

Study of yield and yield components of camelina (*Camelina sativa* L.) under water deficit stress with the application of zeolite and wood vinegar

Amir Mohammad Abedi¹, Seyed Ali Mohammad Modarres-Sanavy^{2*} , Ali Heidarzadeh³ 

1. Graduated M.Sc, 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, Department of Agronomy, Faculty of Agronomy, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Citation: 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. *Plant Productions*, 48(1), 21 -38.

Abstract

Introduction

The agricultural sector plays a critical role in ensuring food security through while conserving natural resources. Oilseed crops require substantial water inputs, making it necessary to identify alternative crops with lower water and nutrient demands. *Camelina sativa* has emerged as a promising oilseed crop due to its adaptability to unfavorable environmental conditions. Promoting camelina cultivation could help diversify agricultural production and reduce dependence on traditional oilseed crops.

Materials and Methods

This study aimed to investigate the yield and yield components of camelina under water deficit stress with the application of zeolite and wood vinegar. The experiment was conducted in 2023 at the Agricultural Faculty Farm of Tarbiat Modares University as a split-plot factorial in a randomized complete block design with three replications. The main factor was irrigation regimes at four levels: optimal irrigation, mild water deficit stress, moderate water deficit stress, and severe water deficit stress, corresponding to 20%, 40%, 60%, and 80% depletion of available water capacity, respectively, followed by irrigation to field capacity. Sub-plots included two levels of zeolite application (0 and 8 tons ha⁻¹) and four levels of wood vinegar foliar application (0, 5000, 10,000, 15,000 ppm) in a factorial arrangement. The Time-Domain Reflectometry (TDR) device was used to determine the irrigation timing and volume, as well as the amount of deep water infiltration. After performing the plowing operation, zeolite was evenly spread over the soil surface in the experimental area and mixed with the soil for the plots designated to have zeolite according to the experimental design. Additionally, foliar application of wood vinegar was carried out at four different stages of plant growth (10 days before flowering, inflorescence emergence, full flowering, and fruiting) to achieve optimal effectiveness.

* **Corresponding Author:** Seyed Ali Mohammad Modarres-Sanavy
E-mail: modaresa@modares.ac.ir



Results and Discussion

The results indicate that zeolite application and wood vinegar foliar spraying significantly improved all measured traits under optimal irrigation conditions. The highest grain yield was obtained in the treatment with zeolite application and no wood vinegar application, which showed no statistically significant difference from the treatment with zeolite application and foliar spraying of wood vinegar at a concentration of 15,000 ppm (1,350 kg.ha⁻¹). Under severe water deficit conditions, the highest grain yield (951 kg.ha⁻¹) was recorded in the treatment without zeolite application and foliar spraying of wood vinegar at a concentration of 10,000 ppm. Other irrigation regimes did not show statistically significant differences. The highest harvest index (33.86%) was achieved under optimal irrigation in the treatment with zeolite application and no foliar spraying of wood vinegar. Under severe water deficit, the highest harvest index (30.31%) was recorded in the treatment without zeolite application and foliar spraying of wood vinegar at a concentration of 10,000 ppm. These beneficial effects were more pronounced under moderate and severe water stress. However, under severe drought stress, zeolite application did not yield significant improvements, whereas wood vinegar at 10,000 ppm significantly enhanced grain yield and harvest index. These findings suggest that zeolite and wood vinegar can serve as effective strategies to enhance plant performance, particularly in water-limited environments.

Conclusion

For maximizing seed and biological yield, moderate water stress combined with zeolite application is recommended as the most cost-effective treatment. Under severe water stress, foliar application of wood vinegar foliar application at 10,000 ppm is recommended to enhance seed and biological yield.

Keywords: Biological yield, Drought stress, Harvest index, Seed yield, Straw yield

مطالعه عملکرد و اجزای عملکرد کاملینا (*Camelina sativa* L.) با کاربرد زئولیت و سرکه چوب در شرایط تنش کم آبی

امیر محمد عابدی^۱، سید علی محمد مدرس ثانوی^{۲*}، علی حیدرزاده^۳

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
- ۲- استاد، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
- ۳- دانش آموخته دکتری، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

گیاهان روغنی مثل سویا و آفتابگردان از جمله محصولات زراعی ضروری هستند که به مقدار قابل توجهی آب نیاز دارند. معرفی گیاه کاملینا به عنوان جایگزین مناسب با ویژگی‌های سازگار با شرایط نامساعد محیطی و نیاز کم به آب و عناصر غذایی می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای تنوع بخشی به کشت و تأمین نیازهای روغنی کشور باشد. این پژوهش به منظور مطالعه عملکرد و اجزای عملکرد کاملینا با کاربرد زئولیت و سرکه چوب در شرایط تنش کم آبی، به صورت کرت‌های خرد شده فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس در سال زراعی ۱۴۰۱-۰۲ اجرا شد. عوامل مورد بررسی در این تحقیق شامل رژیم‌های آبیاری در چهار سطح مختلف بوده‌اند: آبیاری مطلوب (I1)، کم آبیاری ملایم (I2)، کم آبیاری متوسط (I3) و کم آبیاری شدید (I4)، که به ترتیب پس از تخلیه (جذب در منطقه ریشه یا تبخیر) ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد آب قابل استفاده و سپس آبیاری تا حد ظرفیت مزرعه اعمال شده است. رژیم‌های آبیاری در کرت‌های اصلی و استفاده از زئولیت در دو سطح مختلف (بدون کاربرد زئولیت و هشت تن در هکتار زئولیت) و سرکه چوب در چهار سطح مختلف (صفر، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام) به صورت ترکیب فاکتوریل در کرت‌های فرعی مورد بررسی قرار گرفتند. برای تعیین زمان و حجم آبیاری و همچنین مقدار نفوذ عمقی آب، از دستگاه Time-Domain Reflectometry یا TDR استفاده شد. استفاده از زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب در شرایط آبیاری مطلوب سبب بهبود قابل توجهی در تمامی صفات اندازه‌گیری شده گردید. همچنین، در شرایط کم آبیاری متوسط و کم آبیاری شدید، این تأثیرات چشمگیرتر بود. اما باید توجه داشت که در کم آبیاری شدید، تأثیرات معنی‌داری از زئولیت مشاهده نشد، در حالی که استفاده از سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام توانست نتایج قابل توجهی در برخی از ویژگی‌های گیاه، مانند عملکرد دانه و شاخص برداشت داشته باشد. بیشترین عملکرد دانه، در کاربرد زئولیت و عدم کاربرد سرکه چوب حاصل شد که با تیمار کاربرد زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام (۱۳۵۰ کیلوگرم در هکتار) از لحاظ

آماری با یکدیگر اختلاف معنی داری نداشتند. در کم آبیاری شدید با ۹۵۱ کیلوگرم در هکتار، عدم کاربرد زئولیت، محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی پی ام بیشترین عملکرد دانه را ثبت کرد. سایر رژیم‌های آبیاری از لحاظ آماری تفاوت معنی داری با یکدیگر نداشتند. بیشترین شاخص برداشت در آبیاری مطلوب با ۳۳/۸۶ درصد در تیمار کاربرد زئولیت و عدم محلول پاشی سرکه چوب به دست آمد، در کم آبیاری شدید، عدم کاربرد زئولیت و محلول پاشی با غلظت ۱۰۰۰۰ پی پی ام بیشترین شاخص برداشت را ۳۰/۳۱ درصد ثبت کرد. با توجه به نتایج، می‌توان چنین استنباط نمود برای افزایش سطح برگ، طول ریشه، ارتفاع، تعداد خورجینک در بوته، و وزن هزار دانه، آبیاری مطلوب و همچنین استفاده از زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۵۰۰۰ پی پی ام توصیه می‌شود. برای افزایش عملکرد دانه و عملکرد زیست توده، در صورت امکان کم آبیاری متوسط و همچنین کاربرد زئولیت به عنوان به صرفه ترین تیمار معرفی می‌شود. در شرایط کم آبیاری شدید نیز استفاده از محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی پی ام به جهت افزایش عملکرد دانه و عملکرد زیست توده توصیه می‌گردد.

کلید واژه ها: تنش خشکی، شاخص برداشت، عملکرد دانه، عملکرد زیست توده، عملکرد کاه

مقدمه

sativa L.، یک محصول دانه روغنی متعلق به خانواده Brassicaceae، حاوی ۳۵ تا ۴۵ درصد روغن است که بیش از ۹۰ درصد آن از اسیدهای چرب غیراشباع تشکیل شده است (Kim *et al.*, 2019). کاملینا به دلیل الگوی اسید چرب منحصر به فرد و کیفیت روغن آن شناخته شده است، روغن کاملینا منبع بالقوه‌ای از اسید α -لینولنیک، پیش‌ساز اسید چرب امگا ۳ است (Amiri-Darban *et al.*, 2020). روغن کاملینا به عنوان یک روغن گیاهی تجدیدپذیر و منبع انرژی سازگار با محیط زیست برای تولید کالاهای مهم بسیاری از صنایع استفاده می‌شود (Chaturvedi *et al.*, 2018). نیاز کم به آب و مواد مغذی، سازگاری با شرایط نامساعد محیطی و مقاومت در برابر آفات از جمله ویژگی‌های کاملینا می‌باشند. در واقع کاملینا محصولی است که می‌تواند با شرایط محیطی سرد و خشک سازگار شود و در مناطق گرم نیز یافت می‌شود. این گیاه همچنین می‌تواند تنش کم‌آبی را در اوایل فصل رشد تحمل کند. آزمایشات اولیه در ایران نشان داده است که کشت کاملینا می‌تواند در مناطق دیم به خوبی توسعه یابد و تا حد زیادی نیاز کشور به دانه‌های روغنی را برطرف کند (Rostami Ahmadvandi *et al.*, 2021).

