

(OPEN ACCESS)

Evaluation of physiological and yield characteristics of rapeseed in application of zeolite and ammonium sulphate condition

Maedeh Agooshi¹, Mohammad Ali Bahmanyar^{*2}, Mehdi Ghajar Sepanlu³,
Seyed Mostafa Emadi⁴

1. Ph.D. Student of Soil Science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
E-mail: maedeh_agooshi@yahoo.com
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Soil Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
E-mail: mali.bahmanyar@gmail.com
3. Associate Prof., Dept. of Soil Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
E-mail: sepanlu@yahoo.com
4. Associate Prof., Dept. of Soil Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
E-mail: mostafaemadi@gmail.com

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 05.27.2025

Revised: 06.14.2025

Accepted: 07.15.2025

Keywords:

Amendment,
Enriched zeolite,
Nitrogen,
Soil texture

ABSTRACT

Background and Objectives: Nitrogen (N), as an essential nutrient for growth and development of plants, is added to agricultural fields to boost crop yield. Soil inorganic amendments such as zeolite are effective strategies to improve soil quality and increase soil nitrogen content. The objective of this research was to determine the impact of zeolite and ammonium sulphate fertilizer on physiological characteristics and yield in two soils with different texture.

Materials and Methods: This experiment was conducted as a split plot design under pot conditions with three replicates in Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University in 2022. In this experiment, the main factors included two types of soils (silty clay loam and sandy loam) and the secondary factors consisted of twelve levels include the control, 108 and 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer, 2, 4 and 6 g zeolite with 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate, 2, 4 and 6 g zeolite with 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate and 2, 4 and 6 g of enriched zeolite. The amount of ammonium sulfate fertilizer was determined according to the soil test and zeolite was enriched by ion saturation method. Data analysis was done in the Statistic software and the mean comparisons were made by LSD test.

Results: The results showed that the effects of the soil type treatments were significant on pod weight, protein grain and grain yield and the effects of the amendment treatments were significant on all studied traits. The interaction effect of soil type and amendment treatments were significant on biological yield, harvest index, oil yield and grain yield. The treatment with 4 g zeolite with 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate (T₇) was the most effective treatment on pod weight and greenness index. The highest amount of plant height and protein grain was observed in 6 g zeolite with 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate (T₈) and 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate (T₂) respectively. The highest amount of biological

yield (26.47 g) and grain yield (7.68 g) was observed in silty clay loam soil and 6 g zeolite with 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate (T₈). The most effective treatment on harvest index was silty clay loam soil and 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate (T₂) and the highest amount of oil yield was observed in silty clay loam soil and 2 g zeolite with 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate (T₆).

Conclusion: According to the results of the present study, all studied traits in soil with silty clay loam texture are more than soil with sandy loam texture. The best results were obtained in 6 g zeolite with 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate (T₈) and among the enriched zeolite treatments, application of 6 g enriched zeolite with ammonium was the most effective treatment. It can be concluded that the combined use of zeolite and ammonium sulphate can be a suitable solution for improving rapeseed yield.

Cite this article: Agooshi, Maedeh, Bahmanyar, Mohammad Ali, Ghajar Sepanlu, Mehdi, Emadi, Seyed Mostafa. 2026. Evaluation of physiological and yield characteristics of rapeseed in application of zeolite and ammonium sulphate condition. *Journal of Plant Production Research*, 33 (2), 171-189.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jopp.2025.23506.3246

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکرد گیاه کلزا در شرایط کاربرد زئولیت و کود سولفات آمونیوم

مانده آگوشی^۱، محمدعلی بهمنیار^{۲*}، مهدی قاجار سپانلو^۳، سید مصطفی عمادی^۴

۱. دانشجوی دکتری مدیریت حاصلخیزی و زیست فناوری خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: maedeh_agooshi@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: mali.bahmanyar@gmail.com
۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: sepanlu@yahoo.com
۴. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: mostafaemadi@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی	سابقه و هدف: نیتروژن یکی از مهم‌ترین عناصر غذایی برای رشد و تغذیه گیاهان زراعی بوده و کاربرد آن سبب افزایش عملکرد در گیاهان می‌گردد. کاربرد اصلاح‌کننده‌های معدنی مانند زئولیت روش مناسبی برای بهبود کیفیت خاک و افزایش نگهداری نیتروژن در خاک است. این پژوهش با هدف تعیین کاربرد زئولیت و کود سولفات آمونیوم بر خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکرد کلزا در دو خاک با بافت متفاوت انجام شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴	
واژه‌های کلیدی: اصلاح‌کننده، بافت خاک، زئولیت غنی‌شده، نیتروژن	مواد و روش‌ها: این آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات در ۳ تکرار و در شرایط گلدانی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال ۱۴۰۱ انجام شد. عامل اصلی شامل ۲ نوع خاک (لوم شنی و لوم رسی سیلتی) و عامل فرعی در ۱۲ سطح شامل شاهد، کود سولفات آمونیوم در دو سطح ۱۰۸ و ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم، کاربرد ۲، ۴ و ۶ گرم زئولیت به همراه ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم و ۲، ۴ و ۶ گرم زئولیت به همراه ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم و ۲، ۴ و ۶ گرم زئولیت غنی‌شده با آمونیوم بر کیلوگرم خاک در نظر گرفته شد. داده‌ها در نرم‌افزار Statistic آنالیز شدند و مقایسه میانگین‌ها با آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) بررسی شدند.
	یافته‌ها: نتایج نشان داد اثر تیمار نوع خاک بر وزن غلاف، پروتئین دانه و عملکرد دانه معنی‌دار گردید و اثر تیمار اصلاح‌کننده بر تمامی صفات مورد مطالعه معنی‌دار شد. هم‌چنین اثر متقابل نوع خاک و تیمار اصلاح‌کننده بر عملکرد بیولوژیکی، شاخص برداشت، عملکرد روغن و

عملکرد دانه معنی‌دار گردید. تیمار ۴ گرم زئولیت بر کیلوگرم به همراه ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₇) مؤثرترین تیمار بر وزن غلاف و شاخص سبزی‌نگی بود. بیش‌ترین ارتفاع بوته و پروتئین دانه به ترتیب با کاربرد ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم به همراه ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₈) و ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₂) به دست آمد. بیش‌ترین عملکرد بیولوژیک (۲۶/۴۷ گرم در گلدان) و عملکرد دانه (۷/۶۸ گرم در گلدان) در تیمار خاک با بافت لوم رسی سیلتی و تیمار ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم به همراه ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₈) مشاهده شد. مؤثرترین تیمار بر شاخص برداشت، تیمار خاک لوم رسی سیلتی و تیمار ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₁) بود و بیش‌ترین عملکرد روغن در تیمار خاک با بافت لوم رسی سیلتی و تیمار ۲ گرم زئولیت بر کیلوگرم به همراه ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₆) به دست آمد.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر، تمامی صفات مورد مطالعه در خاک با بافت لوم رسی سیلتی بیش‌تر از خاک با بافت لوم شنی بود. بهترین نتایج در تیمار ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم به همراه ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₈) به دست آمد و در میان تیمارهای مقادیر مختلف زئولیت غنی‌شده، تیمار ۶ گرم زئولیت غنی‌شده با آمونیوم مؤثرترین تیمار بر صفات مورد مطالعه بود. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت کاربرد توأم زئولیت و کود سولفات آمونیوم می‌تواند راهکار مناسبی برای بهبود عملکرد کلزا باشد.

استناد: آگوشی، مائده، بهمنیار، محمدعلی، قاجار سپانلو، مهدی، عمادی، سید مصطفی (۱۴۰۵). بررسی خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکرد گیاه کلزا در شرایط کاربرد زئولیت و کود سولفات آمونیوم. نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی، ۳۳ (۲)، ۱۸۹-۱۷۱.

