

Effects of zeolite and biofertilizers on nutrient dynamics in soil under two corn cultivars (cv. 6010 and ns71) in Neka county

Hossein Ebrahimi Chamani¹, Hormoz Fallah Amoli^{2*},
Yusof Niknezhad³, Davood Barari Tari⁴

¹ Ph.D. Student, Department of Agronomy, Am.C., Islamic Azad University, Amol, Iran, Email: h.chamani@iau.ac.ir

^{2*} (Corresponding Author), Associate Professor, Department of Agronomy, Am.C., Islamic Azad University, Amol, Iran, Email: hormoz.fallah@iau.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Agronomy, Am.C., Islamic Azad University, Amol, Iran, Email: y.niknejad@iau.ac.ir

⁴ Associate Professor, Department of Agronomy, Am.C., Islamic Azad University, Amol, Iran, Email: davood.barari@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

ABSTRACT

Background and Objectives: In order to study the effects of zeolite and biofertilizers on nutrient dynamics of two corn cultivars (cv. 6010 and ns71) in Neka county, a field experiment was carried out followed a split-plot arrangement in a randomized complete block design, comprising three blocks in Mazandaran province, Neka during 2017 and 2018 growing season.

Materials and methods: The corn cultivars at two levels of cv. 6010 and ns71 as main plots and applications of zeolite and biofertilizers at six levels including the zeolite application, bacteria application, fungus application, applications of zeolite+bacteria, applications of zeolite+fungus and applications of zeolite+bacteria+fungus were considered as sub-plots. At the end of the season, the soil's physical and chemical characteristics were analyzed.

Results: The highest nitrogen and zinc content in soil was obtained by combined application of zeolite and biofertilizers, while the maximum phosphorus and iron content in the soil was obtained by separate application of zeolite. The highest reduction of soil phosphorus in both crop years related to the treatment of zeolite+bacteria+fungus and the separate use of bacteria was obtained with an average of 9.04 and 9.13 mg/kg, respectively. Also, the maximum reduction of soil iron was achieved with the simultaneous application of zeolite+bacteria+fungus with about 25% reduction compared to zeolite treatment in the first year in ns71 variety. The maximum soil potassium content was obtained with an average of 383.8 mg/kg in the conditions of individual application of bacteria for cultivar 6010 during both cropping years, and the lowest soil potassium content with a decrease of about 47.3 and 45.8 percent respectively for The cultivars 6010 and ns71 were obtained under conditions of combined use of zeolite+bacteria+fungus. The minimum content of zinc in the soil was observed in the conditions of separate use of bacteria and fungi in both years of the study. The minimum soil magnesium content with decrease of about 20.2% was obtained for ns71 variety in the first year of the experiment. The obtained results showed

Article history:

Received: 2025-7-21

Accepted: 2026-2-21

Keywords:

Bacteria
Fungus
Maize
Nutrient
Yield
zeolite

that the simultaneous application of zeolite+bacteria+fungus caused the maximum reduction of pH in the soil.

Conclusion: This indicates that by selecting the most suitable combination of plant and biofertilizers along with enriched zeolite, this symbiosis can be effectively used to enhance soil nutrient efficiency.

Cite this article: Ebrahimi Chamani, H., Fallah Amoli, H., Niknezhad, Y., Barari Tari, D. 2026. Effects of zeolite and biofertilizers on nutrient dynamics in soil under two corn cultivars (cv. 6010 and ns71) in Neka county. *Crop Production Journal*, 19 (2), 1-21.



© The author(s)



[10.22069/ejcp.2026.22695.2640](https://doi.org/10.22069/ejcp.2026.22695.2640)

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



اثرات ژئولیت و کودهای زیستی بر پویایی عناصر غذایی در خاک تحت کاشت دو رقم ذرت (6010 و ns71) در شهرستان نکا

حسین ابراهیمی چمانی^۱، هرمز فلاح آملی^{۲*}، یوسف نیک‌نژاد^۳، داوود براری تاری^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زراعت، واحد آیت‌اله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران، رایانامه: h.chamani@iau.ac.ir

^{۲*} (نویسنده مسئول)، دانشیار، گروه زراعت، واحد آیت‌الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران، رایانامه: hormoz.fallah@iau.ac.ir

^۳ دانشیار، گروه زراعت، واحد آیت‌اله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران، رایانامه: y.niknejad@iau.ac.ir

^۴ دانشیار، گروه زراعت، واحد آیت‌اله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران، رایانامه: davood.barari@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی	سابقه و هدف: به منظور بررسی اثرات کودهای زیستی <i>Bacillus cereus</i> و <i>Bacillus subtilis</i> و قارچ <i>مایکوریزا آریسکولار Glomus mosseae</i> در ترکیب با ژئولیت بر پویایی عناصر غذایی خاک تحت کاشت دو رقم ذرت ۶۰۱۰ و ذرت ns71، آزمایشی طی سال‌های زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۳۹۷-۱۳۹۸ در استان مازندران، شهرستان نکا به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی شامل سه بلوک اجرا شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۳۱	مواد و روش‌ها: ارقام ذرت در دو سطح ذرت ۶۰۱۰ و ns71 به عنوان عامل اصلی و کاربرد ژئولیت و کودهای زیستی در شش سطح مصرف ژئولیت، مصرف باکتری، مصرف قارچ، مصرف ژئولیت+باکتری، مصرف ژئولیت+قارچ و مصرف ژئولیت+باکتری+قارچ به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شده‌اند. در پایان فصل صفات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی قرار گرفتند.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۳	یافته‌ها: نتایج نشان داد بیشترین محتوای نیتروژن و روی در خاک در تیمار ترکیبی ژئولیت و کودهای زیستی اتفاق افتاد. حداکثر کاهش در محتوای فسفر خاک در هر دو سال زراعی مربوط به تیمار ژئولیت+باکتری+قارچ و مصرف جداگانه باکتری به ترتیب با میانگین‌های ۹/۱۳ و ۹/۰۴ میلی گرم بر کیلوگرم حاصل شد. همچنین بیشترین کاهش آهن خاک نیز با مصرف همزمان ژئولیت+باکتری+قارچ با حدود ۲۵٪ کاهش نسبت به تیمار ژئولیت در سال اول در رقم ns71 به دست آمد. بیشترین محتوای پتاسیم خاک با میانگین ۳۸۳/۸ پی پی ام در شرایط کاربرد انفرادی باکتری برای رقم ۶۰۱۰ طی هر دو سال زراعی حاصل شد، و کمترین محتوای پتاسیم خاک به ترتیب با حدود ۴۷/۳ و ۴۵/۸٪ کاهش برای ارقام ۶۰۱۰ و ns71 در شرایط مصرف ترکیبی ژئولیت+باکتری+قارچ به دست آمد. کمترین محتوای روی خاک در شرایط مصرف جداگانه باکتری و قارچ در هر دو سال مورد مطالعه مشاهده گردید. کمترین محتوای منیزیم خاک با حدود ۲۰/۲٪ کاهش برای رقم ns71 در سال اول آزمایش حاصل گردید. نتایج به دست آمده کاربرد همزمان ژئولیت+باکتری+قارچ موجب حداکثر کاهش pH در خاک شد.
واژه‌های کلیدی: باکتری، قارچ، ژئولیت، ذرت، عناصر غذایی	

نتیجه گیری: با انتخاب مناسب‌ترین ترکیب گیاه و کودهای زیستی همراه با زئولیت غنی‌شده، می‌توان از این همزیستی برای افزایش کارایی عناصر خاک بهره برد.

استناد: ابراهیمی چمانی، حسین؛ فلاح آملی، هرمز؛ نیک‌نژاد، یوسف؛ براری تاری، داوود. (۱۴۰۵). اثرات زئولیت و کودهای زیستی بر پویایی عناصر غذایی در خاک تحت کاشت دو رقم ذرت (6010 و ns71) در شهرستان نکاء. *مجله تولید گیاهان زراعی*، ۱۹ (۲)، ۱-۲۱.



