      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

### مقدمه

ایران از نظر جغرافیایی در منطقه خشک و نیمه‌خشک واقع شده و در نتیجه 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

وجود بحران آب، همراه با واردات قابل توجه روغن و دانه‌های روغنی و خروج قابل توجه ارز، نیاز فوری برای معرفی گیاه دانه روغنی با مصرف کم نهاده ایجاد کرده است. کاملینا (*Camelina sativa* L.) در سراسر جهان به عنوان یک محصول دانه روغنی کم‌نهاده که در طیف وسیعی از شرایط زراعی و محیطی کشت می‌شود، شناخته شده است. کشور

زراعت‌های بهاره و تابستانه تخصیص می‌دهند. این دسترسی محدود منابع آب در نتیجه منجر به کمبود آب برای گیاه 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 غشاهای، تغییر ترکیب غشاهای و تغییرات اسمزی سلول می‌گردد. این تغییرات سبب تخریب ساختار کلی غشا، خاصیت انتخابی غشا و در نهایت از بین رفتن سلول می‌شود (Wang et al., 2018). تنش خشکی باعث القای کمبود آب در گیاه، تغییر در وضعیت تغذیه‌ای گیاه، تغییر pH شیره‌ای آوند چوبی، هدایت هیدرولیکی آوند چوبی و کاهش اختلاف فشار بخار بین برگ و هوا شده و بر اثر این تغییرات روزه‌های 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 ناپایدار 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 ۳-ω، اسیدهای ۶-ω، توکوفرول‌ها، فیتواسترول‌ها و ترکیبات فنلی است. تغذیه انسان، خوراک دام و طیور، تولید بیودیزل و استفاده در صنعت پلیمرهای زیستی از جمله 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 در نتیجه 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 در نهایت دسترسی بیشتر نیتروژن در اندام‌های تولیدمثلی می‌شود (Amiri et al., 2021). افزایش قابل توجه میزان فتوسنتز در مرحله گلدهی در پاسخ به کاربرد زئولیت ممکن است عملکرد دانه را به دلیل افزایش سنتر 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 از جمله استون، فنل، اسید استیک، متانول، اتانول و اسید فورمیک است (Zhai et al., 2015). استفاده از سرکه چوب منجر به افزایش قابل توجه 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 ۵۱°/۱۰' طول شرقی و ۳۵°/۴۴' 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، کم آبیاری ملایم، متوسط و شدید به ترتیب بعد از تخلیه (جذب در منطقه ریشه یا تبخیر) ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد آب قابل استفاده و سپس آبیاری تا حد ظرفیت مزرعه) در کرت های اصلی و زئولیت طبیعی از نوع کلینوپتیلولیت تهیه شده از شرکت فتح البرز دامغان با دو سطح (۱- بدون کاربرد زئولیت، ۲- ۰ ton.ha<sup>-1</sup>؛ ۲- هشت تن بر

جدول ۱. مشخصات فیزیکوشیمیایی زئولیت استفاده شده

Table 1. Physicochemical characteristics of the used Zeolite

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

جدول ۲. مشخصات فیزیکوشیمیایی سرکه چوب استفاده شده

Table 2. Physicochemical characteristics of the used Wood Vingar

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

از رقم اصلاحی داخلی سهیل (DH102)، شرکت دانش بنیان بیستون به عنوان بذر مورد استفاده 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 بوته ها روی هر خط پنج سانتی متر و به منظور جلوگیری از اختلاط اثر هر یک از تیمارها، فاصله بین تکرارها (بلوک ها) دو متر و فاصله بین کرت های اصلی درون هر تکرار، یک متر در نظر گرفته شد. کاشت به صورت دستی در تاریخ ۲۰ مهرماه سال ۱۴۰۱ و بذرها در عمق یک سانتی متری خاک کاشته شد.

آبیاری به صورت نواری قطره ای با ضخامت حدود ۱۷۵ تا ۲۰۰ میکرون و فاصله روزنه قطره چکان ۲۰ سانتی متر 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 کرت هایی که بر اساس نقشه آزمایش دارای زئولیت هستند، به طور یکنواخت بر روی سطح خاک پخش و سپس با خاک مخلوط شد. محلول پاشی سرکه چوب به منظور اثربخشی بهینه تر، در چهار مرحله مختلف از

هکتار، ۸ ton.ha<sup>-1</sup>) و سرکه چوب به دست آمده از روش پیرولیز با چهار سطح (۱- بدون کاربرد سرکه چوب، ۰ ppm؛ ۲- کاربرد غلظت ۵۰۰۰ ppm؛ ۳- کاربرد غلظت ۱۰۰۰۰ ppm؛ و ۴- کاربرد غلظت ۱۵۰۰۰ ppm) به صورت ترکیب فاکتوری در کرت های فرعی قرار گرفتند.