DOI: 10.22069/jopp.2025.23506.3246



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

کلزا با نام علمی *Brassica napus* از تیره شب بو و از جنس کلم می باشد و در شرایط آب و هوایی مساعد به صورت یک ساله رشد می کند و یکی از مهم ترین گیاهان روغنی یک ساله مورد کشت در جهان می باشد (۱). کلزا یکی از مهم ترین گیاهان زراعی و صنعتی در جهان به شمار می رود. در حال حاضر سطح زیر کشت کلزا در کشور حدود ۳۰۰ هزار هکتار است که بیش ترین سطح زیر کشت را در بین دانه های روغنی در ایران به خود اختصاص داده است. دانه کلزا حاوی ۴۸-۴۰ درصد روغن و ۴۰-۳۴ درصد پروتئین است (۲). تأمین بخش زیادی از نیاز غذایی جمعیت روبه رشد جهان، از خاک و اراضی زراعی است و این موضوع لزوم حفظ و نگهداری این منبع حیاتی را بیش از گذشته نشان می دهد (۳). امروزه با افزایش جمعیت و بیشتر شدن نیاز انسان به غذا، افزایش عملکرد محصولات کشاورزی تنها از طریق افزایش سطح زیر کشت امکان پذیر نیست. بنابراین تمرکز بر افزایش عملکرد در واحد سطح باید یکی از اصلی ترین راهکارهای پیش رو باشد (۱). نیتروژن یکی از مهم ترین عناصر غذایی برای رشد و تغذیه گیاهان زراعی است و کاربرد مقدار بهینه آن برای پایداری تولید در کشاورزی و سلامت محیط زیست اهمیت فراوانی دارد و با توجه به این که نیتروژن خاک نمی تواند برای نیاز گیاهان کافی باشد، نیتروژن مورد نیاز گیاهان با کاربرد کودهای نیتروژن دار تأمین می شود (۴). یکی از روش های موثر در مدیریت منابع خاک، استفاده از ژئولیت به عنوان اصلاح کننده خاک می باشد. کاربرد مواد و روش های همسو با طبیعت مانند ژئولیت امکان بهره برداری بیش تر از نهاده های شیمیایی را فراهم می سازد (۵).

ژئولیت ها کانی های آلومینوسیلیکاته هیدراته از کاتیون های قلیایی و قلیایی خاکی بوده که دارای یک

ساختار سه بعدی نامحدود از چهار ضلعی های SiO_4 و AlO_4 می باشند (۶). جایگزینی هم شکل آلومینیوم به جای سیلیسیوم باعث ایجاد بار منفی در ساختار این کانی می شود. بار منفی ژئولیت به وسیله کاتیون های قابل تبادل خنثی می شود که این موضوع خود باعث ایجاد ظرفیت تبادل کاتیونی بالایی در این کانی می گردد (۷). ژئولیت به دلیل دارا بودن ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و توانایی بالای جذب آمونیوم، سبب کاهش تبدیل آمونیوم به نیترات و به دنبال آن کاهش آبخشوی نیترات در خاک می شود (۸). تخلخل زیاد و ساختار کریستالی ژئولیت سبب افزایش ظرفیت نگهداشت آب در خاک می شود که این موضوع در مناطق خشک و نیمه خشک می تواند بسیار حائز اهمیت باشد. نقش ژئولیت در بهبود ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک از طریق بهبود ساختمان خاک و به دنبال آن افزایش تهویه خاک، افزایش نفوذ آب به خاک و آب قابل دسترس گیاه و همچنین کاهش آبخشوی عناصر غذایی از خاک، توسط محققین مختلف گزارش شده است (۹، ۱۰ و ۱۱).

لطیفا و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که قابلیت دسترسی آمونیوم و نیترات با کاربرد ژئولیت، افزایش یافت (۱۲). افزایش عملکرد و اجزای عملکرد در نتیجه استفاده از ژئولیت به همراه کودهای آلی یا شیمیایی برای محصولات زراعی متعددی گزارش شده است که دلیل آن می توان به بهبود ساختمان خاک، افزایش آب قابل دسترس گیاه و همچنین افزایش دسترسی به عناصر غذایی نسبت داد (۷، ۱۳ و ۱۴). پولات و همکاران (۲۰۰۴) گزارش کردند که ژئولیت کارایی کودهای مصرفی را افزایش داده، سبب رشد رویشی بهتر محصولات زراعی و به تبع آن افزایش عملکرد و اجزای عملکرد در آنها می گردد (۱۵). متقی و همکاران (۲۰۱۹) هم به بررسی اثر ژئولیت بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا پرداختند و

نتایج نشان داد که کاربرد زئولیت به مقدار ۱۰ تن در هکتار با بهبود شرایط رشد گیاه، عملکرد دانه را ۲۳ درصد افزایش داد (۱۱). راولی و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که کاربرد زئولیت در سطح ۷/۵ تن در هکتار و سطوح مختلف کاربرد کود نیتروژن شامل ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار سبب افزایش معنی‌دار غلظت نیترات و آمونیوم در خاک، جذب نیتروژن در اندام هوایی، کارایی مصرف نیتروژن و عملکرد دانه ذرت شد (۱۶). جذب انتخابی و آزادسازی کنترل شده عناصری نظیر پتاسیم و آمونیوم توسط زئولیت باعث می‌شود از طریق فراهمی طولانی‌مدت عناصر غذایی و رطوبت به بهبود رشد گیاه کمک کند (۱۷). به دلیل تنوع بافت خاک و تأثیر آن بر سایر ویژگی‌های خاک، بررسی تأثیر اصلاح‌کننده‌ها بر روی رشد گیاه در خاک‌های با بافت متفاوت ضرورت دارد. با توجه به این‌که زئولیت مورد استفاده در این آزمایش پتانسیل قابل قبولی جهت غنی‌سازی با نیتروژن داشت، ضرورت بررسی اثر کاربرد زئولیت و زئولیت غنی‌شده با آمونیوم به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک و رویکردی جدید برای توصیه مصرف بهینه زئولیت در بخش کشاورزی، مورد توجه قرار گرفت. هدف از این پژوهش بررسی اثر کاربرد زئولیت طبیعی و کود سولفات آمونیوم و زئولیت غنی‌شده با آمونیوم در دو خاک با بافت متفاوت بر برخی خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکرد کلزا بود.

مواد و روش‌ها

به منظور تعیین نقش زئولیت طبیعی و غنی‌شده با آمونیوم بر خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه کلزا رقم هایولا ۵۰، دو آزمایش جداگانه به‌صورت اسپلیت پلات بر پایه طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار به‌صورت گلدانی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال ۱۴۰۱ انجام شد. تیمارهای

آزمایش شامل عامل اصلی (S) خاک با بافت لوم شنی (S_1) و خاک با بافت لوم رسی سیلتی (S_2) و عامل فرعی (T) در ۱۲ تیمار که شامل شاهد (T_0)، ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_1)، ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_2)، ۲ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_3)، ۴ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_4)، ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_5)، ۲ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_6)، ۴ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_7)، ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_8)، ۲ گرم زئولیت غنی‌شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T_9)، ۴ گرم زئولیت غنی‌شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T_{10}) و ۶ گرم زئولیت غنی‌شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T_{11})، در مجموع ۷۲ گلدان در نظر گرفته شد. مقادیر استفاده از کود سولفات آمونیوم بر طبق نتایج آزمایش خاک تعیین شد. لازم به ذکر است مقدار ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم سولفات آمونیوم مطابق توصیه آزمون خاک و ۱۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم سولفات آمونیوم، ۲۵ درصد بیش‌تر از توصیه آزمون خاک می‌باشد. در جدول ۱ برخی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه ارائه شده است. بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۷)، کربن آلی (۱۸)، قابلیت هدایت الکتریکی و pH خاک (۱۹) نیتروژن خاک به روش کلدال (۲۰)، فسفر خاک به روش اولسن (۲۱) و پتاسیم تبادلی خاک نیز به روش استخراج با استات آمونیوم یک مولار با دستگاه فلیمتومتر اندازه‌گیری شد (۲۲).