[10.22069/ejcp.2026.22695.2640](https://doi.org/10.22069/ejcp.2026.22695.2640)

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان



مقدمه

بررسی ۱۰۰ آزمون خاک از مناطق مختلف شهرستان نکا در استان مازندران نشان داد، pH خاک منطقه با میانگین ۸۷/۷ از عدد بالایی برخوردار است و مقدار فسفر و آهن خاک منطقه نیز در محدوده حد کفایت یا بالاتر از حد کفایت گیاهان زراعی است ولی با این وجود، معمولاً کشاورزان شهرستان نکا با علائم کمبود این عناصر در اندام هوایی مواجه هستند. در خاک‌های آهکی عمدتاً پایین بودن قابلیت دسترسی به عناصر غذایی که یکی از مهمترین عوامل بروز کمبود آنها در گیاهان است، متأثر از مقدار آهک و pH بالای خاک است (۱ و ۲). با وجود اینکه مصرف کودهای شیمیایی جهت جبران کمبود عناصر غذایی و افزایش عملکرد گیاه به عنوان راهکاری سریع شناخته شده است ولی کاربرد این کودها در بسیاری از موارد سبب ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی، خسارات اکولوژیکی و در نهایت باعث افزایش هزینه‌های تولید می‌شود (۳). در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از کودهای زیستی نظیر باکتری‌های محرک رشد گیاه^۱ (PGPRs) مانند گونه‌های باسیلوس (*Bacillus* sp.) و قارچ‌های میکوریزا/آربوسکولار^۲ (AMF) که اجزای اصلی اکولوژی ریزوسفر گیاه هستند به‌عنوان جایگزین پایدار برای کودهای شیمیایی مورد توجه قرار گرفته است (۴، ۵، ۶ و ۷). باکتری‌های محرک رشد با قابلیت تولید فیتوهورمون‌هایی نظیر سیتوکینین، اکسین و جیبرلین، تولید سیدروفورها، کمک به حل نمودن عناصر غذایی نظیر فسفر، تولید ACC دآمیناز (۸، ۹ و ۱۰)، سنتز آنتی‌بیوتیک‌ها، آنزیم‌ها و یا ترکیب برخی قارچ‌کش‌ها باعث بهبود رشد گیاه می‌شوند (۱۱). گروه قارچی نیز نقش مهمی در بهبود رشد و عملکرد گیاه از طریق ایجاد شبکه هیفی

گسترده با قابلیت افزایش سطح تماس و سرعت جذب ریشه‌ها و همچنین افزایش کارایی سیستم ریشه‌ای در جذب آب و عناصر غذایی دارد (۱۲). تلقیح گیاه ذرت با قارچ میکوریزا آربوسکولار سبب بهبود رشد گیاه از طریق جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه می‌شود، بنابراین به‌عنوان جزئی از استراتژی‌های مدیریت تلفیقی مواد غذایی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (۱۳). به گفته دورودیان و بشارتی (۲۰۱۶)، باکتری *Bacillus* در تأمین مواد مغذی مانند نیتروژن، آهن، روی و منگنز برای گیاه بسیار موثر است (۱۴).

ژئولیت‌ها از منافذ و چهاروجهی‌های آلومینوسیلیکات با گوشه‌های مشترک تشکیل شده‌اند که در چارچوب‌های سه‌بعدی به هم متصل شده‌اند؛ منافذ آنها به هم پیوسته‌اند و کانال‌های طولانی و عریضی با اندازه‌های مختلف بسته به نوع کانی را تشکیل می‌دهند. این کانال‌ها با فراهم نمودن امکان حرکت آسان مولکول‌های ساکن و یون‌ها به داخل و خارج از ساختار، موجب اصلاح ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و جلوگیری از هدرروی کودهای شیمیایی و همچنین برطرف نمودن اثرات تخریبی ناشی از مصرف کودهای شیمیایی در مزارع کشاورزی می‌شوند؛ این تکنیک یکی از راهکارهای مدرنی است که طی سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است (۱۵). کلینوپتیلولیت یک نوع ژئولیت است که توانایی رهاسازی تدریجی مواد را دارد (۱۶). ژئولیت‌ها همچنین قادرند حمل‌کننده‌ی بسیاری از حشره‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها و قارچ‌کش‌ها باشند (۱۷). مطالعات اخیر حاکی از آن است که کاربرد ترکیبی مخلوط کلینوپتیلولیت اشباع از NH_4 با سنگ فسفات (آپاتیت) موجب آزادسازی تدریجی نیتروژن و فسفر و افزودن آن‌ها به خاک می‌گردد (۱۶). کاربرد ترکیبی ژئولیت و کودهای شیمیایی منجر به آزادسازی تدریجی عناصر

^۱ Plant growth promoting rhizobacteria

^۲ Arbuscular Mycorrhizal Fungi

کودهای زیستی همراه با ژئولیت بر بهبود جذب عناصر غذایی، به ویژه فسفر و آهن، و کاهش pH خاک در شهرستان نکا بررسی شود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی شامل سه بلوک طی دو سال زراعی در دهم خرداد ۱۳۹۷-۱۳۹۸ و ۱۳۹۷-۱۳۹۸ در مزرعه‌ای واقع در استان مازندران، شهرستان نکا، روستای چمان با مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۳ درجه و ۱۴ دقیقه طول شرقی در ارتفاع ۴۹ متری از سطح دریای آزاد انجام شد. ویژگی‌های خاک مزرعه آزمایشی قبل از انجام طرح، از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک (جدول ۱ و ۲) با تهیه نمونه‌ی مرکب از ۱۰ نقطه به صورت تصادفی تهیه شد.

غذایی و افزایش راندمان جذب عناصر غذایی توسط گیاهان می‌شود (۱۸). کلینوپتیلولیت در کشاورزی کارایی کودهای مصرفی را بهبود می‌بخشد؛ در نتیجه باعث رشد بهتر گیاه و افزایش عملکرد می‌شود (۱۵). پریانکاخطی و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که کاربرد نانوزئولیت در ترکیب با ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه، خواص فیزیکوشیمیایی خاک را بهبود بخشد و رشد محصول ذرت را افزایش داد (۱۹). استفاده از قارچ مایکوریزا به همراه ژئولیت علاوه بر مصرف بهینه کودهای شیمیایی فسفره، سبب بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی و زراعی گیاه ذرت می‌شود. بهبود رشد و افزایش عملکرد گیاه ذرت در تیمارهای حاوی ژئولیت به دلیل افزایش فراهمی برخی از عناصر غذایی برای گیاه می‌باشد (۲۰). بنابراین در این پژوهش، ژئولیت به عنوان یک حامل کندرها برای حفظ بلندمدت کودهای زیستی در اطراف ریشه‌ی گیاه به کار رفت تا اثرات کاربرد

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک، میانگین ۱۰۰ آزمون خاک در شهرستان نکا سال اول

Table 1. Physical and chemical characteristics of soil (0-30 cm depth), average of 100 soil samples in Neka County

روى	آهن	پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب	نیترژن کل	هدایت الکتریکی	اسیدیته	بافت خاک
(میلی گرم بر کیلوگرم)	(میلی گرم بر کیلوگرم)	جذب (میلی گرم بر کیلوگرم)	(میلی گرم بر کیلوگرم)	کل	الکتریکی	ته	Soil texture
Zinc (mg/kg)	Iron (mg/kg)	Available potassium (mg/kg)	Available phosphorus (mg/kg)	Total nitrogen (%)	EC (dS/m)	pH	
1.93	24.17	300	21.2	0.26	0.63	7.87	Silty loam

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک مزرعه آزمون خاک در شهرستان نکا سال دوم

Table 2. Physical and chemical characteristics of soil (0-30 cm depth) at the experimental field in Neka County

روى	آهن	پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب	نیترژن کل	هدایت الکتریکی	اسیدیته	بافت خاک
(میلی گرم بر کیلوگرم)	(میلی گرم بر کیلوگرم)	جذب (میلی گرم بر کیلوگرم)	(میلی گرم بر کیلوگرم)	کل	الکتریکی	ته	Soil texture
Zinc (mg/kg)	Iron (mg/kg)	Available potassium (mg/kg)	Available phosphorus (mg/kg)	Total nitrogen (%)	EC (dS/m)	pH	
1.77	23.29	312	20.9	0.24	0.65	7.89	Silty loam

گیاهپزشکی مزرعه سلامت نکا ارسال شد و اندازه‌گیری به روش‌های زیر انجام شد (۲۲، ۲۳، ۲۴ و ۲۵):

برای اندازه‌گیری pH خاک، ۲۰۰ گرم خاک عبور داده شده از مش ۱۰ را در بشر ریخته و با آب مقطر آن را به حالت اشباع رسید و پس از ۲۴ ساعت به وسیله pH متر، pH گل اشباع قرائت شد.