در واکنش به تنش کم‌آبی، گیاهان نسبت جذب آب و نسبت ریشه به ساقه را از طریق رشد ریشه افزایش می‌دهند. این عمل باعث می‌شود آب قابل دسترس در خاک به

دانه‌های روغنی در بین محصولات زراعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و از جمله ذخایر بزرگ غذایی در جهان محسوب می‌شوند. این محصولات دارای ذخایر غنی از اسیدهای چرب هستند. با توجه به وابستگی کشور به واردات روغن‌های گیاهی و از طرفی افزایش سالانه مصارف روغن در کشور، واردات روغن موجب خروج سالانه ارز از کشور می‌شود (Qamarnia *et al.*, 2019). این موضوع از جمله موضوعات قابل تأمل در کشاورزی و صنایع غذایی کشور می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه تقریباً یک سوم میانگین جهانی بارندگی را تشکیل می‌دهد. همچنین، پتانسیل تبخیر و تعرق در ایران سه برابر پتانسیل جهانی گزارش شده است که کشور را در گروه کشورهای خشک و نیمه‌خشک قرار می‌دهد (Shakiba *et al.*, 2009). دانه‌های روغنی مانند سویا، کلزا و آفتابگردان، با وجود فواید فراوان، نیاز به مصرف آب بالایی برای تولید دارند. به همین دلیل، معرفی محصول جدید دانه روغنی که بتواند در شرایط خشکسالی و در اراضی دیم عملکرد اقتصادی و رضایت‌بخشی داشته باشد، می‌تواند راه‌حلی مؤثر و کلیدی در این زمینه باشد. جستجوی محصولات جایگزین دانه‌های روغنی به دلیل نیاز روزافزون به تولید روغن‌های گیاهی یک ضرورت شناخته می‌شود (Waraich *et al.*, 2020). گیاه کاملینا (*Camelina*)

زئولیت‌ها می‌توانند تخلخل کل را افزایش داده و چگالی ظاهری را کاهش دهند و در نتیجه میزان آب خاک را افزایش دهند (Nakhli *et al.*, 2017). زئولیت‌ها راندمان مصرف آب را با افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک و در دسترس بودن آن برای محصولات به دلیل ساختار فوق العاده متخلخل خود بهبود می‌بخشند (Gholamhoseini *et al.*, 2013). بنابراین با در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی به ویژه کاهش نزولات جوی و در نتیجه افزایش کمبود آب، زئولیت‌ها می‌توانند اهمیت زیادی در کاهش تنش آبی در کشاورزی داشته باشند. سرکه چوب مایع متراکم شده از دودهای کربنیزه شده برای تولید بیوجار از ضایعات کشاورزی و جنگلداری در دمای بالا است. بیوجار یک ماده زیستی سبز و سازگار با محیط زیست به همراه اثرات ضد عفونی کننده و کنترل حشرات است (Grewal *et al.*, 2018). سرکه چوب به دلیل کاربردهای متنوع آن از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است. خواص متمایز آن، مانند اسیدیته بالا، ترکیبات فرار متعدد و فعالیت ضد میکروبی و همچنین به دلیل کاربردهای بالقوه آن در کشاورزی به دلیل اثرات آن بر رشد گیاه، کنترل آفات، بهبود خاک، جوانه زنی بذر، رشد ریشه و سرکوب بیماری مورد توجه قرار گرفته است (Xu *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2021). افزایش تنش کم آبی باعث کاهش عملکرد اسانس شد؛ به طوری که در شرایط تنش کم آبی متوسط و شدید به ترتیب ۹/۳۷ و ۴۰/۱۷ درصد کاهش عملکرد اسانس اتفاق افتاد. محلول پاشی سرکه چوب باعث افزایش عملکرد اسانس نعنای فلفلی شد؛ به طوری که با افزایش غلظت محلول پاشی سرکه چوب از صفر به ۱۲ در صد، عملکرد اسانس ۸۱/۲۹ در صد افزایش یافت (Alavi Asl *et al.*, 2023).

بدون شک با محدودیت منابع آبی و تغییرات نامتوازن آب و هوایی احتمال مواجه شدن گیاهان زراعی با تنش کم آبی روز به روز بیشتر می‌شود. بدین جهت این مطالعه با هدف مطالعه عملکرد و اجزای عملکرد کاملینا در شرایط تنش کم آبی همراه با کاربرد زئولیت و سرکه چوب به

ریشه‌ها منتقل شده و گیاهان به آن دسترسی داشته باشند. بنابراین یکی از اولین نشانه‌های کم آبی کاهش گسترش سلولی و توسعه سلولی به ویژه در ساقه و برگ‌ها می‌باشد. دیواره‌های سلولی ریشه کمتر به تنش حساسیت نشان می‌دهند در حالی که رشد ساقه کاملاً متوقف شده است و رشد در برگ‌ها نیز کاهش یافته است (Zhang *et al.*, 2018). کاهش رشد سلول‌ها در اثر کم آبی در درجه اول باعث کاهش رشد برگ‌ها می‌گردد. به علاوه در شرایط کم آبی جذب مواد و عناصر غذایی نیز کاهش یافته و بنابراین رشد و توسعه برگ‌ها محدود می‌شود و با کاهش سطح برگ گیاه آب کمتری را از طریق تعرق از دست می‌دهد. بنابراین محدود شدن سطح برگ را می‌توان به عنوان اولین ساز و کار دفاعی گیاه در برابر کم آبی در نظر گرفت که با کم شدن میزان فتوسنتز و تولید آسمیلات‌ها در نهایت باعث کاهش عملکرد می‌شود (Hlavacova *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2018). کاهش میزان آبیاری به میزان ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری کامل به ترتیب باعث کاهش عملکرد دانه کاملینا به میزان ۳۱/۴ و ۴۰/۰ درصد در مقایسه با تیمار کاربرد ۱۰۰ درصد (آبیاری کامل) شد. از طرفی میزان شاخص برداشت در تیمارهای ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری کامل به ترتیب ۲۲/۶، ۱۹/۰ و ۲۵/۱ درصد بود (Yazdani *et al.*, 2024).

زئولیت‌ها خانواده بزرگی از کانی‌ها هستند که از جمله مهم‌ترین‌ها در مواد ریز متخلخل به شمار می‌روند. کلمه "زئولیت" یک پلی مورف سیلیس یا آلومینوسیلیکات کریستالی را نشان می‌دهد که بر اساس چندین چهار وجهی TO4 با گوشه مشترک (T = معمولاً سیلیکون و آلومینیوم) است که یک چارچوب چهار وجهی، سه بعدی، منفذ دار با ابعاد مولکولی و اندازه منظم را تشکیل می‌دهد (Ghasemi *et al.*, 2018). در خاک‌های شنی، زئولیت‌ها می‌توانند به ظرفیت نگهداری آب بالاتری منجر شوند. ظرفیت خاک تیمار شده با زئولیت طبیعی از نظر نگهداری آب در شرایط خشکی و شرایط عمومی در مقایسه با خاک تیمار نشده افزایش یافت (Chmielewska, 2014). به طور خلاصه،

کاشته شدند. هر واحد آزمایشی شامل چهار خط کشت با طول دو متر و با فاصله خطوط ۰/۳ متر (عرض کرت ۱/۲ متر) بود. فاصله بین بوته‌ها روی هر خط پنج سانتی‌متر بود و به منظور جلوگیری از اختلاط اثر هر یک از تیمارها، فاصله بین تکرارها دو متر در نظر گرفته شد. همچنین، فاصله بین کرت‌های اصلی درون هر تکرار یک متر بود. تراکم نهایی در هر مترمربع حدود ۶۷ بوته در مترمربع در نظر گرفته شد و تنک کردن بوته‌ها به منظور رسیدن به تراکم مورد نظر در مرحله دو برگی انجام شد. برای ارزیابی عملکرد و اجزای آن 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. برای تعیین سطح برگ با حذف تأثیرات حاشیه، از هر کرت پنج بوته گیاه برداشت شد و با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (مدل DELTA-T DEVICES ساخت کشور انگلستان) اندازه‌گیری شد.

درصد آب قابل استفاده (D) بر اساس معادله ۱ (Martin *et al.*, 1990) تعیین و سپس با استفاده از معادله ۲ درصد تخلیه آب قابل استفاده محاسبه شد.

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

در این معادله n تعداد نمونه خاک گرفته شده از عمق مؤثر توسعه ریشه، Fci رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه در نمونه iام، θi رطوبت خاک در نمونه iام و Wp رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم

$$[2] \quad 100 - D = \text{درصد تخلیه آب قابل استفاده}$$

از مقایسه رطوبت‌های اندازه‌گیری شده به وسیله حسگرها با روش نمونه‌برداری و توزین، اعتبارسنجی صورت گرفت (Vanclouster *et al.*, 1994).