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه.

Table 1. Selected physical and chemical characteristics of the studied soil.

پتاسیم قابل دسترس Available K	فسفر قابل دسترس Available p	نیترژن N	قابلیت هدایت الکتریکی EC	pH	کربن آلی OC	شن sand	سیلت silt	رس Clay	چگالی ظاهری Bulk density	بافت خاک Soil texture	ویژگی Property
mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	dSm ⁻¹	-	%	%	%	%	g cm ⁻³	-	واحد Unit
112	10.43	0.09	1.19	7.82	0.82	60	26	14	1.40	لوم شنی Sandy loam	S ₁
168	14.51	0.12	0.71	7.40	1.23	22	47	31	1.24	لوم رسی سیلتی Silty clay loam	S ₂

این عمل تکرار شد و شستشو با آب مقطر جهت رفع نمک‌های اضافه صورت گرفت و در نهایت ژئولیت غنی‌شده با آمونیوم در آون در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک و آماده گردید (۲۳). پس از تهیه ژئولیت غنی‌شده، درصد عناصر تشکیل‌دهنده آن با دستگاه فلورسانس اشعه ایکس (XRF) تعیین گردید (جدول ۲).

ژئولیت به روش اشباع یونی غنی‌سازی شد. ابتدا ژئولیت توسط الک شماره ۳۵ به اندازه ۰/۵ میلی‌متر جدا شد. سپس ژئولیت با استفاده از آب مقطر (نسبت ۱:۱۰) شسته و در هوای آزاد خشک گردید. ۵ گرم ژئولیت جداگانه در ۲۵ میلی‌لیتر محلول ۱ مولار کلرید آمونیوم به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد و پس از ۳۰ دقیقه بهم‌زدن و پنج دقیقه سانتریفیوژ با ۳۰۰۰ دور در دقیقه، محلول رویی دور ریخته شد. سه مرتبه

جدول ۲- برخی ویژگی‌های شیمیایی ژئولیت خام و غنی‌شده با آمونیوم.

Table 2. Selected chemical characteristics of raw and ammonium enriched zeolite.

N (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	CEC (Cmol _c Kg ⁻¹)	pH	نمونه
0.03	2.12	1.43	0.91	2.73	0.73	10.27	68.32	135	7.9	ژئولیت خام Raw zeolite
2.51	1.55	1.31	0.19	2.65	0.72	10.26	67.9	112	7.9	ژئولیت غنی‌شده با آمونیوم Ammonium enriched zeolite

گرفت. گلدان‌ها دارای زهکش بودند و رطوبت خاک گلدان‌ها در طول دوره رشد گیاه در حدود ظرفیت زراعی به‌روش وزنی تأمین شد. در مرحله گل‌دهی برای اندازه‌گیری شاخص سبزی‌نگی از دستگاه کلروفیل متر SPAD-502 استفاده شد. ارتفاع بوته در مرحله رسیدن دانه برحسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. در اردیبهشت ۱۴۰۲ برداشت کلزا انجام شد. جهت تعیین عملکرد و اجزای عملکرد، بوته‌ها را به

به‌منظور آماده‌سازی گلدان‌ها، با توجه به اندازه گلدان‌ها و چگالی ظاهری خاک‌های مورد آزمایش، وزن خاک با بافت لوم شنی ۱۰/۹۰ کیلوگرم و برای خاک لوم رسی سیلتی ۹/۷۰ کیلوگرم محاسبه و به گلدان‌ها انتقال داده شد. پس از اعمال تیمارها، در هر گلدان ده بذر جوانه‌دار کلزا در آبان سال ۱۴۰۱ کاشته شد و پس از پنج‌برگی شدن به سه بوته تنک گردید. عملیات آبیاری و وجین علف‌های هرز با دست انجام

آزمایشگاه منتقل کرده و وزن غلاف، پروتئین دانه (حاصل ضرب نیتروژن دانه در عدد ۶/۲۵)، عملکرد بیولوژیکی، شاخص برداشت (حاصل تقسیم عملکرد دانه بر عملکرد بیولوژیک)، عملکرد روغن (حاصل ضرب درصد روغن دانه در عملکرد دانه) و عملکرد دانه اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار Statistic مورد تجزیه آماری قرار گرفتند. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از روش آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت.

نتایج و بحث

وزن غلاف: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر نوع خاک در سطح احتمال پنج درصد و اثر تیمار اصلاح‌کننده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید اما اثر متقابل نوع خاک و تیمار اصلاح‌کننده، تفاوت معنی‌داری را نشان نداد (جدول ۳). بیش‌ترین وزن غلاف در خاک لوم رسی سیلتی به مقدار ۸/۳۰

گرم در گلدان که از مقدار آن در خاک لوم شنی بیش‌تر بود. نتایج مقایسه میانگین وزن غلاف در تیمارهای اصلاح‌کننده نشان داد که بیش‌ترین وزن غلاف در تیمار ۴ گرم زئولیت بر کیلوگرم به‌همراه ۱۵۳ میلی‌گرم کود سولفات آمونیوم بر کیلوگرم خاک (T₇)، (۹/۶۲ گرم در گلدان) مشاهده شد که با تیمارهای کاربرد سطوح مختلف کود سولفات آمونیوم (T₁ و T₂) تفاوت معنی‌داری داشت. در صورت تغذیه مناسب گیاه با نیتروژن، به دلیل نقش تعیین‌کننده نیتروژن در توسعه پوشش گیاهی و تولید مواد فتوسنتزی، ذخیره آن‌ها در دانه افزایش یافته و دانه‌های سنگین‌تری تولید می‌شود که سبب افزایش وزن غلاف می‌گردد (۲۴). به نظر می‌رسد در مرحله تشکیل دانه به دلیل کاربرد زئولیت و بهینه بودن شرایط فیزیکی، وضعیت رطوبتی خاک و محیط ریشه سبب بهبود ظرفیت فتوسنتزی گیاه و در نتیجه افزایش وزن غلاف شده است (۲۵).

جدول ۳- نتیجه تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات اندازه‌گیری شده در گیاه کلزا.

Table 3. The result of analyzing the variance (mean square) of measured traits in rapeseed.

منابع تغییرات S.O.V	df	درجه آزادی	وزن غلاف Pod weight	ارتفاع بوته Height	پروتئین دانه Protein grain	شاخص سبزیگی Greenness index	عملکرد بیولوژیکی Biological yield	شاخص برداشت Harvest index	عملکرد روغن Oil yield	عملکرد دانه Grain yield
تکرار Replication	2	0.69	7.29	1.84	0.44	0.11	2.45	275.1	0.18	
نوع خاک Soil type	1	3.06*	190.12 ^{ns}	46.48*	25.69*	1.79 ^{ns}	85.69**	10850.1**	7.04**	
خطا تکرار × نوع خاک Error replication × soil type	2	0.07	2.54	1.68	0.31	0.59	0.3	10.3	0.02	
تیمار اصلاح کننده Amendment treatment	11	8.95**	161.42**	58.16**	12.20**	336.67**	18.04**	3024**	2.97**	
نوع خاک × تیمار اصلاح کننده Soil type × amendment treatment	11	0.54 ^{ns}	15.30 ^{ns}	5.78 ^{ns}	0.56 ^{ns}	36.12**	6.07**	217.7*	0.19*	
خطا تکرار × نوع خاک × تیمار اصلاح کننده Error replication × soil type × amendment treatment	44	0.36	8.61	3.46	0.32	13.12	1.80	107.1	0.09	
ضریب تغییرات CV	-	3.40	1.59	5.09	1.24	2.36	2.96	4.55	2.7	

ns، *، ** به ترتیب بیانگر معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و عدم متفاوت معنی‌دار می‌باشد

ns، * and ** represent significant effect at $P < 0.01$, $P < 0.05$ and no significant effect, respectively

