Research Article

Agricultural Engineering., 48(2) (2025) 231- 248 ISSN (E): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2025.48642.1759 ISSN (P): 2588-5944

Application of natural and enriched zeolite on yield, yield components and the concentration of potassium in soil and rapeseed.

M. Agooshi[1], M.A. Bahmanyar[2*], M. Ghajar Sepanlu[3] and S.M. Emadi[4].

1. Ph. D Student, Department of Soil Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. Sari. Iran.
2. Professor, Department of Soil Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. Sari. Iran.
3. Associate Professor, Department of Soil Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. Sari. Iran.
4. Associate Professor, Department of Soil Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. Sari. Iran

.

Received: 1 January 2025 Accepted: 21 March 2025 *Corresponding Author: mali.bahmanyar@gmail.com

Abstract

Introduction: In recent years, ensuring the continuous and sustainable production of healthy food products along with environmental protection and paying attention to agricultural economic and environmental problems is very important. Potassium is one of the major nutrients that its deficiency decreased the growth and yield of rapeseed. After soybean, rapeseed is the world's second produced oilseed. soil inorganic amendments such as zeolite are good strategies to improve soil quality and increase soil potassium content. The addition of zeolite plays an important role in reducing the nutrients loss and increasing fertilizer use efficiency. Considering unique characteristics of zeolites, such as the low-cost and abundance of its mines in Iran, having a special physical and chemical structure and it plays an important role in enhancing the water and nutrients uptake by plant. This research was conducted with the aim of determining the effects of natural and enriched zeolite with potassium on rapeseed yield, component yields and concentration of potassium in soil and rapeseed in two soils with different texture (sandy loam and silty clay loam).

Materials and Methods: This experiment was conducted as a split plot in the form of a completely "randomized" design in pots conditions for three replicates in the research greenhouse of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. In this experiment, the main factors include two types of soil (silty clay loam and sandy loam) and the secondary factors in twelve levels include the control (without zeolite and potassium sulphate) (T_0), 32 mg. kg^{-1} potassium sulphate fertilizer (T_1), 46 mg. kg^{-1} potassium sulphate fertilizer (T_2), 2 g zeolite with 32 mg. kg^{-1} potassium sulphate(T_3), 4 g zeolite with 32 mg. kg^{-1} potassium sulphate(T_4), 6 g zeolite with 32 mg. kg^{-1} potassium sulphate (T_5), 2 g zeolite with 46 mg. kg^{-1} potassium sulphate (T_6), 4 g zeolite with 46 mg. kg^{-1} potassium sulphate (T_7), 6 g zeolite with 46 mg. kg^{-1} potassium sulphate (T_8), 2 g enriched zeolite (T_9), 4 g enriched zeolite (T_{10}) and 6 g enriched zeolite (T_{11}) were considered.

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Zeolite enrichment was performed by ion saturation method. Rapeseed cultivation was carried out in the 2021 crop year. At the end of the crop season, each plot was harvested. Grain yield, some yield components (number of pods, thousand-seed weight, seed oil), leaf potassium, and seed potassium were measured. In addition, after harvest, soil sampling was performed from the plots and soil potassium was measured. Data analysis was performed in Statistic software, and comparison of means was performed using the LSD test.

Results and discussion: The results showed that the effects of the soil type treatments were significant on all studied traits except seed potassium. The effects of amendment treatment were significant ($P< 0.01$) on all studied and the interaction effect of soil type and amendment treatment was only significant ($P< 0.05$) on grain yield. The highest amount of grain yield (6.46 g) was observed in silty clay loam soil and 4 g zeolite with 46 mg. kg-1 potassium sulphate (T7) with increasing about 49% compared the lowest amount (4.33 g) was obtained in sandy clay loam soil and control (T0). The use of 4 g zeolite with 46 mg. kg potassium sulphate (T7) compared with the control (T0), was increased by 22% of thousand grain weight. Also the highest amount of grain oil (36.36 %) and grain potassium (2.75 %) was obtained in the treatment of 4 g zeolite with 46mg.kg-1 potassium sulphate(T7). The results also revealed that the number of pod (85.16 %), leaf potassium (2.28%) and soil potassium (155.83 mg. kg-1) with increasing about 40%, 19% and 21 % respectively, compared with the control were significantly affected by 6 g zeolite with 46 mg. kg potassium sulphate (T8). Among the enriched zeolite with potassium treatments, 4 g enriched zeolite (T11) had the greatest effect on the studied traits.

Conclusions: It can be concluded that, all studied traits except grain potassium in soil with silty clay loam texture were more than soil with sandy loam texture. The best results were obtained in 4 g zeolite with 46 mg. kg-1 potassium sulphate (T7). Among K-enriched zeolite, application of 4 g K-enriched zeolite was the most effective treatment on the studied traits. It can be concluded that the combined use of zeolite and potassium sulphate can be a suitable solution for improving rapeseed yield.

Keyword: grain oil, K-enriched zeolite, potassium sulphate, soil texture.

مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۸. شماره ۲، ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی

تاثیر زئولیت طبیعی و غنی شده با پتاسیم بر عملکرد، اجزای عملکرد و غلظت پتاسیم در خاک و گیاه کلزا

مائده آگوشی[۱]، محمدعلی بهمنیار[۲]*، مهدی قاجار سپانلو[۳] و سید مصطفی عمادی [٤]

۱- دانشجوی دکتری رشته مدیریت حاصلخیزی و زیست فناوری خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. ساری. ایران.
۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. ساری. ایران.
۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. ساری. ایران.
۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. ساری. ایران.

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

پذیرش نهایی: ۰۱/ ۱۴۰۴/۰۱

کلمات کلیدی:
بافت خاک،
روغن دانه،
زئولیت غنی‌شده با پتاسیم ،
سولفات پتاسیم.

* عهده دار مکاتبات

Email: mali.bahmanyar@gmail.com

چکیده

پتاسیم یکی از مهم‌ترین عناصر غذایی است که کمبود آن سبب کاهش رشد و عملکرد گیاه کلزا می‌گردد. کاربرد اصلاح‌کننده‌های معدنی مانند زئولیت رویکرد مناسبی در جهت بهبود کیفیت خاک و افزایش پتاسیم خاک می‌باشد. این پژوهش با هدف تعیین اثر کاربرد زئولیت و زئولیت غنی‌شده با پتاسیم بر عملکرد، اجزای عملکرد و غلظت عنصر پتاسیم در خاک و گیاه کلزا، در دو خاک با بافت متفاوت انجام شد. این آزمایش به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و در شرایط گلدانی در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال ۱٤۰۱ انجام شد. عامل اصلی شامل دو نوع خاک (لوم شنی و لوم رسی سیلتی) و عامل فرعی در دوازده سطح شامل شاهد، کود سولفات پتاسیم در دو سطح ۳۲ و ٤٦ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، کاربرد ۲، ٤ و ٦ گرم زئولیت به‌همراه ۳۲ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم خاک، ۲، ٤ و ٦ گرم زئولیت به‌همراه ٤٦ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم خاک و ۲، ٤ و ٦ گرم زئولیت غنی‌شده با پتاسیم در کیلوگرم خاک در نظر گرفته شد.

نتایج نشان داد اثر تیمار اصلاح‌کننده بر تمامی صفات مورد مطالعه($P < 0.01$) و اثر متقابل نوع خاک و تیمار اصلاح‌کننده تنها بر عملکرد معنی-دار ($P < 0.05$) گردید. اثر تیمار نوع خاک بر وزن هزاردانه، روغن دانه، پتاسیم خاک و برگ ($P < 0.01$) و بر عملکرد دانه و تعداد غلاف ($P < 0.05$) معنی‌دار گردید. بیش‌ترین عملکرد دانه (٦/٤٦ گرم) در خاک لوم رسی سیلتی و تیمار ٤ گرم زئولیت در کیلوگرم به‌همراه ٤٦ میلی-گرم در کیلوگرم کود سولفات پتاسیم (T_7) مشاهده شد. در بین تیمارهای زئولیت غنی شده، ٤ گرم زئولیت غنی شده (T_{11})، بیش‌ترین

تأثیر را بر صفات مورد مطالعه داشت. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت بهترین نتایج در تیمار ٤ گرم زئولیت در کیلوگرم به‌همراه ٤٦ میلی‌گرم در کیلوگرم کود سولفات پتاسیم (T_7) بدست آمد. در بین تیمارهای مقادیر مختلف زئولیت غنی‌شده با پتاسیم، تیمار ٤ گرم زئولیت غنی‌شده مؤثرترین تیمار بر صفات مورد مطالعه بود.

