Journal of Water and Soil Science
Vol. 30, No. 2, 2026, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. DOI: 10.47176/jwss.30.2.49840

Fertigation as Affected by the Natural and Surfactant-Modified Zeolites to Reduce Nitrate and Ammonium Leaching

Jahangir Abedi-Koupai*, Noushin Shafiei, Behrooz Mostafazadeh-Fard and Mohammad Mahdi Matinzadeh[1]

(Received: September 23-2025; Revised: November 28-2025; Accepted: December 2-2025)

1- Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
* Corresponding author, Email: koupai@iut.ac.ir

Abstract
One of the key factors in agricultural production is the availability of sufficient and usable nutrients for plant growth, and among these, nitrogen plays a particularly important role. The waste of nitrogen fertilizers due to the low efficiency of using fertilizers has caused environmental problems such as pollution of surface and groundwater by nitrate or ammonium. In this study, the influence of fertigation as a combination of urea, ammonium nitrate, natural zeolite of Semnan (CP), and modified zeolite by surfactant (SMZ) in the reduction of waste and manure fertilizer was evaluated. Two separate experiments with a completely randomized design with three replications were used for loam soil columns. Treatments consisted of four levels of zeolite application (0, 4, 8, and 16 g/Kg) and a fertilization level with a concentration of 60 mg per liter nitrate applied at three fertigations during six irrigations. In the first part of the study, the role of nitrogen fertilizers in fertigation as a combination of urea and ammonium nitrate (UAN) for ordinary soil was examined to reduce the concentration of nitrate and ammonium in the drainage water, and the results were compared with one of the fertigation applications. The results showed that the loss of fertilizer in the form of nitrate was reduced by 40 percent for the UAN treatment during the first period of fertigation. Since the results of the first part of the experiment showed that the concentration of ammonium nitrate does not reduce to the same level as drinking water, in the second part of the experiment, the soil amendments were used. The measured nitrate removal showed that the highest nitrate removal belonged to the soil mixed with 16 g/kg of modified zeolite in the surface layer of soil (SM16) treatment, and it was equivalent to 90 percent. The highest ammonium removal belonged to the soil mixed with 16 g/kg of natural zeolite in the surface layer of soil (CP16) treatment, and it was 85 percent. Therefore, the use of fertigation as a combination of nitrogen fertilizers with soil amendments for conditions where there is a potential for groundwater pollution by nitrate leaching is recommended.

Keywords: Nitrogen losses, loamy soil, removal efficiency, nitrate leaching, surface and groundwater pollution

How to cite this article: Abedi-Koupai, J., Shafiee, N., Mostafazadeh-Fard, B. and Matinzadeh, M.M. 2026. Fertigation as Affected by the Natural and Surfactant-Modified Zeolites to Reduce Nitrate and Ammonium Leaching. *J. Water and Soil Sci.* 30(2): 1-15. DOI: 10.47176/jwss.30.2.49840

Copyright © 2026 Abedi-Koupai et al. Published by Isfahan University of Technology.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

نشریه علوم آب و خاک
سال سی‌ام/ شماره دوم / تابستان ۱۴۰۵/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۱ تا ۱۵
10.47176/jwss.30.2.49840

کود آبیاری تحت تأثیر زئولیت‌های طبیعی و اصلاح‌شده با سورفکتانت در جهت کاهش آبشوئی نیترات و آمونیوم

جهانگیر عابدی کوپایی*، نوشین شفیعی، بهروز مصطفی‌زاده‌فرد و محمدمهدی متین‌زاده[1]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۱ ؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۱۱)

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: koupai@cc.iut.ac.ir

چکیده

یکی از عوامل مهم تولید محصولات کشاورزی وجود مقدار کافی از عناصر غذایی و قابل استفاده برای گیاه است که در این راستا عنصر نیتروژن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اتلاف کودهای نیتروژنه حاصل از کم‌بودن کارایی مصرف کود، منجر به مسائل زیست‌محیطی چون آلودگی آبهای زیرزمینی و سطحی به نیترات و آمونیوم می‌شود. در این پژوهش تأثیر کود آبیاری به صورت ترکیبی از کودهای نیتروژن‌دار اوره و نیترات آمونیوم به همراه زئولیت طبیعی سمنان (CP) و اصلاح‌شده با سورفکتانت (SMZ) در کاهش هدررفت کود بررسی شد. آزمایش‌ها در دو بخش و در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار برای هر تیمار، به‌صورت ستونی برای خاک لومی صورت گرفت. تیمارها شامل چهار سطح کاربرد زئولیت (صفر، ۴، ۸ و ۱۶ گرم بر کیلوگرم در لایه سطحی خاک) و یک سطح کوددهی با غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نیترات در سه دوره کود آبیاری و با شش بار آبیاری در هر دور بودند. در بخش اول مطالعه نقش کود آبیاری به صورت ترکیبی از کودهای نیتروژن‌دار اوره و نیترات آمونیوم (UAN) در خاک معمولی در کاهش غلظت نیترات و آمونیوم زهاب بررسی شد و با کود آبیاری به صورت کاربرد یکی از کودهای مد نظر مقایسه شد. نتایج نشان داد که میزان هدررفت کود به فرم نیترات در دور اول کود آبیاری توسط تیمارهای UAN به میزان ۴۰ درصد کاهش یافت. با توجه به اینکه نتایج حاصل از بخش اول مطالعه نشان داد که غلظت نیترات و آمونیوم زهاب در حد استاندارد آب شرب کاهش نمی‌یابد، در بخش دوم از اصلاح‌کننده‌های خاک استفاده شد. بیشترین شدت حذف نیترات با اندازه‌گیری مقدار نیترات حذف‌شده مربوط به تیمار خاک مخلوط با ۱۶ گرم در کیلوگرم زئولیت اصلاح‌شده در لایه سطحی خاک (SM_{16}) و معادل ۹۰ درصد بود و بیشترین شدت حذف آمونیوم مربوط به تیمار خاک مخلوط با ۱۶ گرم در کیلوگرم زئولیت طبیعی در لایه سطحی خاک (CP_{16}) و به میزان ۸۵ درصد بود؛ بنابراین به‌کارگیری کود آبیاری به صورت ترکیبی از کودهای نیتروژن‌دار به همراه اصلاح‌کننده‌های خاک در شرایطی که پتانسیل آلودگی آبهای زیرزمینی به سبب افزایش آبشویی نیترات زیاد است، توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تلفات نیتروژن، خاک لومی، راندمان حذف، آبشویی نیترات، آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