ارتفاع بوته: نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس نشان داد اثر تیمارهای اصلاح‌کننده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد اما اثر نوع خاک و اثر متقابل نوع خاک و تیمار اصلاح‌کننده، تفاوت معنی‌داری را نشان نداده است (جدول ۳). مقایسه میانگین تیمار اصلاح‌کننده بر ارتفاع بوته نشان داد بیش‌ترین ارتفاع بوته (۱۰۷/۵ سانتی‌متر) در تیمار ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم به همراه ۱۵۳ میلی‌گرم در کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₈) مشاهده شد که نسبت به شاهد (T₀)، ۲۱ درصد افزایش یافت و با تیمارهای کاربرد سطوح مختلف کود سولفات آمونیوم (T₁ و T₂) تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۴). به نظر می‌رسد

نیترژن به دلیل افزایش رشد رویشی و افزایش تقسیم سلولی، افزایش ارتفاع بوته را به دنبال داشته است (۱۴). سیدی و حمزه‌ای (۲۰۱۵) بیان کردند که با کاربرد کود نیترژن، افزایش ارتفاع بوته کلزا حاصل شد (۲۶). هم‌چنین رضوانی و کافی (۲۰۲۴) بیان کردند که زئولیت با بهبود ویژگی‌های رشدی در لوبیا سفید سبب افزایش ارتفاع بوته گردید و با مصرف ۱۰ تن در هکتار زئولیت بیش‌ترین ارتفاع بوته (۸۶ سانتی‌متر) به دست آمد (۲۷). در مطالعه دیگر زمانی نوری و همکاران (۲۰۱۴) با کاربرد زئولیت در لوبیا قرمز نشان دادند که کاربرد ۳۰ تن در هکتار زئولیت، بیش‌ترین اثر را بر ارتفاع بوته داشت (۲۸).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر نوع خاک بر وزن غلاف، پروتئین دانه و شاخص سبزیگی.

Table 4. Mean comparison effect of soil type pod weight, protein grain and leaf chlorophyll content.

نوع خاک	وزن غلاف (گرم در گلدان)	پروتئین دانه (درصد)	شاخص سبزیگی
Soil type	Pod weight (g.pod ⁻¹)	Protein grain (%)	Greenness index
لوم شنی (S ₁) sandy loam	7.89 ^b	24.74 ^b	45.08 ^b
لوم رسی سیلتی (S ₂) Silty clay loam	8.30 ^a	26.35 ^a	46.27 ^a

ستون‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، نمایانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است

Means followed with the same letters in each column are not significant at P<0.05

ارتفاع بوته در تیمار ۶ گرم زئولیت غنی‌شده با آمونیوم (T₁₁)، ۱۰۲/۴۳ سانتی‌متر به دست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۱۵ درصد افزایش یافت (جدول ۴). به نظر می‌رسد مصرف زئولیت با بهبود شرایط فیزیکی و حاصلخیزی خاک، سبب جلوگیری از کاهش طول ساقه می‌شود. بیکی و خاشعی (۲۰۱۹) بیان کردند کاربرد ۴ گرم زئولیت در حالت آبیاری کامل می‌تواند سبب افزایش ارتفاع بوته سیاه‌دانه گردد (۴).

پروتئین دانه: نتایج تجزیه واریانس ارائه شده در جدول ۳ نشان داد که اثر تیمار نوع خاک بر پروتئین دانه در سطح احتمال پنج درصد و اثر تیمار اصلاح‌کننده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار

گردید (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر نوع خاک بر پروتئین دانه نشان داد که بیش‌ترین پروتئین در خاک لوم رسی (۲۶/۳۵ درصد) کم‌ترین آن در خاک لوم شنی (۲۴/۷۴ درصد) مشاهده شد. هم‌چنین نتایج جدول ۴ نشان داد که با مصرف ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم به همراه ۱۵۳ میلی‌گرم در کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₈)، بیش‌ترین مقدار پروتئین دانه (۲۹/۲ درصد) به دست آمد که با تیمار ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₂) و ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم به همراه ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₅) تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر تیمارهای اصلاح‌کننده بر صفات اندازه‌گیری‌شده در گیاه کلزا.

Table 5. Mean comparisons effect of amendment treatments of measured traits in rapeseed.

شاخص سبزی‌نگی Greenness index	پروتئین دانه (درصد) Protein grain (%)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height (cm)	وزن غلاف (گرم در گلدان) Pod weight (g.pod ⁻¹)	تیمار اصلاح‌کننده
42 ^f	18.1 ^e	88.6 ^g	6.21 ^d	T ₀
45.5 ^c	24.7 ^{cd}	96.3 ^f	7.07 ^c	T ₁
45.6 ^{bc}	29.0 ^a	97.5 ^{ef}	8.26 ^{bc}	T ₂
45.2 ^{cd}	25.8 ^{bc}	100 ^{cde}	8.61 ^b	T ₃
45.6 ^{bc}	24.2 ^{cd}	97.8 ^{ef}	8.74 ^b	T ₄
46.2 ^b	28.8 ^{ab}	99.1 ^{def}	8.86 ^b	T ₅
47.1 ^a	26.0 ^b	102.8 ^{bc}	9.58 ^a	T ₆
47.7 ^a	27.9 ^b	106.5 ^a	9.62 ^a	T ₇
47.4 ^a	29.2 ^a	107.5 ^a	8.76 ^b	T ₈
44.3 ^e	24.3 ^{cd}	100.1 ^{cde}	6.70 ^{cd}	T ₉
44.8 ^{de}	24.4 ^{cd}	102.3 ^{bcd}	6.73 ^{cd}	T ₁₀
45.6 ^{bc}	23.6 ^d	102.4 ^{bcd}	7.18 ^c	T ₁₁

شاهد (T₀)، ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₁)، ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₂)، ۲ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₃)، ۴ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₄)، ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₅)، ۲ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₆)، ۴ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₇)، ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₈)، ۲ گرم زئولیت غنی‌شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₉)، ۴ گرم زئولیت غنی‌شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₁₀) و ۶ گرم زئولیت غنی‌شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₁₁). ستون‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، نمایانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

Control (T₀), 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₁), 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₂), 2 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₃), 4 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₄), 6 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₅), 2 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₆), 4 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₇), 6 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₈), 2 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₉), 4 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₁₀) and 6 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₁₁). Means followed with the same letters in each column are not significant at P<0.05

این آزمایش با نتایج تحقیقات فهیم و همکاران (۲۰۲۰) که به بررسی اثر کود نیتروژنی بر پروتئین دانه کلزا پرداختند، مطابقت داشت (۲۹). اگر اثر سطوح مختلف زئولیت غنی‌شده بر پروتئین دانه اختلاف معنی‌دار نشد اما پروتئین دانه در تیمار ۴ گرم