رشد گیاه (۱- ده روز قبل از گلدهی ۲- ظهور گل آذین ۳- گلدهی کامل ۴- میوه دهی) انجام گرفت. جهت تعیین شاخص سطح برگ با حذف اثرات حاشیه، از هر کرت پنج بوته برداشت و با استفاده از دستگاه اندازه گیری سطح برگ مدل DELTA-TDEVICES ساخت کشور انگلستان اندازه گیری شد. سپس با استفاده از معادله (۱)، سطح برگ که هر گیاه در زمین اشغال کرده محاسبه شد.

$$LAI = \frac{LA}{Ga} \quad [1]$$

LA نمایانگر سطح برگ اندازه گیری شده به واحد سانتی متر مربع است و Ga نمایانگر سطح زمینی است که از آن نمونه برداری انجام شده به واحد سانتی متر مربع 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. شاخص های تبادل گازی با استفاده از دستگاه LI-6400 (Li-Cor، ایالات متحده) اندازه گیری شدند. برای ارزیابی عملکرد دانه و روغن در انتهای فصل رشد با در نظر گرفتن اثر حاشیه، ۱۰ گیاه که نماینده هر کرت بودند به طور تصادفی انتخاب و مورد ارزیابی قرار

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

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

$$D (\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_{ci} - \theta_i}{F_{ci} - W_p} \times 100 \quad [2]$$

در این معادله n تعداد نمونه خاک گرفته شده از عمق مؤثر توسعه ریشه، F<sub>ci</sub> رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه در نمونه i، θ<sub>i</sub> رطوبت خاک در نمونه i و W<sub>p</sub> رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم

$$[3] \quad 100 - D = \text{درصد تخلیه آب قابل استفاده}$$

از مقایسه رطوبت های اندازه گیری شده به وسیله حسگرها با روش نمونه برداری و توزین، اعتبارسنجی صورت گرفت (Vanclouster et al., 1994).

بهره وری آب (تولید دانه به کیلوگرم از هر مترمکعب آب مصرفی)، شامل اندازه گیری 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.

$$WP = \frac{Y}{I+P} \quad [4]$$

WP بهره وری 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، برش دهی بر اساس رژیم های 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 سبزیگی

اثر متقابل آبیاری و محلول پاشی سرکه چوب در سطح احتمال پنج درصد و اثر اصلی کاربرد ژئولیت در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی داری روی شاخص سبزیگی داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین های اثر اصلی ژئولیت نشان داد کاربرد ژئولیت با ۴۹/۵۶ اسید باعث افزایش شاخص سبزیگی نسبت به عدم کاربرد ژئولیت (۴۷/۲۷) شد (شکل ۲).

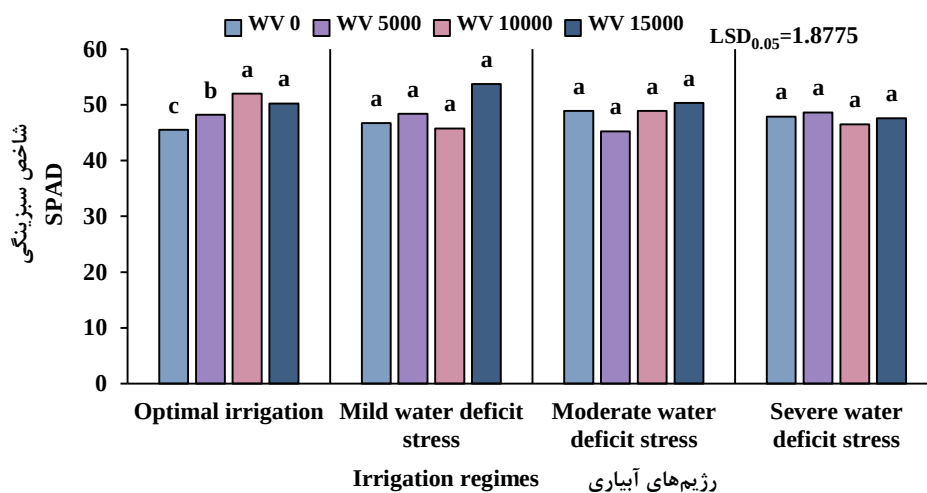
جدول ۳. آنالیز واریانس (میانگین مربعات) صفات فیزیولوژیکی، عملکرد دانه و بهره وری آب

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 سبزیگی SPAD      | شاخص سطح              |                         | بهره وری آب بر اساس عملکرد دانه WUE |
|------------------------|------------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------------|
|                        |                              |               |                       | برگ LAI               | عملکرد دانه Grain yield |                                     |
| Block                  | بلوک                         | 2             | 0.00038 <sup>ns</sup> | 0.00078 <sup>ns</sup> | 48239.88*               | 0.64*                               |
| Irrigation regimes (I) | رژیم های آبیاری              | 3             | 0.00095 <sup>ns</sup> | 0.046**               | 913690.17**             | 5.829**                             |
| Error (a)              | خطای کرت اصلی                | 6             | 0.00212 <sup>ns</sup> | 0.0029 <sup>ns</sup>  | 5095.49 <sup>ns</sup>   | 0.115 <sup>ns</sup>                 |
| Zeolite (Z)            | ژئولیت                       | 1             | 0.016**               | 0.03**                | 122864.94**             | 0.879*                              |
| Foliar Application (F) | محلول پاشی                   | 3             | 0.0057*               | 0.0078**              | 100102.75**             | 1.556**                             |
| F*Z                    | ژئولیت × محلول پاشی          | 3             | 0.00024 <sup>ns</sup> | 0.0032 <sup>ns</sup>  | 63956.43**              | 0.464 <sup>ns</sup>                 |
| I*Z                    | آبیاری × ژئولیت              | 9             | 0.0022 <sup>ns</sup>  | 0.0039 <sup>ns</sup>  | 28587.56 <sup>ns</sup>  | 0.148 <sup>ns</sup>                 |
| I*F                    | آبیاری × محلول پاشی          | 3             | 0.0042*               | 0.0092**              | 48769.01**              | 0.733**                             |
| I*Z*F                  | آبیاری × ژئولیت × محلول پاشی | 9             | 0.002 <sup>ns</sup>   | 0.0036*               | 43663.96**              | 0.499**                             |
| Error (b)              | خطای کرت فرعی                | 56            | 0.0018 <sup>ns</sup>  | 0.0016 <sup>ns</sup>  | 15040.18 <sup>ns</sup>  | 0.176 <sup>ns</sup>                 |
| CV (%)                 | ضریب تغییرات                 |               | 45.1                  | 49.15                 | 14.13                   | 13.66                               |