یکی از عوامل مهم و اساسی در تولید محصولات کشاورزی وجود مقدار کافی از عناصر غذایی و قابل استفاده برای گیاه است. یکی از عناصر مهم و حیاتی برای رشد گیاهان نیتروژن است. منبع عمده نیتروژن کودهایی است که به خاک داده می‌شوند؛ اما زمانی که به علت مصرف نادرست و بی‌رویه کودها، غلظت نیتروژن در آب از حد مجاز تعیین‌شده تجاوز کند، آب دچار آلودگی می‌شود. در ایران در ویرایش پنجم استاندارد ۱۰۵۳ مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی، بیشینه غلظت مجاز نیترات آب آشامیدنی از ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر به ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر تغییر یافت (۵). حد مجاز نیتروژن نیتراتی از نظر اداره حفاظت محیط‌زیست آمریکا (USEPA) معادل ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر نیترات است (۷). اتلاف کودهای نیتروژنه حاصل از کم‌بودن کارایی مصرف کود منجر به مسائل زیست‌محیطی چون آلودگی آبهای زیرزمینی و سطحی به نیترات، و پخش و انتشار گازهای NO_x و آمونیاک شده است. همچنین مصرف بیش از حد کودهای نیتروژن‌دار کیفیت محصول را تحت تأثیر قرار داده و سلامتی بشر را با خطر جدی روبرو کرده است (بروز سرطان‌های معده و غدد لنفاوی) (۱۰). از طرف دیگر مصرف بی‌رویه کودهای نیتروژنه برای دستیابی به عملکرد زیاد، سبب خسارت به اقتصاد و هدررفت ذخایر ملی می‌شود. متأسفانه مصرف کودهای شیمیایی در کشور ایران نامتعادل بوده و مطابقتی با نیاز واقعی گیاه ندارد. در بیشتر کشورهای دنیا درصد بازیافت کودهای نیتروژنه برای غلات به طور میانگین حدود ۳۳ درصد گزارش شده است. این رقم در ایران به دلایل متعددی از جمله عدم دقت در انتخاب نوع کود، مقدار و زمان مصرف کود، کم است (۱۶). نیترات به علت داشتن بار منفی و جذب‌نشدن روی سایت‌های تبادلی خاک، به سرعت از لایه‌های بالایی خاک شسته شده و وارد آبهای سطحی و زیرزمینی می‌شود و باعث افزایش غلظت نیترات از حد مجاز شده و درنهایت آلودگی این منابع را به دنبال دارد. همچنین فلات و همکاران (۲۰۰۱) در ایالت کلرادو آمریکا نشان دادند که آلودگی نیتروژنی در جریانات سطحی فقط به فرم نیترات خطرساز نبوده، بلکه فرم‌های آمونیاکی نیز نقش قابل توجهی داشته‌اند (۱۱). روش کوددهی نیز نقش اساسی در کارایی مصرف کود و عملکرد محصول دارد. کارایی مصرف آب نیز تحت تأثیر نحوه مصرف کود نیتروژن است. کاربرد کود به روش کود آبیاری که در آن زمان و مصرف کود به سهولت قابل تنظیم است، موجب افزایش کارایی مصرف آب و کود می‌شود (۸). یکی از راهکارهایی که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه واقع شده است، استفاده از زئولیت است که به صورت طبیعی و مصنوعی قابل استفاده هستند که با توجه به منابع غنی زئولیت در ایران با هزینه کم به راحتی قابل دسترس است و چه بسا هزینه‌های حذف نیترات از آب‌های آلوده بسیار گزاف و امری مشکل‌تر است. با پژوهش‌های وسیعی که تاکنون در ارتباط با زئولیت صورت گرفته است، زئولیت به عنوان ماده‌ای با مزایای بسیار و چندمنظوره در بخش کشاورزی معرفی شده است. زئولیت علاوه بر توانایی در جذب و نگهداری کودهای نیتروژن‌دار (۱، ۱۷، ۱۸ و ۲۲)، دارای خصوصیاتی مانند افزایش نگهداشت آب در خاک و درنتیجه حفاظت خاک از فرسایش بادی (۹)، افزایش عملکرد محصولات (۶، ۱۳ و ۲۰)، راندمان زیاد مصرف آب و کاهش نیاز به کوددهی (۲۰)، اثرهای مثبت بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مانند کاهش چگالی ظاهری خاک است (۱۲). سلیمانی و همکاران (۲۰۰۸) از زئولیت‌های طبیعی و اصلاح‌شده سمنان و فیروزکوه به منظور حذف یون‌های نیترات و آمونیوم از محلول‌های آزمایشگاهی و آب‌های زیرزمینی استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بیشترین و کمترین جذب آمونیوم به ترتیب مربوط به تیمار زئولیت طبیعی سمنان و زئولیت اصلاح‌شده فیروزکوه بوده است (۲۳).

عابدی کوپایی و همکاران ۱۳۸۹، در یک مطالعهٔ گلخانه‌ای، چهار سطح زئولیت صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد اضافه‌شده به یک خاک لوم رسی‌سیلتی، یک سطح آبشویی ۲۵ درصد عمق خالص آبیاری، یک سطح کوددهی اوره با غلظت ۶۰ میلی‌گرم

در لیتر و دو زئولیت میانه (مش ۵۰ و ۲۰۰) و زئولیت مشهد (مش ۲۰۰)، در چهار بار آبیاری را به منظور بررسی تأثیر کاربرد زئولیت کلینوپتی‌لولایت در کاهش آبشویی کود اوره از خاک انجام دادند. نتایج به‌دست‌آمده تأثیر مثبت کارایی زئولیت را در کاهش آبشویی اوره نشان داد (۱). خدارحمی و همکاران (۱۳۹۸) اثر زئولیت و سوپر جاذب نوع A200 را بر کاهش آبشویی نیترات در یک خاک لوم در شرایط غیر اشباع بررسی کردند. نتایج نشان داد تیمارهای ۲ و ۵ گرم زئولیت در کیلوگرم خاک به ترتیب ۲۰ و ۲۹ درصد و تیمارهای ۲ و ۵ گرم سوپرجاذب در کیلوگرم خاک به ترتیب ۴۸ و ۶۴ درصد نسبت به تیمار شاهد در جلوگیری از آبشویی نیترات مؤثر بودند (۱۴). ملکیان و همکاران در سال ۲۰۱۰ در زمینه تأثیر کاربرد زئولیت‌های طبیعی (زئولیت سمنان) و اصلاح‌شده با سورفکتانت برای جلوگیری از آبشویی نیترات انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش نشان داد که هر دو اصلاح‌کننده پتانسیل جلوگیری از آلودگی آبهای زیر زمینی را دارند (۱۸). فواید عمده کود آبیاری را می‌توان در افزایش کارایی مصرف کود، کاربرد دقیق عناصر غذایی بر اساس نیاز گیاهان، استفاده آسان کودهای شیمیایی مرکب و محلول‌های غذایی آماده شامل عناصر غذایی کم‌مصرف (ریزمغذی)، تنظیم آسان‌تر و پایش (مانیتورینگ) منظم مدیریت کوددهی، کاهش تلفات آبشویی کودها و کاهش هزینه‌های تولید خلاصه کرد (۲۴)؛ بنابراین کاربرد کود به روش کود آبیاری نه‌تنها موجب افزایش کارایی مصرف آب و کود می‌شود (۸)، بلکه مدیریت کود آبیاری باعث افزایش درآمد کشاورزان و کاستن آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود (۲۵).