برای آنالیز واریانس از روش مدل خطی عمومی (GLM) استفاده شد. برای مقایسه اثرات اصلی آزمون LSD (حداقل تفاوت معنی‌دار) در سطح پنج درصد به کار رفت. مقایسه میانگین برهم‌کنش از روش برش دهی و بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد استفاده شد. در نهایت داده‌ها با نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ تجزیه شد.

منظور افزایش رشد، عملکرد و تعدیل اثرات تنش کم‌آبی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت کرت‌های خرد شده فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس واقع در ۱۷ کیلومتر اتوبان تهران-کرج در مختصات جغرافیایی ۵۱°/۱۰' طول شرقی و ۳۵°/۴۴' ارتفاع ۱۳۵۲ متر از سطح دریا و در سال زراعی ۱۴۰۱-۰۲ انجام شده است. بر اساس آمار ایستگاه هواشناسی چیتگر این منطقه با ۲۴۲ میلی‌متر بارندگی سالانه دارای رژیم آب و هوایی نیمه‌خشک است و متوسط درجه حرارت سالانه آن ۲۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

عوامل مورد بررسی در این تحقیق شامل رژیم‌های آبیاری در چهار سطح مختلف بوده‌اند: آبیاری مطلوب (I_1)، کم آبیاری ملایم (I_2)، کم آبیاری متوسط (I_3) و کم آبیاری شدید (I_4)، که به ترتیب پس از تخلیه (جذب در منطقه ریشه یا تبخیر) ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد آب قابل استفاده و سپس آبیاری تا حد ظرفیت مزرعه اعمال شده است. این چهار سطح در کرت‌های اصلی، استفاده از ژئولیت در دو سطح مختلف (بدون کاربرد ژئولیت و هشت تن بر هکتار ژئولیت) و سرکه چوب در چهار سطح مختلف (صفر، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام) به صورت ترکیب فاکتوریلی در کرت‌های فرعی مورد بررسی قرار گرفتند. برای تعیین زمان و حجم آبیاری و همچنین مقدار نفوذ عمقی آب، از دستگاه Time-Domain Reflectometry یا TDR استفاده شد. پس از اجرای عملیات شخم زمین، ژئولیت در محل انجام آزمایش و برای کرت‌هایی که بر اساس نقشه آزمایش دارای ژئولیت بودند، به طور یکنواخت بر روی سطح خاک پخش و سپس با خاک مخلوط شد. همچنین، محلول پاشی سرکه چوب به منظور اثر بخشی بهینه‌تر، در چهار مرحله مختلف از رشد گیاه (۱۰ روز قبل از گلدهی، ظهور گل آذین، گلدهی کامل و میوه‌دهی) انجام گرفت. کاشت به صورت دستی در تاریخ ۲۰ مهرماه سال ۱۴۰۱ انجام شد و بذرها به عمق یک سانتی‌متری خاک

(۲) و وزن ساقه (جدول ۳) و همچنین اثر اصلی زئولیت به ترتیب برای طول ریشه در سطح پنج درصد و وزن ساقه در سطح یک درصد معنی دار شدند (جدول ۲ و ۳). برای صفت وزن هزار دانه برهم کنش محلول پاشی سرکه چوب و زئولیت در سطح یک درصد و اثر اصلی رژیم های آبیاری در سطح پنج درصد معنی دار شدند (جدول ۳). برهم کنش رژیم های آبیاری × محلول پاشی سرکه چوب و رژیم های آبیاری × زئولیت در سطح یک درصد و برهم کنش رژیم های آبیاری × محلول پاشی سرکه چوب در سطح پنج درصد برای صفت عملکرد زیست توده معنی دار شدند (جدول ۴) در نهایت برای صفت عملکرد گاه برهم کنش رژیم های آبیاری × محلول پاشی سرکه چوب و رژیم های آبیاری × زئولیت هر دو در سطح یک درصد معنی دار شدند (جدول ۴).

نتایج و بحث

تجزیه واریانس صفات مورد بررسی

جداول تجزیه واریانس صفات اندازه گیری شده مشخص کرد که برهم کنش سه گانه رژیم های آبیاری، زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب برای صفات سطح برگ در بوته، عملکرد دانه و شاخص برداشت در سطح یک درصد و برای صفات تعداد خورجینک در بوته، تعداد دانه در خورجینک، وزن خورجینک با دانه و وزن خورجینک بدون دانه در سطح پنج درصد معنی دار شد (جداول ۲ تا ۴). برای صفت طول ریشه برهم کنش رژیم های آبیاری و زئولیت در سطح پنج درصد معنی دار شد (جدول ۲). برهم کنش آبیاری و محلول پاشی سرکه چوب در سطح پنج درصد برای صفات طول ریشه (جدول

Table 1. Soil characteristics of the experimental site

Soil Depth (cm)	Texture	OM (%)	K (ppm)	P (ppm)	N (%)	pH	EC (dSm ⁻¹)	OC (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
0-30	loamy sand	1.04	187	4.14	0.05	7.95	0.75	0.55	72.5	16.0	11.5
0-60	loamy sand	1.97	147	4.12	0.02	8	0.74	0.21	77.0	14.0	9.0

Table 2. Analysis of variance of morphological traits, number of silique per plant and number of seed per silique

S.O.V	df	Mean squares				
		Leaf area	Root length	Height	Number of silique per plant	Number of seed per Silique
Block	2	1.10	4.14	5.95	111083.23	0.88
Irrigation regimes (I)	3	883.11**	4.34	125.01	157657.93**	1.54
Error (a)	6	10.71	2.24	41.31	3608.58	0.81
Zeolite(Z)	1	481.55**	7.71*	75.26*	4822.76	9.28**
Foliar application (F)	3	62.50**	0.41	15.00	29274.92**	1.10
F×Z	3	49.22**	2.82	8.14	533.48	0.05
I×Z	9	31.46**	6.65*	5.09	10507.49	0.54
I×F	3	99.32**	1.17	88.73*	9756.49	2.49*
I×Z×F	9	31.47**	0.88	18.28	10574.54*	2.85*
Error (b)	56	7.12	1.60	14.57	4289.63	1.17
CV (%)		7.30	13.67	7.16	17.79	8.19

no sign, * and ** show not significant and significant at 5% and 1% level, respectively

Table 3. Analysis of variance of camelina yield components

S.O.V	df	Mean squares			
		Stem weight	Weight of silique with seeds	Weight of silique without seeds	1000- seeds weight
Block	2	35071.45	150062.34	5×10^{-4}	0.0268*
Irrigation regimes (I)	3	909311.83**	1722417.90**	$85 \times 10^{-4**}$	0.0262*
Error (a)	6	16119.37	34639.58	2×10^{-4}	0.0031
Zeolite(Z)	1	1211326.28**	964072.31**	$163 \times 10^{-4**}$	0.0098
Foliar application (F)	3	191733.10**	162153.23**	$18 \times 10^{-4**}$	0.0346**
F×Z	3	22152.99	109763.80	6×10^{-4}	0.0255**
I×Z	9	70825.76	149336.69*	$15 \times 10^{-4**}$	0.0145
I×F	3	89715.69*	132755.30**	$15 \times 10^{-4**}$	0.0078
I×Z×F	9	23895.62	90726.09*	$8 \times 10^{-4*}$	0.0096
Error (b)	56	33931.09	40122.82	3×10^{-4}	0.0060
CV (%)		9.37	15.97	0.83	6.61

no sign, * and ** show not significant and significant at 5% and 1% level, respectively

Table 4. Analysis of variance of biological yield, straw yield, grain yield and harvest index

S.O.V	df	Mean squares			
		Biological yield	Straw yield	Seed yield	Harvest index
Block	2	329675.95*	127256.82	48239.88*	7.14
Irrigation regimes (I)	3	5070105.57**	1747599.60**	913690.17**	132.29**
Error (a)	6	49557.04	34966.80	5095.49	5.25
Zeolite(Z)	1	4336593.90**	2999588.92**	122864.94**	49.12*
Foliar application (F)	3	706251.40**	298389.96**	100102.75**	13.11
F×Z	3	204773.57*	65773.73	63956.43**	16.34
I×Z	9	397402.21**	250708.23**	28587.56	9.63
I×F	3	292392.39**	167390.76**	48769.01**	27.69**
I×Z×F	9	47260.16	7893.49	43663.96**	25.21**
Error (b)	56	707.14	48783.85	15040.18	8.82
CV (%)		8.21	9.39	14.13	11.13

no sign, * and ** show not significant and significant at 5% and 1% level, respectively

سطح برگ بوته

نتیجه کاهش قابل توجه پارامترهای مربوط به فتوسنتز، از جمله میزان فتوسنتز، محتوای کلروفیل و فلورسانس باشد (Zhang et al., 2018).