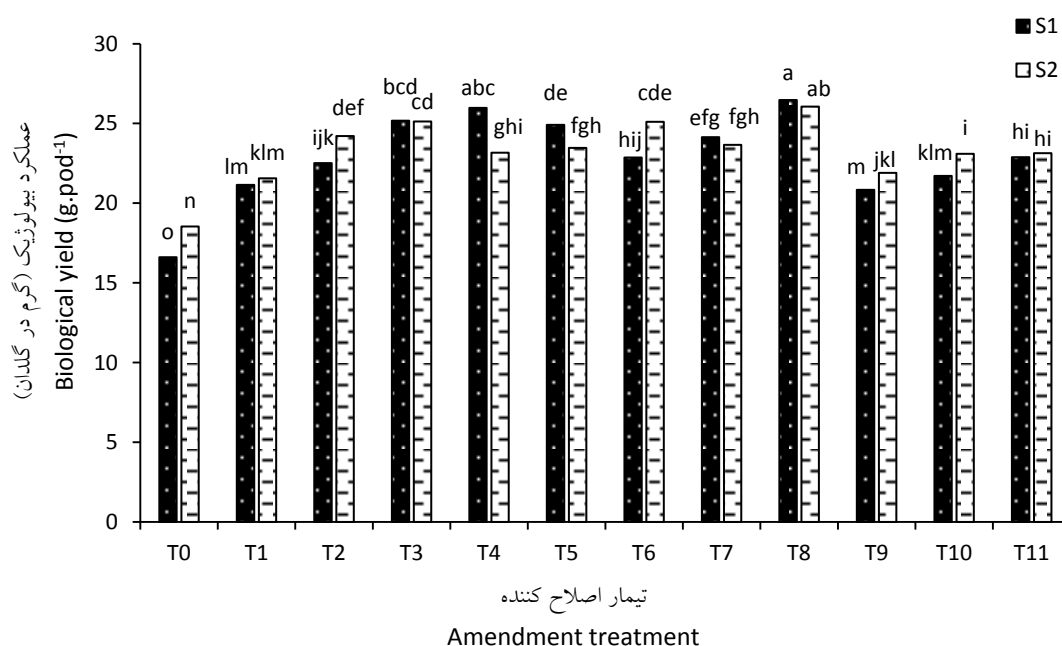
نیتروژن نقش مهمی در بسیاری از فرایندها از جمله ساختمان آنزیم‌ها و کلروفیل‌ها، اسیدهای نوکلئیک، پروتئین‌ها، غشای سلول و دیگر ترکیبات سلولی دارد. بنابراین کمبود این عنصر بر طول دوره رشد، عملکرد و پروتئین دانه مؤثر است (۸). نتایج

زئولیت غنی شده با آمونیوم (T_{10})، ۲۴/۴۷ درصد به دست آمد که نسبت به شاهد (T_{10})، ۳۴ درصد افزایش یافت (جدول ۴).

شاخص سبزینگی: نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد اثر نوع خاک در سطح احتمال پنج درصد و اثر تیمار اصلاح کننده بر شاخص سبزینگی در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۳). تفاوت معنی داری بین سطوح مختلف زئولیت در تیمارهای حاوی ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_6 ، T_7 و T_8) بر شاخص سبزینگی مشاهده نشد. اما بیشترین شاخص سبزینگی در تیمار خاک با بافت لوم رسی سیلتی (۴۶/۲۷) و کمترین آن در خاک با بافت لوم شنی (۴۵/۰۸) مشاهده شد. هم چنین نتایج مقایسه میانگین تیمار اصلاح کننده بر شاخص سبزینگی نشان داد که بیشترین مقدار آن در تیمار ۴ گرم زئولیت بر کیلوگرم به همراه ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_7)، با مقدار ۴۷/۷۲ و کمترین آن در تیمار شاهد با مقدار ۴۲/۰۸ به دست آمد (جدول ۴). افزایش میزان نیتروژن در گیاه به علت حضور این عنصر در ساختمان کلروفیل، سبب افزایش میزان کلروفیل می شود که به دنبال آن توانایی جذب نور خورشید و تولید مواد فتوسنتزی افزایش می یابد (۱۲). هم چنین زئولیت به دلیل میل ترکیبی بالای آن با یون آمونیوم و حفظ نیتروژن خاک، می تواند دسترسی گیاهان به نیتروژن را بهبود بخشد و به شکل غیرمستقیم بر شاخص کلروفیل اثر گذارد (۲۰). کریمی و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند زئولیت با

حفظ طولانی مدت رطوبت و نیتروژن محلول در خاک به افزایش شاخص سبزینگی کمک می کند (۹).

عملکرد بیولوژیک: نتایج به دست آمده نشان داد که اثر تیمار اصلاح کننده و اثر متقابل نوع خاک و تیمار اصلاح کننده در سطح احتمال یک درصد معنی دار گردید (جدول ۳). بیشترین عملکرد بیولوژیک (۲۶/۴۷ گرم در گلدان) در تیمار خاک با بافت لوم شنی و تیمار ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم به همراه ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_8) به دست آمد که با تیمار خاک با بافت لوم رسی سیلتی و تیمار ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم به همراه ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_8) تفاوت معنی داری نداشت. هم چنین کمترین مقدار عملکرد بیولوژیکی (۱۶/۶۱ گرم در گلدان) در تیمار خاک با بافت لوم شنی و تیمار شاهد (T_0)، مشاهده شد (شکل ۱). به نظر می رسد اثر مثبت زئولیت بر افزایش عملکرد بیولوژیک به دلیل نقش مؤثر زئولیت بر دسترسی نیتروژن و اثر آن در افزایش تولیدات فتوسنتزی و اختصاص این مواد به اندام های هوایی و دانه می باشد. کاربرد زئولیت با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و بهبود فراهمی عناصر غذایی در خاک و به دنبال آن افزایش جذب آن ها برای گیاه، می تواند از دیگر دلایل افزایش عملکرد بیولوژیک باشد (۱۲). کاربرد نیتروژن با افزایش و تحریک رشد رویشی اندام های هوایی گیاه، باعث افزایش عملکرد کاه و کلس و در نتیجه افزایش عملکرد بیولوژیک می گردد (۳۰).



شکل ۱- اثر متقابل نوع خاک و تیمارهای اصلاح کننده بر عملکرد بیولوژیک.

خاک لوم شنی (S₁)، خاک لوم رسی سیلتی (S₂)، شاهد (T₀)، ۱۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₁)، ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₂)، ۲ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₃)، ۴ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₄)، ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₅)، ۲ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₆)، ۴ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₇)، ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₈)، ۲ گرم زئولیت غنی شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₉)، ۴ گرم زئولیت غنی شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₁₀) و ۶ گرم زئولیت غنی شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₁₁). ستون‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، نمایانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد است.

Fig. 1. The interaction effect of soil type and amendment treatments on biological yield.

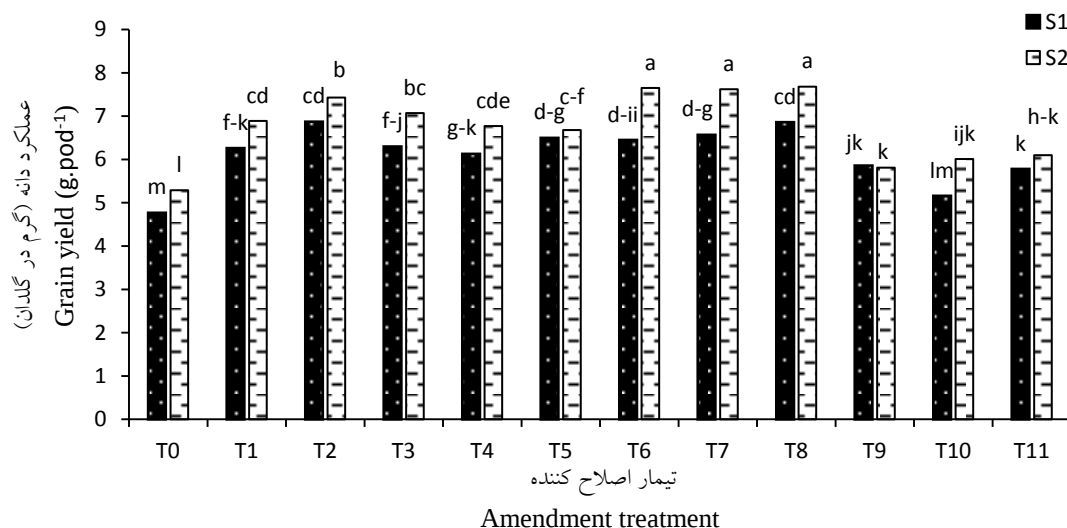
Sandy loam soil (S₁), Silty clay loam soil (S₂), Control (T₀), 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₁), 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₂), 2 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₃), 4 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₄), 6 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₅), 2 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₆), 4 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₇), 6 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₈), 2 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₉), 4 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₁₀) and 6 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₁₁). Means followed with the same letters in each column are not significant at P<0.05