بیشتر مطالعات انجام‌شده برای کود اوره یا نیترات آمونیوم به صورت مجزا صورت گرفته است؛ درصورتی‌که همان‌طور که با بررسی منابع مشخص شد، ترکیبی از کودهای نیتروژن‌دار و اوره بهتر است مصرف شود؛ زیرا از این طریق تلفات کود در اثر تبخیر و تصعید، کاهش می‌یابد. همچنین، در مطالعات قبلی کود آبیاری توجه کمتری به بررسی تأثیر ترکیب کود اوره با کودهای نیتروژن‌دار تحت تأثیر زئولیت طبیعی و اصلاح‌شده در کاهش آبشویی نیترات و آمونیوم و اثرهای آن بر pH و شوری خاک صورت گرفته است که این موضوع هدف و نوآوری این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی کود آبیاری تحت تأثیر زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت بر آبشویی نیترات و آمونیوم، این پژوهش در گلخانه آموزشی و پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد. در این پژوهش از زئولیت طبیعی (Clinoptilolite, CP) و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت (Surfactant Modified Zeolite, SMZ) استفاده شد. زئولیت طبیعی (CP)، کانی‌های آلومینوسیلیکات آبداری هستند که دارای عناصر فلزی قلیایی و یا قلیایی خاکی به ویژه سدیم، پتاسیم، منیزیم، کلسیم استرانسیم و باریم هستند. انواع مختلف زئولیت در ساختمان شبکه سه‌بعدی سیلیکات‌های آبدار نوع داربستی (تکتوسیلیکات) متبلور می‌شوند (۲۱). آنیون‌ها و املاح خنثی‌شونده جذب سطحی زئولیت‌های CP نشده و از سطح منفی آنها دفع می‌شوند. سورفکتانت‌های چهاروجهی با کاتیون‌های سطح خارجی زئولیت مبادله شوند، سطح خارجی زئولیت تغییر کرده و دارای بار مثبت می‌شود. از آنجایی که سورفکتانت‌ها به دلیل بزرگ‌بودن نمی‌توانند وارد منافذ داخلی ساختمان زئولیت شوند، سایت‌های تبادلی داخلی زئولیت برای کاتیون‌های کوچک همچنان قابل دسترس است. به این ترتیب زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت (SMZ)، می‌تواند جذب‌کننده مؤثری برای جداسازی کاتیون‌های غیر آلی، آنیون‌های غیر آلی و مواد خنثی باشند (۱۰). نوع سورفکتانت هگزا دسیل تری متیل آمونیوم (Hexadecyltrimethylammonium, HDTMA) به دلیل دسترسی آسان‌تر و ارزان‌تر بودن مورد استفاده قرار گرفت. خاک مورد استفاده در این پژوهش از مکان ناژوان شهر اصفهان تهیه شد. این خاک پس از عبور از الک ۵ میلی‌متری و جداسازی سنگ و کلوخ و ریشه‌ها برای تعیین دقیق بافت و

سایر مشخصات به آزمایشگاه منتقل شد. جدول ۱ برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این مطالعه را نشان می دهد. خاک مد نظر دارای ۲۵ درصد رس ۴۲ درصد سیلت و ۳۳ درصد شن و بافت خاک لومی است. همچنین نیاز کودی خاکی که باید با زئولیت مخلوط شود، مشخص شد تا پس از اضافه کردن زئولیت به آن و انجام کود آبیاری اثر زئولیت بر نگهداشت کود مشهود باشد. در غیر این صورت، مقداری از کود موردنیاز خاک از زئولیت جذب می‌شود. به همین منظور با فرض کشت گیاه ذرت نیازهای کودی خاک مشخص شد و بر اساس سطح ستون‌های مورد آزمایش تعدیل شد. سپس خاک مد نظر پس از عبور از الک ۱۰، با میزان کودهای تعیین‌شده مخلوط شد.

زئولیت طبیعی مورد استفاده، دارای کانی کلینوپتی لولایت است و در اندازه‌های میلی‌متر و از معادن سمنان تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. بر طبق پژوهش‌های گذشته استفاده از زئولیت در اندازه‌های کوچک‌تر نه‌تنها تأثیر معنی‌داری بر میزان جذب نیترات و آمونیوم ندارد (۱۸)، بلکه در آزادسازی به موقع آب ناتوان بوده و بر آب قابل دسترس در خاک بی‌تأثیر است (۱۳). زئولیت اصلاح‌شده از نوع سورفکتانت دولایه‌ای است که برای این منظور از هگزا دسیل تری متیل آمونیوم (HDTMA) استفاده شده است و برای تشکیل سورفکتانت کاملاً دولایه‌ای نسبت HDTMA جذب‌شده به ظرفیت تبادل کاتیونی خارجی زئولیت باید ۲:۱ باشد. در این حالت ظرفیت تبادل کاتیونی خارجی (External Cation Exchange Capacity, ECEC) این نوع زئولیت معادل ۲۰۰ درصد است (۱۵ و ۱۸). برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این کانی در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

آزمایش‌ها در دو بخش و در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار برای هر تیمار، به صورت ستونی برای خاک مد نظر و به تعداد ۲۷ ستون خاک صورت گرفت. تیمارهای مورد مطالعه در بخش اول آزمایش‌ها عبارت بودند از: ۱- خاک معمولی و کود آبیاری با اوره (UN)، ۲- خاک معمولی و کود آبیاری با نیترات آمونیوم (UA) و ۳- خاک معمولی و کود آبیاری با ترکیب اوره و نیترات آمونیوم (UAN). همچنین تیمارهای مورد مطالعه در بخش دوم آزمایش‌ها عبارت‌اند از: ۱- خاک مخلوط با ۴ گرم در کیلوگرم زئولیت طبیعی در لایه سطحی خاک (CP_4)، ۲ - خاک مخلوط با ۸ گرم در کیلوگرم زئولیت طبیعی در لایه سطحی خاک (CP_8)، ۳- خاک مخلوط با ۱۶ گرم در کیلوگرم زئولیت طبیعی در لایه سطحی خاک (CP_{16})، ۴- خاک مخلوط با ۴ گرم در کیلوگرم زئولیت اصلاح‌شده در لایه سطحی خاک (SM_4)، ۵- خاک مخلوط با ۸ گرم در کیلوگرم زئولیت اصلاح‌شده در لایه سطحی خاک (SM_8) و ۶- خاک مخلوط با ۱۶ گرم در کیلوگرم زئولیت اصلاح‌شده در لایه سطحی خاک (SM_{16}). همچنین محلول کود آبیاری در بخش دوم آزمایش‌ها شامل ترکیبی از کودهای نیتروژن‌دار اوره و نیترات آمونیوم بود (UAN) و به ترتیب با نماد CP_0 برای مقدار مصرف صفر زئولیت طبیعی و SM_4 برای ستون‌های با مصرف صفر زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت در نظر گرفته شد.

نحوه آماده‌سازی و پر کردن ستون‌ها: در این پژوهش از لوله‌هایی از جنس پولیکا با قطری برابر با ۹۰ میلی‌متر و ارتفاعی برابر با ۷۵ سانتی‌متر استفاده شد. انتهای ستون‌ها توسط در پوش از جنس پولیکا بسته شدند و ستون‌ها با آب پر شد تا از بروز هرگونه نشتی از اطراف در پوش اطمینان حاصل شود. پس از آب‌بندی کامل برای خروجی زهاب، سوراخی به قطر ۱/۲۵ سانتی‌متر در وسط در پوش ایجاد شد. قبل از پر کردن ستون‌ها برای جلوگیری از جریان ترجیحی از دیواره‌ها، دیواره درونی ستون‌ها چرب شد. همچنین برای جلوگیری از شسته‌شدن خاک، در کف هر ستون لایه‌ای به ضخامت ۵ سانتی‌متر از شن به عنوان فیلتر قرار گرفت. سپس خاک تهیه‌شده به ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر به صورت لایه‌ای درون ستون‌ها ریخته شد تا از ایجاد خلل و فرج بزرگ جلوگیری شده و شرایطی مشابه با شرایط طبیعی ایجاد شود و ۱۰ سانتی‌متر بالایی هر ستون خاک به منظور قرارگیری محلول کود آبیاری در نظر گرفته شد. برای

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

پارامتر	واحد	مقدار
بافت خاک	-	لومی
EC	dS/m	۲/۶
pH	-	۷/۴
نیتروژن کل	٪	۰/۰۸
ماده آلی	٪	۰/۷۵
کربن آلی	٪	۰/۲۵
پتاسیم	mgL^{-1}	۲۹
فسفر	mgL^{-1}	۳۸

جدول ۲. نتایج تجزیه شیمیایی زئولیت سمنان

ترکیب	LoI	MgO	CaO	K_2O	Na_2O	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	P_2O_5
درصد	۱۲/۸	۰/۶۴	۲/۵۱	۲/۴۵	۱/۹۶	۱۱/۸۳	۶۵/۱۵	۱/۲	۰/۲۷

جدول ۳. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زئولیت

پارامتر	واحد	مقدار
چگالی ظاهری	gr/cm^3	۰/۸–۱/۱
ظرفیت تبادل کاتیون خارجی	%	۷۲/۴
اندازه زئولیت کاربردی*	mm	۰/۲–۰/۸
سطح ویژه خارجی	m^2/gr	۱۵–۱۴
سطح ویژه کل	m^2/gr	۸۰۰

*: بیش از ۸۰ درصد اندازه زئولیت کاربردی حدود ۰/۵ میلی‌متر است.