طول ریشه

جدول مقایسه میانگین‌های برهم کنش رژیم‌های آبیاری و زئولیت نشان داد که بیشترین طول ریشه در آبیاری مطلوب و کم آبیاری شدید مربوط به عدم کاربرد زئولیت به ترتیب با ۹/۳۵ و ۱۰/۲۹ سانتی متر حاصل شد، اما در سایر سطوح کم آبیاری اختلاف معنی دار دیده نشد (جدول ۶). بررسی‌ها مشخص کرد که ترکیبی از طول ریشه بلند و قطر ریشه ریز برای سازگاری با کم آبی سودمند است (Awad et al., 2018). افزایش تخصیص زیست توده به ریشه‌ها در شرایط خشکی و همچنین گسترش سیستم ریشه گیاه، به طور معمول منجر به افزایش توانایی جذب آب می‌شود

بر اساس جدول مقایسه میانگین‌ها در آبیاری مطلوب بیشترین سطح برگ در بوته با ۵۲/۲۱ سانتی متر مربع مربوط به عدم کاربرد زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام و کمترین آن با ۳۳/۵۸ متعلق به عدم کاربرد زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب بود. در دیگر سطوح از کم آبیاری اختلاف معنی دار دیده نشد (جدول ۵). هرگونه کمبود آب موجب کاهش بیشتر آماس سلولی، کاهش تقسیم و توسعه سلولی به خصوص در ساقه و برگ‌ها می‌شود. به همین دلیل اولین اثر محسوس کم آبی روی گیاه را می‌توان از روی اندازه کوچک تر برگ‌ها تشخیص داد (Beyki and Khashei, 2019). طول و عرض برگ‌های تیمار شده با کم آبی به طور قابل توجهی کوتاه تر از برگ‌های با آبیاری مطلوب بود، که ممکن است

ناشی از خشک شدن و محدود کردن رشد ریشه در مقایسه با شرایط عدم وجود زئولیت را فراهم می‌کند. (Rahnama *et al.*, 2024). زئولیت توانایی جذب رطوبت و ارائه به گیاه در دوره‌های کمبود آب را دارد و بدین ترتیب امکان کاهش پیامدهای مضر ناشی از تنش

Table 5. Mean comparison for the triple interaction of irrigation regimes, zeolite and wood vinegar solution on camelina traits (slicing based on irrigation regimes)

Irrigation	Zeolite	Wood vinegar	Leaf area	Number of silique per plant	Number of seed per silique	Weight of silique with seeds	Weight of silique without seeds	Seed yield	Harvest index
-	ton.ha ⁻¹	ppm	(cm ²)	-	-	(Kg. ha ⁻¹)	(Kg. ha ⁻¹)	(Kg. ha ⁻¹)	(%)
Optimal irrigation	0	0	33.58 ^c	457.56 ^a	12.50 ^a	1402.16 ^{cd}	380.29 ^{cd}	1021.88 ^{bc}	31.29 ^{ab}
		5000	46.95 ^b	412.57 ^a	13.72 ^a	1404.91 ^{cd}	362.76 ^d	1042.15 ^{bc}	32.18 ^{ab}
		10000	52.21 ^a	456.29 ^a	13.40 ^a	1454.61 ^{cd}	380.48 ^{cd}	1074.13 ^b	30.59 ^{ab}
		15000	34.44 ^c	438.04 ^a	12.55 ^a	1561.06 ^{bc}	422.35 ^{cd}	1138.71 ^b	29.21 ^{bc}
	8	0	48.76 ^{ab}	295.09 ^a	13.75 ^a	2002.99 ^a	606.23 ^{ab}	1396.76 ^a	33.68 ^a
		5000	49.29 ^{ab}	449.33 ^a	13.51 ^a	1348.19 ^d	437.94 ^c	910.24 ^c	25.28 ^c
		10000	50.10 ^{ab}	468.51 ^a	14.70 ^a	1730.50 ^b	562.13 ^b	1168.37 ^b	29.06 ^{bc}
		15000	46.59 ^b	407.54 ^a	13.89 ^a	2000.84 ^a	649.95 ^a	1350.89 ^a	28.72 ^{bc}
Mild water deficit stress	0	0	31.27 ^a	350.91 ^a	14.77 ^a	1074.85 ^a	298.81 ^a	776.04 ^a	28.82 ^a
		5000	32.18 ^a	396.14 ^a	11.73 ^a	1173.96 ^a	323.26 ^a	850.69 ^a	26.69 ^a
		10000	31.00 ^a	364.38 ^a	12.35 ^a	1231.64 ^a	320.21 ^a	911.43 ^a	28.20 ^a
		15000	36.01 ^a	410.99 ^a	12.45 ^a	968.22 ^a	238.21 ^a	730.02 ^a	25.20 ^a
	8	0	38.02 ^a	433.41 ^a	13.44 ^a	1211.29 ^a	387.39 ^a	823.90 ^a	23.63 ^a
		5000	34.36 ^a	413.05 ^a	13.89 ^a	1622.16 ^a	827.86 ^a	794.30 ^a	21.39 ^a
		10000	36.44 ^a	403.96 ^a	13.09 ^a	1374.15 ^a	439.47 ^a	934.68 ^a	26.29 ^a
		15000	39.79 ^a	519.60 ^a	14.09 ^a	1555.08 ^a	497.33 ^a	1057.74 ^a	27.42 ^a
Moderate water deficit stress	0	0	28.55 ^a	242.14 ^d	12.53 ^a	995.46 ^a	284.42 ^a	711.04 ^a	24.52 ^a
		5000	31.17 ^a	322.72 ^{cd}	12.33 ^a	943.56 ^a	269.59 ^a	673.97 ^a	25.68 ^a
		10000	35.78 ^a	416.73 ^{a-c}	13.78 ^a	1057.56 ^a	302.16 ^a	755.40 ^a	26.38 ^a
		15000	41.22 ^a	514.22 ^a	13.75 ^a	1232.82 ^a	371.83 ^a	860.98 ^a	27.85 ^a
	8	0	31.04 ^a	388.31 ^{bc}	12.94 ^a	1285.07 ^a	404.69 ^a	880.38 ^a	27.63 ^a
		5000	33.93 ^a	408.23 ^{a-c}	13.82 ^a	1125.84 ^a	354.55 ^a	771.29 ^a	25.40 ^a
		10000	36.30 ^a	357.16 ^{b-c}	14.39 ^a	1157.27 ^a	364.45 ^a	792.82 ^a	25.99 ^a
		15000	41.03 ^a	464.07 ^{ab}	13.37 ^a	1332.35 ^a	419.58 ^a	912.77 ^a	26.93 ^a
Severe water deficit stress	0	0	28.07 ^a	228.87 ^a	11.87 ^c	606.85 ^d	179.49 ^a	427.36 ^d	18.71 ^d
		5000	29.69 ^a	238.47 ^a	12.67 ^{bc}	885.05 ^{b-d}	261.78 ^a	623.28 ^{b-d}	24.07 ^{bc}
		10000	28.46 ^a	261.91 ^a	12.50 ^{bc}	1378.24 ^a	426.88 ^a	951.36 ^a	30.31 ^a
		15000	28.15 ^a	263.42 ^a	14.13 ^a	1083.51 ^{a-c}	320.48 ^a	763.04 ^{ab}	28.69 ^{ab}
	8	0	37.84 ^a	253.35 ^a	14.33 ^a	770.83 ^{cd}	242.72 ^a	528.11 ^{cd}	20.59 ^{cd}
		5000	30.32 ^a	179.62 ^a	12.00 ^c	1162.64 ^{ab}	366.09 ^a	796.55 ^{ab}	27.19 ^{ab}
		10000	37.26 ^a	276.42 ^a	12.25 ^c	882.10 ^{b-d}	277.75 ^a	604.34 ^{b-d}	21.51 ^{cd}
		15000	29.32 ^a	284.51 ^a	13.54 ^{ab}	1099.94 ^{ab}	366.84 ^a	733.10 ^{bc}	24.81 ^{bc}

Means with the same letters in each column from each level of water deficit stress, do not have a significant difference at %5 probability level in the LSD test.

Table 6. Mean comparison for the interaction of irrigation regimes and zeolite on root length, biological yield and straw yield (slicing based on irrigation regimes)

Irrigation	Zeolite	Root length	Biological yield	Straw yield
-	(ton. ha ⁻¹)	(cm)	(Kg. ha ⁻¹)	(Kg. ha ⁻¹)
Optimal irrigation	0	9.35 ^a	3485.44 ^b	2416.22 ^b
	8	8.08 ^b	4125.99 ^a	2919.43 ^a
Mild water deficit stress	0	8.69 ^a	3003.04 ^b	2185.99 ^b
	8	9.68 ^a	3642.94 ^a	2740.28 ^a
Moderate water deficit stress	0	9.84 ^a	2870.45 ^b	2120.10 ^b
	8	9.01 ^{ns}	3162.68 ^a	2323.36 ^a
Severe water deficit stress	0	10.29 ^a	2667.60 ^a	1976.35 ^b
	8	9.15 ^b	2795.24 ^a	2129.71 ^a

Means with same letters in each column from each level of water deficit stress, do not have a significant difference at %5 probability level in the LSD test.

ارتفاع بوته

افزایش رشد رویشی و ارتفاع کاملینا شده است (Zaefarian *et al.*, 2023).