مقدمه

تغذیه صحیح گیاهان یکی از عوامل مهم در بهبود کمیت و کیفیت محصولات محسوب می‌گردد و هر عنصر باید به اندازه کافی برای تغذیه مناسب در دسترس گیاه قرار گیرد. ایجاد تعادل و رعایت نسبت عناصر نیز از اهمیت زیادی برخوردار است (۳۱). در بین عناصر غذایی، پتاسیم به‌عنوان یک عنصر پرمصرف در گیاهان نقش اساسی داشته و به عنوان یکی از سه عنصر مهم کودی، از اهمیت بالایی برخوردار است. اهمیت کود پتاسیم برای بهبود عملکرد و کیفیت گیاهان به‌خوبی شناخته شده است (۵۱). پتاسیم، کاتیون حامل آنیون‌ها بوده، در باز و بسته شدن روزنه‌ها و تقسیم سلولی، افزایش تحمل بیماری‌های گیاهی و تنش‌های محیطی مانند شوری و سرما و فعال شدن بیش از ۶۰ نوع آنزیم و افزایش واکنش کاتالیزوری در گیاه نقش مهمی دارد. همچنین پتاسیم اثرات مطلوبی بر متابولیسم اسیدهای نوکلئیک، پروتئین‌ها و ویتامین‌ها دارد (۹). پژوهشگران نشان دادند که عواملی مانند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نوع کانی‌های رسی، تکامل خاک و رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک می‌توانند روی مقدار، توزیع و چرخه پتاسیم مؤثر باشند (۳۷). اگرچه خاک‌های مناطق مختلف ایران دارای مقدار بالایی پتاسیم می‌باشند، اما امروزه به‌دلیل کشاورزی گسترده و استفاده از ارقام پرمحصول با قابلیت استفاده بالای پتاسیم و همچنین استفاده کم از کودهای پتاسیمی، مقدار قابل استفاده خاک‌ها کاهش یافته است (۷). همچنین در خاک‌های آهکی ایران، به‌دلیل اثر رقت، با افزایش مقدار کربنات کلسیم خاک‌ها، مقدار پتاسیم تبادلی، غیرتبادلی و ساختمانی خاک‌ها کاهش یافته است (۴۶). پتاسیم یکی از موثرترین عوامل تعیین کننده بر عملکرد دانه کلزا می‌باشد. پتاسیم در مکانیسم انتقال سایرعناصر غذایی از غشاء سلولی دخالت داشته و وجود آن برای انجام فتوسنتز موثر و ضروری می‌باشد (۵).

کلزا با نام علمی (*Brassica napus L*) از تیره شب بو و از جنس کلم می‌باشد که کشت عمده آن به‌دلیل استخراج روغن مورد توجه است. این گیاه پس از نخل روغنی و سویا در جایگاه سوم تولید محصولات روغنی قرار دارد (۱۹).

یکی از مهم‌ترین عواملی که ممکن است بر توزیع پتاسیم اثر بگذارد فعالیت‌های انسان مانند افزودن کودهای آلی و شیمیایی و همچنین مواد اصلاح‌کننده خاک مانند زئولیت می‌باشد (۳۸). زئولیت‌ها گروهی از کانی‌های آلومینوسیلیکاتی با شبکه سه بعدی می‌باشند، اسکلت باز آن‌ها شامل کانال‌ها و حفراتی حاوی کاتیون‌ها و مولکول‌های آب است و به‌دلیل تحرک این کاتیون‌ها، پدیده تبادل یونی که یکی از ویژگی‌های زئولیت‌ها است، میسر می‌شود (۱۲). زئولیت‌ها ظرفیت نگهداری آب بالایی داشته و می‌تواند با بهبود ویژگی‌های مختلف خاک در افزایش رشد و عملکرد گیاهان موثر باشد (۴). جذب انتخابی و آزاد سازی کنترل شده‌ی عناصر غذایی توسط زئولیت باعث می‌شود که در صورت انتخاب صحیح نوع زئولیت، از طریق فراهمی طولانی مدت عناصر غذایی و رطوبت به بهبود رشد گیاه کمک کند (۲۳). متقی و همکاران[1] (۲۰۱۹) به بررسی اثر زئولیت بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا پرداختند، نتایج نشان داد کاربرد زئولیت به مقدار ۱۰ تن در هکتار با بهبود شرایط رشد گیاه، عملکرد دانه را ۲۳ درصد افزایش داد (۳۵). جذب انتخابی پتاسیم نسبت به سایر یون‌ها توسط زئولیت به‌دلیل سطح ویژه بالا و وجود کانال های چند بعدی در زئولیت می‌باشد (۳۹). اگرچه زئولیت‌ها به منظور بهبود وضعیت پتاسیم خاک مورد استفاده قرار نمی‌گیرند اما

1- Motaghi *et al.*

تأثیرات ثانویه آن‌ها ممکن است روی توزیع و چرخه پتاسیم خاک مؤثر باشد. مطالعات قبلی نشان داد که زئولیت کلینوپتیلولیت بیش از ۱۲ گرم در کیلوگرم پتاسیم تبادلی دارد (۱۲ و ۲۷). برخی محققان بر این باورند که پتاسیم موجود در کلینوپتیلولیت بیشتر به فرم قابل تبادل است در حالی‌که نجفی قیری (۲۰۱۴) بیان کردند که بخش زیادی از پتاسیم موجود در زئولیت به فرم غیر قابل تبادل است (۳۸ و ۵۲). نوربخش و همکاران[1] (۲۰۱۱) به‌بررسی اثر افزودن ۰، ۱، ۲/۵ و ۵ درصد زئولیت بر میزان تغییرات پتاسیم تبادلی خاک پرداختند. نتایج نشان داد مقدار پتاسیم تبادلی در خاک‌های مورد مطالعه از ۲۴۳ تا ۴۵۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود که با افزودن زئولیت به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است (۴۱). لی و همکاران[2] (۲۰۲۲) هم به بررسی اثر زئولیت و پتاسیم بر عملکرد دانه و محتوای پتاسیم در مدت دو سال زراعی در مزارع شالیزار پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد بیش‌ترین عملکرد دانه با کاربرد ۵ تن در هکتار زئولیت و ۳۰ کیلوگرم در هکتار کود پتاسیمی در دومین سال کشت بدست آمد (۲۹). اسلامی و همکاران[3] (۲۰۱۹) بیان کردند که بیشترین مقدار پتاسیم خاک (۱۵۴/۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) با کاربرد زئولیت به مقدار ۲۰ گرم در گلدان بدست آمد که به نظر می‌رسد دسترسی پتاسیم در حضور زئولیت افزایش یافت (۱۷). همچنین زئولیت‌های طبیعی قابلیت غنی شدن با کاتیون‌های نظیر آمونیوم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سایر عناصر را دارند (۲۹).

ذخایر زئولیتی در ایران فراوان اند، ولیکن معادن مهم زئولیتی در سه نقطه متمرکز شده که عبارت است از: منطقه آذربایجان شرقی (میانه)، منطقه استان تهران (دماوند) و منطقه سمنان که به‌دلیل کیفیت بالا و ذخایر زیاد زئولیت به‌عنوان قطب زئولیت کشور شناخته شده است (۴۴). دلیل تنوع بافت خاک و تاثیر آن بر سایر ویژگی‌های خاک، بررسی تأثیر اصلاح‌کننده‌ها بر روی رشد گیاه در خاک‌های با بافت متفاوت ضرورت دارد. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد زئولیت‌ها از قبیل ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت نگهداشت بالای آب و فراوانی آن در ایران و با توجه به اهمیت سلامت خاک و لزوم حفظ آن در راستای تحقق اهداف کشاورزی پایدار و اهمیت کشت کلزا در استان مازندران نیاز به مطالعه بر شاخص‌های عملکردی کلزا آشکار می‌گردد. تاکنون در بیش‌تر مطالعات، به‌بررسی اثر زئولیت غنی‌شده با آمونیوم بر حاصلخیزی خاک و عملکرد گیاهان پرداختند و با توجه به‌اینکه زئولیت مورد استفاده در این آزمایش پتانسیل بالایی جهت غنی‌سازی با پتاسیم داشت، ضرورت بررسی اثر کاربرد زئولیت و زئولیت غنی شده با پتاسیم به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک و تحلیل اقتصادی کاربرد زئولیت بر عملکرد کلزا به‌عنوان یک رویکرد جدید برای توصیه مصرف بهینه زئولیت در بخش کشاورزی، مورد توجه قرار گرفت. هدف از این مطالعه بررسی اثر کاربرد زئولیت طبیعی و غنی شده با پتاسیم در دو خاک با بافت متفاوت بر عملکرد، اجزای عملکرد، غلظت پتاسیم در خاک و گیاه بود.