تهیه محلول کود آبیاری، از نمک خالص نیترات آمونیوم و اوره استفاده شد. غلظت نیترات ورودی برابر ۶۰ میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته شد که معادل ۲۰۵ کیلوگرم در هکتار کود اوره ۴۶ درصد و ۲۹۰ کیلوگرم در هکتار کود نیترات آمونیوم ۳۳ درصد است. میزان آب آبیاری برای همه تیمارها یکسان و بر اساس حد اشباع خاک تعیین و محاسبه شد. به منظور بررسی تأثیر نحوه کود آبیاری و اصلاح‌کننده‌های خاک بر غلظت نیترات و آمونیوم ورودی، ستون‌ها به صورت سطحی و با یک سطح کوددهی با غلظت نیترات ۶۰ میلی‌گرم در لیتر، تغذیه شدند؛ به‌طوری که ستون‌های خاک طی دوره آزمایش، سه مرتبه و هر بار با یک سوم غلظت مد نظر و با در نظر گرفتن ۶ بار آبیاری تا دوره بعدی کود آبیاری اشباع شدند و سپس در هر دوره کود آبیاری تغییرات فاکتورهای مد نظر بررسی شد. گفتنی است که دومین و سومین کود آبیاری به فاصله ۲۱ و ۴۲ روز از کود آبیاری اول انجام شد. نمونه‌برداری از محلول خروجی ستون‌های آزمایشگاهی طی مدت ۹ هفته به طول انجامید. برای

تعیین میزان آبشویی نیترات و آمونیوم غلظت یون‌های نیترات و آمونیوم در زهاب خروجی پس از اعمال کود آبیاری از ستون خاک اندازه‌گیری شد و با مقادیر اولیه غلظت یون‌های نیترات و آمونیوم موجود در محلول کود آبیاری مقایسه شد. از طرفی برای بررسی تغییرات ایجادشده در شوری و اسیدیته خاک، پارامترهای EC و pH خاک قبل و بعد از اعمال تیمارها نیز اندازه‌گیری شدند. پس از اتمام مراحل انجام آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌های نمونه‌برداری‌شده با نرم افزار SAS انجام شد و برای مقایسه میانگین‌ها آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

ابتدا به بررسی تأثیر کود آبیاری بدون کاربرد اصلاح‌کننده‌های خاک (زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده)، به صورت ترکیبی از دو نوع کود نیتروژن‌دار در کاهش میزان آبشویی نیترات و آمونیوم و مقایسه آن با شرایط کاربرد یک نوع کود نیتروژن‌دار پرداخته می‌شود و سپس عملکرد کود آبیاری به‌صورت ترکیبی از دو نوع کود نیتروژن‌دار تحت تأثیر زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بررسی روند تغییرات غلظت نیترات و آمونیوم زه آب در ستون‌های با خاک معمولی

آبشویی نیترات با خاک معمولی

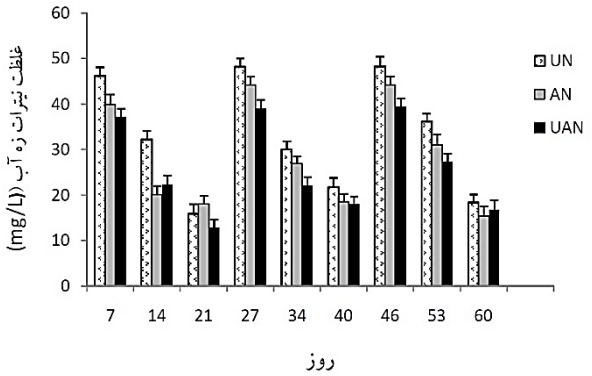
شکل ۱، روند تغییرات غلظت نیترات خروجی در ستون‌های بدون اصلاح‌کننده خاک را طی سه دوره متوالی کود آبیاری نشان می‌دهد. همان‌طور که روند تغییرات نشان می‌دهد، بیشترین هدررفت کود بلافاصله پس از اعمال کود آبیاری رخ داده است؛ به‌طوری که پس از اولین کود آبیاری، تیمارهای UN ، AN و UAN در پایان دوره اول کود آبیاری به ترتیب ۳۸، ۳۶ و ۳۳ درصد کود را به شکل نیترات از محیط خاک خارج کردند. افزایش غلظت نیترات زهاب در تیمار UN نسبت به سایر تیمارها به خوبی مشهود است؛ اما میزان غلظت نیترات خروجی در تیمارهای UAN نسبت به سایر تیمارها، در طول دوره مورد مطالعه، همواره کمتر است. معمولاً بازدهی کود اوره بسیار کم است که موجب اتلاف بیش از ۵۰ درصد نیتروژن آن می‌شود و همین امر دلیل مصرف بیش از حد این کود در مصارف کشاورزی به شمار می‌آید (۳).

آبشویی آمونیوم با خاک معمولی

جدول ۴، مقدار کل آمونیوم موجود در زهاب ستون‌های خاک را در تیمارهای UN، AN و UAN، در سه دوره کود آبیاری نشان دهد. این جدول به خوبی کاهش چشمگیر غلظت آمونیوم خروجی در هر دوره کود آبیاری در مقایسه با غلظت کل آمونیوم ورودی را نشان می‌دهد؛ به‌طوری که در کود آبیاری با ترکیبی از کودهای اوره و نیترات آمونیوم این فرایند کمتر رخ داده است؛ یعنی میزان کمتری از آمونیوم به فرم نیترات از محیط خارج شده است. توجه به غلظت آمونیوم ورودی با درنظرگرفتن نوع کود آبیاری حائز اهمیت است.