شد که با تیمارهای T₆ و T₇ تفاوت معنی دار نداشت. عملکرد دانه در تیمار ۶ گرم زئولیت غنی شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₁₁) و در خاک لوم رسی سیلتی ۶/۱ گرم در گلدان به دست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۱۵ درصد افزایش نشان داد و تفاوت معنی داری بین سطوح مختلف زئولیت غنی شده مشاهده نشد (شکل ۲). با توجه به تفاوت در مقادیر عناصر غذایی و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در دو خاک

عملکرد دانه: نتایج به دست آمده نشان داد که اثر نوع خاک و تیمار اصلاح کننده در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل نوع خاک و تیمار اصلاح کننده در سطح احتمال پنج درصد معنی دار گردید (جدول ۳). بیشترین عملکرد دانه در تیمار خاک با بافت لوم رسی سیلتی و تیمار ۶ گرم زئولیت در کیلوگرم به همراه ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₈) به مقدار ۷/۶۸ گرم در گلدان، مشاهده

بسیاری از مولکول‌های مهم از جمله پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک، برخی هورمون‌ها، کلروفیل و انواع دیگری از مواد سازنده اولیه و ثانویه در گیاهان می‌باشد.

مورد مطالعه، افزایش عملکرد در خاک لوم رس سیلتی قابل پیش‌بینی بود. به نظر می‌رسد در مرحله تشکیل دانه کاربرد ژئولیت با نگهداشت عناصر غذایی در خاک سبب افزایش در وزن دانه و عملکرد آن گردید (۱۲). نیتروژن یکی از اجزاء تشکیل‌دهنده



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و تیمارهای اصلاح‌کننده بر عملکرد دانه.

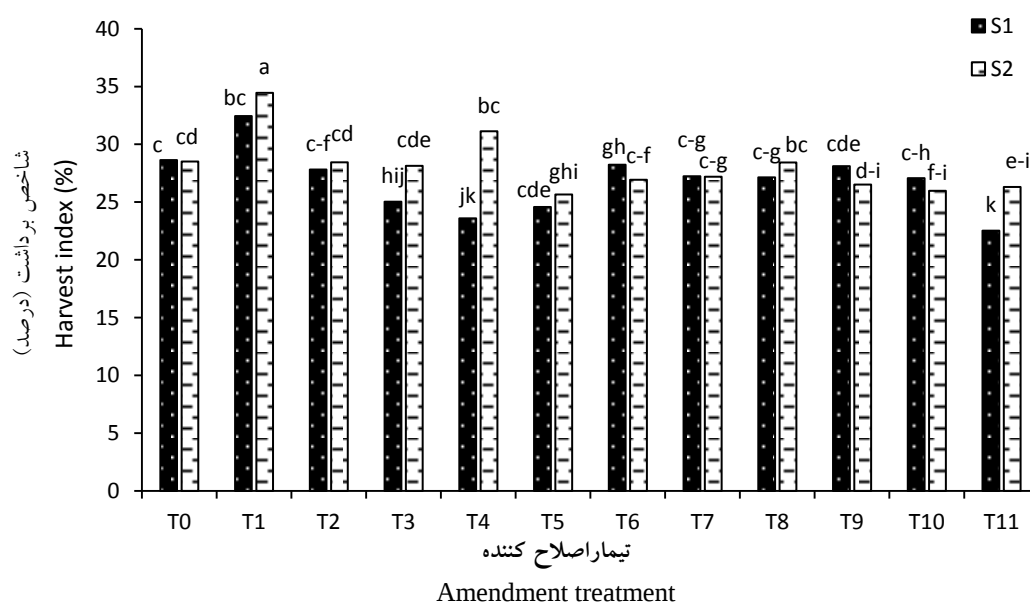
خاک لوم شنی (S₁)، خاک لوم رسی سیلتی (S₂)، شاهد (T₀)، ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₁)، ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₂)، ۲ گرم ژئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₃)، ۴ گرم ژئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₄)، ۶ گرم ژئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₅)، ۲ گرم ژئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₆)، ۴ گرم ژئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₇)، ۶ گرم ژئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₈)، ۲ گرم ژئولیت غنی‌شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₉)، ۴ گرم ژئولیت غنی‌شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₁₀) و ۶ گرم ژئولیت غنی‌شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₁₁). ستون‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، نمایانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

Fig. 2. Mean comparison of the interaction effect of soil type and amendment treatments on grain yield. Sandy loam soil (S₁), Silty clay loam soil (S₂), Control (T₀), 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₁), 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₂), 2 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₃), 4 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₄), 6 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₅), 2 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₆), 4 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₇), 6 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₈), 2 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₉), 4 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₁₀) and 6 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₁₁). Means followed with the same letters in each column are not significant at P<0.05

کاربرد کود نیتروژن و زئولیت از طریق افزایش جذب نیتروژن گیاه، سبب افزایش شاخص سطح برگ و همچنین سرعت بالاتر گسترش سطح برگ می‌شود و در نتیجه آسیمیلات بیش‌تری به سمت اندام‌های زایشی منتقل شده و در نهایت عملکرد دانه نسبت به شرایط عدم کاربرد زئولیت و نیتروژن افزایش می‌یابد (۱۶). در پژوهشی که جهت تعیین اثرات زئولیت بر شاخص‌های گیاه کلزا در رژیم‌های مختلف آبیاری انجام گرفته است، نتایج نشان داد که در آبیاری معمولی (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و استفاده از زئولیت (۱۵ تن در هکتار) موجب افزایش ۲۳ درصدی عملکرد دانه نسبت به شاهد (عدم کاربرد زئولیت) شد (۲). زابکوا و همکاران (۲۰۲۲) اثر زئولیت، کود شیمیایی $N_{60}P_{60}K_{60}$ و زئولیت همراه با کود را بر عملکرد کلزا بررسی کردند و نتایج نشان داد که مصرف زئولیت همراه با کود مؤثرترین تیمار بر عملکرد دانه کلزا بود (۳۱).

شاخص برداشت: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر نوع خاک، تیمار اصلاح‌کننده و اثر متقابل نوع خاک و تیمار اصلاح‌کننده بر شاخص برداشت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید. نتایج مقایسه

میانگین اثر متقابل نوع خاک و تیمار اصلاح‌کننده نشان داد که بیش‌ترین شاخص برداشت (۳۴/۴۶ درصد) در تیمار خاک لوم رسی سیلتی و تیمار ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_1) و کم‌ترین آن (۲۲/۵۳ درصد) در تیمار خاک با بافت لوم شنی و تیمار ۸ گرم زئولیت غنی‌شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T_{11}) به دست آمد (شکل ۳). با افزایش مقدار کود سولفات آمونیوم از ۱۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_1) به ۱۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T_2) شاخص برداشت در خاک لوم شنی ۱۶ درصد و در خاک لوم رسی سیلتی ۲۱ درصد کاهش یافت (شکل ۳). شاخص برداشت بیان‌کننده چگونگی توزیع مواد فتوسنتزی بین مخزن‌های اقتصادی و سایر مخزن‌های موجود در گیاه است. با افزایش کاربرد نیتروژن به‌دلیل افزایش شاخ و برگ، سهم کمتری از مواد فتوسنتزی به دانه‌ها اختصاص یافت و از این‌رو شاخص برداشت کاهش یافت (۳۲). شبوطی و همکاران (۲۰۲۲) بیان کردند بیش‌ترین و کم‌ترین شاخص برداشت به ترتیب در مقادیر ۹۰ و ۱۹۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌دست آمد (۳۳).