تعداد خورجینک در بوته

بر اساس نتایج جدول مقایسه میانگین‌های اثر سه گانه تنش کم‌آبی، زئولیت و سرکه چوب مشخص کرد که در کم‌آبیاری متوسط بیشترین تعداد خورجینک در بوته مربوط به عدم کاربرد زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام می‌باشد. سایر رژیم‌های آبیاری از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند (جدول ۵). علت کاهش تعداد غلاف در بوته، کاهش دوره رشد است که در نتیجه آن تولید مواد غذایی کاهش پیدا می‌کند. کاهش سنتز آسمیلات‌ها و از طرف دیگر افزایش رقابت درون بوته‌ای و نیز ریزش گل‌ها در اثر تنش کمبود آب، باعث کاهش تعداد غلاف در بوته می‌شود (Liu *et al.*, 2004). نتیجه بررسی تأثیر کاربرد زئولیت و کوددهی نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد لوبیا چشم بلبلی نتایج نشان داد که کاربرد زئولیت باعث افزایش تعداد غلاف در بوته شد (Azarpour *et al.*, 2011). از طرفی سرکه چوب به دلیل افزایش سرعت فتوسنتز و تولید مواد فتوسنتزی باعث تعدیل اثرات منفی تنش گردید.

وزن هزار دانه

مقایسه میانگین‌های برهم‌کنش زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب نشان داد که بیشترین وزن هزار دانه با ۱/۲۵

جدول مقایسه میانگین‌های برهم‌کنش رژیم‌های آبیاری و محلول پاشی سرکه چوب نشان که بالاترین ارتفاع در تنش کم‌آبیاری متوسط و محلول پاشی ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام با ۵۸/۹۳ سانتی‌متر مشاهده شد. سایر سطوح کم-آبیاری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۷). مقایسه میانگین‌های اثر اصلی کاربرد زئولیت نشان داد که کاربرد زئولیت تا ۳/۲۶ درصد می‌تواند موجب افزایش ارتفاع گردد (شکل ۱). رشد سلول یکی از حساس‌ترین فرایندهای فیزیولوژیک به کم‌آبی است که دلیل آن کاهش فشار آماس سلولی می‌باشد. تنش کم‌آبی از طریق کاهش فتوسنتز و در نتیجه کاهش شیره پرورده باعث کوتاه شدن ارتفاع گیاه و در نتیجه کاهش محصول دانه گلرنگ می‌شود (Farrokhiniya *et al.*, 2011). در تنش شدید کم‌آبی، جریان آب از آوندهای چوب به سلول‌های در حال رشد متوقف شده که این اختلال در نهایت باعث مختل شدن فرایند میتوز، کاهش رشد و حجیم شدن سلول و در نهایت کاهش ارتفاع ساقه می‌شود (Anjum *et al.*, 2011). به نظر می‌رسد دوره رشد طولانی‌تر فرصت کافی برای استفاده از شرایط رشد از جمله نور، رطوبت و دمای مناسب در طول دوره رشد رویشی و زایشی کاملینا را فراهم کرده است و عدم برخورد مراحل حساس گلدهی و دانه‌بندی گیاه با دمای بالا، سبب افزایش ساخت مواد فتوسنتزی و در نهایت

پتاسیم، آهن، منگنز، فسفر، آلومینیوم، مس، کلسیم، روی و سدیم است. اکثر این عناصر در فعالیت‌های حیاتی گیاه و افزایش فتوسنتز نقش دارند. گیاهان در بین همه ریزمغذی‌ها بیشترین نیاز را به آهن دارند. آهن برای سنتز کلروفیل مورد نیاز است (Taiz and Zeiger, 2006). از این رو استفاده از سرکه چوب به دلیل افزایش ظرفیت فتوسنتزی گیاه موجب بهبود وزن هزار دانه در گیاه می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که تنش از طریق قطع فتوسنتز گیاه، مواد فتوسنتزی مورد نیاز برای پر شدن دانه را کاهش داده و سبب چروکیدگی دانه‌ها و کاهش وزن هزار دانه می‌شود (Manvelian *et al.*, 2021).

گرم در تیمار کاربرد زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی پی ام بدست آمد (شکل ۲). بر اساس مقایسه میانگین‌های اثر اصلی رژیم‌های آبیاری، تیمار آبیاری مطلوب با ۱/۲۱ گرم بیشترین وزن هزار دانه را به خود اختصاص داد. کمترین وزن هزار دانه مربوط به کم آبیاری شدید با ۱/۱۳ گرم بود (شکل ۳). وزن هزار دانه از یکسو به میزان مواد فتوسنتزی موجود، به ویژه در مراحل اولیه رشد دانه و از سوی دیگر به ظرفیت و توانایی دانه در حال رشد برای استفاده از این مواد بستگی دارد. اثر تیمار زئولیت به تنهایی بر روی وزن هزار دانه موثر نبود که این را می‌توان به ناتوانی جذب از منبع نسبت داد (Aghaalikhani *et al.*, 2012). سرکه چوب حاوی عناصر پرمصرف و کم مصرف شامل

Table 7. Mean comparison for the interaction of irrigation regimes and wood vinegar solution on plant height, stem weight, biological yield and straw yield (Slicing based on irrigation regimes)

Irrigation	Wood vingar	Plant height	Stem weight	Biological yield	Straw yield
-	ppm	(cm)	(Kg. ha ⁻¹)	(Kg. ha ⁻¹)	(Kg. ha ⁻¹)
Optimal irrigation	0	59.00 ^a	2002.46 ^b	3705.04 ^b	2495.72 ^b
	5000	53.75 ^a	2053.85 ^b	3430.40 ^b	2454.20 ^b
	10000	56.83 ^a	2187.91 ^b	3780.47 ^b	2659.22 ^b
	15000	52.83 ^a	2526.01 ^a	4306.96 ^a	3062.16 ^a
Mild water deficit stress	0	52.96 ^a	1882.61	3025.68 ^a	2225.71 ^a
	5000	53.26 ^a	2091.40	3489.46 ^a	2666.96 ^a
	10000	54.63 ^a	2090.00	3392.89 ^a	2469.84 ^a
	15000	54.32 ^a	2122.27	3383.92 ^a	2490.04 ^a
Moderate water deficit stress	0	45.44 ^c	1901.28	3041.55 ^{ab}	2245.84 ^{ab}
	5000	54.77 ^b	1793.85	2828.55 ^c	2105.92 ^b
	10000	55.38 ^b	1849.04	2956.45 ^{bc}	2182.34 ^b
	15000	58.93 ^a	1957.13	3239.71 ^a	2352.84 ^a
Severe water deficit stress	0	52.75 ^a	1709.21 ^a	2398.05 ^b	1920.31 ^a
	5000	49.33 ^a	1733.07 ^a	2756.92 ^a	2047.00 ^a
	10000	47.50 ^a	1843.43 ^a	2973.60 ^a	2195.75 ^a
	15000	51.00 ^a	1705.39 ^a	2797.11 ^a	2049.04 ^a

Means with the same letters in each column from each level of water deficit stress, do not have a significant difference at 5% probability level in the LSD test.

عابدی و همکاران: مطالعه عملکرد و اجزای عملکرد کاملینا...

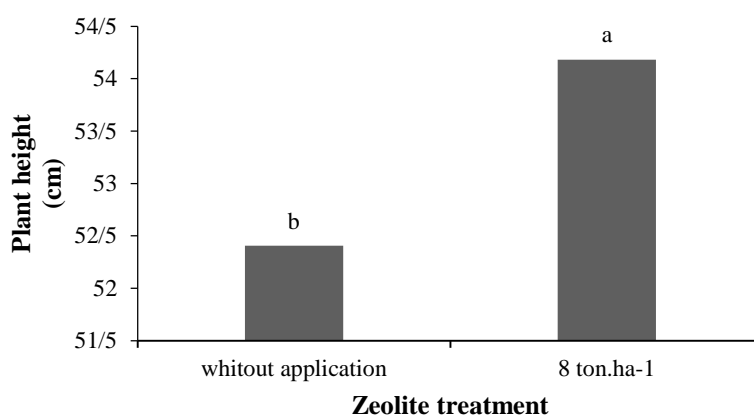


Figure 1. Mean comparisons for the effect of zeolite treatment on plant height of camelina

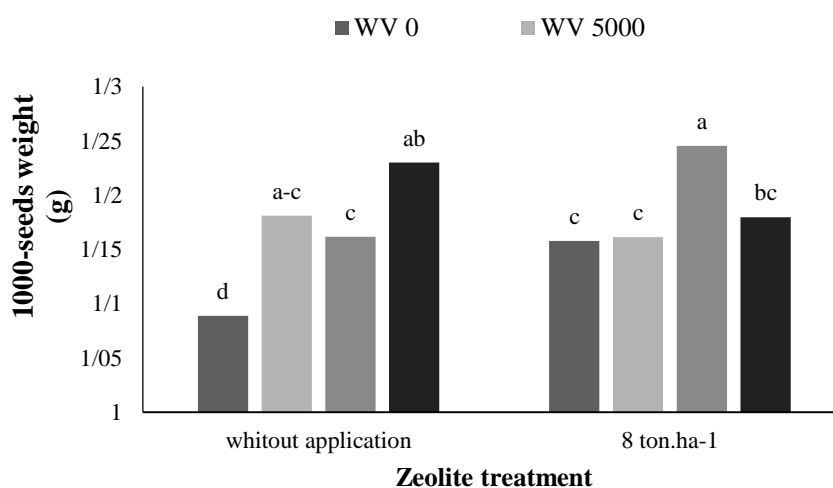


Figure 2. Mean comparison for the interaction between zeolite and wood vinegar treatments on 1000-seeds weight of camelina