بررسی روند تغییرات غلظت نیترات و آمونیوم خروجی در خاک همراه با اصلاح‌کننده خاک

با وجود اینکه نتایج به‌دست‌آمده از بخش اول آزمایش‌ها در تیمار کود آبیاری به صورت ترکیبی از دو نوع کود نیتروژن‌دار (اوره و نیترات آمونیوم) دلالت بر کاهش آبشویی نیترات دارد، اما این ارقام در کل نمونه‌های زهاب اختلاف چشمگیری با غلظت استاندارد نیتروژن در آب شرب یعنی ۱۰ میلی‌گرم در لیتر (۴) دارند. همچنین میزان غلظت آمونیوم زهاب در کلیه تیمارها به ویژه در تیمارهای UAN بیشتر از حد استاندارد است؛ بنابراین در بخش دوم مطالعه به بررسی عملکرد کود آبیاری به صورت ترکیبی از دو نوع کود نیتروژن‌دار اوره و نیترات آمونیوم تحت تأثیر اصلاح‌کننده‌های خاک از نوع زئولیت‌های طبیعی (CP) و اصلاح‌شده با سورفکتانت (SMZ) پرداخته شده است. با توجه به اینکه هدف اصلی از این پژوهش



شکل ۱. روند تغییرات غلظت نیترات خروجی در ستون‌های بدون اصلاح‌کننده خاک

جدول ۴. مقدار آمونیوم کل موجود در زهاب (mgL^{-1}) در سه دوره کود آبیاری

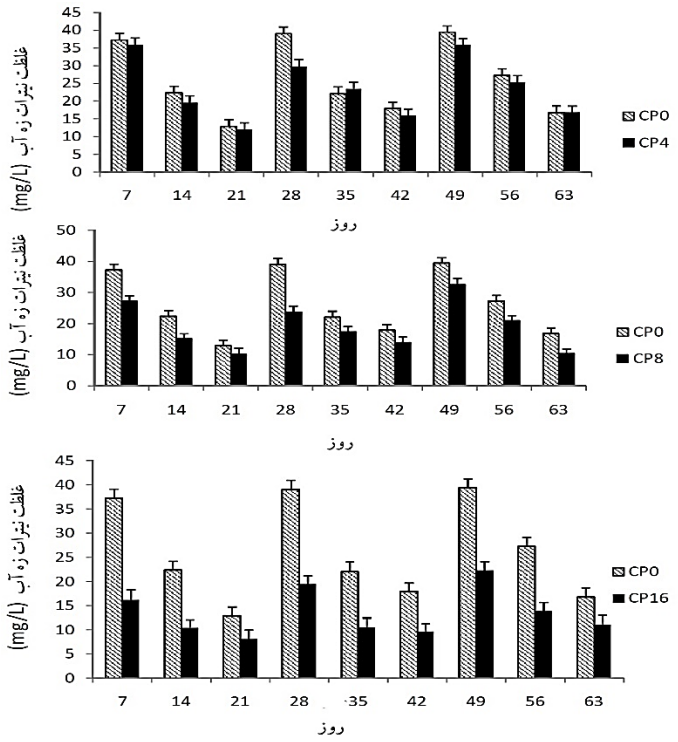
کودآبیاری	اوره+نیترات آمونیوم	نیترات آمونیوم	اوره
اول	۵۳/۶۱	۱۶/۳۰	۲۴/۹۵
دوم	۵۶/۳۰	۱۷/۴۵	۱۷/۱۰
سوم	۵۲/۹۷	۱۹/۲۳	۱۲/۳۶

کاهش غلظت نیترات و آمونیوم با استفاده از اصلاح خاک است، از نظر درصد کاهش غلظت پارامترهای مربوطه دوره ابتدایی کود آبیاری سنجیده می‌شود؛ چراکه با توجه به ماهیت طبیعی زئولیت در پدیده جذب و واجذب اثر این اصلاح‌کننده‌ها در کاهش غلظت نیترات و آمونیوم در این دوره از کود آبیاری بیشتر قابل مشهود است.

آبشویی نیترات تحت تأثیر زئولیت طبیعی

شکل ۲، روند تغییرات غلظت نیترات خروجی در ستون‌های با اصلاح‌کننده خاک از نوع زئولیت طبیعی را برای تیمارهای CP_4، CP_8 و CP_{16} نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، تیمارهای CP_4 و CP_8 توانستند به خوبی نیترات ورودی را به ترتیب به میزان ۷۰ تا ۷۷ درصد از محیط حذف کنند؛ درحالی‌که تیمارهای شاهد در طول دوره نمونه‌برداری قادر به حذف تنها ۶۰ درصد (دوره اول کود آبیاری) از نیترات ورودی بودند. همچنین غلظت نیترات زهاب در تیمارهای CP_{16} با سایر تیمارها تفاوت چشمگیری داشته است؛ به‌طوری که قادر به حذف ۸۵ درصد نیترات ورودی از محیط بودند. نتیجه حاصل‌شده به علت افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و همچنین افزایش تعادل جذب یون NH_4 خاک سطحی ترکیب‌شده با زئولیت قابل توجیه است. به این ترتیب میزان دسترسی باکتری‌های نیتریت‌کننده خاک به NH_4 و درنتیجه میزان آبشویی نیترات کاهش می یابد (۱۹).

با وجود اینکه غلظت‌های به‌دست‌آمده در تیمارهای CP_4، CP_8 و CP_{16} به ترتیب حدود ۶۳،۵۹ و ۴۷ درصد از غلظت استاندارد نیترات در آب شرب یعنی ۱۰ میلی‌گرم در لیتر تجاوز کرده‌اند، ولیکن نباید نقش زئولیت را در کاهش غلظت نیترات نادیده گرفت. شکل ۲، نشان‌دهنده تأثیر مثبت زئولیت بر آبشویی نیترات است. از طرفی تیمار CP_{16} توانست غلظت نیترات زهاب را حداکثر به میزان ۸/۵۵ میلی‌گرم در لیتر کاهش دهد. در کود آبیاری به صورت ترکیبی از کودهای نیتروژن‌دار (اوره و نیترات آمونیوم) غلظت یون آمونیوم در محلول ورودی بر غلظت یون نیترات غالب است. زئولیت طبیعی (CP) قادر است میزان زیادی از آمونیوم را جذب کند و از این طریق از تولید نیترات طی فرایند نیتریفیکاسیون جلوگیری نماید و این



شکل ۲. روند تغییرات غلظت نیترات خروجی در ستون‌های با اصلاح‌کننده خاک زئولیت طبیعی (CP)

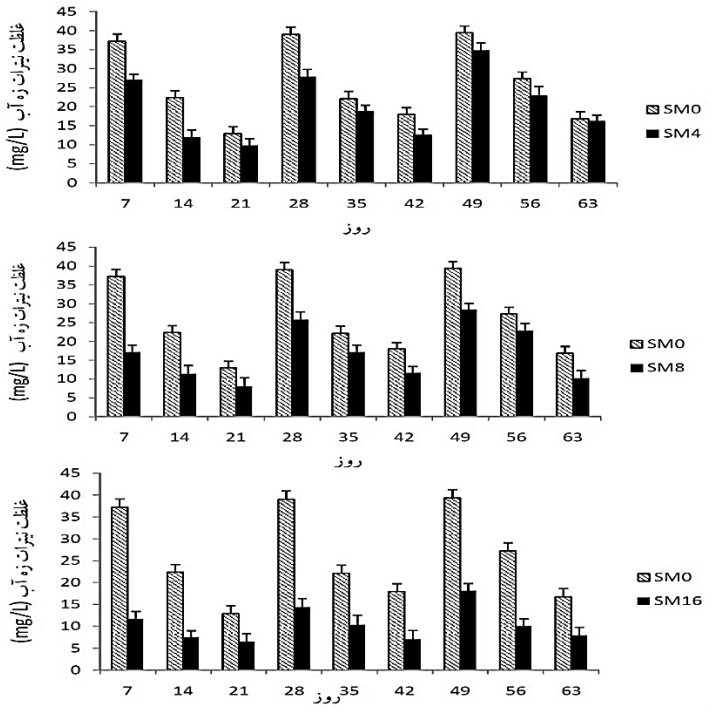
یکی از دلایل عمده کاهش غلظت نیترات در زهاب این ستون‌هاست. عابدی و ملکیان راندمان حذف آمونیوم را توسط زئولیت سمنان (CP) با اندازه میلی‌متر و در مقادیر ۲۰ و ۶۰ گرم در هر کیلوگرم خاک در محدوده ۱۰/۳۳ تا ۸۸/۴۲ درصد به دست آوردند (۱۸).