شکل ۳- اثر متقابل نوع خاک و تیمارهای اصلاح کننده بر شاخص برداشت.

خاک لوم شنی (S₁)، خاک لوم رسی سیلتی (S₂)، شاهد (T₀)، ۱۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₁)، ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₂)، ۲ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₃)، ۴ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₄)، ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₅)، ۲ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₆)، ۴ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₇)، ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₈)، ۲ گرم زئولیت غنی شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₉)، ۴ گرم زئولیت غنی شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₁₀) و ۶ گرم زئولیت غنی شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₁₁). ستون‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، نمایانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

Fig. 3. The interaction effect of soil type and amendment treatments on harvest index.

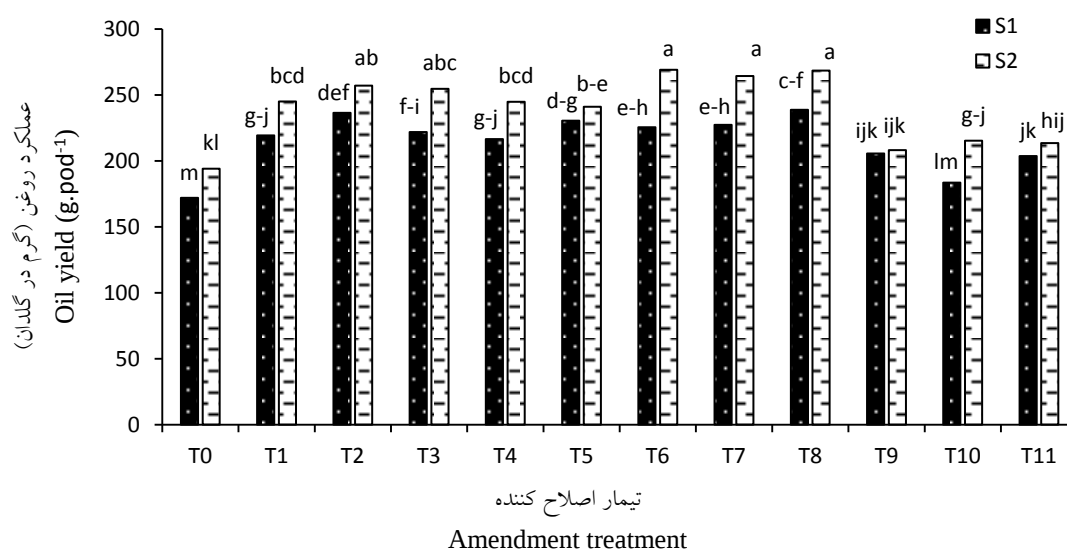
Sandy loam soil (S₁), Silty clay loam soil (S₂), Control (T₀), 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₁), 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₂), 2 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₃), 4 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₄), 6 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₅), 2 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₆), 4 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₇), 6 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₈), 2 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₉), 4 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₁₀) and 6 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₁₁). Means followed with the same letters in each column are not significant at P<0.05

عملکرد روغن: نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس نشان داد اثر نوع خاک و تیمار اصلاح کننده در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل نوع خاک و تیمار اصلاح کننده در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار گردید (جدول ۳). با توجه به شکل ۴ در تیمار خاک با بافت لوم رسی سیلتی و تیمار ۲ گرم زئولیت بر کیلوگرم به همراه ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₆)، بیشترین عملکرد روغن

به دست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۱۰ درصد به مقدار آن (۱۷۱/۹۷ گرم) در تیمار خاک با بافت لوم شنی و تیمار شاهد (T₀)، ۵۶ درصد افزایش یافت. بین مقادیر مختلف زئولیت بر عملکرد روغن دانه تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. هم‌چنین عملکرد روغن دانه در تیمار ۴ گرم زئولیت غنی شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₁₀) در خاک لوم رسی سیلتی ۲۱۵/۳۸ گرم به دست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۱۰ درصد

دانه کلزا می‌گردد (۳۴). با توجه به اهمیت روغن دانه کلزا در بخش کشاورزی و صنعت و همچنین تأثیر مثبت زئولیت بر افزایش درصد روغن دانه، کاربرد زئولیت به همراه کود نیتروژنی می‌تواند روشی مؤثر بر افزایش درصد روغن دانه باشد.

افزایش یافت (شکل ۴). عملکرد روغن دانه تابعی از درصد روغن و عملکرد دانه می‌باشد و به نظر می‌رسد مصرف کود سولفات آمونیوم از طریق تأثیر بر عملکرد دانه تأثیر مثبت بر عملکرد روغن داشته است. ژائو و همکاران (۲۰۲۳) بیان کردند استفاده از کود نیتروژن سبب کاهش درصد روغن و افزایش عملکرد روغن



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و تیمارهای اصلاح کننده بر عملکرد روغن.

خاک لوم شنی (S₁), خاک لوم رسی سیلتی (S₂), شاهد (T₀), ۱۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₁), ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₂), ۲ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₃), ۴ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₄), ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₅), ۲ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₆), ۴ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₇), ۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم + ۱۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم کود سولفات آمونیوم (T₈), ۲ گرم زئولیت غنی شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₉), ۴ گرم زئولیت غنی شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₁₀) و ۶ گرم زئولیت غنی شده با آمونیوم بر کیلوگرم (T₁₁). ستون‌های دارای یک حرف لاتین مشترک، نمایانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد است

Fig. 4. Mean comparison of the interaction effect of soil type and amendment treatments on oil yield. Sandy loam soil (S₁), Silty clay loam soil (S₂), Control (T₀), 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₁), 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₂), 2 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₃), 4 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₄), 6 g kg⁻¹ zeolite + 108 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₅), 2 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₆), 4 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₇), 6 g kg⁻¹ zeolite + 153 mg kg⁻¹ ammonium sulphate fertilizer (T₈), 2 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₉), 4 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₁₀) and 6 g kg⁻¹ ammonium enriched zeolite (T₁₁). Means followed with the same letters in each column are not significant at P<0.05

نتیجه گیری

خاک و گیاه باشد. با توجه به دوام زئولیت در خاک برای مدت طولانی، استفاده از آن به عنوان یک اصلاح کننده معدنی در خاک می تواند با بهبود وضعیت حاصلخیزی خاک، سبب افزایش عملکرد گردد. پیشنهاد می شود اثر زئولیت به تنهایی و یا با کاربرد کود شیمیایی بر عملکرد و اجزای عملکرد سایر گیاهان زراعی در شرایط مزرعه بررسی گردد.

تیمار خاک با بافت لوم رسی سیلتی و تیمار ۶ گرم زئولیت در کیلوگرم به همراه ۱۵۳ میلی گرم در کیلوگرم کود سولفات آمونیوم بیشترین تأثیر را بر عملکرد بیولوژیکی، عملکرد دانه و عملکرد روغن داشت. همچنین کاربرد ۶ گرم زئولیت غنی شده با آمونیوم یکی از موثرترین تیمارها بر صفات مورد مطالعه بود که به عنوان یک اصلاح کننده طبیعی خاک می تواند روش مؤثری در جهت بهبود خصوصیات