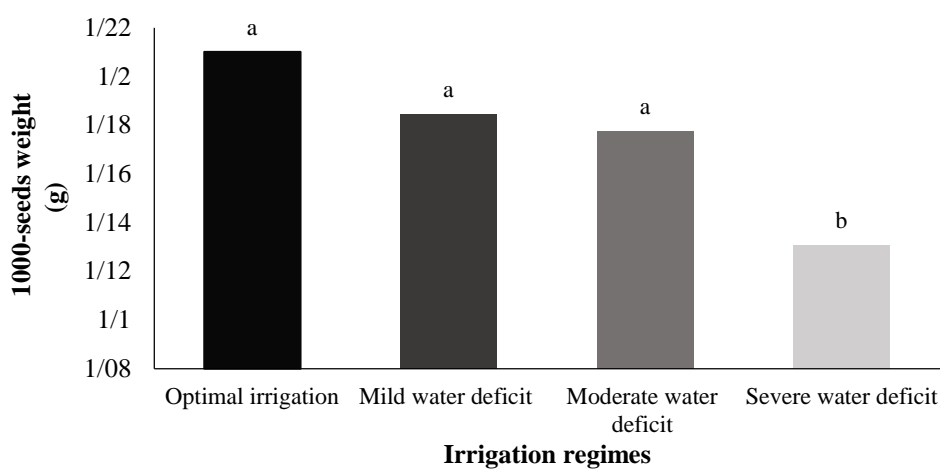


Figure 3. Mean comparison for the main effect of irrigation regimes on 1000-seeds weight of camelina

محدودیت است، زیرا ظرفیت تولید این جز از عملکرد بیش تر تحت تأثیر عوامل ژنتیکی است (Sayed Ahmadi *et al.*, 2012).

وزن ساقه

براساس مقایسه میانگین‌های برهم‌کنش تنش کم‌آبیاری و محلول‌پاشی سرکه چوب، در آبیاری مطلوب بیشترین وزن ساقه با ۲۵۲۶ کیلوگرم در هکتار در غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام به دست آمد. سایر رژیم‌های آبیاری از نظر آماری با هم اختلاف معنی‌داری نداشتند (جدول ۷). مقایسه میانگین‌های اثر اصلی ژئولیت نشان داد که کاربرد ژئولیت باعث افزایش ۱۰/۸۱ درصدی وزن ساقه در زمان برداشت نهایی شد (شکل ۴). اثر بازدارندگی تنش کم‌آبی روی رشد ساقه را احتمالاً می‌توان به محدود شدن فتوسنتز تحت این شرایط نسبت داد (Preuss *et al.*, 2012). تنش کم-آبی باعث کاهش رشد و شاخص‌های مربوط به آن می‌گردد. با کاهش مقدار آب، میزان تجمع مواد فتوسنتزی و سرعت رشد نسبی کاهش می‌یابد و کاهش قابل توجه سرعت رشد نسبی بیانگر کاهش ماده خشک تولید شده در اثر کاهش رشد شاخه و برگ در زمان تنش است (Molden *et al.*, 2005).

تعداد دانه در خورجینک

مشاهده نتایج مقایسه میانگین‌های اثر سه‌گانه تنش کم‌آبی، ژئولیت و سرکه چوب نشان داد که در کم‌آبیاری شدید بیشترین تعداد دانه در خورجینک به ترتیب مربوط به کاربرد ژئولیت و عدم محلول‌پاشی سرکه چوب با ۱۴/۳۳ دانه در خورجینک بود که با عدم کاربرد ژئولیت و محلول‌پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام با تعداد ۱۴/۱۳ دانه در خورجینک در یک گروه آماری قرار گرفتند. مابقی رژیم‌های آبیاری از نظر آماری تفاوت معنی‌دار با یکدیگر نداشتند (جدول ۵). در زمان تنش کم‌آبی، کاهش فتوسنتز جاری باعث کاهش دسترسی مخازن، که همان خورجین‌ها و دانه‌ها می‌باشند، به فرآورده‌های فتوسنتزی می‌شوند که این امر باعث کاهش وزن هزار دانه، تعداد دانه‌ها و وزن خورجینک‌ها می‌شود (Amini Pak Soltani *et al.*, 2022). استفاده از سرکه چوب عمدتاً با بهبود تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در غلاف، عملکرد دانه کلزا را به طور قابل توجهی افزایش داد (Kunmiao *et al.*, 2021). تعداد دانه در غلاف حساس‌ترین جز عملکرد دانه نسبت به تنش کم‌آبی است، به نظر می‌رسد ارقامی که دارای تعداد بالای دانه در غلاف هستند به دلیل تحمل تنش کم‌آبی مطلوب‌تر هستند، اما افزایش تعداد دانه در غلاف دارای

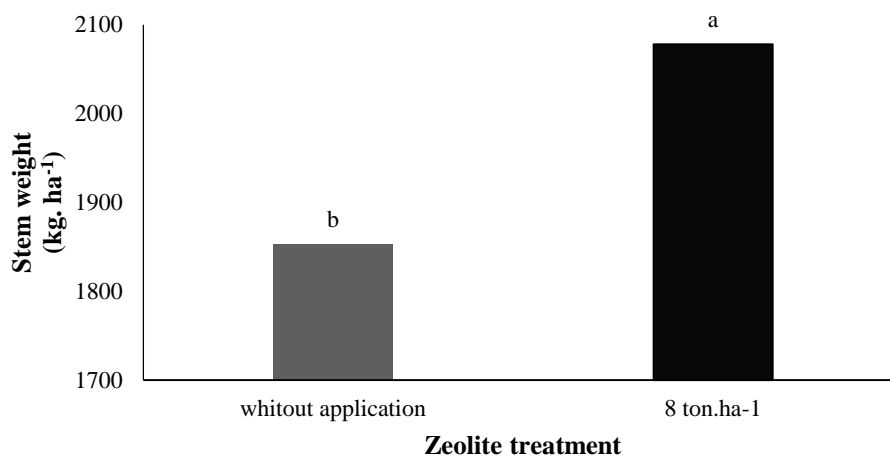


Figure 4. Mean comparison for the effect of zeolite treatment on stem weight of camelina

وزن خورجین به همراه دانه

بر اساس جدول مقایسه میانگین‌های اثر سه گانه تنش کم آبی، زئولیت و سرکه چوب، تیمارهای کاربرد زئولیت و عدم محلول پاشی سرکه چوب و همچنین کاربرد زئولیت، محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی پی ام (۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) با یکدیگر از لحاظ آماری در یک گروه قرار گرفتند و بیشترین وزن خورجین به همراه دانه در آبیاری مطلوب به ثبت رساندند. در کم آبیاری شدید عدم کاربرد زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی پی ام بالاترین وزن خورجین به همراه دانه (۱۳۷۸ کیلوگرم در هکتار) را ثبت کرد. سایر سطوح از کم آبیاری از لحاظ آماری تفاوت معنی دار با هم نداشتند (جدول ۵).

وزن خورجین بدون دانه

جدول مقایسه میانگین‌های اثر سه گانه تنش کم آبی، زئولیت و سرکه چوب مشخص کرد که در آبیاری مطلوب بیشترین وزن خورجین بدون دانه در کاربرد زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی پی ام به دست آمد. سایر رژیم‌های آبیاری تفاوت معنی دار از نظر آماری با یکدیگر نداشتند. (جدول ۵). این معنی داری را می توان به همبستگی مثبت با وزن خورجینک به همراه دانه و عملکرد کاه نسبت داد.

عملکرد زیست توده

جدول مقایسه میانگین‌های برهم کنش تنش کم آبیاری و زئولیت نشان داد که در تمامی سطوح کم آبیاری کاربرد زئولیت موجب افزایش عملکرد زیست توده شده اما در کم آبیاری شدید این افزایش از نظر آماری معنی دار نبود (جدول ۶). بر اساس جدول مقایسه میانگین‌های برهم کنش تنش کم آبیاری و سرکه چوب در آبیاری مطلوب بیشترین عملکرد زیست توده در آبیاری مطلوب، محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی پی ام با ۴۳۰۶/۹۶ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. در کم آبیاری ملایم اختلاف معنی دار بین میانگین‌ها دیده نشد اما در کم آبیاری متوسط با ۳۲۳۹ کیلوگرم در هکتار، محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی پی ام بیشترین عملکرد را به دست آورد. در کم آبیاری شدید بیشترین عملکرد مربوط به محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی پی ام بود که با تیمارهای محلول پاشی ۵۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ در یک گروه آماری قرار

گرفتند (جدول ۷). مقایسه میانگین‌های برهم کنش سرکه چوب و زئولیت مشخص کرد که بالاترین عملکرد زیست توده در تیمار عدم کاربرد زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی پی ام با عملکرد ۳۷۲۸ کیلوگرم در هکتار به دست آمد (شکل ۵). به کارگیری ترکیب‌هایی با ویژگی‌های زئولیت‌ها با جلوگیری از هدرروی عناصر غذایی و نگهداری یون‌های مغذی موجب افزایش کارایی کودهای موجود، جذب عناصر غذایی (Nus and Brauen, 1991) و حفظ رطوبت شده و در نهایت به توسعه و بهبود رشد گیاه، افزایش وزن ریشه، اندام‌های هوایی و در مجموع افزایش وزن خشک و عملکرد زیست توده منجر می شود. در بررسی‌ها بر روی گیاه کلزا نیز مشخص شد که کاربرد زئولیت می تواند سبب افزایش عملکرد اقتصادی و زیست توده گردد (Gholamhoseini et al., 2007).