اندازه‌گیری نیتروژن کل خاک نیز با استفاده از دستگاه میکروکجلدال ۴ قطعه‌ای دستی انجام شد. در این روش یک گرم خاک در بالن مخصوص هضم ریخته شد. سپس، کاتالیزور مخلوط به مقدار ۱/۱ گرم و اسید سولفوریک غلیظ به مقدار ۶ میلی‌لیتر به آن اضافه گردید. بالن به مدت ۹۰ الی ۱۲۰ دقیقه روی اجاق هضم حرارت قرار گرفت. آزمایش بر روی یک نمونه شاهد (بدون خاک) نیز انجام شد. مقدار نیتروژن در این عصاره با سیستم کجلدال اندازه‌گیری شد (رابطه ۱).

رابطه ۱)

$$N(ppm) = \frac{\text{حجم کل} \times 14 \times 1000 \times (\text{نرمالینه اسید} - \text{حجم اسید مصرفی شاهد} - \text{حجم اسید مصرفی نمونه})}{\text{حجم نمونه برداشته شده در آزمایش} \times \text{وزن نمونه}}$$

اندازه‌گیری فسفر خاک به روش السن انجام شد، به این صورت که ۲/۵ گرم خاک به همراه ۰/۳ گرم کربن اکتیو در بشر ۱۰۰ میلی‌لیتر ریخته شد. سپس به آن مقدار ۵۰ میلی‌لیتر بی‌کربنات سدیم ۰/۵ نرمال اضافه شد و پس از ۳۰ دقیقه شیک توسط کاغذ صافی ۲ لایه (به دلیل عبور کردن کربن اکتیو از کاغذ صافی) صاف شد سپس مقدار ۵ میلی‌لیتر از عصاره را در ارلن ۵۰ ریخته و ۵ میلی‌لیتر معرف به آن افزوده شد و پس از ۲۰ دقیقه شیک کردن توسط اسپکتروفتومتر هانن مدل i3 در طول موج ۷۲۰ نانومتر قرائت شد و عدد به دست آمده در رابطه ۲ زیر قرار داده شد:

رابطه ۲)

$$X = \frac{A \times V}{M \times \%D.M} \times 100$$

ارقام میان‌رس ذرت علوفه‌ای در دو سطح شامل رقم‌های 6010 و ns71 به عنوان عامل اصلی و کاربرد ژئولیت و کودهای زیستی در شش سطح مصرف جداگانه ژئولیت، مصرف جداگانه باکتری، مصرف جداگانه قارچ، مصرف ترکیبی ژئولیت+باکتری، ژئولیت+قارچ و مصرف ژئولیت+باکتری+قارچ به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. هر کرت آزمایشی شامل ۶ ردیف کاشت به فاصله ۶۰ سانتی‌متر و طول ۴ متر بودند، فاصله بوته‌ها روی ردیف نیز ۲۰ سانتی‌متر و همچنین فاصله بین تکرارها یک متر تعیین شد. بذور ذرت ارقام 6010 و ns71 از شرکت دشت ناز ساری تهیه شد. ژئولیت سمnan از شهرک صنعتی بابلسر تهیه و پس از غنی‌سازی به مقدار ۸۰ کیلوگرم در هکتار مورد استفاده قرار گرفت. کودهای زیستی مورد استفاده در آزمایش شامل باکتری که ترکیبی از دو باکتری *Bacillus subtilis* و *Bacillus cereus* و قارچ میکوریزا آربوسکولار گونه *Glomus mosseae* بود. باکتری‌ها و قارچ مورد استفاده در این آزمایش از مرکز ملی ذخایر ژنتیکی و زیستی ایران به ترتیب، باکتری با جمعیت 3×10^8 CFU و قارچ با میانگین ۱۰ عدد اسپور در هر گرم خاک خشک تهیه و به میزان ۸۰ گرم در هکتار مصرف شدند. در این طرح کود شیمیایی بر اساس آزمون خاک استفاده شد. مبارزه با علف‌های هرز به صورت وجین دستی طی دوره رشد گیاه انجام شد. غنی‌سازی ژئولیت با ۱ گرم روی با خلوص ۹۹ درصد، ۱ گرم گوگرد با خلوص ۹۹ درصد و ۱ گرم کود زیستی در یک کیلوگرم ژئولیت انجام شد که ویژگی‌های جذب مواد با معادلات ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ توصیف شده است (۲۱).

در پایان فصل رشد پس از برداشت گیاه، ۳ نمونه خاک به طور تصادفی از هر کرت آزمایشی انتخاب و برای اندازه‌گیری عناصر در خاک به آزمایشگاه کلینیک

A: عدد بدست آمده؛ V: حجم نمونه (۵ میلی‌لیتر)؛
M: وزن نمونه خاک (۲/۵ گرم)، %D.M: درصد ماده خشک که برابر است با

$$\%D.M = 100 - \theta m$$

$$\theta m = 100 \times \text{رطوبت وزنی}$$

برای اندازه‌گیری پتاسیم خاک به روش نشر شعله‌ای ۲/۵ گرم خاک عبور داده شده از مش ۱۰ را در ارلن ۱۰۰ میلی‌لیتر ریخته و مقدار ۵۰ میلی‌لیتر استات آمونیوم ۱ نرمال به آن افزوده شد و بعد از ۳۰ دقیقه شیک کردن از کاغذ صافی عبور داده شد، سپس عدد به وسیله فلیم فتومتر کورنینگ مدل 410c قرائت شد. ۵ میلی‌لیتر از عصاره را در ارلن ۱۰۰ میلی‌لیتر ریخته و ۲ میلی‌لیتر بافر آمونیاکی و ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آن افزوده شد و پس از اضافه کردن ۴ قطره EBT توسط EDTA ۰/۲ نرمال تیترا شد تا رنگ محلول به آبی تغییر کند.

همچنین برای به دست آوردن میزان منیزیم خاک، ۵ میلی‌لیتر از عصاره را در ارلن ۱۰۰ ریخته و ۲ میلی‌لیتر سود ۴ نرمال و ۰/۱ گرم موروکساید و ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه شد و سپس توسط EDTA ۰/۲ نرمال تیترا گردید تا رنگ محلول به بنفش تغییر کند. میزان منیزیم خاک از تفریق این دو عدد به دست آمد (رابطه ۳).

رابطه ۳

$$a = \frac{(\text{نمونه - شاهد}) \text{ نرمالیت (0.02)}}{\text{حجم نمونه (5 cc)}} \times 1000$$

عدد به دست آمده بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر بوده که برای تبدیل آن به mg/kg در عدد ثابت ۱۲/۱۶ ضرب گردید. سپس عدد به دست آمده در فرمول (رابطه ۴) زیر قرار داده شد:

$$X = \frac{A \times V}{M \times \%D.M} \times 100 \quad (\text{رابطه ۴})$$

در نهایت، تجزیه واریانس مرکب داده‌های آماری با استفاده از نرم‌افزارهای MSTAT-C و SAS (نسخه ۹/۱) انجام شد. همچنین، مقایسه میانگین داده‌ها بر

اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ صورت گرفت.

نتایج و بحث

pH خاک: نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس مرکب داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که در بین تیمارهای آزمایش، pH خاک تنها تحت تأثیر تیمار کودی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد و سایر تیمارهای آزمایش اثر معنی‌داری بر صفت فوق نداشتند. جدول مقایسه میانگین اثر ساده کود بر pH خاک (جدول ۴) نشان داد کاربرد توأم زئولیت+باکتری+قارچ باعث بیشترین کاهش pH خاک شد، این درحالی است که تنها، تیمار قارچ با کمترین تغییرات pH خاک در گروه آماری دیگری قرار گرفت ولی با دیگر تیمارها در یک گروه آماری قرار داشت. همچنین مشاهده شد ترکیب کودهای زیستی با زئولیت تأثیر بیشتری در کاهش pH داشته است. احتمالاً کاهش pH خاک را می‌توان به ترشح اسیدهای آلی در خاک نسبت داد (۴ و ۲۶). اسیدهای آلی از طریق کلات نمودن کاتیون‌ها و رقابت با فسفر جهت اشغال مکان‌های جذب در خاک، کاهش pH و همچنین معدنی شدن نیتروژن و فسفر و تبدیل آن‌ها به نیترات، نیتريت و ارتوفسفات موجب افزایش حلالیت فسفات‌های نامحلول می‌شوند (۲۷). در یک مطالعه با هدف ارزیابی پتانسیل بازیافت انواع مواد زاید آلی، گزارش شد که آزاد شدن اسیدهای آلی و گاز دی‌اکسیدکربن حاصل از تجزیه مواد غذایی موجود در بستر توسط میکروارگانیسم‌ها و کرم‌های خاکی موجب کاهش pH مواد بستر در تمامی تیمارها طی دوره ۱۰۰ روزه شد. این محققان افزودند که اسیدهای آلی ممکن است با تشکیل کمپلکس‌های محلول با یون‌های فلزی پیوند شده با فسفر نظیر آهن، آلومینیوم و کلسیم به آزادسازی فسفر کمک نمایند (۲۸).