ns, \* و \*\* به ترتیب عدم معنی داری و معنی دار در سطح ۵ و ۱ درصد

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



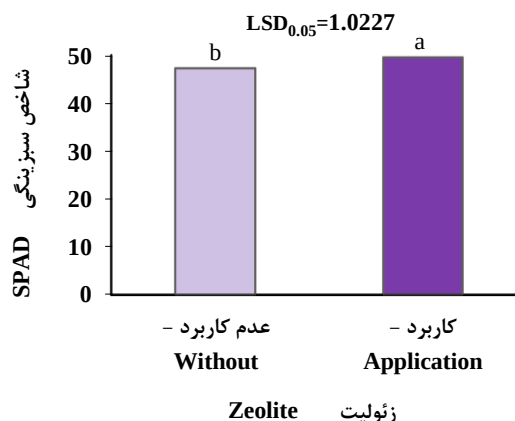
شکل ۱. مقایسه میانگین‌های شاخص سبزیگی کاملینا تحت تأثیر رژیم‌های آبیاری و محلول‌پاشی سرکه چوب

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

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 در نتیجه شاخص سبزیگی 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 ۱۵۰۰ پی‌پی‌ام حاصل شد. سایر سطوح آبیاری از لحاظ آماری تفاوت معناداری نداشتند (جدول ۴). 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 در نتیجه از بزرگ شدن سلول‌ها و رشد برگ جلوگیری می‌کند. از این‌رو زئولیت به دلیل توانایی ذخیره و نگهداشت آب در ساختار خود، قادر به بهبود سطح برگ در



شکل ۲. مقایسه میانگین‌های شاخص سبزیگی تحت تیمار زئولیت

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

در سطح آبیاری مطلوب، بیشترین شاخص سبزیگی در محلول‌پاشی ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام سرکه چوب مشاهده شد که با محلول‌پاشی ۱۵۰۰ پی‌پی‌ام در یک گروه آماری قرار گرفت در حالی که 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



زمان تنش کم آبی است (Gholamhoseini et al., 2013). کاربرد ژئولیت به طور قابل توجهی باعث افزایش شاخص سطح برگ (LAI) می شود (Zheng et al., 2018). یکی از ویژگی های سرکه چوب، وجود ترکیبات متانول و فرفورال در آن است که می توانند سرعت رشد گیاه را بهبود ببخشند. درواقع افزایش سطح برگ در زمان تنش را می توان به ترکیبات سرکه چوب که باعث تحریک رشد رویشی می شوند 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 سه گانه رژیم های آبیاری، ژئولیت و سرکه چوب در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). مقایسه میانگین های اثر سه گانه رژیم های آبیاری، ژئولیت و سرکه چوب نشان داد که در آبیاری مطلوب بیشترین عملکرد دانه، در کاربرد ژئولیت و عدم کاربرد سرکه چوب به دست آمد که با کاربرد ژئولیت، محلول پاشی سرکه چوب با

غلظت ۱۵۰۰ پی پی ام در همین تیمار آبیاری (۱۳۵۰/۸۹ کیلوگرم در هکتار) تفاوت معنی داری نداشت. در کم آبیاری شدید با ۹۵۱/۳۶ کیلوگرم در هکتار، عدم کاربرد ژئولیت، محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰ پی پی ام بیشترین عملکرد را به دست آورد. سایر رژیم های آبیاری از لحاظ آماری تفاوت معنی داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۴). هنگامی که گیاه در مرحله رشد خورجین ها، با کمبود آب مواجه گردد، انتقال مواد غذایی از منابع به دانه ها کم شده و باعث کاهش عملکرد می شود که این کاهش عملکرد متأثر از تعداد و اندازه خورجین ها است. درواقع می توان گفت که این کاهش عملکرد ناشی از کاهش اجزای عملکرد از جمله 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 ژئولیت با نیتروژن نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی داری 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 بهره وری آب  
Table 4. Variance analysis (Mean of squares) of oil percent, oil yield and water use efficiency