مواد و روش‌ها

این مطالعه به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و به صورت 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 (بدون کاربرد زئولیت و کود سولفات پتاسیم) (T_0)، ۳۲ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم خاک (T_1)، ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم خاک (T_2)، ۲ گرم زئولیت در کیلوگرم خاک + ۳۲ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم خاک (T_3)، ۴ گرم زئولیت در کیلوگرم خاک + ۳۲ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم خاک (T_4)، ۶ گرم زئولیت در کیلوگرم خاک + ۳۲ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم خاک (T_5)، ۲ گرم زئولیت در کیلوگرم خاک + ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم خاک (T_6)، ۴ گرم زئولیت در کیلوگرم خاک + ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم خاک (T_7)، ۶ گرم زئولیت در کیلوگرم خاک + ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم خاک (T_8)، ۲ گرم زئولیت غنی

1- Nourbakhsh *et al.*
2- Li *et al.*
3- Eslami *et al.*

شده با پتاسیم در کیلوگرم خاک (T_9) ، ۴ گرم زئولیت غنی شده با پتاسیم در کیلوگرم خاک (T_{10}) و ۶ گرم زئولیت غنی شده با پتاسیم در کیلوگرم خاک (T_{11})، در سه تکرار و در مجموع ۷۲ گلدان در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است مقدار ۳۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم سولفات پتاسیم مطابق توصیه آزمون خاک و ۴۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم سولفات پتاسیم، ۲۵ درصد بیش‌تر از توصیه آزمون خاک می‌باشد. در جدول ۱ برخی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه ارائه شده است.

بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۵)، کربن آلی (۴۰)، قابلیت هدایت الکتریکی و pH خاک (۴۹) نیتروژن خاک به روش کلدال (۱۱)، فسفر خاک به روش اولسن (۴۲) و پتاسیم تبادلی خاک نیز به روش استخراج با استات آمونیوم یک مولار با دستگاه فلیم‌فتومتر (مدل M۴۱۰، Sherwood، انگلستان) اندازه‌گیری شد. زئولیت مورد استفاده در این آزمایش از معادن استان سمنان تهیه شد. زئولیت به روش اشباع یونی غنی‌سازی شد. ابتدا زئولیت توسط الک شماره ۳۵ به اندازه ۰/۵ میلی‌متر جدا شد. سپس زئولیت با استفاده از آب مقطر (نسبت ۱:۱۰) شسته و در هوای آزاد خشک گردید. ۵ گرم زئولیت جداگانه در ۲۵ میلی‌لیتر محلول ۱ مولار کلرید پتاسیم 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 این عمل تکرار شد و سه مرتبه شستشو با آب مقطر جهت رفع نمک‌های اضافه صورت گرفت و در نهایت زئولیت غنی‌شده با پتاسیم در آون در دمای ۵۰ درجه سلسیوس خشک و آماده گردید (۴۳). پس از تهیه زئولیت غنی شده، درصد عناصر تشکیل دهنده‌ی آن با دستگاه فلوئورسانس اشعه ایکس (XRF)، ظرفیت تبادل کاتیونی زئولیت به‌روش اشباع استات آمونیوم (۲۴)، قابلیت هدایت الکتریکی (۱:۵) و pH زئولیت (۱:۵) اندازه‌گیری شد (۴۹)، که در جدول ۲ ارائه شده است.

به منظور آماده سازی گلدان‌ها، با توجه به اندازه گلدان و چگالی ظاهری خاک های مورد آزمایش، مقدار خاک مورد نیاز برای هر گلدان محاسبه شد و پس از اعمال تیمارها، به گلدان‌ها انتقال داده شد. وزن خاک گلدان در تیمار خاک لوم شنی ۱۰/۹ کیلوگرم و در تیمار خاک لوم رسی سیلتی ۹/۷ کیلوگرم می‌باشد.

در هر گلدان ده بذر جوانه‌دار کلزا کاشته شد و پس از پنج برگی شدن به سه بوته تنک گردید. عملیات آبیاری و وجین علف‌های هرز با دست انجام گرفت. رطوبت خاک گلدان‌ها در طول دوره رشد گیاه در حدود ظرفیت زراعی به‌روش وزنی تامین شد (۲۱). در مرحله گلدهی از هر تیمار نمونه برگ از برگ‌های توسعه یافته تهیه و در مرحله برداشت از دانه کلزا و خاک نمونه‌برداری شد. جهت اندازه‌گیری عملکرد و اجزای عملکرد، بوته‌ها را به آزمایشگاه منتقل کرده و تعداد غلاف، وزن هزاردانه تعیین شد. پتاسیم برگ، و دانه به روش خاکستر خشک و با دستگاه فلیم‌فتومتر (مدل M۴۱۰، Sherwood، انگلستان) و پتاسیم تبادلی خاک نیز به روش استخراج با استات آمونیوم یک مولار با دستگاه فلیم‌فتومتر (مدل M۴۱۰، Sherwood، انگلستان) اندازه‌گیری شد (۲۲). روغن دانه با دستگاه سوکسله و حلال دی متیل اتر اندازه‌گیری شد (۲۳). تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم افزار 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.

جدول (۱) برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

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

بافت خاک	چگالی ظاهری	رس	سیلت	شن	کربن آلی	پ.هاش	قابلیت هدایت الکتریکی	نیتروژن	فسفر قابل دسترس	پتاسیم قابل دسترس
Soil texture	Bulk density ($g.\ cm^{-3}$)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	(OC) (%)	pH	($dS.\ m^{-1}$) (EC)	N (%)	Available p ($mg.\ kg^{-1}$)	Available K ($mg.\ kg^{-1}$)
لوم شنی	1.40	14	26	60	0.82	7.82	1.19	0.09	10.43	112

لوم رسی سیلتی (S_1)	1.24	31	47	22	1.23	7.40	0.71	0.12	14.51	168
لوم رسی سیلتی (S_2)										

نتایج و بحث

عملکرد دانه: نتایج تجزیه واریانس ارائه شده در جدول ۳ نشان داد که اثر تیمار اصلاح‌کننده بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد و اثر نوع خاک و اثر متقابل نوع خاک و تیمار اصلاح‌کننده در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار گردید (جدول ۳).

با توجه به نمودار (۱) بیش‌ترین عملکرد دانه در خاک لوم رسی سیلتی و تیمار ۴ گرم زئولیت به‌همراه ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم (T_7) و کم‌ترین آن در خاک لوم شنی و تیمار شاهد مشاهده شد. با توجه به جدول ۱ و تفاوت در مقادیر عناصر غذایی و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در دو خاک مورد مطالعه، افزایش عملکرد در خاک لوم رسی سیلتی قابل پیش بینی بود. اثرات زئولیت در خاک‌های با بافت مختلف، می‌تواند متفاوت باشد. افزودن زئولیت به خاک‌های با درصد رس بیش‌تر ممکن است میانگین اندازه ذرات را افزایش دهد، بنابراین منجر به هدایت هیدرولیکی بالاتری می‌شود (۲۸). پتاسیم با اینکه در ساختمان هیچ‌کدام از ترکیبات مهم گیاهی مانند پروتئین‌ها، چربی‌ها و قندها شرکت ندارد، اما به عنوان مهم‌ترین فعال کننده آنزیم‌های احیاکننده دی اکسید کربن نقش ایفا می‌کند و به همین دلیل در افزایش سوخت و ساز، رشد و عملکرد گیاه نقش بسزایی دارد (۵۴).

ای و همکاران[1] (۲۰۲۰) به مطالعه اثرات کود پتاسیمی بر عملکرد دانه در ارقام مختلف کلزا پرداختند. نتایج نشان داد مصرف کود پتاسیمی عملکرد دانه را از ۷/۵ تا ۳۲/۶ درصد افزایش داد (۵۳). لی و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند کاربرد ۵ تن در هکتار زئولیت به‌همراه ۳۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم، عملکرد دانه را ۶/۴ درصد افزایش داد (۲۸).