اثرات زئولیت و کودهای زیستی بر پویایی عناصر غذایی... / حسین ابراهیمی چمانی و همکاران

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب محتوای عناصر غذایی خاک تحت تأثیر رقم و تیمارهای کودی تحت کشت دو رقم ذرت 6010 و ns71

Table 2. Combined analysis of variance for soil nutrient content as affected by cultivar and fertilizer treatments under two corn cultivars (cv. 6010 and ns71)

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	نیتروژن خاک Soil nitrogen	فسفر خاک Soil phosphorus	پتاسیم خاک Soil potassium	روی خاک Soil zinc	منگنز خاک Soil manganese	منیزیم خاک Soil magnesium	PH خاک Soil PH
سال Year	1	0.005**	1521.03**	1492.9**	7.566**	0.490*	12232.0**	0.0042 ^{ns}
تکرار در سال Replication*Year	4	0.005	0.514	60.978	0.164	0.676	19.111	0.0065
رقم Cultivar	1	0.003**	1.194 ^{ns}	6756.2**	1.080 ^{ns}	0.002 ^{ns}	284.6**	0.0008 ^{ns}
سال در رقم Year*Cultivar	1	0.000 ^{ns}	0.011 ^{ns}	2110.9**	0.076 ^{ns}	0.000 ^{ns}	150.1**	0.0001 ^{ns}
خطای a Error a	4	0.000	0.473	37.397	0.184	0.038	6.726	0.0020 ^{ns}
کود Fertilizer	5	0.002**	33.731**	26081.8**	38.331*	0.166 ^{ns}	151.6**	0.0842*
سال در کود Year*Fertilizer	5	0.002**	1.673 ^{ns}	488.9**	0.425**	0.218 ^{ns}	157.3**	0.0100 ^{ns}
رقم در کود Cultivar*Fertilizer	5	0.001 ^{ns}	0.584 ^{ns}	3425.7**	0.655**	0.318 ^{ns}	23.212*	0.026 ^{ns}
سال در رقم در کود Year*cultivar*Fertilizer	5	0.000 ^{ns}	0.187 ^{ns}	365.3*	0.102 ^{ns}	0.310 ^{ns}	8.394 ^{ns}	0.0067 ^{ns}
خطای b Error b	40	0.000	1.185	125.2	0.044	0.310	8.393	0.0035
ضریب تغییرات CV(%)	-	9.34	6.95	3.94	5.88	3.62	2.20	۰.۸۰

ns, * و **: به ترتیب عدم معنی دار، معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns, * and **: non-significant, significant at 5% and significant at 1% probability level

کربن مواد آلی به گاز دی اکسید کربن و کاهش مقدار pH ناشی از پروسه تجزیه توسط میکروارگانیسم ها در خاک طی دوره رشد گیاه نسبت داد. یکی از فاکتورهای مهم در حفظ نیتروژن، کاهش pH می باشد؛ زیرا در pH قلیایی، فرآیند تبدیل نیتروژن به گاز آمونیاک و تصعید آن صورت می پذیرد (۲۹).

محتوای نیتروژن خاک: با توجه به نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس مرکب داده ها (جدول ۳) محتوای نیتروژن خاک تحت تأثیر اثرات اصلی سال، رقم، کود و برهمکنش دوگانه سال در کود در سطح احتمال ادرصد معنی دار شد و سایر تیمارهای آزمایش اثر معنی داری بر صفت فوق نداشتند. یکی از دلایل اصلی این تغییرات را می توان به تبدیل شدن

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات اصلی کود بر pH خاک تحت کشت دو رقم ذرت 6010 و ns71

Table 3. Mean comparison of the main effects of fertilizer on soil pH under two corn cultivars (cv. 6010 and ns71)

کود Fertilizer	pH
زئولیت Zeolite	7.48
باکتری Bacteria	7.54
قارچ Fungus	7.60
زئولیت + باکتری Zeolite+Bacteria	7.43
زئولیت + قارچ Zeolite+ Fungus	7.44
زئولیت + باکتری + قارچ Zeolite+Bacteria+Fungus	7.37
LSD _{0.05}	0.10

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵٪ بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test at P<0.05.

نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی رقم (جدول ۵) نشان داد که محتوای نیتروژن خاک در رقم ns71 حدود ۵/۱ درصد بیشتر از رقم 6010 بوده است. همچنین مقایسه میانگین برهمکنش سال در کود (جدول ۶) نشان داد کمترین کاهش محتوای نیتروژن خاک (۲۸۶۰/۰ میلی گرم بر کیلوگرم) در کاربرد همزمان زئولیت + باکتری + قارچ در سال اول آزمایش حاصل شد و در شرایط مصرف زئولیت+باکتری در سال دوم آزمایش، محتوای نیتروژن خاک حدود ۲۶/۵ درصد کاهش یافت. نتیجه نشان داد که در هر دو سال آزمایش با کاربرد ترکیبی زئولیت+باکتری+قارچ، بیشترین محتوای نیتروژن خاک مشاهده شد.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات اصلی رقم بر محتوای نیتروژن خاک تحت کشت دو رقم ذرت 6010 و ns71

Table 4. Mean comparison of the main effects of cultivar on soil nitrogen content under two corn cultivars (cv. 6010 and ns71)

صفات مورد بررسی Traits under investigation	محتوای نیتروژن خاک (درصد) Soil nitrogen content (%)
رقم Cultivar	
6010	0.2273
ns71	0.2397
LSD _{0.05}	0.022

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵٪ بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test at P<0.05.

جدول ۶- مقایسه میانگین برهمکنش سال در تیمارهای کودی بر محتوای نیتروژن، روی و منیزیم خاک تحت کشت دو رقم ذرت 6010 و ns71

Table 5. Interaction between year × fertilizer treatments on nitrogen, zinc and magnesium contents of the soil under two corn cultivars (cv. 6010 and ns71)

سال Year	تیمارهای کودی Fertilizer treatments	محتوای نیتروژن خاک (میلی گرم بر کیلوگرم) Soil nitrogen content (mg/kg)	محتوای روی خاک (میلی گرم بر کیلوگرم) Soil zinc content (mg/kg)	محتوای منیزیم خاک (میلی گرم بر کیلوگرم) Soil magnesium content (mg/kg)
1396 (2017)	ژئولیت Zeolite	0.2175	4.650	119.9
	باکتری Bacteria	0.2265	1.470	116.8
	قارچ Fungus	0.2365	1.345	118.2
	ژئولیت + باکتری Zeolite+Bacteria	0.2430	5.295	118.8
	ژئولیت + قارچ Zeolite+Fungus	0.2425	5.255	118.7
	ژئولیت + باکتری + قارچ Zeolite+Bacteria+Fungus	0.2860	5.225	118.2
	ژئولیت Zeolite	0.2350	4.195	152.4
	باکتری Bacteria	0.2200	1.090	151.8
	قارچ Fungus	0.2300	1.110	148.2
	ژئولیت + باکتری Zeolite+Bacteria	0.2100	4.525	139.3
1397 (2018)	ژئولیت + قارچ Zeolite+ Fungus	0.2200	4.485	138.3
	ژئولیت + باکتری + قارچ Zeolite+Bacteria+Fungus	0.2350	3.945	136.9
	LSD _{0.05}	0.016	0.34	4.78

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test at P<0.05.

نشان داد محتوای فسفر خاک برای سال اول آزمایش حدود ۴۵/۳ درصد بیشتر از سال دوم آزمایش بود. نتایج مقایسه میانگین اثرات سال در تیمارهای کودی (جدول ۸) نشان داد که بیشترین محتوای فسفر خاک با میانگین ۲۲/۵۷ میلی گرم بر کیلوگرم در شرایط کاربرد انفرادی ژئولیت طی سال اول آزمایش حاصل شد؛ اگرچه با تیمارهای مصرف ژئولیت+قارچ در سال اول اختلاف آماری معنی‌داری نداشت.