آبشویی نیترات تحت تأثیر زئولیت با سورفکتانت (SMZ)

شکل ۳، روند تغییرات غلظت نیترات خروجی در ستون‌های با اصلاح‌کننده خاک از نوع SMZ را برای تیمارهای SM_4، SM_8 و SM_{16} نشان می‌دهد. روند تغییرات غلظت نیترات خروجی در این تیمارها بسیار مشابه روند تغییرات غلظت نیترات خروجی در تیمارهایی است که با زئولیت طبیعی اصلاح شده‌اند. با توجه به این شکل دامنه تغییرات غلظت نیترات خروجی در زهاب این ستون‌ها در طول دوره نمونه‌برداری برای تیمار SM_4 بین ۳۴/۷۵–۹/۷۶ میلی‌گرم در لیتر، برای تیمار SM_8 بین ۳۱/۵۴–۸/۶۵ و برای تیمار SM_{16} بین ۱۹/۱۵–۶/۰۲ میلی‌گرم در لیتر به‌دست‌آمده است؛ بنابراین تیمارهای SM_4 و SM_8 توانستند میزان غلظت نیترات زهاب را در همان دوره ابتدایی آزمایش به حد غلظت استاندارد نیترات در آب شرب یعنی ۱۰ میلی‌گرم در لیتر برسانند. همچنین تیمار SM_{16} به طور چشمگیری میزان نیترات زهاب را تا حد ۶/۰۲ میلی‌گرم در لیتر کاهش داد که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت با سطح کاربرد ۱۶ گرم در هر کیلوگرم خاک سطحی در حذف نیترات از ستون‌های خاک است. تیمارهای SM_4، SM_8 و SM_{16} در طول دوره مطالعه به ترتیب حداکثر به میزان ۷۶، ۸۵ و ۹۰ درصد از نیترات ورودی را از محیط حذف کردند؛ درحالی‌که این میزان برای تیمارهای شاهد ۶۰ درصد به دست آمد.

بررسی نتایج تجزیه واریانس آبشویی نیترات و آمونیوم تحت تأثیر اصلاح‌کننده‌های خاک

نتایج به‌دست‌آمده از کاربرد زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح شده با سورفکتانت در خاک نشان داد که غلظت نیترات و آمونیوم



شکل ۳. روند تغییرات غلظت نیترات خروجی در ستون‌های با اصلاح‌کننده خاک از نوع زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت (SMZ)

خروجی نسبت به تیمار شاهد (کنترل) کاهش چشمگیری داشته است. جدول ۵، بیانگر آن است که نوع و سطح کاربرد اصلاح‌کننده‌های خاک دارای اثر معنی‌داری به ترتیب در سطوح یک و پنج درصد بر بیشینه و متوسط غلظت نیترات زهاب هستند.

در جدول ۶، اثرهای متقابل نوع و سطوح کاربرد اصلاح‌کننده بر بیشینه و متوسط غلظت نیترات زهاب ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که نوع اصلاح‌کننده در سطوح کاربرد ۸ و ۱۶ گرم در هر کیلوگرم خاک بر بیشینه نیترات زهاب اثر یکسانی داشتند؛ به‌طوری که هر دو نوع اصلاح‌کننده در این میزان از مصرف، به یک اندازه بیشینه نیترات زهاب را کاهش داده‌اند. ولی دو نوع اصلاح‌کننده در سطوح کاربرد کمتر (۴ گرم در هر کیلو گرم خاک) اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد ((P<۰/۰۵)) بر بیشینه غلظت نیترات آبشویی شده داشته‌اند؛ به‌طوری که نوع اصلاح‌کننده SMZ، از این لحاظ مؤثرتر واقع شده است. همچنین نوع اصلاح‌کننده بر متوسط نیترات خروجی موثر واقع نشد و اختلاف آنها با تیمار شاهد (مصرف صفر) در سطح پنج درصد معنی‌دار شد؛ بنابراین هر دو نوع اصلاح‌کننده به یک اندازه متوسط نیترات زهاب را کاهش داده‌اند. از نظر سطوح کاربرد مختلف هر دو نوع اصلاح‌کننده بر بیشینه و متوسط غلظت نیترات زهاب موثر واقع شدند (P<۰/۰۵). همچنین سطوح کاربرد بیستر، به شکل چشمگیری بیشینه و متوسط غلظت نیترات زهاب را کاهش داده‌اند. به طور کلی اصلاح‌کننده‌های SM_{16} و CP_4 به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر بیشینه و متوسط غلظت نیترات زهاب در مقایسه با تیمار شاهد گذاشتند.

بر اساس نتایج جدول ۷، افزایش سطوح کاربرد در هر دو نوع اصلاح‌کننده، میانگین غلظت نیترات زهاب را کاهش داده است؛ به‌طوری که اختلاف بین سطوح کاربرد مختلف در سطح پنج درصد (P<۰/۰۵) معنی‌دار شد. همچنین نتایج این جدول نشان می‌دهد که نوع اصلاح‌کننده بر میانگین غلظت نیترات زهاب در سطح پنج درصد اثر معنی‌داری داشته است؛ به‌طوری که اصلاح‌کننده SMZ با سطح کاربرد ۱۶ گرم در هر کیلوگرم

جدول ۵. تجزیه واریانس تأثیر فاکتورهای مختلف بر میزان غلظت نیترات زهاب

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		بیشینه	متوسط
نوع اصلاح‌کننده	۱	۸۵/۰۸*	۱۲/۴۳**
سطح کاربرد	۳	۲۳۷۸/۲۶*	۱۶۷/۵۲**
نوع × سطح کاربرد	۳	۳/۰۹ns	۰/۰۹ns
خطا	۲۴	۷/۲۳	۰/۸۲

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

جدول ۶. اثر متقابل نوع و سطوح مختلف اصلاح‌کننده بر میزان بیشینه و متوسط غلظت نیترات زهاب (mgL^{-1})

تیمار آزمایشی	بیشینه	متوسط
SM_4	۳۴/۷۵b	۱۸/۰۷b
SM_8	۲۸/۴۵c	۱۷/۳۹c
SM_{16}	۱۹/۱۵d	۱۴/۳۳d
CP_4	۳۶/۷۱e	۱۹/۶۱b
CP_8	۲۹/۵۲ c	۱۸/۱۷c
CP_{16}	۲۰/۳۱d	۱۵/۲۱d
شاهد (کل)	۴۰/۹۵a	۲۸/۴۶a

در هر تیمار در هر ستون که دارای یک حرف غیر مشترک هستند، اختلاف آماری معنی‌داری (آزمون LSD) در سطح احتمال ۵ درصد دارند.

جدول ۷. مقایسه میانگین تأثیر فاکتورهای مختلف بر میانگین غلظت نیترات زهاب (mgL^{-1})

نوع اصلاح‌کننده	سطوح کاربرد	میانگین نیترات زهاب		
		دوره اول کودآبیاری	دوره دوم کودآبیاری	دوره سوم کودآبیاری
CP	صفر (خاک معمولی)	۳۱/۰۸a	۳۲/۹۲a	۳۳/۴۴a
	۴	۲۱/۵۲b	۲۲/۰۶b	۲۳/۴۱b
	۸	۱۹/۹۶c	۲۰/۳۵c	۲۱/۶۴c
	۱۶	۱۶/۲۵d	۱۹/۶۹d	۱۸/۷۱d
SMZ	صفر (خاک معمولی)	۳۱/۰۸a	۳۲/۹۲a	۳۳/۴۴a
	۴	۱۹/۱۴e	۲۱/۴۸e	۱۸/۱۱e
	۸	۱۶/۰۷f	۱۸/۶۶f	۱۷/۰۲f
	۱۶	۱۴/۴۸g	۱۶/۵۰g	۱۵/۳۳g

لایه سطحی خاک بر میانگین غلظت نیترات آبشویی‌شده مؤثرتر واقع شده است.