وزن هزار دانه: نتایج بدست آمده نشان داد که اثر نوع خاک و تیمار اصلاح‌کننده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر نوع خاک بر وزن هزار دانه نشان داد که بیش‌ترین وزن هزار دانه در خاک لوم رسی سیلتی (۳/۳۸ گرم) و کم‌ترین آن در خاک لوم شنی (۳/۲۵ گرم در گلدان) مشاهده شد (جدول ۵). با توجه به محتوای عناصر غذایی در خاک لوم رسی سیلتی (جدول ۱) و به‌دلیل اینکه قابلیت حفظ آب و عناصر غذایی در خاک‌های با درصد رس بیشتر، بیش‌تر از خاک‌های با درصد رس کم‌تر می‌باشد، در نتیجه وزن هزار دانه در خاک لوم رسی سیلتی بیش‌تر بود (۲۱). همچنین نتایج جدول ۶ نشان داد که با مصرف ۴ گرم زئولیت در کیلوگرم خاک به‌همراه ۴۶ میلی‌گرم در کیلوگرم کود سولفات پتاسیم (T_7) بیش‌ترین مقدار وزن هزار دانه (۳/۶۵ گرم) بدست آمد که نسبت به شاهد (۲/۷۵ گرم)، ۲۲ درصد افزایش نشان داد. در بین تیمارهای زئولیت غنی‌شده با پتاسیم، ۴ گرم زئولیت غنی شده با پتاسیم در کیلوگرم (T_{10})، (۳/۱۷ گرم) بیش‌ترین تاثیر را بر وزن هزار دانه داشت (جدول ۶). پتاسیم با افزایش کارایی مصرف آب، بهبود شرایط رشد گیاه، تقسیم سلولی و ساخت کربوهیدرات‌ها و انتقال سریع آن به طرف دانه موجب افزایش وزن هزار دانه و عملکرد دانه می‌گردد (۱۳). همچنین تخلخل زیاد و ساختار کریستالی زئولیت با افزایش ظرفیت نگه‌داشت آب در خاک و همچنین کاهش آبشویی عناصر غذایی به‌عنوان اصلاح‌کننده اثر بخشی کودهای شیمیایی را افزایش می‌دهد (۱۶). افزایش وزن هزار دانه را می‌توان به‌دلیل افزایش نگهداشت عناصر غذایی و ظرفیت نگهداری آب در خاک با حضور زئولیت نسبت داد (۲).

1- Ye *et al.* Ye *et al.*

جدول (۲) برخی ویژگی‌های شیمیایی زئولیت خام و غنی‌شده با پتاسیم

Table (2) Selected chemical characteristics of raw and K-enriched zeolite.

نمونه sample	پ.هاش pH	هدایت الکتریکی EC ($dS.\ m^{-1}$)	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC ($Cmol_c.\ kg^{-1}$)	اکسید سیلیسیم SiO_2 (%)	اکسید آلومینیوم Al_2O_3 (%)	اکسید آهن Fe_2O_3 (%)	اکسید کلسیم CaO (%)	اکسید سدیم Na_2O (%)	اکسید منیزیم MgO (%)	اکسید پتاسیم K_2O (%)
زئولیت خام Raw zeolite	7.9	0.6	135	68.32	10.27	0.73	2.73	0.91	1.43	2.12
زئولیت غنی‌شده Enriched zeolite	7.9	0.5	105	67.78	10.26	0.72	1.32	0.01	0.93	7.5

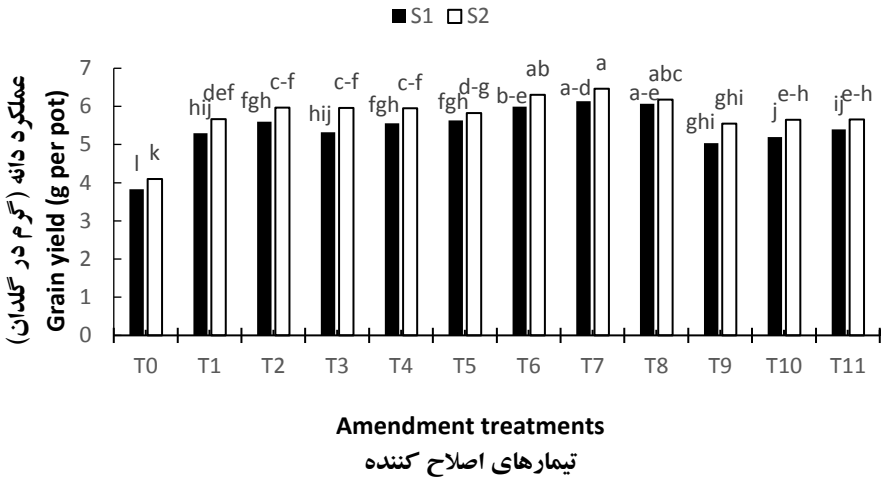
جدول (۳) نتیجه تجزیه واریانس عملکرد دانه و اجزای عملکرد در گیاه کلزا.

Table (3) analysis the variance of the grain yield and component yield in rapeseed.

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	عملکرد دانه Grain yield	وزن هزاردانه Thousand grain weight	تعداد غلاف Pod number	روغن دانه Grain oil
تکرار Replication	2	0.02	0.003	7.51	0.02
نوع خاک Soil type	1	3.07^{*}	0.344^{**}	654.01^{*}	24.37^{**}
خطا تکرار* نوع خاک Error replication* soil type	2	0.105	0.001	13.01	0.094
تیمار اصلاح‌کننده Amendment treatment	11	1.21^{**}	0.394^{**}	369.34^{**}	0.74^{**}
نوع خاک* تیمار اصلاح‌کننده Soil type*amendment treatment	11	0.07^{*}	0.025^{ns}	20.19^{ns}	0.14^{ns}
خطا تکرار*نوع خاک*تیمار اصلاح کننده Error replication*soil type*amendment treatment	44	0.03	0.025	22.77	0.09
ضریب تغییرات (تکرار* نوع خاک) C.V (replication*soil type)	-	5.68	1.17	4.71	3.81
ضریب تغییرات تکرار* نوع خاک*اصلاح کننده(درصد) C.V (replication*soil type*soil amendment)	-	3.25	3.70	6.23	5.04

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

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



در هرستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه، تفاوت معنی‌داری بر طبق آزمون LSD، در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

نمودار (۱) مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و تیمارهای اصلاح‌کننده بر عملکرد دانه.

Figure (1) Mean comparisons effect of soil type and amendment treatments on grain yield.

اصلانی و همکاران[1] (۲۰۲۱) بیان کردند بیش‌ترین وزن هزاردانه گندم (۴۱/۲ گرم) با کاربرد ۱۵ تن زئولیت در هکتار بدست آمد (۶).

تعداد غلاف: نتایج تجزیه واریانس بیانگر اثر معنی‌دار نوع خاک در سطح احتمال پنج درصد و تیمار اصلاح‌کننده در سطح احتمال یک درصد بر تعداد غلاف در گیاه کلزا بود ($P < 0.01$) (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد تعداد غلاف در خاک لوم رسی سیلتی (۸۲/۶۶ عدد) به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تعداد آن (۷۳/۶۳ عدد) در خاک لوم شنی بود (جدول ۵). با توجه به اینکه درصد عناصر غذایی در خاک لوم رسی سیلتی بیش‌تر از خاک لوم شنی بود، افزایش تعداد غلاف در خاک لوم رسی سیلتی انتظار می‌رفت (جدول ۱). همچنین بیش‌ترین تعداد غلاف (۸۵/۱۶) در تیمار ۶ گرم زئولیت در کیلوگرم به‌همراه ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم (T_8) و کم‌ترین تعداد غلاف (۶۰/۵ عدد) مربوط به تیمار شاهد (T_0) بود (جدول ۶). اما بین تیمار ۶ گرم زئولیت در کیلوگرم به‌همراه ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم (T_8) و تیمار ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم (T_2) تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. امینا و همکاران[2] (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای به بررسی اثر کود پتاسیمی بر رشد، عملکرد و اجزای عملکرد گیاه کلزا پرداختند و بیان کردند که بیش‌ترین تعداد غلاف با مصرف ۶۰ کیلوگرم کود پتاسیمی در هکتار به‌دست آمد (۳). وجود پتاسیم کافی سبب بهبود فعالیت فتوسنتزی و تولید مواد فتوسنتزی می‌شود و بدین‌ترتیب با توجه به نقش پتاسیم در انتقال اسمولیت‌ها و مواد غذایی، افزایش تعداد غلاف با کاربرد پتاسیم قابل توجیه است (۱). اگر چه در سطوح مختلف زئولیت غنی‌شده با پتاسیم، اختلاف معنی‌داری در تعداد غلاف مشاهده نشد اما بیش‌ترین تعداد غلاف در تیمار ۴ گرم زئولیت غنی شده با پتاسیم (T_{10})، (۷۱/۵ عدد در گلدان) مشاهده شد که نسبت به شاهد (T_0) ۱۸ درصد افزایش نشان داد (جدول ۶). زئولیت با بهبود کارآیی مصرف عناصر غذایی از طریق قابلیت جذب فسفر، آمونیوم و نیترات و همچنین با کاهش آبشویی و اتلاف کاتیون‌های تبادلی به خصوص پتاسیم، سبب افزایش در عملکرد و اجزای عملکرد دانه گردید (۱۰). متقی و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند که کاربرد زئولیت سبب افزایش تعداد غلاف کلزا در رژیم‌های مختلف رطوبتی شد (۳۶).