محتوای فسفر خاک: نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که در بین تیمارهای آزمایش، محتوای فسفر خاک فقط تحت تأثیر اثرات ساده سال و تیمارهای کودی در سطح احتمال ۱ درصد قرار گرفت و برهمکنش سال در کود نیز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. سایر تیمارهای آزمایش بر صفت فوق معنی‌دار نگردید. نتایج جدول مقایسه میانگین اثرات سال در محتوای فسفر خاک (جدول ۷)

محسوب می‌شوند. حداقل میزان حل‌پذیری فسفات‌های کلسیم در pH حدود ۸ می‌باشد و میزان حل‌پذیری آن با کاهش یا افزایش pH از ۸ افزایش پیدا می‌کند، اگرچه در pH بالاتر از ۸، تشکیل کربنات کلسیم با سطح ویژه زیاد موجب جذب سطحی فسفر شده و در نتیجه برای گیاه غیرقابل جذب می‌باشد (۳۰) و (۳۱).

همچنین پژوهشگران دیگر بیان نمودند تلقیح با باکتری‌های حل‌کننده فسفات از طریق ایجاد تغییرات مورفولوژیکی در تارهای کشنده، تعداد، ضخامت و طول ریشه موجب جذب حداکثری فسفر می‌گردند (۳۲). استفاده از قارچ مایکوریزا به همراه زئولیت علاوه بر مصرف بهینه کودهای شیمیایی فسفر، سبب بهبود صفات فیزیولوژیکی و زراعی گیاه ذرت می‌شود. بهبود رشد و افزایش عملکرد گیاه ذرت در تیمارهای حاوی زئولیت به دلیل افزایش فراهمی برخی از عناصر غذایی برای گیاه می‌باشد (۲۰).

همچنین بیشترین کاهش مقدار فسفر در خاک نیز در شرایط مصرف سه‌گانه زئولیت+باکتری+قارچ و تیمار باکتری به‌ترتیب با میانگین‌های ۹/۰۴ و ۹/۱۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد که در یک گروه آماری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که کاربرد تیمارهای حاوی باکتری اثرات بهتری در کاهش محتوای فسفر خاک در مقایسه با تیمارهای حاوی قارچ داشت.

با توجه به نتایج به‌دست آمده (جدول ۴) می‌توان کاهش pH خاک را عامل افزایش جذب فسفر از خاک دانست. پژوهشگران اظهار داشتند که ترشح اسیدهای آلی عامل حلالیت میکروبی فسفات‌های نامحلول در محیط کشت مایع حاوی میکروارگانیسم‌ها است (۲۶). فسفر در pH‌های اسیدی تمایل به پیوند با یون‌های آهن و آلومینیوم و همچنین در pH‌های خنثی و قلیایی تمایل به پیوند با کلسیم و منیزیم دارد. لذا، فسفات‌های کلسیم به‌عنوان کانی غالب فسفر در خاک‌هایی با pH خنثی و قلیایی

جدول ۷- مقایسه میانگین اثرات اصلی سال بر محتوای فسفر و منگنز خاک تحت کشت دو رقم ذرت 6010 و ns71

Table 6. Mean comparison of the main effects of year on phosphorus and manganese content of the soil under two corn cultivars (cv. 6010 and ns71)

صفات مورد بررسی Traits under investigation	محتوای فسفر خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Soil phosphorus content (mg/kg)	محتوای منگنز خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Soil manganese content (mg/kg)
سال Year		
1396 (2017)	20.25	15.44
1397 (2018)	11.06	15.28
LSD _{0.05}	1.55	0.44

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test at $P < 0.05$.

جدول ۸- مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای کودی بر محتوای فسفر خاک تحت کشت دو رقم ذرت 6010 و ns71

Table 7. Mean comparison of the main effects of fertilizer treatments on soil phosphorus content under two corn cultivars (cv. 6010 and ns71)

صفات مورد بررسی	محتوای فسفر خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)
Traits under investigation	Soil phosphorus content (mg/kg)
تیمارهای کودی	
Fertilizer treatments	
زئولیت	17.57
Zeolite	
باکتری	13.60
Bacteria	
قارچ	16.34
Fungus	
زئولیت + باکتری	15.45
Zeolite+Bacteria	
زئولیت + قارچ	17.15
Zeolite+ Fungus	
زئولیت + باکتری + قارچ	13.81
Zeolite+Bacteria+Fungus	
LSD _{0.05}	1.79

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test at $P < 0.05$.

محتوای پتاسیم خاک: نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس مرکب داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که تمامی اثرات ساده، برهمکنش دوگانه و سه‌گانه تیمارهای آزمایش بر محتوای پتاسیم خاک معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سال در رقم در کود (جدول ۹) نشان داد که بیشترین محتوای پتاسیم خاک با میانگین ۳۸۳/۸ میلی گرم بر کیلوگرم در شرایط کاربرد انفرادی باکتری برای رقم 6010 طی هر دو سال زراعی حاصل شد، در حالی که کمترین محتوای پتاسیم خاک به ترتیب با حدود ۴۷/۳ و ۴۵/۸ درصد کاهش برای ارقام 6010 و ns71 در شرایط مصرف ترکیبی زئولیت+باکتری+قارچ مشاهده شد. این نتایج می‌تواند در اثر آزادسازی عناصر غذایی خاک به واسطه فعالیت باکتری و قارچ موجود در زئولیت بوده باشد که با نتایج دیگر پژوهشگران مبنی بر اینکه ریزجانداران مختلف نظیر جلبک‌ها، قارچ‌ها، مخمرها، باکتری‌ها و گلسنگ‌ها دارای قابلیت تجزیه سیلیکات‌ها و آزادسازی عناصر غذایی نظیر فسفر،

پتاسیم، روی، آهن و سیلیس هستند (۳۳ و ۳۴). همسو می‌باشد. اگامبردیوا (۲۰۰۷) گزارش داد که باکتری گونه‌های *Bacillus*، *Pseudomonas* و *Mycobacterium* اثر تحرکی بالاتری بر جذب پتاسیم در گیاه ذرت در خاک‌های فقیر از نظر عناصر غذایی داشت (۹). مینا و همکاران (۲۰۱۴) و گائو و همکاران (۲۰۱۶) افزایش میزان حلالیت پتاسیم در اثر تلقیح گیاه با باکتری‌های محرک رشد را نسبت به شاهد گزارش دادند (۳۵ و ۳۶). به گونه کلی می‌توان گفت تلقیح با باکتری‌های محرک رشد گیاه از طریق تولید اسیدهای آلی و سیدروفور و همچنین افزایش سایر مواد محرک رشد موجب افزایش پتاسیم قابل استفاده در خاک و در نتیجه افزایش جذب آن توسط گیاه می‌گردد (۳۷). مطالعات قبلی نیز حاکی از تأثیر مثبت باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم در گیاهان مختلف زراعی نظیر پنبه و کلزا (۳۸)، خیار و فلفل (۳۹)، سورگوم (۴۰)، گندم و ذرت (۴۱) و سودان گراس (۴۲ و ۴۳) گزارش شده است. سوگوماران و

طریق ایجاد تغییرات در مرفولوژی ریشه و افزایش سطح جذب ریشه، به بهبود جذب عناصر غذایی در گیاهان کمک می‌نمایند. این اختلافات به دلیل نوع و شرایط توسعه ریشه‌ای در گیاهان متفاوت است. احتمالاً هورمون‌های رشد از طریق افزایش تراکم ریشه و ریشه‌های موین موجب افزایش جذب عناصر غذایی نظیر فسفر و پتاسیم می‌گردند. کما اینکه انتخاب باکتری‌ها در مطالعه حاضر به دلیل برتری نسبی آن‌ها در پژوهش‌های دیگر بود و این خود نشان‌دهنده آن است که لزوماً نمی‌توان جهت انتخاب یا رد باکتری به نتیجه یک پژوهش اتکا نمود.

جانارتانام (۲۰۰۷) و لیو و همکاران (۲۰۰۶) نیز بیشترین میزان آزادسازی پتاسیم در خاک را در تیمار باکتری‌های سودوموناس و باسیلوس عنوان کردند که سبب بهبود رشد گیاه و افزایش غلظت پتاسیم در بافت گیاه گندم شد (۴۴ و ۴۵).

