

# تأثیر کاربرد زئولیت سدیمی بر نگه‌داشت نیترات و آمونیم در یک خاک اشباع لوم‌سیلتی

عدنان صادقی لاری<sup>۱\*</sup>، هادی معاضد<sup>۲</sup>، عبدالرحیم هوشمند<sup>۳</sup> و مصطفی چرم<sup>۴</sup>

\* نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشکده‌ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

Adnansadeghi@yahoo.com

۲ و ۳- دانشیار و استادیار گروه آبیاری و زهکشی دانشکده‌ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- دانشیار گروه خاک‌شناسی دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۸۹/۶/۱۶

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۰/۱

## چکیده

آب‌شویی نیتروژن از نیمرخ خاک در اراضی تحت آبیاری به‌خصوص در شالیزارها موجب کاهش راندمان استفاده از نیتروژن و آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌گردد. وضعیتی از خاک که باعث افزایش نگه‌داشت یون‌های آمونیم و نیترات می‌شود از شدت این مشکل می‌کاهد. زئولیت‌های طبیعی که دارای ظرفیت تبادل یونی بالایی می‌باشند، ممکن است جهت جذب آمونیم و به تعویق انداختن آب‌شویی اضافی نیترات به کار برده شود. اهداف این تحقیق تأثیر مقادیر مختلف کاربرد زئولیت سدیمی (۰، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ گرم زئولیت بر کیلوگرم خاک) بر سرعت حرکت آب در خاک و آب‌شویی نیترات و آمونیم به کار برده شده به عنوان کود نیترات آمونیم به میزان ۳۵۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار در یک خاک لوم‌سیلتی تحت شرایط رطوبت اشباع (شالیزاری) بودند. نتایج نشان داد که کاربرد ۲، ۴، ۸ و ۱۶ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک باعث افزایش میانگین سرعت حرکت آب در منافذ خاک، به ترتیب به میزان ۵/۰، ۱۹/۹، ۶۸/۰ و ۵۸/۶ درصد نسبت به تیمار شاهد می‌شود. ماکزیمم غلظت نسبی (C/C<sub>0</sub>) نیترات خروجی از ستون‌های خاک در منحنی‌های رخنه (BTC) در تمامی تیمارها در نزدیکی حجم تخلخل برابر با ۰/۵ اتفاق افتاد. همچنین به طور متوسط پس از عبور ۳۹/۱ سانتی‌متر آب از خاک اشباع در تیمارهای ۲، ۴ و ۸ گرم زئولیت، مقدار نیترات خارج شده به ترتیب برابر ۴۸/۹، ۶۶/۰ و ۴۸/۵ درصد مقدار نیترات اضافه شده به سطح خاک بود. میزان آمونیم خارج شده از خاک در تمامی تیمارها ناچیز بود (۳/۹۵، ۳/۴۸ و ۳/۱۳، ۲/۲۸ درصد مقدار اضافه شده به سطح خاک)، اما نتایج تحلیل آماری تفاوت معنی‌داری را در بین تیمارهای زئولیت‌دار در میزان آمونیم خروجی نشان داد. رابطه‌ی بین ضریب پراکندگی هیدرودینامیک نیترات در خاک با سرعت حرکت آب در منافذ خاک به صورت توانی بوده و با افزایش مقدار زئولیت در خاک مقدار این ضریب افزایش بیش‌تری یافت.

واژه‌های کلیدی: زئولیت، نیترات، آمونیم، منحنی رخنه، انتشار هیدرودینامیک

## مقدمه

کاهش آب‌شویی نیتروژن از خاک داشته باشد (کاووسی و رحیمی، ۱۳۷۹). کاووسی (۲۰۰۷)، تأثیر کاربرد زئولیت بر عملکرد محصول برنج و راندمان استفاده از نیتروژن در دو خاک سبک و سنگین را مورد مطالعه قرار داد. نتایج حاصل از تحقیق آنان نشان داد که کاربرد ۸ تن زئولیت به همراه ۶۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار در مقایسه با سایر تیمارها (۸، ۱۶ و ۲۴ تن زئولیت در هکتار بدون کاربرد کود ازته، ۸، ۱۶ و ۲۴ تن زئولیت در هکتار به همراه ۶۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار و ۶۰ کیلوگرم نیتروژن

امروزه از کودها به عنوان موادی برای نیل به حداکثر تولید در واحد سطح استفاده می‌شود. این کودها باید بتوانند علاوه بر افزایش تولید، کیفیت محصولات کشاورزی را ارتقا داده و موجب آلودگی محیط زیست خصوصاً آلودگی نیترات‌های آب‌های زیرزمینی نگردند. نیتروژن در آب بسیار محلول است و لذا قابلیت آب‌شویی و آلوده کردن محیط زیست را دارد (خداپنده، ۱۳۶۹). کاربرد ترکیبات طبیعی نظیر کانی‌های زئولیت در اراضی شالیزار به دلیل افزایش ظرفیت جذب و تبادل یونی خاک می‌تواند نقش مؤثری در

### مبانی نظری

در صورتی که یک ماده‌ی آلاینده‌ی محلول در آب، روی سطح خاک به صورت غلیظ اضافه شده و سپس این ماده به وسیله‌ی آب در داخل خاک جریان یابد، به این نوع جابه‌جایی ماده در خاک، انتقال یا موج ماده<sup>۵</sup> گفته می‌شود. در عمل، از این مکانیسم برای انتقال و جابه‌جایی کودهای به کار رفته در اراضی کشاورزی استفاده می‌شود. در این حالت، یک ماده غلیظ با غلظت  $c_0$  (مانند نیترات به کار برده شده در این پژوهش) روی ستون خاک قرار گرفته و سپس با استفاده از آب این ماده در ستون خاک جابه‌جا می‌گردد (Jury and Sposito, 1985).