1- Aslani *et al.*

2- Amina *et al.*

روغن دانه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر نوع خاک و اثر تیمار اصلاح‌کننده بر درصد روغن دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۳). با توجه به نتایج جدول ۵، درصد روغن دانه در خاک با بافت لوم رسی سیلتی به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از درصد روغن در خاک با بافت لوم شنی بود. در خاک های با درصد رس بیش‌تر، قابلیت نگهداری آب و عناصر غذایی بیش‌تر از خاک‌های با درصد رس کم‌تر می‌باشد (۲۱). بیش‌ترین درصد روغن دانه (۳۶/۳۷ و ۳۶/۳۶ درصد) که به ترتیب مربوط به تیمارهای ۴ گرم زئولیت در کیلوگرم به‌همراه ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم (T_7) و ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم (T_2) بود که باهم اختلاف معنی‌داری نداشتند (جدول ۶). پتاسیم به‌عنوان یکی از عناصر معدنی پرمصرف نقش مهمی در فرآیندهای آنزیمی و کنترل متابولیسم مواد فتوسنتزی و تبدیل آن‌ها به روغن دارد (۴۵). یافته‌های شیرانی راد و همکاران[1] (۲۰۲۲) در رابطه با اثر کاربرد سیلیکات پتاسیم بر روغن دانه کلزا، بیانگر اثر مثبت کود پتاسیمی بر افزایش درصد روغن دانه بود (۴۸) که با نتایج مطالعات دار و همکاران[2] (۲۰۲۱) مطابقت داشت (۱۴). در میان تیمارهای زئولیت غنی‌شده با پتاسیم، بیش‌ترین درصد روغن دانه در تیمار ۴ گرم زئولیت غنی شده با پتاسیم در کیلوگرم (T_{10})، (۳۵/۷۱ درصد) بود که با سایر تیمارهای زئولیت غنی شده، اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۶). روغن دانه کلزا یکی از مهم‌ترین روغن‌های گیاهی است و افزایش درصد آن در بخش کشاورزی و صنعت اهمیت ویژه‌ای دارد. با توجه به نتایج این تحقیق و تاثیر مثبت زئولیت بر افزایش درصد روغن دانه،کاربرد زئولیت به‌همراه کود پتاسیمی می‌تواند روشی مؤثر و جدید بر افزایش درصد روغن دانه باشد.

پتاسیم خاک

طبق نتایج جدول تجزیه واریانس اثر نوع خاک و اثر تیمارهای اصلاح‌کننده بر غلظت پتاسیم خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که مقدار پتاسیم خاک در خاک لوم رسی سیلتی بیش‌تر از خاک لوم شنی بود که با توجه به نتایج جدول یک مورد انتظار بود (جدول ۵). در شرایط یکسان، خاک‌های با درصد رس و ظرفیت تبادل کاتیونی بیش‌تر، یون‌های پتاسیم بیشتری جذب می‌کنند (۲۰). شارما و همکاران[3] (۲۰۰۶) گزارش کردند تمام شکل‌های مختلف پتاسیم با درصد رس و سیلت نسبت مستقیم و با درصد شن نسبت عکس دارد. علت همبستگی منفی شکل‌های پتاسیم با آهک و شن به‌این دلیل است که رس جایگاه اصلی نگهداری پتاسیم بوده و با افزایش شن مقدار آن کاهش می‌یابد (۴۷). همچنین نتایج نشان داد بیش‌ترین مقدار پتاسیم خاک در تیمار ۶ گرم زئولیت در کیلوگرم به‌همراه ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم خاک (T_8)، (۱۵۵/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بدست آمد که نسبت به تیمار شاهد (T_0)، ۲۱ درصد افزایش نشان داد. در بین تیمارهای زئولیت غنی شده، بیش‌ترین مقدار پتاسیم خاک در تیمار ۶ گرم زئولیت غنی شده با پتاسیم (T_{11})، مشاهده شد (جدول ۶). با توجه اهمیت کمبود پتاسیم در خاک و همچنین نقش زئولیت غنی شده با پتاسیم بر محتوای پتاسیم خاک، استفاده از زئولیت غنی‌شده با پتاسیم می‌تواند یک راهکار نوین در جهت بهبود وضعیت پتاسیم خاک باشد.

طبق نتایج تحقیقات زاتانیک و همکاران[4] (۲۰۲۱) که بیان کردند در یک تن زئولیت، ۱۵ کیلوگرم پتاسیم قابل تبادل وجود دارد و همچنین افزایش غلظت پتاسیم در اثر کاربرد زئولیت می‌تواند با نگهداشت پتاسیم، سبب کاهش اتلاف آن و به‌دنبال آن افزایش پتاسیم خاک گردد (۵۰). زئولیت سبب تمرکز بیش‌تر پتاسیم خاک در فاز محلول و تبادلی می‌شود، که این نتایج می‌تواند در مدیریت کاربرد این مواد از نظر جلوگیری از اتلاف پتاسیم از خاک (آبشویی و تثبیت) بسیار مهم باشد (۲۶). مرایتس و همکاران[5] (۲۰۱۶) گزارش کردند که افزودن زئولیت به مخلوط خاک و کمپوست دسترسی

1- Rad *et al*
2- Dar *et al*
3- Sharma *et al.*
4- Szatanik *et al.*
5- Moraetis *et al.*

پتاسیم را تا ۱۶ برابر افزایش داد (۳۴). لی و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی اثر زئولیت و پتاسیم در خاک شالیزار به مدت دو سال پرداختند و بیان کردند که کاربرد زئولیت با فراهم کردن پتاسیم قابل تبادل، نقش مهمی در افزایش مقدار پتاسیم خاک سطحی در طول آزمایش داشت (۲۹).

پتاسیم دانه

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها تنها اثر تیمار اصلاح‌کننده بر پتاسیم دانه معنی‌دار گردید ($P < 0.01$) (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که تیمار ۴ گرم زئولیت در کیلوگرم به‌همراه ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم (T_7) ، بیش‌ترین تأثیر را بر پتاسیم دانه داشتند. در بین تیمارهای زئولیت غنی شده بیش‌ترین مقدار پتاسیم دانه مربوط به تیمار ۴ گرم زئولیت غنی شده با پتاسیم (T_{10}) بود که نسبت به تیمار شاهد (T_0)، ۷ درصد افزایش نشان داد (جدول ۶). از آنجایی‌که کاربرد زئولیت به همراه کود پتاسیمی سبب افزایش معنی‌داری بر پتاسیم خاک در این آزمایش شد، در نتیجه افزایش پتاسیم دانه قابل انتظار بود. همچنین ملکی و همکاران (۲۰۱۸) افزایش ۱۵ درصدی پتاسیم دانه نخود را در اثر مصرف ۳۰ تن در هکتار زئولیت، گزارش کردند (۳۲).

جدول(٤) نتیجه تجزیه واریانس غلظت پتاسیم خاک، دانه و برگ.

Table (4) analysis of the variance of the concentration of potassium in soil, seed and leaf.