منابع

1. Rigby, D., & Caceres, D. (2001). Organic farming and the sustainability of agricultural systems. *Agricultural Systems*, 68, 21-40. doi: 10.1016/S0308-521X(00)00060-3.
2. Bagheri, H., Farahvash, F., Sam Daliri, M., Yarnia, M., & Shirani Rad, A. H. (2015). Investigation of the application of zeolite and manganese on yield, oil content and glucosinolate of rapeseed cultivars in different irrigation regimes. *Journal of Plant Ecophysiology*, 23(7), 44-29. doi: 10.1001.1.20085958.1394.7.23.3.9. [In Persian]
3. Brevik, E., Cerda, A., Mataix-Solera, J., Pereg, L., Quinton, J., Six, J., & Oost, K. (2015). The interdisciplinary nature of soil. *Soil*, 1, 117-129. doi: 10.5194/soil-1-117-2015.
4. Beyki A., & Khashei Siuki 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), 137-149. doi:10.22092/JWRA.2019.119120.
5. Sahari, M., Feyz Asl, A., & Valizadeh, G. R. (2009). Investigation of the effect of urea foliar application time on quantitative and qualitative characteristics of Sardari wheat in rainfed conditions. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 3(52), 2011-1998. [In Persian]
6. Mihok, F., Macko, J., Orinak, A., Orinaková, R., Koval, K., Sisakova, K., Petrus, O., & Kostecka, Z. (2020). Controlled nitrogen release fertilizer based on zeolite clinoptilolite: Study of preparation process and release properties using molecular dynamics. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 3, 100030. doi. org/10.1016/j.crgsc.2020.100030.
7. Jarosz, R., Szerement, J., Gondek, K., & Mierzwa-Hersztek, M. (2022). The use of zeolites as an addition to fertilisers—A review. *Catena*, 213, 106125. doi. 10.1016/j.catena.2022.106125.
8. Gan, Y., Malhi, S. S., Brandt, S., Katepa-Mupondwa, F., & Stevenson, C. (2011). Nitrogen use efficiency and nitrogen uptake of Jancea canola under diverse environments. *Agronomy Journal*, 100, 285-295. doi: 10.2134/agronjnl2007.0229.
9. Karimi, 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. doi: 10.1007/s42729-020-00223-z.
10. Doni, S., Gispert, M., Peruzzi, E., Macci, C., Mattii, G. B., Manzi, D.,

- Masini, C. M., & Grazia, M. (2020). Impact of natural zeolite on chemical and biochemical properties of vineyard soils. *Soil Use and Management*, 37(4), 832-842. doi:10.1111/sum.12665.
11. Mottaghi, S., Mottaghi, L., Shiranirad, A., & Lotfifar, O. (2019). Study the efficiency of zeolite in reduce the effect of drought stress on agronomical traits and seed yield of rapeseed in Karaj region. *Plant Ecology*, 11(36), 256-271. doi:10.1001.1.20085958.1398.11.36.22.2.
12. Latifah, O., Ahmed, O. H., & Majid, N. M. A. (2017). Enhancing nitrogen availability from urea using clinoptilolite zeolite. *Geoderma*, 306, 152-159. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.07.012.
13. Flajsman, M., Mihelic, R., Kolmanic, A., & Acko, D.K. (2020). Influence of soil amended with zeolite and/or mineral N on agronomic performance and soil mineral N dynamics in a soybean–winter triticale crop rotation field experiment. *Cereal Research Communication*, 48, 239-246. doi: 10.1007/s42976-020-00030-3.
14. Noori, M., Zendehtel, M., & Ahmadi, A. (2006). Using natural zeolite for the improvement of soil salinity and crop yield. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 88, 77-84. doi: 10.1080/02772240500457928.
15. Polat, E., Karaca, M., Demir, H., & Onus, A. N. (2004). Use of natural zeolite (clinoptilolite) in agriculture. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 12(1), 183-189.
16. Ravali, C. H., Rao, K. J., Anjaiah, T., & Suresh, K. (2020). Influence of zeolite on nitrogen fractions, nitrogen use efficiency and nitrogen uptake of maize. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 2, 297-307. doi: 10.9734/irjpac/2020/v21i2330327.
17. Day, P. R. (1965). Particle fractionation and particle size analysis. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 9, 545-567.
18. Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon and organic matter. In A. L. Page (ed). *Method of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy, 539-579.
19. Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., & Loeppert, R. H. (1996). *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*. SSSA Book Series. Soil Science Society of America, Madison, WI. 1390 P.
20. Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen-total. P 595-624. In: R. H. Miller and D. R. Keeney (eds), *Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical Analysis*, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
21. Olsen, S. R., & Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. P 403-30, In: R. H. Miller and D. R. Keeney (eds), *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*, American Society of Agronomy, Madison.
22. Helmke, P. A., & Sparks, D. L. (1996). Lithium, Sodium, Potassium and Rubidium. P. 551-574. In: D. L. Sparks et al. (ed) *Methods of soil analysis, Part 3. ASA-SSA*, Madison, WI., USA.
23. Park, M., & Komarneni, S. (1998). Ammonium nitrate occlusion vs. nitrate ion exchange in natural zeolites. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 1455-1459.
24. Ozturk, O. (2010). Effects of source and rate of nitrogen fertilizer on yield, yield components and quality of winter rapeseed (*Brassica napus* L.). *Chilean Journal of Agriculture Research*, 70(1), 132-141. doi: 10.4067/S0718-58392010000100014.
25. Dastbaz, N., Ali Mohammadi, M., Karimi, A., & Salavati, S. (2023). Impact of zeolite and nitrogen application on nitrogen use efficiency, growth and yield of maize (*Zea mays* L.). *Agricultural Engineering*,

- 45(4), 391-408. **doi.10.22055/agen.2023.43010.1655.** [In Persian]
- 26.Seyedi, M., & Hamzei, J. (2022). Evaluation of rapeseed growth and yield under nitrogen fertilizer in rotation with corn and chickpea. *Journal of Plant Production Research*, 28(1), 81-91. **doi:10.22069/JOPP.2020.17248.2590.** [In Persian]
- 27.Rezvani, R., & Kafi, M. (2024). The effect of irrigation interval and different doses of zeolite on the growth and yield indices on white bean (*Phaseolus lanatus* L.). *Iranian Journal of Pulses Research*, 15(1), 75-91. **doi:10.22067/ijpr.2024.85616.1076.**
- 28.Zamani Nouri, A., Qashqai, A., & Hosseini Abri, S. (2014). Effect of zeolite on yield, yield components and protein content of red bean plant. The first national conference on sustainable agricultural development with the application of agricultural model, February 12. 2014. Islamic Azad University, Saveh branch, iran.
- 29.Fahim, M., Gharineh, M. H., & Bakhshandeh, A. (2019). Investigating the effect of different levels of nitrogen on oil and nitrogen traits of three rapeseed cultivars under early planting conditions in Khuzestan province, *Journal of Contemporary Research Science and Research*, 1(2), 43-53. [In Persian]
- 30.Behdarvandan, A., Soleimani, Y., & Alavi Fazel, M. (2022). Effect of Nitrogen and Zinc Sulfate Fertilizers on Yield and Yield Components of Barley (*Hordeum Vulgare* L.). *Sustainable Agricultural Science Research*, 1(4), 64-76. **doi:10.30495/sarj.2022.1952124.1066.** [In Persian]
- 31.Zubkova, T. N., Vinogradov, D. V., & Dubrovina, O. A. (2022). Effect of zeolite on the micro-morphological and biochemical features of the spring rapeseed. *Sabrao Journal of Breeding and Genetics*, 54(1), 153-164. **doi. 10.54910/sabrao2022.54.1.14.**
- 32.Yu, X., & Li, B. (2019). Release mechanism of a novel slow release nitrogen fertilizer. *Particuol.* 4, 124-130. **doi:10.1016/j.partic.2018.09.005.**
- 33.Shabouti, M., Banisaidi, A., & Modhaj A. (2022). Study the response of bread wheat (*Triticum eastivum* L.) cultivars to seeding rate and different amounts of nitrogen. *Bi-Quarterly Journal of Plant Production*, 12(2), 140-158. [In Persian]
- 34.Zhao, D., Cao, Z., Chen, L., Zhan, G., Zhu, Y., & Han, J. (2023). Optimizing the effect of nitrogen on winter oilseed rape grain yield in china: A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 144, 126755. **doi.org/10.1016/j.eja.2023.126755.**