برتری باکتری‌ها در مقایسه با تیمارهای کودی می‌تواند به دلیل افزایش فراهمی پتاسیم (۳۹) و مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم باکتری‌ها به‌ویژه تولید فیتوهورمون‌های گیاهی (۴۶) و همچنین تولید هورمون‌های محرک رشد (۴۷) و متعاقب آن گسترش تارهای کشنده باشد. باکتری‌های محرک رشد گیاه از

جدول ۹- مقایسه میانگین برهمکنش سال در رقم در کود بر محتوای پتاسیم خاک تحت کشت دو رقم ذرت 6010 و ns71

Table 8. Interaction between year $\times$ cultivar $\times$ fertilizer on soil potassium content under two corn cultivars (cv. 6010 and ns71)

سال Year	1396 (2017)	1397 (2018)
تیمارهای کودی Fertilizer treatments	6010	ns71
زئولیت Zeolite	300.7	282.8
باکتری Bacteria	383.8	323.2
قارچ Fungus	282.8	283.8
زئولیت + باکتری Zeolite+Bacteria	262.6	303.0
زئولیت + قارچ Zeolite+Fungus	323.2	303.0
زئولیت + باکتری + قارچ Zeolite+Bacteria+Fungus	202.0	208.0

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test at $P < 0.05$.

LSD_{0.05}: 18.47

نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سال در کود (جدول ۶) نشان داد که بیشترین محتوای روی خاک به‌ترتیب با میانگین‌های ۵/۲۹۵، ۵/۲۵۵ و ۵/۲۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم با کاربرد زئولیت+باکتری، زئولیت+قارچ و مصرف زئولیت+باکتری+قارچ در سال اول آزمایش حاصل شد. نتایج نشان داد که

محتوای روی خاک: نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که در بین تیمارهای آزمایش، محتوای روی خاک تحت تأثیر اثرات ساده سال، کود و برهمکنش دوگانه سال در کود و رقم در کود در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد و صفت فوق تحت تأثیر سایر تیمارهای آزمایش قرار نگرفت.

کمترین محتوای روی خاک در شرایط مصرف جداگانه باکتری و قارچ در هر دو سال مورد مطالعه مشاهده گردید که در راستای نتایج سایر محققان بود. باکتری‌های موجود در خاک با اثرگذاری مثبت بر بستر رشد در ناحیه ریزوسفیر و از طریق افزایش تولید هورمون‌های محرک رشد و همچنین افزایش سطح ریشه به بهبود جذب عناصر غذایی در گیاه کمک می‌کنند (۴۸ و ۴۹). بومسما و وین (۲۰۰۸) بیان کردند که وجود شبکه هیفی گسترده در قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار موجب افزایش سطح و سرعت جذب ریشه و در نتیجه افزایش کارایی گیاهان در جذب آب و عناصر غذایی به‌ویژه عناصر کم‌تحرک نظیر روی، مس و فسفر می‌گردد (۵۰). در این آزمایش با مصرف زئولیت، محتوای روی خاک به گونه معنی‌داری افزایش یافت که احتمالاً می‌تواند به دلیل توانایی زئولیت‌ها در به دام انداختن عناصر سنگین در خاک و جلوگیری از تجمع آنها در خاک و گیاه باشد. ماهرخ و همکاران (۲۰۱۷) بیان داشتند در مصرف زئولیت‌ها در خاک امکان دارد برخی از عناصر غذایی کم‌مصرف نظیر روی، مس، منگنز و استرنتیوم به دلیل محبوس شدن در کانال‌ها و حفرات زئولیت، در دسترس گیاه قرار نگیرند (۵۱). همچنین یافته‌های پژوهشی در رابطه با کارایی اصلاحگرهای بوکسیت، زئولت طبیعی و آهک در تثبیت سرب، کادمیوم و روی در خاک‌های آلوده نشان داد افزودن این اصلاحگرها در سطح ۵ درصد باعث کاهش حلالیت فلزات سنگین شد (۵۲). گارسیا

سانچز و همکاران (۱۹۹۹) قابلیت بالای زئولیت مصنوعی را در حفظ کاتیون‌های یک و دو ظرفیتی گزارش دادند (۵۳). در مطالعه دیگری، کلوپکا و آدریانو (۱۹۹۷) بیان نمودند که استفاده از کانی‌های زئولیت و آپاتیت موجب کاهش غلظت سرب به میزان ۵۰٪ در برگ‌های ذرت گردید (۵۴). همچنین نتایج مقایسه میانگین برهمکنش رقم در کود (جدول ۹) نشان داد که بیشترین محتوای روی خاک با میانگین ۵/۲۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم با مصرف زئولیت+قارچ در رقم ns71 به‌دست آمد، اگرچه با مصرف ترکیبی زئولیت+باکتری+قارچ در همین رقم اختلاف آماری معنی‌داری نداشت. کمترین محتوای روی خاک نیز با حدود ۷۷/۹ درصد کاهش در شرایط کاربرد انفرادی باکتری در رقم 6010 و مصرف جداگانه قارچ در رقم ns71 مشاهده شد. نتیجه به‌دست آمده حاکی از آن بود که کمترین محتوای روی خاک در شرایط مصرف جداگانه باکتری و قارچ برای هر دو رقم مورد مطالعه مشاهده گردید در حالی‌که با مصرف زئولیت و تیمارهای حاوی زئولیت، محتوای روی خاک به طور معنی‌داری افزایش یافت.

محتوای منیزیم خاک: نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که محتوای منیزیم خاک تحت تأثیر اثرات اصلی سال، رقم، کود، برهمکنش سال در کود و سال در رقم در سطح احتمال ۱ درصد و همچنین برهمکنش رقم در کود در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد.

جدول ۱۰- مقایسه میانگین برهمکنش رقم و تیمارهای کودی بر محتوای روی و منیزیم خاک تحت کشت دو رقم ذرت 6010 و ns71

Table 9. Interaction between cultivar × fertilizer treatments on zinc and magnesium content of the soil under two corn cultivars (cv. 6010 and ns71)

رقم Cultivar	تیمارهای کودی Fertilizer treatments	محتوای روی خاک (میلی گرم بر کیلوگرم) Soil zinc content (mg/kg)	محتوای منیزیم خاک (میلی گرم بر کیلوگرم) Soil magnesium content (mg/kg)
6010	زنولیت	4.440	139.3
	Zeolite		
	باکتری	1.165	138.3
	Bacteria		
	قارچ	1.290	133.3
	Fungus		
	زنولیت + باکتری	5.025	131.0
	Zeolite+Bacteria		
	زنولیت + قارچ	4.455	129.7
ns71	Zeolite+Fungus		
	زنولیت + باکتری + قارچ	4.185	129.0
	Zeolite+Bacteria+Fungus		
	زنولیت	4.405	133.0
	Zeolite		
	باکتری	1.395	130.3
	Bacteria		
	قارچ	1.165	133.0
	Fungus		
	زنولیت + باکتری	4.795	127.1
	Zeolite+Bacteria		
	زنولیت + قارچ	5.285	127.3
	Zeolite+Fungus		
	زنولیت + باکتری + قارچ	4.985	126.0
	Zeolite+Bacteria+Fungus		
LSD _{0.05}		0.34	4.78

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test at $P < 0.05$.

میلی گرم بر کیلوگرم مربوط به تیمارهای زنولیت و تیمار باکتری برای رقم 6010 بود. نتیجه نشان داد که به گونه کلی کاربرد انفرادی تیمارهای کودی اثرات کمتری در جذب محتوای منیزیم خاک در مقایسه با تیمارهای ترکیبی داشت. نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سال در رقم (جدول ۱۱) نشان داد که بیشترین محتوای منیزیم خاک با میانگین ۱۴۷/۹ میلی گرم بر کیلوگرم برای رقم 6010 در سال دوم

نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سال در کود (جدول ۶) نشان داد که بیشترین محتوای منیزیم خاک به ترتیب با میانگین‌های ۱۵۲/۴، ۱۵۱/۸ و ۱۴۸/۲ میلی گرم بر کیلوگرم با کاربرد جداگانه زنولیت، باکتری و قارچ حاصل شد و با کاربرد ترکیبی تیمارهای کودی، از محتوای منیزیم خاک در سال دوم آزمایش کاسته گردید. همچنین بیشترین محتوای منیزیم خاک به ترتیب با میانگین‌های ۱۳۹/۳ و ۱۳۸/۳

موجب بهبود جذب آهن و در نتیجه افزایش جذب منیزیم می گردد (۵۵). همبستگی مثبت در جذب و انتقال در گیاه می تواند به جذب سایر عناصر غذایی پس از جذب یک یا چند عنصر از عناصر مذکور ناشی از افزایش نیاز گیاه مرتبط باشد یا اینکه وجود شرایط مشابه جهت جذب این عناصر موجب همبستگی مثبت در فرآیند جذب و انتقال می گردد. مشارکت آهن و منیزیم در ساخت کلروفیل، تسهیل در جذب یکدیگر و وجود شرایط مشابه برای جذب آن ها به وسیله گیاه می تواند از دلایل رابطه سینرژیستی بین این دو عنصر غذایی باشد.