پتاسیم برگ leaf potassium	پتاسیم دانه Grain potassium	پتاسیم خاک Soil potassium	درجه آزادی df	منابع تغییرات Source of variance
0.001	0.016	31.30	2	تکرار Replication
0.483^{**}	1.041^{ns}	55555.6^{**}	1	نوع خاک Soil type
0.002	0.007	151.9	2	خطا تکرار* نوع خاک Error replication* soil type
0.105^{**}	0.208^{**}	368.6^{**}	11	تیمار اصلاح‌کننده Amendment treatment
0.007^{ns}	0.01^{ns}	70.20^{ns}	11	نوع خاک* تیمار اصلاح‌کننده Soil type*amendment treatment
0.002	0.004	72.00	44	خطا تکرار*نوع خاک*تیمار اصلاح کننده Error replication*soil type*amendment treatment
5.29	3.36	8.68	-	ضریب تغییرات (تکرار* نوع خاک) C.V (replication*soil type)
5.40	2.62	5.98	-	ضریب تغییرات تکرار* نوع خاک*اصلاح کننده(درصد) C.V (replication*soil type*soil amendment)

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

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

جدول(۵) مقایسه میانگین اثر نوع خاک بر اجزای عملکرد و غلظت پتاسیم خاک و برگ .

Table (5) Mean comparison effect of soil type on component yield and concentration of potassium in soil and leaf.

نوع خاک Soil type	وزن هزار دانه (گرم) Thousand grain weight (g)	تعداد غلاف Pod number	روغن دانه (درصد) Grain oil (%)	پتاسیم خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Soil potassium ($mg.\ kg^{-1}$)	پتاسیم برگ (درصد) Leaf potassium (%)
لوم شنی Sandy loam	3.25[b]	73.63[b]	35.40[b]	114.22[b]	2.10[b]
لوم رسی سیلتی Silty clay loam	3.38[a]	82.66[a]	36.57[a]	169.78[a]	2.27[a]

در هرستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری بر طبق آزمون LSD، در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

In each column, means with at least one similar letter have no significant difference at ۵٪ level based on LSD test.

پتاسیم برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر نوع خاک و تیمار اصلاح‌کننده بر پتاسیم برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۴). با توجه به نتایج جدول ۵، مقدار پتاسیم برگ در خاک لوم رس سیلتی بیش‌تر از خاک لوم شنی بود. همچنین نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای اصلاح‌کننده نشان داد که بیش‌ترین مقدار پتاسیم برگ (۲/۳۸ درصد) مربوط به تیمار ۶گرم زئولیت در کیلوگرم به‌همراه ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم (T_8) بود که نسبت به تیمار شاهد (T_0)، ۲۴ درصد افزایش یافت. همچنین کاربرد ۶ گرم زئولیت غنی شده با پتاسیم (T_{11})، در مقایسه با سایر تیمارهای زئولیت غنی‌شده، بیش‌ترین تأثیر را بر پتاسیم برگ نشان داد (جدول ۶) . لطفها و همکاران[1] (۲۰۱۹) بیان کردند که زئولیت سبب افزایش جذب پتاسیم در گیاه شد (۳۰). تأثیر زئولیت بر افزایش کارآیی پتاسیم قابل توجه است به‌گونه‌ای که افزودن زئولیت در خاک، سطح پتاسیم قابل جذب را افزایش می‌دهد و در نتیجه فراهمی پتاسیم برای گیاه افزایش می‌یابد. نتایج پژوهش فنایی و همکاران[2] (۲۰۱۲) نشان داد که کاربرد کود سولفات پتاسیم در سطوح ۱۵۰ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب سبب افزایش ۴۰ و ۵۵ درصدی غلظت پتاسیم برگ شد (۱۸).

تحلیل اقتصادی

بررسی اقتصادی عملکرد دانه کلزا در تیمارهای آزمایش بر اساس قیمت‌های سال ۱۴۰۱ در جدول ۷ آورده شده است. ارزیابی اقتصادی بر اساس قیمت هر کیلوگرم دانه کلزا ۳۰۰۰۰۰ ریال، یک کیلوگرم زئولیت ۱۰۰۰۰۰ ریال و یک کیلوگرم کود سولفات پتاسیم ۱۲۵۰۰۰ ریال محاسبه گردید. نتایج نشان داد که بیش‌ترین درآمد حاصل از دانه کلزا (۹۶۹,۰۰۰,۰۰۰ ریال) در تیمار خاک لوم رسی سیلتی و تیمار ۴ گرم زئولیت به‌همراه ۴۶ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات پتاسیم (T_7) و بیش‌ترین درآمد خالص (۸۷۵,۳۷۵,۰۰۰ ریال) در خاک لوم رسی سیلتی و تیمار ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم (T_2) حاصل شد که نسبت به شاهد سبب افزایش ۴۲ درصدی گردید. همچنین نتایج نشان داد با افزایش مقدار کود سولفات پتاسیم درآمد خالص افزایش یافت و در بین تیمارهای زئولیت، ۲ گرم زئولیت نسبت به سایر مقادیر بیش‌ترین درآمد خالص را بدست آورد (جدول ۷).

1- lutfha *et al.*
2- Fanaie *et al.*

جدول(٦) مقایسه میانگین اثر تیمارهای اصلاح‌کننده بر اجزای عملکرد و غلظت پتاسیم خاک، دانه و برگ.

Table (6) Mean comparisons effect of amendment treatments on component yield and concentration of potassium in soil, grain and leaf.

تیمار اصلاح کننده Amendment treatment	وزن هزاردانه (گرم) Thousand grain (g) weight	تعداد غلاف Pod number	روغن دانه (درصد) Grain oil (%)	پتاسیم خاک (میلی گرم بر کیلوگرم) Soil potassium (mg kg^{-1})	پتاسیم دانه (درصد) Grain potassium (٪)	پتاسیم برگ (درصد) Leaf potassium (٪)
T_0	2.99^{f}	60.50^{e}	35.43^{e}	128.33^{d}	2.22^{h}	1.91^{e}
T_1	3.28^{cd}	77.16^{c}	36.36^{a}	142.00^{bc}	2.64^{cde}	2.22^{c}
T2	3.5^{b}	83.83^{ab}	36.33^{ab}	146.33^{b}	2.61^{def}	2.28^{bc}
T3	3.35^{c}	78.83^{bc}	36.07^{abc}	143.33^{bc}	2.55^{f}	2.23^{c}
T4	3.34^{c}	80.16^{abc}	35.92^{cd}	142.50^{bc}	2.60^{def}	2.21^{c}
T5	3.26^{cde}	82.66^{abc}	36.02^{bcd}	145.00^{b}	2.58^{ef}	2.26^{bc}
T6	3.50^{b}	81.51^{abc}	36.32^{ab}	148.50^{ab}	2.70^{ab}	2.30^{ab}
T7	3.66^{a}	82.50^{abc}	36.37^{a}	147.17^{ab}	2.75^{a}	2.33^{c}
T8	3.56^{ab}	85.16^{a}	36.15^{abc}	155.83^{a}	2.67^{cd}	2.28^{a}
T9	3.15^{de}	68.16^{d}	35.41^{e}	134.50^{cd}	2.33^{g}	2.06^{d}
T10	3.17^{de}	71.50^{d}	35.71^{de}	134.00^{cd}	2.37^{g}	2.05^{d}
T11	3.12^{e}	67.66^{d}	35.70^{de}	135.50^{cd}	2.35^{g}	2.1^{d}

درهرستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه تفاوت معنی‌داری بر طبق آزمون LSD، در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

In each column, means with at least one similar letter have no significant difference at ٥٪ level based on LSD test.

جدول (۷) تحلیل اقتصادی عملکرد کلزا.

Table (7) Economic analysis of rapeseed yield.