| S.O.V                  | منابع تغییرات                | درجه آزادی | درصد روغن<br>Oil percent | عملکرد روغن<br>Oil yield | بهره وری آب بر اساس<br>عملکرد روغن<br>WUE |
|------------------------|------------------------------|------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|
| Block                  | بلوک                         | 2          | 2.70 <sup>ns</sup>       | 5186.20*                 | 0.00041*                                  |
| Irrigation regimes (I) | رژیم های آبیاری              | 3          | 272.68**                 | 167954.58**              | 0.0004*                                   |
| Error (a)              | خطای کرت اصلی                | 6          | 6.11 <sup>ns</sup>       | 835.08 <sup>ns</sup>     | 0.00006 <sup>ns</sup>                     |
| Zeolite (Z)            | ژئولیت                       | 1          | 61.88**                  | 30920.67**               | 0.00129**                                 |
| Foliar Application (F) | محلول پاشی                   | 3          | 38.64**                  | 17082.90**               | 0.00077**                                 |
| F*Z                    | ژئولیت × محلول پاشی          | 3          | 2.64 <sup>ns</sup>       | 5586.01*                 | 0.00021 <sup>ns</sup>                     |
| I*Z                    | آبیاری × ژئولیت              | 9          | 2.84 <sup>ns</sup>       | 4971.12*                 | 0.00016 <sup>ns</sup>                     |
| I*F                    | آبیاری × محلول پاشی          | 3          | 9.42 <sup>ns</sup>       | 2810.75 <sup>ns</sup>    | 0.00023*                                  |
| I*Z*F                  | آبیاری × ژئولیت × محلول پاشی | 9          | 3.07 <sup>ns</sup>       | 4616.46**                | 0.00021*                                  |
| Error (b)              | خطای کرت فرعی                | 56         | 6.25 <sup>ns</sup>       | 1476.55 <sup>ns</sup>    | 0.00009 <sup>ns</sup>                     |
| CV (%)                 | ضریب تغییرات                 |            | 9.29                     | 16.08                    | 19.79                                     |

ns، \* و \*\* به ترتیب عدم معنی داری و معنی دار در سطح ۵ و ۱ درصد

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

### بهره وری آب بر اساس عملکرد دانه

بر اساس جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل سه گانه رژیم های آبیاری، ژئولیت و سرکه چوب در سطح

احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). جدول مقایسه میانگین های اثر سه گانه تنش کم آبی، ژئولیت و سرکه چوب مشخص کرد که در آبیاری مطلوب بیشترین بهره وری آب

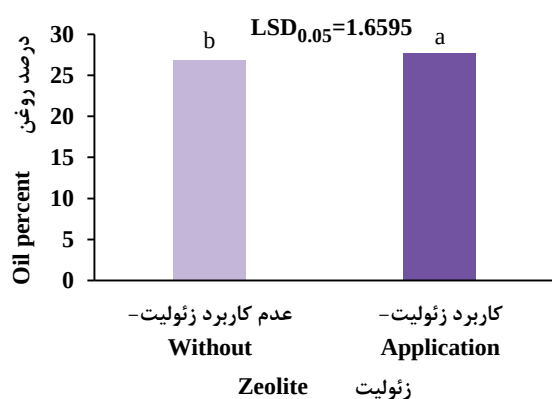


مختص به کاربرد زئولیت و عدم محلول پاشی سرکه چوب با ۰/۱۹۹ کیلوگرم دانه در مترمکعب آب و بعد از آن کاربرد زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی پی ام که از لحاظ آماری در یک گروه قرار می گیرند. میانگین های کم آبیاری ملایم و متوسط از نظر آماری اختلافی باهم نداشتند اما در کم آبیاری شدید بیشترین بهره وری آب در عدم کاربرد زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی پی ام دیده شد (جدول ۶). تنش خشکی موجب افزایش کارایی مصرف آب می شود. زئولیت ها می توانند 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 می بخشد همچنین کاربرد زئولیت با جلوگیری از هدر رفت نیتروژن باعث دسترسی طولانی مدت این عنصر و بهبود رشد گیاه و افزایش عملکرد علوفه و در نهایت افزایش راندمان مصرف آب شد (Karami et al., 2020).

### درصد روغن

جدول تجزیه واریانس نشان داد، اثرات اصلی رژیم های آبیاری، زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب در سطح معنی داری یک درصد برای صفت درصد روغن معنی دار شدند (جدول ۴). جدول مقایسه میانگین های اثر اصلی زئولیت نشان داد که کاربرد زئولیت می تواند تا ۵/۸۱ درصد، موجب بهبود درصد روغن در کاملینا شود (شکل ۳). بررسی جدول مقایسه میانگین های اثر اصلی تنش کم آبی مشخص کرد بیشترین درصد روغن در آبیاری مطلوب با ۳۱/۰۶ درصد و از طرفی کمترین درصد روغن در کم آبیاری شدید با ۲۲/۹ درصد به دست آمد (جدول ۹). همچنین از مقایسه میانگین های اثر اصلی محلول پاشی سرکه چوب مشخص شد که محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی پی ام بالاترین درصد روغن را با ۲۸/۱۲ درصد به خود اختصاص داده که از نظر آماری با غلظت های ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ در یک گروه آماری قرار می گیرند (جدول ۸). مهم ترین عاملی که برای کاهش درصد روغن دانه در تنش خشکی می توان عنوان کرد این است که

تنش خشکی، باعث بروز اختلال در پر شدن دانه ها می شود و طول دوره پر شدن دانه ها را کاهش می دهد؛ بنابراین فرصت برای تجمع پروتئین در دانه فراهم می شود و در نتیجه درصد روغن کاهش می یابد (Maleki Nejad and Majidi, 2015). در واقع توازن رطوبت در محیط ریشه به دلیل توانایی زئولیت در جذب آب بیشتر است. در نتیجه رشد و عملکرد گیاه افزایش می یابد (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 میانگین های درصد روغن تحت تأثیر اصلی زئولیت