آزمایش حاصل شد در حالی که کمترین محتوای منیزیم خاک با حدود ۲۰/۲ درصد کاهش برای رقم ns71 در سال اول آزمایش مشاهده گردید. نتایج حاکی از آن است که رقم ns71 کارایی بالاتری در جذب منیزیم خاک در هر دو سال آزمایش نسبت به رقم 6010 داشت.

در این آزمایش نشان داده شد که در تیمار ترکیبی، میزان جذب آهن از خاک به گونه چشم گیری افزایش یافت و احتمالاً به دلیل همبستگی مثبت بین منیزیم و آهن، میزان جذب منیزیم در گیاه برای فتوسنتز آسانتر افزایش یافت (۵۵). عباس زاده و زاکریان (۲۰۱۴) نیز بیان کردند مایکوریزا با افزایش جذب نیتروژن،

جدول ۱۱- مقایسه میانگین برهمکنش سال در رقم بر محتوای منیزیم خاک تحت کشت دو رقم ذرت 6010 و ns71

Table 10. Interaction between year × cultivar on soil magnesium content under two corn cultivars (cv. 6010 and ns71)

سال Year	رقم Cultivar	محتوای منیزیم خاک (میلی گرم بر کیلوگرم) Soil magnesium content (mg/kg)
1396 (2017)	6010	119.0
	Ns71	117.9
1397 (2018)	6010	147.9
	Ns71	141.1
LSD _{0.05}		5.87

در هر ستون میانگین های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵٪ بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی داری ندارند.
Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test at $P < 0.05$.

نتایج نشان داد که در کشت ارقام مورد بررسی ذرت، همزیستی با کودهای زیستی و زئولیت غنی شده باعث تغییرات میزان عناصر غذایی در خاک شد، که این تغییرات در کرت های زیر کشت رقم ns71 نسبت به رقم 6010 بیشتر مشاهده شد. این موضوع نشان می دهد که با تعیین مناسب ترین ترکیب گیاه و کودهای زیستی به همراه زئولیت غنی شده می توان به نحو مؤثری از این همزیستی در افزایش کارایی عناصر خاک استفاده کرد. صفت جذب انتخابی

محتوای منگنز خاک: نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثرات هیچ یک از تیمارهای آزمایش به جز اثرات اصلی سال ($P \leq 0.05$) بر محتوای منگنز خاک معنی دار نبود. نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی سال (جدول ۷) نشان داد که محتوای منگنز خاک در سال اول آزمایش بیشتر از سال دوم آزمایش بود.

نتیجه گیری کلی

زئولیت‌ها می‌تواند برای طیف گسترده‌ای از کاتیون‌ها به‌عنوان حامل‌های کودهای شیمیایی به افزایش توانایی خاک در نگهداشت عناصر غذایی کمک نماید و همچنین مشابه کودهای کندرها با رهاسازی آهسته و تدریجی عناصر غذایی موجب کاهش هدررفت عناصر از طریق آبشویی و همچنین بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاه زراعی می‌گردد. به طور کلی کاربرد کودهای زیستی به همراه زئولیت غنی‌شده منجر به کاهش pH و محتوای عناصر غذایی در خاک یا به‌عبارتی افزایش جذب عناصر در کشت ذرت به‌ویژه عناصر فسفر و آهن در خاک‌های منطقه نکا شد. بنابراین برای کاهش مخاطرات زیست‌محیطی، پاکسازی خاک، جلوگیری از آبشویی عناصر غذایی در خاک و افزایش کارایی عناصر، استفاده از این ترکیبات در منطقه نکا پیشنهاد می‌شود.

References

1. El-Fatah, M. S., & Khaled, S. M. (2010). Influence of organic matter and different rates of sulfur and nitrogen on dry matter and mineral composition of wheat plant in new reclaimed sandy soil. *Journal of American Science*, 6(11), 1078-1084.
2. Kaya, M., Zeliha, K., & Erdal, I. (2009). Effects of elemental sulfur and sulfurcontaining waste on nutrient concentrations and growth of bean and corn plants grown on a calcareous soil. *African Journal of Biotechnology*, 8(18), 4481-4489.
3. Salehi, A. F., Seifollah, R., Iranpour., & Souraki, A. (2014). The effect of fertilizer use in combination with cow manure on growth, yield and yield components of Black-caraway (*Nigella sativa* L.). *Journal of Agroecology*, 6(3), 495-507.
4. Costa-Santos, M., Mariz-Ponte, N., Dias, M. C., Moura, L., Marques, G., & Santos, C. (2021). Effect of *Bacillus spp.* and *Brevibacillus sp.* on the Photosynthesis and Redox Status of *Solanum lycopersicum*. *Horticulturae*, 7(2), 24.
5. Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in microbiology*, 8, 971.
6. Schmidt, J. E., & Gaudin, A. C. (2018). What is the agronomic potential of biofertilizers for maize? A meta-analysis. *FEMS microbiology ecology*, 94(7). <https://doi.org/10.1093/femsec/fiy094>
7. Bitterlich, M., Franken, P., & Graefe, J. (2018). Arbuscular mycorrhiza improves substrate hydraulic conductivity in the plant available moisture range under root growth exclusion. *Frontiers in Plant Science*, 9, 301.
8. Shaharoon, B. , Arshad, M., Zahir, Z. A., & Khalid, A. (2006). Performance of *Pseudomonas spp.* containing ACC-deaminase for improving growth and yield of maize (*Zea mays* L.) in the presence of nitrogenous fertilizer. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(9), 2971-2975.
9. Egamberdiyeva, D. (2007). The effect of plant growth promoting bacteria on growth and nutrient uptake of maize in two different soils. *Applied soil ecology*, 36(2-3), 184-189.
10. Glick, B. R., Todorovic, B., Czarny, J., Cheng, Z., Duan, J., & McConkey, B. (2007). Promotion of plant growth by bacterial ACC deaminase. *Critical reviews in plant sciences*, 26(5-6), 227-242.
11. Gholami, A., Shahsavani, S., & Nezarat, S. (2009). The effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on germination, seedling growth and yield of maize. *Pakistan Journal of Biological Science*, 1(1), 35-40.
12. Mahmoudzadeh, M., Rasouli-Sadaghiani, M., Hassani, A., & Barin, M. (2015). The role of mycorrhizal inoculation on growth and essential oil of peppermint (*Mentha piperita*). *Journal Of Horticultural Science*, 29(3), 342-348.
13. Cozzolino, V., Di Meo, V., & Piccolo, A. (2013). Impact of arbuscular mycorrhizal fungi applications on maize production and soil phosphorus availability. *Journal of Geochemical Exploration*, 129, 40-44.