نوع خاک Soil type	تیمار اصلاح‌کننده Amendment treatment	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Grain yield (Kg ha^{-1})	درآمد دانه (ریال در هکتار) Grain income (Rial ha^{-1})	هزینه کود و زئولیت (ریال) Fertilizer and zeolite cost (Rial)	درآمد خالص (ریال) Net income (Rial)	درآمد نسبت به شاهد (ریال) Income relative to of control (Rial)
S_1	T_0	1915	574,500,000	0	574,500,000	0
	T_1	2650	795,000,000	14,000,000	781,000,000	206,500,000
	T_2	2800	840,500,000	20,125,000	819,875,000	200,375,000
	T_3	2660	798,000,000	84,000,000	714,000,000	245,375,000
	T_4	2780	834,000,000	154,000,000	608,000,000	33,500,000
	T_5	2815	844,500,000	214,000,000	630,500,000	56,000,000
	T_6	2995	898,500,000	90,125,000	808,375,000	233,875,000
	T_7	3070	921,001,000	160,125,000	760,875,000	186,375,000
	T_8	3035	910,500,000	230,125,000	680,375,000	105,875,000
	T_9	2520	756,000,000	70,000,000	686,000,000	111,500,000
	T_{10}	2600	780,000,000	140,000,000	640,000,000	65,500,000
	T_{11}	2700	810,000,000	210,000,000	600,000,000	25,500,000
S_2	T_0	2050	615,000,000	0	615,000,000	0
	T_1	2835	880,500,000	14,000,000	866,500,000	251,500,000
	T_2	2990	895,500,000	20,125,000	875,375,000	260,375,000
	T_3	2980	894,000,000	84,000,000	810,000,000	195,000,000
	T_4	2975	892,500,000	154,000,000	738,500,000	123,500,000
	T_5	2915	874,500,000	214,000,000	660,500,000	45,500,000
	T_6	3150	945,000,000	90,125,000	854,875,000	205,875,000
	T_7	3230	969,000,000	160,125,000	808,875,000	193,375,000
	T_8	3090	927,000,000	230,125,000	696,875,000	81,875,000
	T_9	2775	832,500,000	70,000,000	762,500,000	147,500,000
	T_{10}	2825	846,500,000	140,000,000	706,500,000	91,500,000
	T_{11}	2830	849,000,000	210,000,000	639,000,000	24,000,000

نتیجه‌گیری

بیش‌ترین عملکرد دانه نتیجه اثر متقابل تیمار خاک با بافت لوم رسی سیلتی و تیمار ۴ گرم زئولیت به‌همراه ۴۶ میلی گرم در کیلوگرم سولفات پتاسیم (T_7) بود. همچنین تیمار ۴ گرم زئولیت در کیلوگرم به‌همراه ۴۶ میلی‌گرم کود سولفات پتاسیم در کیلوگرم (T_7) بیش‌ترین تأثیر را در عملکرد دانه، وزن هزار دانه، روغن دانه و پتاسیم دانه داشت. در بین تیمارهای زئولیت غنی‌شده، تیمار ۴ گرم زئولیت غنی‌شده با پتاسیم اثر مثبت بیش‌تری بر صفات مورد مطالعه داشت. در مجموع نتایج این پژوهش بیان‌گر آن است که مصرف زئولیت به‌عنوان یک اصلاح‌کننده معدنی به کمک کود شیمیایی پتاسیمی می‌تواند راهکار مناسبی جهت بهبود فراهمی پتاسیم، مدیریت مصرف کود شیمیایی و افزایش رشد و عملکرد کلزا باشد. با توجه به اینکه فرایند غنی سازی زئولیت در این تحقیق سبب افزایش ۷/۵ درصدی پتاسیم در زئولیت گردید، می‌توان زئولیت به‌کار برده شده در این تحقیق را نمونه مناسبی جهت تولید زئولیت غنی‌شده با پتاسیم معرفی نمود. همچنین زئولیت غنی‌شده با پتاسیم به‌عنوان یک اصلاح‌کننده طبیعی خاک می‌تواند روش موثری درجهت بهبود خصوصیات خاک و گیاه باشد. با توجه به دوام زئولیت در خاک برای مدت طولانی، استفاده از آن به‌عنوان یک اصلاح‌کننده معدنی در خاک مزارع زراعی می‌تواند با بهبود وضعیت حاصلخیزی خاک، سبب افزایش عملکرد گردد. پیشنهاد می‌شود اثر زئولیت به تنهایی و یا با کاربرد کود شیمیایی بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه کلزا و یا سایر گیاهان زراعی در شرایط مزرعه بررسی گردد.

References

1. Abd El- Mageed, T., Semida, W.M., Abdu, N.M., and Abd El- Mageed, S.A. 2023. Coupling effects of potassium fertilization rate and application time on growth and grain yield of wheat (Triticum aestivum L.) plants grown under Cd-contaminated saline soil. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 23:1070-1084. DOI:10.1007/s42729-022-01104-3
2. Aghaalikhani, M., Gholamhoseini, M., Dolatabadian, A., Khodaei-Joghan, A., and 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. DOI:10.1080/03650340.2011.572876

3. Amina., L., and Abdelhalim, A.Kh. 2020. Impact of potassium fertilization on growth, yield and water productivity of canola under water stress condition. Plant Archives, 20(2): 8389-8402. DOI: 10.21608/jpp.2010.86554.

4. Amirahmadi, E., Ghorbani, M., and Moudry, J. 2022. Effects of zeolite on aggregation, nutrient availability, and growth characteristics of corn (*Zea mays* L.) in cadmium-contaminated soils. Water, Air and Soil Pollution, 233(11): 436. DOI:10.1007/s11270-022-05910-4

5. Amtmann, A., Hammond, J.P., Armengaud, P., and White, P.J. 2005. Nutrient sensing and signaling in plants: potassium and phosphorus. Advances in Botanical Research, 43: 209-257. DOI:1016/S0065-2296(05)43005-0

6. Aslani, P., Davari, M., Ali Mahmoodi, M., Hosseinpanahi, F., and Khaleghpanah, N. 2021. Effect of zeolite and nitrogen on some basic soil properties and wheat yield in potato-wheat rotation. Agricultural Engineering, 44(1): 97-119. (In Persian with English abstract). DOI:10.22055/agen.2021.37397.1603

7. Balali, M.R., and Malakouti, M.J. 1998. Study of exchangeable K changes in agriculture soils of Iran. Soil and Water, 12(3): 59-70. (In Persian)

8. Bazargan, K., Malakoti, M.G., and Eftekhari, K. 2004. Potassium behavior in three types of soil with different cation exchange capacity under maze cultivation. Journal of Water and Soil Science, 18(2): 112-124. (In Persian)

9. Bednarz, C.W., and Oosterhuis, D.M. 1999. Physiological changes associated with potassium deficiency in cotton. Journal of Plant Nutrition, 22: 303-313. DOI: 10.1080/01904169909365628

10. Bernardi, A.C., Oliviera, P.P.A., de Melo Monte, M.B., and Souza Barros, F. 2013. Brazilian sedimentary zeolite use in agriculture. Microporous Mesoporous Materials, 167: 16-21. DOI: 10.1016/j.micromeso.2012.06.051

11. Bremner, J.M., and 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. DOI: 10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31

12. Chatzistathis, T., Papaioannou, E., Giannakoula, A., and Papadakis, I. E. 2021. Zeolite and vermiculite as inorganic soil amendments modify shoot-root allocation, mineral nutrition, photosystem II activity and gas xchange parameters of chestnut *(Castanea sativa Mi*ll) plants. Agronomy, 11, 109. DOI:10.3390/agronomy11010109

13. Daneshian, J., Majidi Hrvan, A., and Jonoubi P. 2002. The effect of drought stress and different amounts of potassium on quantitative and qualitative characteristics of soybean. Journal of Agricultural Science, 8: 108-95. (In Persian)

14. Dar, J.S., Cheema, M.A., Rehmani,M.I.A., Khuhro, S., Rajput, S., and Virk, A.L. 2021. Potassium fertilization improves growth, yield and seed quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under drought stress at different growth stages. Plos One, 16(9): e0256075. DOI: 10.1371/journal.pone.0256075

15. 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.

16. Doni, S., Gispert, M., Peruzzi, E., Macci, C., Mattii, G.B., Manzi, D., Masini, C.M. and 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

17. Eslami, M., Khorassani, R., Fotovat, A., and Halajnia, A. 2019. $NH4^{+}$ -K^{+} co-loaded clinoptilolite as a binary fertilizer. Archives of Agronomy and Soil Science, 66: 33-45. DOI:10.1080/03650340.2019.1591617

18. Fanaie, H.R., Golavi, M., Kafi, M., and Shirani Rad, A.H. 2013. The mutual effect of water deficiency and potassium on the concentration of potassium, calcium, magnesium and oil in two species canola and mustard. Water and Soil Science, 23(3): 261-275. (In Persian)

19. FAO. 2016. Food outlook, Biannual Report on Global Food Markets. http://www.fao.org

20. Gourley, C.J.P. 1999. Potassium. In Soil analysis and interpretation manual. Peverill, K.I., Sparrow, L.A. and Reuter, D.J (Ed) CSIRO Publishing, Collingwood, VIC 3066, Australia. 229-243.