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

### عملکرد روغن

برهمکنش رژیم های آبیاری، زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب تأثیر معناداری روی عملکرد روغن در سطح احتمال یک درصد گذاشت (جدول ۳). مقایسه میانگین های اثر سه گانه تنش کم آبی، زئولیت و سرکه چوب مشخص کرد که بیشترین عملکرد روغن در آبیاری مطلوب در تیمار کاربرد زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی پی ام به دست آمد. در کم آبیاری شدید عدم کاربرد زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی پی ام بالاترین عملکرد روغن (۲۱۲/۰۷ کیلوگرم در هکتار) را ثبت کرد. سایر سطوح کم آبیاری از لحاظ آماری تفاوت معنادار باهم نداشتند (جدول ۷). کمبود آب باعث کاهش معنی دار عملکرد روغن شد. به طور کلی 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 کم آبیاری ملایم و کم آبیاری متوسط از نظر آماری اختلافی باهم نداشتند اما در کم آبیاری 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. به‌طور کلی میزان کارایی مصرف آب با کاهش مصرف آب افزایش یافت این در حالی است که معمولاً در شرایط کم آبیاری 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 کم آبیاری متوسط، در تیمار کاربرد زئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام دیده شد و سایر سطوح کم آبیاری از لحاظ آماری تفاوت معنادار با یکدیگر نداشتند (جدول ۷). شرایط خشکی باعث بسته شدن روزنه‌های برگ گیاه می‌شود و مقدار CO<sub>2</sub> وارد شده به روزنه‌ها، کمتر از مقدار مورد نیاز برای فتوسنتز خواهد بود در نهایت، 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 کم آبیاری ملایم با میزان هدایت آب ۰/۰۸۵ مول H<sub>2</sub>O 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 از نظر آماری با یکدیگر نداشتند (جدول ۷). بسته شدن روزنه باعث کاهش فتوسنتز و تعرق می‌شود که درعین حال 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<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 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<sub>2</sub> بین سلولی

جدول تجزیه واریانس نشان داد، اثر اصلی محلول پاشی سرکه چوب برای این در سطح پنج درصد معنی دار شد (جدول ۵). جدول مقایسه میانگین‌های اثر اصلی محلول پاشی سرکه چوب مشخص کرد که بیشترین غلظت CO<sub>2</sub> بین سلولی در عدم محلول پاشی سرکه چوب با ۱۸۷/۱۱ میکرومول CO<sub>2</sub> در مول است از طرفی کمترین مقدار آن با ۱۶۵/۹۴ میکرومول CO<sub>2</sub> در مول در محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام است (جدول ۸). تنش خشکی باعث بسته شدن روزنه‌ها می‌شود که در نتیجه، نسبت CO<sub>2</sub> به O<sub>2</sub> را در برگ‌ها کاهش داده و از تثبیت CO<sub>2</sub> ممانعت می‌کند کاهش CO<sub>2</sub> بین سلولی، محدودیت CO<sub>2</sub> برای فتوسنتز را افزایش و سرعت فتوسنتز را کاهش می‌دهد (Akpınar and Cansev, 2022). سرکه چوب با افزایش سرعت فتوسنتز نسبت CO<sub>2</sub> به O<sub>2</sub> را در برگ‌ها کاهش داده و باعث کاهش غلظت CO<sub>2</sub> بین سلولی در برگ‌ها شده است.