به منظور بررسی تأثیر نوع اصلاح‌کننده و همچنین سطح کاربرد آن بر میزان کل آمونیوم آبشویی‌شده در مطالعه، مقایسه میانگین‌ها مطابق با جدول ۸ بررسی شد. نتایج حاصل بیانگر آن است که نوع و سطوح کاربرد مختلف اصلاح‌کننده‌های خاک بر میانگین غلظت آمونیوم خروجی زهاب در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شده است. از نظر سطح کاربرد، مقدار بیشتر زئولیت طبیعی CP_{16} (۱۶gr/kg) تأثیر قابل توجهی بر کاهش غلظت آمونیوم زهاب دارد. همچنین کاربرد ۱۶ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک سطحی نسبت به کاربرد ۴ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک سطحی با اختلافی در سطح پنج درصد (P<۰/۰۵) معنی‌دار شده است. از طرفی زئولیت طبیعی در مقایسه با زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت مؤثرتر عمل می‌کند؛ به‌طوری که در پایان دوره آزمایش میانگین غلظت آمونیوم زهاب از ۲۹/۶۲ میلی‌گرم بر لیتر در تیمار شاهد (مصرف صفر)، توسط تیمارهای CP و SMZ در سطوح کاربرد بیشتر (۱۶gr/kg) به ترتیب به ۱۴/۹۵ و ۱۹/۳۳ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافته است.

بررسی pH و EC خاک پس از کود آبیاری و تحت تأثیر اصلاح‌کننده‌های خاک

به منظور بررسی pH و EC خاک تحت تأثیر تیمارهای کود آبیاری با و بدون اصلاح‌کننده‌های خاک میزان pH و EC عصاره اشباع خاک در طول دوره آزمایش قبل (نمونه‌برداری‌های ۱، ۳ و ۵) و پس از کود آبیاری (نمونه‌برداری‌های ۲، ۴ و ۶) اندازه‌گیری شد و با یکدیگر مقایسه گردید. منبع آب مورد استفاده در این پژوهش آب مقطر بود که پس از اعمال کود، pH و EC آن تغییر کرد. میزان pH ورودی در طول دوره آزمایش و در تمامی محلول‌های کود آبیاری بین ۸/۸–۷/۳ در نوسان بود. همچنین میزان EC ورودی محلول‌های کود آبیاری بین ۶/۲۳–۷/۶ متغیر بود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری pH خاک در طول دوره نمونه‌برداری در تیمارهای UN و UAN نشان می‌دهد که میزان pH خاک در انتهای دوره آزمایش با اندکی کاهش مواجه شده است و دامنه pH بین ۷/۳۵–۶/۹ تغییر کرده است (میزان pH خاک قبل از اعمال تیمارها برابر ۷/۴ بود). علت کاهش pH طی دوره نمونه‌برداری در این تیمارها ناشی از پدیده نیتریفیکاسیون (نیترات‌زائی) است. پدیده نیتریفیکاسیون به علت تولید یون هیدروژن قابلیت کاهش واکنش خاک را دارد (۱۵). اما نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری pH در سایر تیمارها در محدوده ۷/۴ تا ۷/۵ قرار داشت؛ بنابراین درنتیجه اعمال تیمارهای یادشده در pH خاک تغییری حاصل نشده است. در حضور اصلاح‌کننده‌های خاک پدیده نیتریفیکاسیون کاهش می‌یابد (۱۹). همچنین نتایج حاصل از اندازه‌گیری EC عصاره اشباع خاک (میزان EC خاک قبل از اعمال تیمارها برابر ۲/۶ دسی‌زیمنس بر متر بود) در تمامی تیمارها نشان می‌دهد که EC خاک با افزایش مواجه شده است. بر اساس جدول ۹ در خصوص تجزیه واریانس، نوع و سطوح کاربرد اصلاح‌کننده‌های خاک بر pH و EC خاک اثر معنی‌داری نداشتند. نتایج تجزیه واریانس به‌دست‌آمده برای تیمارهای بدون اصلاح‌کننده خاک نیز نشان داد که نوع کود آبیاری تأثیر معنی‌داری بر میزان EC و pH خاک ندارد. برای همین منظور از آوردن جدول مربوطه خودداری شد.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، تأثیر تیمارهای کود آبیاری بدون اصلاح‌کننده‌های خاک و کود آبیاری با اصلاح‌کننده‌های خاک از نوع زئولیت طبیعی (CP) و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت (SMZ) بر پارامترهای غلظت نیترات و آمونیوم خروجی در زهاب و همچنین EC و pH خاک بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها ستونی نشان داد که ترکیب دو نوع کود اوره و نیترات آمونیوم می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب برای حذف نیترات از محیط مورد استفاده قرار گیرد و میزان حذف نیترات و آمونیوم با حضور اصلاح‌کننده‌های خاک CP و SMZ

جدول ۸. مقایسه میانگین تأثیر فاکتورهای مختلف بر میانگین غلظت آمونیوم زهاب (mgL^{-1})

نوع اصلاح‌کننده	سطوح کاربرد	میانگین آمونیوم زهاب		
		دوره اول کودآبیاری	دوره دوم کودآبیاری	دوره سوم کودآبیاری
CP	صفر (خاک معمولی)	۲۶/۷۴[a]	۲۷/۱۳[a]	۲۹/۶۲[a]
	۴	۱۸/۳۳[b]	۱۹/۴۱[b]	۲۰/۷۶[b]
	۸	۱۶/۵۹[c]	۱۷/۹۲[c]	۱۹/۰۳[c]
	۱۶	۱۴/۰۸[d]	۱۵/۱۱[d]	۱۴/۹۵[d]
SMZ	صفر (خاک معمولی)	۲۶/۷۴[a]	۲۷/۱۳[a]	۲۹/۶۲[a]
	۴	۲۴/۳۶[e]	۲۵/۶۷[e]	۲۶/۸۴[e]
	۸	۲۱/۱۹[f]	۲۳/۹۲[f]	۲۲/۴۷[f]
	۱۶	۱۸/۹۰[g]	۲۰/۵۰[g]	۱۹/۳۳[g]

در هر ستون که دارای یک حرف غیر مشترک هستند، اختلاف آماری معنی‌داری (آزمون LSD) در سطح احتمال ۵ درصد دارند.