21. Hakimzadeh Ardakani, M.A., Haghjoo, M., Moradi, G.H., and Esfandiari, M. 2022. Investigating the effect of different soil textures on morphological characteristics and the amount of essential oil of *Lippia citriodora* medicinal plant. Water and Soil Management and Modeling, 3(1), 14-25. (In Persian with English abstract). DOI: 10.22098/MMWS.2022.10991.1095

22. Hamblin, A.P. 1981. Filter-paper method for routine measurement of field water potential. Journal of Hydrology, 53: 355-360. DOI: 10.1016/0022-1694(81)90011-1

23. Helmke, P.A., and 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.

24. Hosseini, Z. 2003. Common methods in food material analysis. Shiraz University press.

25. Hosseini Abri, A., Esmail Kaveh, M., and Saleh Parhizkar, R. 2007. The Investigation of the Chemical Structure of Natural Zeolites and the Benefits of Using Them as Agricultural Soil Amendments. Journal of Fundamental and Applied Science, 64, 1-16. (In Persian)

26. Jaberian, F., Mahmoudi, Sh., Abtahi, S.A., and Esfandiari, M. 2016. Effect of Zeolite on distribution of different soil potassium pools in Vertisols of Fars province. Journal of Water and Soil Conservation, 23 (4): 295-308. (In Persian with English abstract). DOI:10.22069/JWFST.2016.9743.2404

27. Latifah, O., Ahmed, O.H., and Majid, N.M.A. 2017. Enhancing nutrients use efficiency and grain yield of *Zea mays* L. cultivated on a tropical acid soil using paddy husk compost and clinoptilolite zeolite. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 23: 418-428. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.07.012

28. Li, J., Wee, C., and Sohn, B. 2013. Effect of ammonium and potassium loaded zeolite on kale (Brassica alboglabra) growth and soil property. American Journal of Plant Sciences, 4:1976-1982. DOI: 10.4236/ajps.2013.410245

29. Li, Y., Xia, G., Wu, Q., Chen, W., Lin, W., Zhang, Z., Chen, Y., Chen, T., Siddique, K., and Chi, D. 2022. Zeolite increases grain yield and potassium balance in paddy fields. Geoderma, 405: 115397. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115397

30. Lutfha Haniati, I., Minardi, S., Nastiti, A.H.L., and Harieni, S. 2019. The utilizing of zeolite and manures for increasing potassium availability, uptake, and yield on soybean in Alfisols. International Conference on Food Science and Engineering, 633(1): 012012. DOI: 10.1088/1757-899X/633/1/012012

31. Madani, H., Hosseinkhani, R., and Sajedi, N. 2009. Effect of different level of potassium sulfate and zeolite on yield and potassium sulfate and zeolite on yield and yield component of potato in Arak region. New Finding in Agriculture, 4: 1. 38-49. (In Persian with English abstract)

32. Maleki, S., Nakhzari Moghadam, A., Sabbaghpour, S.H., Noornia, A.A., and Sabouri, H. 2018. Effect of zeolite and potassium on some of characteristic and yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in the different irrigation management. Iranian Journal of Pulses Research, 9(2): 114-125. (In Persian with English abstract). DOI: 10.22067/IJPR.V9I2.61250

33. Mihok, F., Macko, J., Orinak, A., Orinakova, R., Koval, K., Sisakova, K., Petrus, O., and 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: 10.1016/j.crgsc.2020.100030

34. Moraetis, D., Papagiannidou, S., Pratikakis, A., Pentari, D., and Komnitsas, K. 2016. Effect of zeolite application on potassium release in sandy soils amended with municipal compost. Desalination and Water Treatment, 57(28):13273-84. DOI: 10.1080/19443994.2015.1065440

35. Motaghi, L., Allahdadi, I., Shirani Rad, A.H., Akbari, Gh. A. and Hasanlu, T. 2014. The effect of zeolite on yield and yield components of rapeseed under drought conditions. Journal of Crop Improvement, 16(2): 381-397. (In Persian with English abstract). DOI: 10.22059/jci.2014.53050

36. Mottaghi, S., Mottaghi, L., Shiranirad, A. and Lotfifar, O. 2019. Study the efficiency of zeolite in reduce the effect of drought stress on agronomical traits and seed yield of rapeseed in Karaj region. Plant Ecophysiology, 11(36), 256-271. (In Persian with English abstract). DOI: 20.1001.1.20085958.1398.11.36.22.2

37. Najafi-Ghiri, M., Abtahi, A., Jaberian, F., and Owliaie, H.R. 2010. Relationship between soil potassium forms and mineralogy in highly calcareous soils of southern Iran. Australian Journal of Basic Applied Sciences. 4: 3. 434-441.

38. Najafi-Ghiri, M., 2014. Effects of zeolite and vermicompost applications on potassium release from calcareous soils. Soil and Water Research, 9: 31-37. DOI: 10.17221/72/2012-SWR

39. Nakhli, S.A.A., Delkash, M., Bakhshayesh, B.E., and Kazemian, H. 2017. Application of zeolites for sustainable agriculture: a review on water and nutrient retention. Water, Air and Soil Pollution, 228(464), 1-34. DOI:10.1007/s11270-017-3649-1

40. Nelson, D.W., and 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.

41. Nourbakhsh, G., Dordipour, A., and Khormali, F. 2011. Zeolite effect on the absorption and utilization efficiency of potassium fertilizers. Twelfth Congress of Soil Science. Tabriz, Iran. 80p. (In Persian).

42. Olsen, S.R., and 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.

43. Park, M., and Komarneni, S. 1998. Ammonium nitrate occlusion vs. nitrate ion exchange in natural zeolites. Soil Science Society of America Journal, 62: 1455-1459.

44. Pour Moghadam, M. 2011. A review of strategic potentials of Irans zeolite. Production and Consumption, 62: 71-75. (In Persian)

45. Rezaei, E., Dadnia, M.R., Allahdad, S., and Zare, S. 2013. Evaluation of zinc and potassium effects on drought stress resistance, yield and yield components in rapeseed. International Journal of Agriculture and Crop Sciences, 6(14): 1004-1007.

46. Shakri, S., and Abtahi, S.A. 2018. Origin and clay minerals characteristics and their relationship with potassium forms in the calcareous soils of kakan plain in east of Kohgilouye-va-Boyerahmad province. Journal of Water and Soil Science, 22(4): 173-188. (In Persian with English abstract). DOI: 10.29252/jstnar.22.4.173

47. Sharma, R.R., Mukhopadhyay S.S., and Sawhney, J.S. 2006. Distribution of potassium fractions in relation to landform in a Himalayan catena. Archives of Agronomy and Soil Science. 52(4): 469-476. DOI:10.1080/03650340600743717

48. Shirani Rad, A.M., Eyni- Nargeseh, H., Shirani Rad, S., and Heidarzedeh, A. 2022. Effect of potassium silicate on seed yield and fatty acid composition of rapeseed (Brassica napus L.) genotypes under different irrigation regimes. Silicon, 14: 11927-11938. DOI: 10.1007/s12633-022-01915-0

49. Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., and Loeppert, R.H. 1996. Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods. SSSA Book Series. Soil Science Society of America, Madison, WI. 1390 P.

50. Szatanik-Kloc, A., Szerement, J., Adamczuk, A., and Jozefaciuk, G. 2021. Effect of low zeolite doses on plants and soil physicochemical properties. Materials, 14(10): 2617. DOI:10.3390/ma14102617

51. Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., and Guo, Sh. 2013. The critical role of potassium in plant stress response. International Journal of Molecular Sciences, 14: 7370-7390. DOI: 10.3390/ijms14047370

52. Yamaguchi, N., Hikono, A., and Saito, T. 2019. Effects of zeolite and vermiculite addition on exchangeable radiocaesium in soil with accelerated ageing. Journal of Environmental Radioactivity, 203: 18-24. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.02.011

53. Ye, T., Xue, X., Lu, J., Yan, J., Ren, T., Cong, R., and Li, X. 2020. Effects of potassium fertilization on crops yield, potassium uptake, and soil potassium fertility in rice-oilseed rape cropping systems. Archives of Agronomy and Soil Science, 68(7): 1-13. DOI: 10.1080/03650340.2020.1858479

54. Zahedi, S., Rasouli, F., and Gohari, G.R. 2017. Effect of potassium on grain yield and concentration of some micro nutrients in cowpea (*Vigna unguiculata* L.) drought stress conditions. Journal of Iranian Plant Eco physiological Research, 12(48), 25-34. (In Persian with English abstract)