#### میزان تعرق

بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی محلول پاشی سرکه چوب و رژیم‌های آبیاری برای این صفت در سطح یک درصد معنی دار شدند (جدول ۵). بر اساس جدول مقایسه میانگین‌های اثر اصلی رژیم‌های آبیاری بالاترین نرخ تعرق، در آبیاری مطلوب با ۱/۴۶ میلی‌مول H<sub>2</sub>O در مترمربع در ثانیه ثبت شد و کمترین میزان تعرق نیز در کم‌آبیاری شدید با ۱/۰۲ میلی‌مول H<sub>2</sub>O در مترمربع در ثانیه به دست آمد (جدول ۹). جدول مقایسه میانگین‌های اثر اصلی محلول پاشی سرکه چوب مشخص کرد که بالاترین نرخ تعرق با ۱/۳۵ میلی‌مول H<sub>2</sub>O در مترمربع در ثانیه در تیمار محلول پاشی با غلظت ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام مشاهده شد که با تیمارهای محلول پاشی ۵۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ در یک گروه از لحاظ 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). از آنجایی که 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                  | درجه آزادی<br>منابع تغییرات<br>df | سرعت فتوسنتز<br>Photosynthetic rate | هدایت روزنه<br>Conductance to H <sub>2</sub> O | CO <sub>2</sub> بین سلولی<br>Inter-cellular CO <sub>2</sub> concentration | میزان تعرق<br>Transpiration rate | کمبود فشار بخار بر اساس دمای برگ<br>Vapor pressure deficit |
|------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Block                  | 2                                 | 0.56 <sup>ns</sup>                  | 0.00451 <sup>**</sup>                          | 10689.91 <sup>ns</sup>                                                    | 0.165 <sup>ns</sup>              | 39.781 <sup>ns</sup>                                       |
| Irrigation regimes (I) | 3                                 | 18.72 <sup>**</sup>                 | 0.00531 <sup>**</sup>                          | 10335.54 <sup>ns</sup>                                                    | 0.837 <sup>**</sup>              | 27.928 <sup>ns</sup>                                       |
| Error (a)              | 6                                 | 0.55 <sup>ns</sup>                  | 0.00025 <sup>ns</sup>                          | 2275.99 <sup>ns</sup>                                                     | 0.062 <sup>ns</sup>              | 67.722 <sup>ns</sup>                                       |
| Zeolite (Z)            | 1                                 | 2.47 <sup>**</sup>                  | 0.00030 <sup>*</sup>                           | 1054.30 <sup>ns</sup>                                                     | 0.141 <sup>ns</sup>              | 3.322 <sup>ns</sup>                                        |
| Foliar Application (F) | 3                                 | 3.29 <sup>**</sup>                  | 0.00016 <sup>ns</sup>                          | 2117.31 <sup>*</sup>                                                      | 0.168 <sup>**</sup>              | 8.941 <sup>**</sup>                                        |
| F*Z                    | 3                                 | 0.07 <sup>ns</sup>                  | 0.00021 <sup>*</sup>                           | 1531.05 <sup>ns</sup>                                                     | 0.064 <sup>ns</sup>              | 1.118 <sup>ns</sup>                                        |
| I*Z                    | 9                                 | 0.92 <sup>**</sup>                  | 0.00026 <sup>*</sup>                           | 405.43 <sup>ns</sup>                                                      | 0.044 <sup>ns</sup>              | 0.291 <sup>ns</sup>                                        |
| I*F                    | 3                                 | 0.76 <sup>**</sup>                  | 0.00009 <sup>ns</sup>                          | 469.71 <sup>ns</sup>                                                      | 0.024 <sup>ns</sup>              | 0.708 <sup>ns</sup>                                        |
| I*Z*F                  | 9                                 | 0.85 <sup>**</sup>                  | 0.00019 <sup>**</sup>                          | 1112.93 <sup>ns</sup>                                                     | 0.027 <sup>ns</sup>              | 0.705 <sup>ns</sup>                                        |
| Error (b)              | 56                                | 0.21 <sup>ns</sup>                  | 0.00006 <sup>ns</sup>                          | 619.85 <sup>ns</sup>                                                      | 0.039 <sup>ns</sup>              | 1.428 <sup>ns</sup>                                        |

| CV (%) | ضریب تغییرات | 9.95 | 13.06 | 14.11 | 15.66 | 5.54 |
|--------|--------------|------|-------|-------|-------|------|
|--------|--------------|------|-------|-------|-------|------|

ns, \* و \*\* به ترتیب عدم معنی داری و معنی دار در سطح ۵ و ۱ درصد

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

جدول ۶. مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه زئولیت، محلول پاشی سرکه چوب و رژیم های آبیاری بر صفات فیزیولوژیکی، عملکرد دانه و بهره وری 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

| بهره‌وری آب                                          |                                                   |              |              |                     |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------|--------------|---------------------|
| آبیاری                                               | زئولیت                                            | سرکه چوب     | شاخص سطح برگ | عملکرد دانه         |
| Irrigation                                           | Zeolite                                           | Wood vinegar | LAI          | Grain yield         |
|                                                      | ton.ha <sup>-1</sup>                              | ppm          | -            | Kg.ha <sup>-1</sup> |
| آبیاری مطلوب<br>Optimal irrigation                   | 0                                                 | 0            | 0.23         | 1021.88             |
|                                                      |                                                   | 5000         | 0.38         | 1042.15             |
|                                                      |                                                   | 10000        | 0.35         | 1074.13             |
|                                                      |                                                   | 15000        | 0.23         | 1138.71             |
|                                                      | 8                                                 | 0            | 0.34         | 1396.76             |
|                                                      |                                                   | 5000         | 0.40         | 910.24              |
|                                                      |                                                   | 10000        | 0.32         | 1168.37             |
|                                                      |                                                   | 15000        | 0.37         | 1350.89             |
|                                                      | LSD <sub>0.05</sub>                               |              | 0.0387       | 155.98              |
|                                                      | تنش کم آبیاری ملایم<br>Mild water deficit stress  | 0            | 0            | 0.20                |
| 5000                                                 |                                                   |              | 0.24         | 850.69              |
| 10000                                                |                                                   |              | 0.25         | 911.43              |
| 15000                                                |                                                   |              | 0.30         | 730.02              |
| 8                                                    |                                                   | 0            | 0.28         | 823.90              |
|                                                      |                                                   | 5000         | 0.26         | 794.30              |
|                                                      |                                                   | 10000        | 0.30         | 934.68              |
|                                                      |                                                   | 15000        | 0.39         | 1057.74             |
| LSD <sub>0.05</sub>                                  |                                                   | 0.0246       | 313.54       |                     |
| تنش کم آبیاری متوسط<br>Moderate water deficit stress |                                                   | 0            | 0            | 0.24                |
|                                                      | 5000                                              |              | 0.23         | 673.97              |
|                                                      | 10000                                             |              | 0.20         | 755.40              |
|                                                      | 15000                                             |              | 0.28         | 860.98              |
|                                                      | 8                                                 | 0            | 0.21         | 880.38              |
|                                                      |                                                   | 5000         | 0.25         | 771.29              |
|                                                      |                                                   | 10000        | 0.27         | 792.82              |
|                                                      |                                                   | 15000        | 0.30         | 912.77              |
|                                                      | LSD <sub>0.05</sub>                               |              | 0.0994       | 138.32              |
|                                                      | تنش کم آبیاری شدید<br>Severe water deficit stress | 0            | 0            | 0.18                |
| 5000                                                 |                                                   |              | 0.18         | 623.28              |
| 10000                                                |                                                   |              | 0.25         | 951.36              |
| 15000                                                |                                                   |              | 0.18         | 763.04              |
| 8                                                    |                                                   | 0            | 0.23         | 528.11              |
|                                                      |                                                   | 5000         | 0.18         | 796.55              |
|                                                      |                                                   | 10000        | 0.23         | 604.34              |
|                                                      |                                                   | 15000        | 0.19         | 733.10              |
| LSD <sub>0.05</sub>                                  |                                                   | 0.0915       | 206.7        |                     |