14. Doroudian, H., & Basharti Kalaye, H. (2017). The effect of inoculation of plant growth-enhancing bacteria on the growth and nutrient absorption of seed corn (Hybrid singlecross 704). *Journal of Agricultural Applied Research*, 120 (97), 62-74.
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. Qurbani, H., & Akbari Shamsi Khan, M. (2016). *Zeolite, a valuable mineral in agriculture and purification of environmental pollutants*. Engineering Geology and Environment Conference of Iran.
17. Evans, M. G. (1931). The sorption process in the zeolite chabazite. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 134(823), 97-102.
18. Davari, M. R., Bayat Kazazi, S., & Akbarzadeh Pivezhzani, O. (2017). Nanomaterials: implications on agroecosystem. In *Nanotechnology: An agricultural paradigm* (pp.59-71). Singapore: Springer Singapore.
19. Priyanka Khatri, P. K., Parul, P., Pankaj Bhatt, P. B., Nisha, N., Rajeev Kumar, R. K., & Anita Sharma, A. S. (2018). Effect of nanozeolite and plant growth promoting rhizobacteria on maize. *3 Biotech*, 8(141). <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1142-1>
20. Farhadi, D., Asghari, H. R., Ameriyan, M. R., & Abbaspour, A. (2016). Effect of zeolite and mycorrhiza on some morphological characteristics and yield of maize at different levels of soil phosphorus. *Journal of Sol Biology*, 4(1), 39-52.
21. Belova, T. P. (2019). Adsorption of heavy metal ions (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} and Fe^{2+}) from aqueous solutions by natural zeolite. *Heliyon*, 5(9).
22. Ebrahimi Chamani, H. (2013). *Determining the effectiveness of Pseudomonas bacteria (fluorescent and putida) in the growth and yield of two native and improved varieties of rice (Oryza sativa L.)*. Master's thesis in Agriculture, Islamic Azad University, Ayatollah Amoli branch.
23. Bremner, J. M. (1996). Nitrogen-total. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 1085-1121.
24. Jones, J. J., Wolf, B., & Mills, H. A. (1991). *Plant analysis handbook. A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide* (pp. 213-pp).
25. Emami, A. (1996). *Plant analysis methods*. Soil and Water Research Institute. 1, 982.
26. Zadeh, A. (2018). *Determining the effectiveness of Pseudomonas bacteria strains (fluorescens and putida) in the growth, yield and yield components of rice*. Master's thesis in agriculture of Gorgan Azad University.
27. Garg, V. K., Kaushik, P., & Dilbaghi, N. (2006). Vermiconversion of wastewater sludge from textile mill mixed with anaerobically digested biogas plant slurry employing Eisenia foetida. *Ecotoxicology and environmental safety*, 65(3), 412-419.
28. Tavaloli, H., & Semnani, A. (2000). *Decomposition methods of soils, plants, water and fertilizers. First edition*, Shahid Chamran University of Ahvaz. p (219).
29. Hartenstein, R., & Hartenstein, F. (1981). *Physicochemical changes effected in activated sludge by the earthworm Eisenia foetida* (Vol. 10, No. 3, pp. 377-381). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
30. Lindsay, Willard L., Paul LG Vlek, & Sen H. Chien. "Phosphate minerals." *Minerals in soil environments* 1 (1989), 1089-1130.
31. Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and soil*, 237(2), 173-195.
32. Yanni, Y. G., Rizk, R.Y., Corich, V., Squartini, A., Ninke, K., Philip-Hollingsworth, S., ... & Dazzo, F. B. (1997). Natural endophytic association between Rhizobium leguminosarum bv. trifolii and rice roots and assessment of its potential to promote rice growth. In *Opportunities for Biological Nitrogen Fixation in Rice and Other Non-Legumes: Papers Presented at the Second Working Group Meeting of the Frontier Project on Nitrogen Fixation in Rice Held at the National Institute for Biotechnology and Genetic Engineering (NIBGE), Faisalabad, Pakistan, 13-15 October 1996* (pp. 99-114). Springer Netherlands.

33. Malakouti, M. J., Shahabi, A. A., & Bazargan, K. (2005). Potassium in Iranian agriculture. *Sana Publication Co., Ministry of Jihad-e-Agriculture, Tehran, Iran*.
34. Shady, M. A., Ibrahim, I., & Afify, A. H. (1984). Mobilisation of elements and their effects on certain plant growth characteristics as influenced by some silicate bacteria. *Egyptian Journal of Anaesthesia*, 27(1-7), 17-30.
35. Meena, V. S., Maurya, B. R., & Verma, J. P. (2014). Does a rhizospheric microorganism enhance K⁺ availability in agricultural soils?. *Microbiological research*, 169(5-6), 337-347.
36. Gao, L., Kong, F., Feng, C., Wang, J., Gao, J., Shen, G., & Zhang, C. (2016). Isolation, characterization, and growth promotion of phosphate-solubilizing bacteria associated with *Nicotiana tabacum* (tobacco). *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(3), 993-1003.
37. Park, M. S., Singvilay, O., Seok, Y. S., Chung, J. B., Ahn, K. S., & Sa, T. M. (2003). Effect of phosphate solubilizing fungi on P uptake and growth of tobacco in rock phosphate applied soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 36(4), 233-238.
38. Sheng, X. F. (2005). Growth promotion and increased potassium uptake of cotton and rape by a potassium releasing strain of *Bacillus edaphicus*. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(10), 1918-1922.
39. Han, H. S., & Lee, K. D. (2005). Plant growth promoting rhizobacteria effect on antioxidant status, photosynthesis, mineral uptake and growth of lettuce under soil salinity. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 1(3), 210-215.
40. Badr, M. A., Shafei, A. M., & Sharaf El-Deen, S. H. (2006). The dissolution of K and P-bearing minerals by silicate dissolving bacteria and their effect on sorghum growth. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 2(1), 5-11.
41. Singh, G., Biswas, D. R., & Marwaha, T. S. (2010). Mobilization of potassium from waste mica by plant growth promoting rhizobacteria and its assimilation by maize (*Zea mays*) and wheat (*Triticum aestivum* L.): a hydroponics study under phytotron growth chamber. *Journal of plant nutrition*, 33(8), 1236-1251.
42. Basak, B. B., & Biswas, D. R. (2009). Influence of potassium solubilizing microorganism (*Bacillus mucilaginosus*) and waste mica on potassium uptake dynamics by sudan grass (*Sorghum vulgare* Pers.) grown under two Alfisols. *Plant and Soil*, 317, 235-255.
43. Basak, B. B., & Biswas, D. R. (2010). Co-inoculation of potassium solubilizing and nitrogen fixing bacteria on solubilization of waste mica and their effect on growth promotion and nutrient acquisition by a forage crop. *Biology and Fertility of Soils*, 46, 641-648.
44. Sugumaran, P., & Janarthanam, B. (2007). Solubilization of potassium containing minerals by bacteria and their effect on plant growth. *World Journal of Agricultural Sciences*, 3(3), 350-355.
45. Liu, W., Xu, X., Wu, X., Yang, Q., Luo, Y., & Christie, P. (2006). Decomposition of silicate minerals by *Bacillus mucilaginosus* in liquid culture. *Environmental Geochemistry and Health*, 28, 133-140.
46. Reddy, G. S. N., Prakash, J. S. S., Matsumoto, G. I., Stackebrandt, E., & Shivaji, S. (2002). *Arthrobacter roseus* sp. nov., a psychrophilic bacterium isolated from an antarctic cyanobacterial mat sample. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 52(3), 1017-1021.
47. Mirza, M. S., Rasul, G., Mehnaz, S., Ladha, J. K., So, R. B., Ali, S., & Malik, K. A. (2000). Beneficial effects of inoculated nitrogen-fixing bacteria on rice. *The quest for nitrogen fixation in rice*, 191-204.
48. Chen, J. H. (2006). The combined use of chemical and organic fertilizers and/or biofertilizer for crop growth and soil fertility. In *International workshop on sustained management of the soil-rhizosphere system for efficient crop production and fertilizer use* (Vol. 16, No. 20, pp. 1-11). Bangkok, Thailand: Land Development Department.
49. Abdelaziz, M. E., Pokluda, R., & Abdelwahab, M. M. (2007). Influence of compost, microorganisms and NPK fertilizer upon growth, chemical composition and essential oil production of *Rosmarinus officinalis* L. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 35(1), 86.

50. Boomsma, C. R., & Vyn, T. J. (2008). Maize drought tolerance: potential improvements through arbuscular mycorrhizal symbiosis?. *Field Crops Research*, 108(1), 14-31.
51. Mahrokh, A., Ghotbi, V., Azizi, F., Moghadam, A., & Gholamhosseini, M. (2018). Application of natural zeolites as a strategy to optimize input consumption for sustainable agriculture. *Research Achievements for Field and Horticulture Crops*, 8(1), 77-89.
52. Lombi, E., Zhao, F. J., Zhang, G., Sun, B., Fitz, W., Zhang, H., & McGrath, S. P. (2002). In situ fixation of metals in soils using bauxite residue: chemical assessment. *Environmental pollution*, 118(3), 435-443.
53. García-Sánchez, A., Alastuey, A., & Querol, X. (1999). Heavy metal adsorption by different minerals: application to the remediation of polluted soils. *Science of the total environment*, 242(1-3), 179-188.
54. Chlopeka, B., & Adriano, N. (1997). Effects of amendments on heavy metal contents in maize. *Soil Science*, 140, 230-237.
55. Abbaszadeh, b., & Zakarian, F. (2015). The absorption rate of elements in Boye cucumber (*Melissa officinalis* L.) under the influence of two types of arbuscular fungi, mycorrhizal fungi and vermicompost. *Bimonthly Scientific-Research Journal of Medicinal and Aromatic Plants of Iran*, 32(1), 47-59.