جدول ۹. تجزیه واریانس تأثیر نوع و سطوح کاربرد زئولیت بر میزان EC و pH خاک

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		EC	pH
نوع اصلاح‌کننده	۱	۰/۰۹[ns]	۰/۰۱[ns]
سطح کاربرد	۳	۰/۲[ns]	۰/۵[ns]
نوع × سطح کاربرد	۳	۰/۸[ns]	۰/۱[ns]
خطا	۲۴	–	–

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

به شکل چشمگیرتری افزایش پیدا کرد. نتایج مطالعه آزمایشگاهی نشان داد که تیمار کود آبیاری بدون اصلاح‌کننده‌های خاک و به صورت ترکیبی از دو نوع کود (UAN) توانست در طول دوره مطالعه به میزان ۶۰ درصد از نیترات ورودی به خاک را از محیط حذف کند. درصد حذف نیترات در کود آبیاری به‌صورت ترکیبی از کودها با کاربرد اصلاح‌کننده‌های خاک نسبت به تیمار شاهد افزایش یافته است؛ به‌طوری که میزان حذف نیترات در طول دوره نمونه‌برداری با استفاده از اصلاح‌کننده CP با سطوح کاربرد صفر، ۴، ۸ و ۱۶ گرم در هر کیلوگرم خاک سطحی به ترتیب برابر ۶۷، ۷۰، ۷۷ و ۸۵ درصد به دست آمد که این نشان‌دهنده عملکرد زیاد این مواد در حذف نیترات از محیط و جلوگیری از ورود بیش از حد نیترات به آب‌های زیر زمینی هستند. میزان حذف نیترات در کل دوره نمونه‌برداری در کود آبیاری تحت تأثیر اصلاح‌کننده SMZ با سطوح کاربرد صفر، ۴، ۸ و ۱۶ گرم در هر کیلوگرم خاک سطحی به ترتیب برابر ۶۷، ۷۶، ۸۵ و ۹۰ درصد به دست آمد؛ بنابراین اصلاح‌کننده SMZ قادر است میزان زیادی از نیترات ورودی را از محیط خارج کند. همچنین تیمارهای CP و SMZ در کاهش غلظت آمونیوم خروجی بسیار چشمگیرتر از تیمارهای شاهد عمل کردند؛ به‌طوری که

تیمارهای CP_4، CP_8 و CP_{16} به ترتیب به میزان ۸۱، ۸۵ و ۹۴ درصد آمونیوم ورودی را حذف کردند؛ درحالی‌که میزان حذف آمونیوم از محیط آزمایش توسط تیمارهای SM_4، SM_8 و SM_{16} به ترتیب معادل ۷۲، ۷۶ و ۸۹ درصد به دست آمد که بیانگر آن است که هر دو اصلاح‌کننده‌های CP و SMZ، جاذب‌های بسیار خوبی برای نیترات و آمونیوم هستند و اصلاح‌کننده خاک از نوع CP، در جذب NH_4^+ و اصلاح‌کننده خاک از نوع SMZ در جذب NO_3^- توانایی بیشتری دارند. همچنین افزایش سطح شوری آب به علت اعمال کود در آب آبیاری در تمامی تیمارها، باعث افزایش EC خاک شده است که به علت تجمع املاح آب، آبیاری در خاک است. اما کاربرد هر دو زئولیت CP و SMZ، تأثیری بر میانگین EC خاک نداشت و میانگین EC خاک تحت تأثیر نوع کود آبیاری قرار نگرفت. نتایج حاصل از اندازه‌گیری pH خاک در طول دوره نمونه‌برداری نشان داد که نوع کود آبیاری و اصلاح‌کننده‌های خاک تأثیر معنی‌داری بر تغییر pH خاک نداشتند.

منابع:

1. Abedi-Koupai. J., S. F. Mousavi and A. Motamedi. 2010. Effect of Clinoptilolite Zeolite Application on Reducing Urea Leaching from Soil. *Journal of Water and Waste Water* 75(3): 51-57.
2. Abrol. Y. P., S. R. Chatterjee and P. Ananda Kumar. 1999. Improvement in nitrogen use efficiency: physiological and molecular approaches. National research center for plant biotechnology, Indian Agriculteural Research Institute, New Dehli, India.
3. Akhlaghi, K. 2006. sulfur-coated urea. <http://alonefarmer.blogfa.com/post- 1786.aspx> (last updated Dec. 2009).
4. Anonymous.1986. Quality criteria for water. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water Regulations and Standards, Washington, DC.
5. Anonymous. 2009. Drinking water - physical and chemical specifications. Institute of Standards and Industrial Research of Iran, Iran.
6. Bedelean. I. 1997. Properties and utilization of natural zeolites, program and abstract. *In:* 5th International Conference on the Occurrence. Island, Naples, Italy.
7. Cameria. M. R., R. M. Fernando and L. S Pereira. 2003. Monitoring water and No3-N in irrigated maize fields in the sorraia watershed. *Journal of Agricultural Water Management* 60(3):199-216.
8. Darvish. T., T. Atallah., M. Elkhatib and S. Hajhasan. 2002. Impact of irrigation and NO3 leaching and soil groundwater contamination in Lebnan. *In:* 17th WCSS, Thailand.
9. Dixon. J. B and S. B. Weed. 1989. Minerals in soil environments, Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA.
10. Eneji. A. E., T. Honna., S. Yamamoto., T. Saito and T. Masuda. 2002. Nitrogen transformation in four Japanese soils following manureturea amendment. Commun. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 33(1-2): 53-66.
11. Follett R. F and j. L. hotfield. 2001. Nitrogen in the environment sources problems and management. *The Scientific World Journal* 1(2): 920-926.
12. Gul. A., D. Erogul and A. R. Ongun. 2005. Comparison of the use of zeolite and perlite as substrate for crisp-head lettuce. *Scientia Horticulturae* 106(4):464-471.
13. Kaghazchi. N. 2008. Effect of zeolite and hydrogel on hydrolic characteristics of soil and some indicators of plant growth of greenhouse cucumber in saline conditions. Master thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran.
14. Khodarahmi. Y., A. Soltani Mohammadi. S. Boroomand Nasab and A. A. Nasseri. 2019. The Effect of Zeolite and Superabsorbent on Reduction of Nitrate Leaching from a Loamy Soil under Unsaturated Conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(7): 1569-1579.
15. Li. Z. H. and R. S. Bowman. 1997. Counterion effects on the sorption of cationic surfactant and chromate on natural Clinoptilolite. *Environmental Science and Technology* 31(8):2407-2412.
16. Malakoti. M. J. 2005. Sustainable agriculture and increasing yield by optimizing fertilizer use in Iran. Publications of agricultural education. Tehran.

17. Malekian. R., J. Abedi-Koupai and S. S. Eslamian. 2011. Use of zeolite and surfactant modified zeolite as ion exchangers to control nitrate leaching. *International Scholarly and Scientific Research and Innovation* 5(4): 267-271.
18. Malekian. R., J. Abedi-Kuopai and S. S. Eslamian. 2011. Influences of clinoptilolite and surfactant-modified clinoptilolite zeolite on nitrate leaching and plant growth. *Journal of Hazardous Materials* 185(2-3): 970-976.
19. Mercer. B. W., L. L. Ames., C. J. Touhill., W. J. Vanslyke and R. B. Dean. 1970. Ammonia removal from secondary effluents by selective ion exchange. *Water Pollution Control Federation* 42(2): 95-107.
20. Perez, R., J. Caballero., C. Gill., J. Benitez and L Gonazalez. 2008. The effect of adding zeolite to soils in order to improve the N-K nutrition of olive trees: Preliminary results. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 2(1): 321-324.
21. Salardini. A.A. 2009. Soil fertility. Publications of Tehran University, Tehran.
22. Sepaskhah. A. R and F. Yousefi. 2007. Effects of zeolite application on nitrate and ammonium retention of a loamy soil under saturated conditions. *Australian Journal of Soil Research* 45(5): 368-373.
23. Soleimani. M., A. Ansari., M. Haj-Abbasi and J. Abedi-Kuopai. 2008. Investigation of nitrate and ammonium removal from groundwater by mineral filter. *Journal of Water and Waste Water* 67(3): 18-26.
24. Vaziri. Zh and P. Kazemi. 2007. Fertigation of greenhouse crops. *In:* The first technical workshop on improving water use efficiency by cultivating greenhouse crops, Tehran, Iran.
25. Yarwood. C. E. 1978. Water and the infection process. Water Deficit and Plant Growth Academic Press, New York.