جدول ۷. مقایسه میانگین بر همکنش سه‌گانه زئولیت، محلول پاشی 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<br>Irrigation                                    | زئولیت<br>Zeolite<br>ton.ha <sup>-1</sup> | سرکه چوب<br>Wood vinegar<br>ppm | عملکرد<br>روغن<br>oil yield<br>kg.ha <sup>-1</sup> | بهره‌وری آب<br>(عملکرد روغن)<br>WUE<br>kg.m <sup>-3</sup> | سرعت فتوسنتز<br>Photosynthetic<br>rate<br>μmol.CO <sub>2</sub> .m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> | هدایت روزنه‌ای<br>Conductance to<br>H <sub>2</sub> O<br>mol.H <sub>2</sub> O.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| آبیاری مطلوب<br>Optimal<br>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                                                                                                         |
|                                                         |                                           | 0                               | 419.00                                             | 0.060                                                     | 5.45                                                                                            | 0.082                                                                                                         |
|                                                         | 8                                         | 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 <sub>0.05</sub>                       |                                 | 63.68                                              | 0.0232                                                    | 0.9369                                                                                          | 0.0175                                                                                                        |
| تنش کم آبیاری ملایم<br>Mild water<br>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                                                                                                         |
|                                                         |                                           | 0                               | 215.39                                             | 0.038                                                     | 5.03                                                                                            | 0.082                                                                                                         |
|                                                         | 8                                         | 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 <sub>0.05</sub>                       |                                 | 88.80                                              | 0.0557                                                    | 1.0427                                                                                          | 0.0195                                                                                                        |
| تنش کم آبیاری متوسط<br>Moderate water<br>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                                                                                                         |
|                                                         |                                           | 0                               | 233.96                                             | 0.055                                                     | 3.87                                                                                            | 0.056                                                                                                         |
|                                                         | 8                                         | 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 <sub>0.05</sub>                       |                                 | 56.72                                              | 0.0325                                                    | 0.6768                                                                                          | 0.0083                                                                                                        |
| تنش کم آبیاری شدید<br>Severe water<br>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                                                                                                         |
|                                                         |                                           | 0                               | 114.73                                             | 0.040                                                     | 2.91                                                                                            | 0.039                                                                                                         |
|                                                         | 8                                         | 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 <sub>0.05</sub>                       |                                 | 54.34                                              | 0.0718                                                    | 0.5228                                                                                          | 0.0092                                                                                                        |

### کمبود فشار بخار بر اساس دمای برگ

جدول تجزیه واریانس نشان داد اثر اصلی محلول پاشی سرکه چوب برای صفت مذکور در سطح احتمال ۱٪ معنی دار شد (جدول ۵). جدول مقایسه میانگین اثر اصلی محلول پاشی سرکه مشخص کرد بیشترین کمبود فشار بخار بر اساس دمای برگ با ۲۲/۲۱ کیلوپاسکال در تیمار عدم محلول پاشی حاصل

شد از طرف دیگر کمترین میزان کمبود فشار بخار بر اساس دمای برگ با ۲۰/۷۹ کیلوپاسکال در محلول پاشی با غلظت ۱۵۰۰۰ پی پی ام ثبت شد (جدول ۸). با افزایش غلظت سرکه چوب کمبود فشار بخار کاهش یافته در نتیجه دمای برگ در اثر افزایش میزان فتوسنتز افزایش یافته که مشخص می کند، سرکه چوب سرعت فتوسنتز در برگ را افزایش می دهد.