عملکرد کاه

جدول مقایسه میانگین‌های برهم کنش تنش کم آبیاری و زئولیت نشان داد که در تمامی سطوح از کم آبیاری کاربرد زئولیت موجب افزایش عملکرد دانه شده (جدول ۶). بر اساس جدول مقایسه میانگین‌های برهم کنش تنش کم آبیاری و سرکه چوب در آبیاری مطلوب و کم آبیاری متوسط بیشترین عملکردها به ترتیب با ۳۰۶۲ و ۲۳۵۲ کیلوگرم در هکتار در محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی پی ام به دست آمد. سایر سطوح کم آبیاری، از لحاظ آماری تفاوت معنی دار با هم نداشتند (جدول ۷). بهبود پیامدهای نامطلوب آبیاری بر عملکرد کاه را می توان به پیشرفت در اجزای عملکرد، به ویژه وزن ساقه در برداشت نهایی و همچنین سایر ویژگی‌ها از جمله شاخص برداشت، شاخص سطح برگ و ارتفاع نسبت داد (Galeshi et al., 2005). تیمار سرکه چوب، تعادل ترکیبات گیاهی همچون تنظیم کننده‌های رشد را افزایش داده و بر میزان رشد گیاه تأثیر می گذارد، که با افزایش طول ساقه، میزان وزن تر و به دنبال آن وزن خشک افزایش می یابد (Abdolahipour et al., 2019).

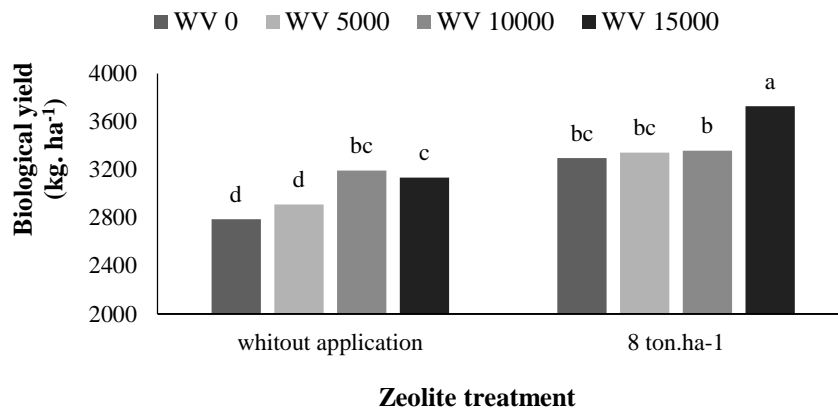


Figure 5. Mean comparison for the interaction between zeolite and wood vinegar treatments on biological yield of camelina

شاخص برداشت

مقایسه میانگین‌های اثر سه گانه رژیم‌های آبیاری، زئولیت و سرکه چوب مشخص کرد که در آبیاری مطلوب بیشترین شاخص برداشت با کاربرد زئولیت و عدم محلول پاشی سرکه چوب به دست آمد، اما در کم آبیاری شدید عدم کاربرد زئولیت و محلول پاشی با غلظت ۱۰۰۰۰ پی پی ام بیشترین شاخص برداشت را ثبت کرد. دیگر سطح‌های رژیم آبیاری اختلاف معنی داری با هم نداشتند (جدول ۵). کمبود آب باعث کاهش قابل توجه عملکرد زیست توده، عملکرد دانه و شاخص برداشت ژنوتیپ‌های کاملینا نسبت به آبیاری معمولی شد (Ahmed *et al.*, 2020). بهبود جذب آب توسط گیاه یکی از دلایل افزایش شاخص برداشت در تیمار زئولیت است. ذخیره آب توسط زئولیت‌ها باعث سایر صفات مربوط به مرحله رشد زایشی شده و در نتیجه سبب بهبود شاخص برداشت می‌گردد. مصرف ۹ تن زئولیت در هکتار در مقایسه با تیمار عدم مصرف زئولیت، توانسته شاخص برداشت دانه گلرنگ را افزایش داد (Sibi *et al.*, 2011).

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که استفاده از زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب در شرایط آبیاری مطلوب، کم آبیاری ملایم، کم آبیاری متوسط و کم آبیاری شدید به ترتیب ۳۶/۲۹، ۴۱/۰۴ و ۲۸/۳۷ درصد عملکرد دانه را بهبود بخشید. از طرفی استفاده از سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰

عملکرد دانه

مقایسه میانگین‌های اثر سه گانه رژیم‌های آبیاری، زئولیت و سرکه چوب نشان داد که، در آبیاری مطلوب بیشترین عملکرد دانه، در کاربرد زئولیت و عدم کاربرد سرکه چوب حاصل شد که با تیمار کاربرد زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۵۰۰۰ پی پی ام (۱۳۵۰ کیلوگرم در هکتار) از لحاظ آماری با یکدیگر اختلاف معنی داری نداشتند. در کم آبیاری شدید با ۹۵۱ کیلوگرم در هکتار، عدم کاربرد زئولیت، محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی پی ام بیشترین عملکرد را به دست آورد. سایر رژیم‌های آبیاری از لحاظ آماری تفاوت معنی داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۵). کم آبیاری عملکرد و اجزای عملکرد دانه را در مقایسه با آبیاری معمولی در دو محصول کلزا و کاملینا به طور معنی داری کاهش می‌دهد (Waraich *et al.*, 2020). وقوع تنش از طریق کاهش دوره فعالیت منبع (برگ‌ها) و کاهش میزان فتوسنتز جاری، سبب کاهش قدرت مخزن (دانه‌ها) در جذب مواد فتوسنتزی می‌گردد، این عامل به همراه ریزش گل‌ها، بارور نبودن دانه‌های گرده و سقط دانه‌ها سبب کاهش اجزای عملکرد می‌شود (Mohtashami *et al.*, 2020). زئولیت به دلیل داشتن ساختار حفره‌ای و سطح ویژه بالا، توانایی بالایی در اصلاح ویژگی‌های فیزیکی خاک، نگهداشت آب و حفظ رطوبت خاک دارد در نتیجه عملکرد را در گیاه افزایش می‌دهد (Ozbahce *et al.*, 2018).

در صورت امکان کم آبیاری متوسط و همچنین کاربرد زئولیت به عنوان به صرفه ترین تیمار معرفی می شود. در شرایط کم آبیاری شدید، استفاده از محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۱۰۰۰۰ پی پی ام به برای افزایش عملکرد دانه و عملکرد زیست توده توصیه می گردد.

سپاس گذاری

از دانشگاه تربیت مدرس به دلیل تأمین هزینه های اجرای این مقاله حاصل از پایان نامه و از داوران محترم برای بهبود کیفیت علمی این پژوهش قدردانی می شود.

پی پی ام به تنهایی در شرایط آبیاری مطلوب، کم آبیاری ملایم، کم آبیاری متوسط و کم آبیاری شدید به ترتیب ۱۶/۲۴، ۱۱/۸۷، ۴/۷۶ و ۶/۷۰ درصد عملکرد زیست توده را افزایش داد. به طور کلی، این نتایج نشان می دهند که استفاده از زئولیت و سرکه چوب می تواند به عنوان روش های مؤثری در بهبود عملکرد گیاهان، به ویژه در شرایط کم آبیاری، مورد استفاده قرار گیرد. برای افزایش سطح برگ، طول ریشه، ارتفاع، تعداد خورجینک در بوته، و وزن هزار دانه، آبیاری مطلوب و همچنین از زئولیت و محلول پاشی سرکه چوب با غلظت ۵۰۰۰ پی پی ام توصیه می شود. برای افزایش عملکرد دانه و عملکرد زیست توده،

References

- Abdolahipour, B., & Haghghi, M. (2019). Effect of pine wood vinegar on germination, growth and physiological characteristics, and uptake of elements in basil. *Journal of Soil and Plant Relations*, 10(2): 11-24. [In Persian]
- Aghaalikhani, M., Gholamhoseini, M., Dolatabadian, A., Khodaei-Joghan, A., & Sadat Asilan, K. (2012). Zeolite influences on nitrate leaching, nitrogen-use efficiency, yield and yield components of canola in sandy soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(10): 1149-1169.
- Ahmed, Z., Liu, J., Waraich, E. A., Yan, Y., Qi, Z., Gui, D., & Zhang, Z. (2020). Differential physio-biochemical and yield responses of *Camelina sativa* L. under varying irrigation water regimes in semi-arid climatic conditions. *PLoS One*, 15(12): e0242441.
- Alavi Asl, S. A., Majidian, M., Modares Sanavy, S. A. M., & Esfahani, M. (2023). Effect of wood vinegar and humic acid on morphological and biochemical traits, antioxidant enzymes, and essential oil of Peppermint (*Mentha piperita* L.) under water deficit stress conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(3): 163-176. [In Persian]
- 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(4): 907-920. [In Persian]
- Amiri-Darban, N., Nourmohammadi, G., Rad, A.H.S., Mirhadi, S.M.J., & Heravan, I.M. (2020) Potassium sulfate and ammonium sulfate affect quality and quantity of Camelina oil grown with different irrigation regimes. *Industrial Crops and Products*, 148: 112308
- Anjum, S. A., Xie, X., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 6(9): 2026-2032.
- Awad, W., Byrne, P. F., Reid, S. D., Comas, L. H., & Haley, S. D. (2018). Great plains winter wheat varies for root length and diameter under drought stress. *Agronomy Journal*, 110(1): 226-235.
- Azarpour, E., Motamed, M. K., Moraditochae, M., & Bozorgi, H. R. (2011). Effects of zeolite application and nitrogen fertilization on yield components of cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *World Applied Sciences Journal*, 14(5): 687-692.
- Beyki, A., & Khashei, A. (2019). Application of clinoptilolite natural zeolite and irrigation management on yield and yield components of black cumin plant (*Nigella sativa* L.). *Journal of Water Research in Agriculture*, 33(1): 137-148.