جدول ۸. مقایسه میانگین های اثر اصلی محلول پاشی 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, Inter-cellular  $CO_2$  concentration, Transpiration rate and Vapor pressure deficit based on Leaf temp.

| سرکه چوب<br>Wood vinegar | درصد روغن<br>oil percentages | $CO_2$ بین سلولی<br>Inter-cellular $CO_2$ concentration | میزان تعرق<br>Transpiration rate              | کمبود فشار بخار بر اساس دمای برگ<br>Vapor pressure deficit based on Leaf temp |
|--------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| ppm                      | %                            | mmol $CO_2$ .mol <sup>-1</sup>                          | mmol $H_2O$ .m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> | 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 <sub>0.05</sub>      | 1.4463                       | 14.398                                                  | 0.1147                                        | 0.6911                                                                        |

جدول ۹. مقایسه میانگین های اثر اصلی رژیم های 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.

| رژیم های آبیاری<br>Irrigation regimes                | درصد روغن<br>oil percentages | میزان تعرق<br>Transpiration rate              |
|------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|
|                                                      | %                            | mmol $H_2O$ .m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> |
| آبیاری مطلوب<br>Optimal irrigation                   | 31.06                        | 1.46                                          |
| تنش کم آبیاری ملایم<br>Mild water deficit stress     | 27.42                        | 1.35                                          |
| تنش کم آبیاری متوسط<br>Moderate water deficit stress | 26.21                        | 1.23                                          |
| تنش کم آبیاری شدید<br>Severe water deficit stress    | 22.90                        | 1.02                                          |
| LSD <sub>0.05</sub>                                  | 1.7474                       | 0.1767                                        |

دانه ۰/۴۳ همبستگی مثبت و معنی دار نشان داد و از طرفی با  $CO_2$  بین سلولی  $0.79^{**}$  و کمبود فشار بخار بر اساس دمای برگ  $0.72^{**}$  همبستگی منفی معنی دار نشان داد. در شرایط نرمال و تنش خشکی عملکرد دانه با وزن خشک ساقه، میزان توزیع مجدد و میزان فتوسنتز جاری همبستگی مثبت و معنی دار نشان داد (Nouriyani, 2015).

### نتیجه گیری نهایی

نتایج نشان داد که رژیم های آبیاری، کاربرد ژئولیت و سرکه چوب تأثیر معنی داری در سطح یک درصد بر صفات عملکرد دانه، عملکرد روغن، سرعت فتوسنتز و هدایت روزنه ای کاملینا دارند. بیشترین شاخص سطح برگ با ۰/۴۰ در تیمار آبیاری مطلوب، کاربرد ژئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۵۰۰۰ پی پی ام به دست آمد. بالاترین بهره وری آب بر اساس عملکرد دانه و روغن در تیمار کم آبیاری شدید، عدم کاربرد ژئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی پی ام مشاهده شد. میزان سرعت فتوسنتز نیز در تیمار آبیاری مطلوب، کاربرد ژئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی پی ام بیشتر از سایر تیمارها بود. با توجه به نتایج این پژوهش، استفاده از ژئولیت و محلول پاشی ۱۵۰۰۰

### همبستگی بین صفات کاملینا

آنالیز همبستگی بین صفات کاملینا مشخص کرد که عملکرد دانه با شاخص سطح برگ  $0.65^{**}$ ، درصد روغن  $0.77^{**}$ ، عملکرد روغن  $0.96^{**}$ ، میزان فتوسنتز  $0.74^{**}$ ، هدایت روزنه  $0.68^{**}$ ، میزان تعرق  $0.65^{**}$  و بهره وری آب بر اساس عملکرد

سرکه چوب و کم آبیاری شدید عدم کاربرد ژئولیت و محلول پاشی ۱۰۰۰۰ پی پی ام توصیه می شود.

پی پی ام سرکه چوب به دلیل افزایش عملکرد به عنوان بهترین تیمار معرفی می شود. همچنین، در شرایط کم آبیاری ملایم و متوسط نیز کاربرد ژئولیت و محلول پاشی ۱۵۰۰۰ پی پی ام

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<br>SPAD                                                     | 1.00   |         |         |         |         |         |         |         |         |       |        |
| 2 شاخص سطح برگ<br>LAI                                                       | 0.49** | 1.00    |         |         |         |         |         |         |         |       |        |
| 3 عملکرد دانه<br>Grain yield                                                | 0.27   | 0.65**  | 1.00    |         |         |         |         |         |         |       |        |
| 4 درصد روغن<br>Oil percent                                                  | 0.45** | 0.82**  | 0.77**  | 1.00    |         |         |         |         |         |       |        |
| 5 عملکرد روغن<br>Oil yield                                                  | 0.36*  | 0.74**  | 0.96**  | 0.89**  | 1.00    |         |         |         |         |       |        |
| 6 سرعت فتوسنتز<br>Photosynthetic rate                                       | 0.42*  | 0.86**  | 0.74**  | 0.91**  | 0.84**  | 1.00    |         |         |         |       |        |
| 7 هدایت روزنه‌ای<br>Conductance to H <sub>2</sub> O                         | 0.22   | 0.72**  | 0.68**  | 0.83**  | 0.76**  | 0.85**  | 1.00    |         |         |       |        |
| 8 CO <sub>2</sub> بین سلولی<br>Inter cellular CO <sub>2</sub> concentration | -0.40* | -0.67** | -0.79** | -0.77** | -0.83** | -0.74** | -0.67** | 1.00    |         |       |        |
| 9 میزان تعرق<br>Transpiration rate                                          | 0.34   | 0.73**  | 0.65**  | 0.87**  | 0.76**  | 0.89**  | 0.79**  | -0.67** | 1.00    |       |        |
| 10 کمبود فشار بخار<br>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<br>عملکرد دانه<br>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<br>عملکرد روغن<br>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 معنی داری، \* و \*\* به ترتیب معنی دار 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>  
Akpınar, 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 vulgaris* 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., Viskochil, 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 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 in calcareous 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., Kiproviski, 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](https://doi.org/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>