- Chaturvedi, S., Bhattacharya, A., Khare, S.K. & Kaushik, G. (2018). *Camelina sativa*: an emerging biofuel crop. In: Hussain, C. (Ed.) Handbook of environmental materials management. Springer: Cham, pp. 1–38.
- Chmielewska, E. (2014). Designing clinoptilolite-rich tuff columns for adsorptive filtration of water with enhanced ammonium concentration. *Fresenius Environmental Bulletin*, 23: 1277-1283.
- Farrokhiniya M, Roshdi M, Paseban Eslam B & Sasandoust R. (2011). Investigation of some physiological characteristics and spring safflower under water stress. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 42(3): 545-553, [In Persian]
- Galeshi, S., Farzaneh, S., & Soltani, A. (2005). Investigation of drought tolerance at seedling stage in forty genotypes of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Seed and Plant Journal*, 21(1): 65-79.
- Gao, Q., Sun, J., Tong, H., Wag, W., Zhang, Y., Zhang, G., Ma, D., & Chen, W. (2018). Evaluation of rice drought stress response using carbon isotope discrimination. *Plant Physiology and Biochemistry*. 132: 80-88.
- Ghasemi, Z.; Sourinejad, I.; Kazemian, H.; Rohani, S. (2018) Application of zeolites in aquaculture industry: A review. *Reviews in Aquaculture*, 10: 75–95
- 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.
- Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Modarres Sanavy, S. A. M., & Jamshidi, E. (2007). Effect of zeolite compost application in loamy sand field on grain yield and other traits of sunflower. *Environmental Sciences*, 5(1): 23-36.
- Grewal, A., Abbey, L., & Gunupuru, L. R. (2018). Production, prospects and potential application of pyrolytic acid in agriculture. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 135: 152-159.
- Habib Porkashef, E., Gharineh, M. H., Shafeinia, A. R., & Roozrokh, M. (2017). Effect of different levels of zeolite on yield of red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under drought stress in Kermanshah climate condition. *Crop Production Technology*, 17(1): 141-151.[In Persian]
- Hlavacova, M., Klem, K., Rapantova, B., Novotna, K., Urban, O., Hlavinka, P., Smutna, P., Horakova, V., Skarpa, P., Wimmerova, M., Orsag, M., Jurecka, F., & Trnka, M. (2018). Interactive effects of high temperature and drought stress during stem elongation, anthesis and early grain filling on the yield formation and photosynthesis of winter wheat. *Field Crops Research*. 221:182-195.
- Kim, R. J., Kim, H. U., & Suh, M. C. (2019). Development of camelina enhanced with drought stress resistance and seed oil production by co-overexpression of MYB96A and DGAT1C. *Industrial Crops and Products*, 138: 111475.
- 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 (3): 510.
- Liu, F., Jensen, C.R., & Andersen, M.N., (2004). Drought stress effect on carbohydrate concentration in soybean leaves and pods during early reproductive development: its implication in altering pod set. *Field Crops Research*, 86: 1–13.
- Manvelian, J., Weisany, W., Tahir, N. A. R., Jabbari, H., & Diyanat, M. (2021). Physiological and biochemical response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars to zinc application under drought stress. *Industrial Crops and Products*, 172: 114069.
- Martin, G. A., Viskoohil, D., Bollag, G., McCabe, P. C., Crosier, W. J., Haubruck, H., & McCormick, F. (1990). The GAP-related domain of the neurofibromatosis type 1 gene product interacts with ras p21. *Cell*, 63(4): 843-849.
- Mohtashami, R., Dehnavi, M. M., Balouchi, H., & Faraji, H. (2020). Improving yield, oil content and water productivity of dryland canola by supplementary irrigation and selenium spraying. *Agricultural Water Management*, 232: 106046.
- Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R., & Makin, I. (2003). A water-productivity framework for understanding and action. In *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement* (pp. 1-18). Wallingford UK: Cabi Publishing.
- 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, & Soil Pollution*, 228: 1-34.

- Nus, J. L., & Brauen, S. E. (1991). Clinoptilolitic zeolite as an amendment for establishment of creeping bentgrass on sandy media. *HortScience*, 26(2): 117-119.
- Ozbahce, A., Tari, A. F., Gonulal, E., & Simsekli, N. (2018). Zeolite for enhancing yield and quality of potatoes cultivated under water-deficit conditions. *Potato Research*, 61(3): 247-259.
- Preuss, S. B., Meister, R., Xu, Q., Urwin, C. P., Tripodi, F. A., Screen, S. E., & Petracek, M. E. (2012). Expression of the Arabidopsis thaliana BBX32 gene in soybean increases grain yield. *PLOS One*, 7(2): e30717.
- Qamarnia, h. Kehrizi, D., & Rostami Ahmadvandi, h. (2019). *Camelina is a less expected and adaptable plant*. Razi University .[In Persian]
- Rahnama, A., Hosseinalipour, B., Farrokhian Firouzi, A., Harrison, M.T., & Ghorbanpour, M. (2024). Root architecture traits and genotypic responses of wheat at seedling stage to water-deficit stress. *Cereal Research Communications*, 52:1499- 1510
- Rostami Ahmadvandi, H., Zeinodini, A., Ghobadi, R., & Gore, M. (2021). Benefits of adding camelina to rainfed crop rotation in Iran: a crop with high drought tolerance. *Agrotechniques in Industrial Crops*, 1(2): 91-96.
- Sayyed Ahmadi, A., Gharineh, M. H., Bakhshandeh, A., Fathi, G., & Naderi, A. (2012). Study of the effect of terminal drought stress (end of the growing season) on grain yield, yield components, oil percentage, protein percentage, and root growth characteristics of canola (*Brassica napus*) under Ahvaz climatic conditions. *Plant Production*, 34(2): 53-66. [In Persian]
- Shakiba A., Bahak B., & Monavarian Z. (2009). The likely effect of precipitation change on runoff, case study: Jajrood river. *Journal of the Studies of Human Settlements Planning* 3(7): 111-134. [In Persian]
- Sibi, M., Mirzakhani, M., & Gomarian, M. (2011). Effect of water stress, taking zeolite and salicylic acid on yield and yield components of spring safflower. *New Finding in Agriculture*, 5(3): 275-290
- Taiz, L. & Zeiger, E. (2006). *Plant Physiology*. 4th Edition, Sinauer Associates, Inc. Publishers, Massachusetts, 676 p
- Vanclouster, 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
- Wang, J., Potoroko, I., & Tsrulnichenko, L. (2021). Wood vinegar and chitosan compound preservative affects on fish balls stability. *Food Bioscience*, 42: 101102.
- Waraich, E. A., Ahmad, R., Ahmad, R., Ahmed, Z. E. E. S. H. A. N., Ahmad, Z., Barutcular, C., & Sabagh, A. (2020). Comparative study of growth, physiology and yield attributes of camelina (*Camelina sativa* L.) and canola (*Brassica napus* L.) under different irrigation regimes. *Pakistan Journal of Botany*, 52(5): 1537-1544.
- Waraich, E.A., Ahmed, Z., Zahoor, A., Ahmed, R., Erman, M., Cig, F., & El Sabagh, A. (2020) Alterations in growth and yield of Camelina induced by different planting densities under water deficit stress. *Phyton*, 89: 587-597.
- Xu, J., Zhang, S., Zhou, Y., Liu, S., Lang, S., Yang, J., & Wu, Y. (2022). Comparative study on the properties of wood vinegar prepared from the pretreated Chinese fir: Effect of hydrothermal parameters and hydrogen peroxide. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 167: 105674.
- Yazdani, S., Hosseini, S., & Ranjbar, G. (2024). Effect of different amounts of irrigation water on yield and proline content of camelina (*Camelina sativa* L. Crantz). *Journal of Water Research in Agriculture*, 38(1): 81-90. [In Persian]
- Zaefarian, F., Ghorbani, H., Majidian, P., & Kaveh, M. (2023). Response of camellia yield and yield components to planting date and distance in Mazandaran province. *Plant Productions*, 46(3): 427-440. [In Persian]
- Zhang, X., Lei, L., Lai, J., Zhao, H., & Song, W. (2018). Effects of drought stress and water recovery on physiological responses and gene expression in maize seedlings. *BMC Plant Biology*, 18(1): 1-16.