انتقال به‌وسیله‌ی موج ماده بر اساس رابطه‌ی دیفرانسیلی (۱) صورت می‌گیرد (Jury and Sposito 1985)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_h \left( \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) - \bar{v} \left( \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (1)$$

که در آن:

$D_h$ : ضریب انتشار هیدرودینامیک املاح در خاک،  
 $c$ : غلظت املاح،  $z$ : فاصله‌ی عمودی بین دو نقطه در خاک،  
 $\bar{v}$ : میانگین سرعت حرکت آب در منافذ خاک و  $t$ : زمان می‌باشد.

با در نظر گرفتن شرایط اولیه ( $c=0$ ) و شرایط مرزی (غلظت دلخواه  $c=c_0$ ) رابطه‌ی (۲) از حل رابطه‌ی (۱) حاصل می‌شود (Jury and Sposito, 1985).

$$\frac{c}{c_0} = \frac{l \cdot \exp\left(-\frac{(l - \bar{v}t)^2}{4D_h t}\right)}{2\sqrt{\pi D_h t}} \quad (2)$$

که در آن:

$c$ : غلظت املاح خروجی از ستون خاک (ppm)،  
 $c_0$ : غلظت اولیه‌ی املاح ورودی به ستون خاک (ppm)  
 $t$ : زمان خروج املاح،  $D_h$ : ضریب انتشار هیدرودینامیکی املاح ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ) و  $l$ : طول ستون خاک (cm) می‌باشد.

خالص در هکتار بدون کاربرد ژئولیت) عملکرد بیش‌تری دارد. یورگ و واماچی<sup>۱</sup> (۲۰۰۴)، حذف آمونیم از پساب ساختگی به وسیله‌ی ژئولیت طبیعی را مورد بررسی قرار دادند. آنان دریافتند که در بسیاری از نمونه‌ها، ۵۰ درصد از آمونیم در لحظات اولیه توسط ژئولیت طبیعی جذب می‌شود. همچنین، ذرات ریزتر جاذب، توانایی بیش‌تری در جذب آمونیم دارا بودند. ایبرل<sup>۲</sup> (۲۰۰۲)، کاربرد مخلوط ژئولیت و کود اوره را مورد بررسی قرار داد. او نتیجه گرفت که ژئولیت از ته‌ی مورد استفاده از سه راه باعث کم کردن شست و شوی نیترات می‌شود: (۱) کود اوره در منافذ کریستاله ژئولیت قرار گرفته و از شست و شوی آن از ناحیه ریشه جلوگیری می‌شود، (۲) تبدیل اوره به حالات دیگر نیتروژن به‌وسیله‌ی میکروارگانیزم‌ها و آنزیم‌های خاک کاهش یافته و تبدیل یون آمونیم به تأخیر می‌افتد و (۳) یون آمونیم را جذب کرده و از آن در برابر باکتری‌های نیتریفیکاسیون‌کننده حفاظت می‌کند. ژیبین و ژان‌بین<sup>۳</sup> (۲۰۰۱)، کاربرد ژئولیت در بالا بردن نفوذ و نگه‌داری آب در خاک را مورد بررسی قرار دادند. ژئولیت مورد استفاده از نوع موردنیابت بود. خاک حاوی ژئولیت در شیب‌های ملایم، ۳-۷ درصد و در شیب‌های تند، مقدار نفوذپذیری خاک را ۵۰ درصد افزایش داد. این امر باعث کاهش رواناب‌های سطحی شده و از فرسایش اراضی جلوگیری می‌کند.

اهداف تحقیق حاضر بررسی تأثیر مقادیر مختلف کاربرد ژئولیت سدیمی بر سرعت حرکت آب در خاک، ضریب انتشار هیدرودینامیک<sup>۴</sup> نیترات و آب‌شویی یون آمونیم و نیترات با به کار بردن کود نیترات آمونیم در یک خاک لوم‌سیلتی تحت شرایط اشباع (شالیزاری) می‌باشد.

1- Jorge and Wamachi

2- Eberl

3- Xiubin and Zhanbin

4- Hydrodynamic Dispersion

سانتی‌متر و طول ۵۰ سانتی‌متر استفاده گردید. در این لوله‌ها تا ارتفاع ۳۴ سانتی‌متری از کف هر لوله خاک ریخته شد و در ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری در دو طرف استوانه دو سوراخ (ورودی و خروجی آب) تعبیه گردید و انتهای استوانه با استفاده از کاغذ صافی و توری فلزی و با استفاده از مفتول سیمی کاملاً مسدود گردید. جهت جلوگیری از حرکت آب از فضای بین دیواره‌ی داخلی لوله‌ها و ذرات

خاک، دیواره‌ی داخلی لوله‌ها به گریس آغشته شد. در این تحقیق از خاک مزرعه‌ی دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز، که دارای جرم مخصوص ظاهری ۱/۴۸ گرم بر سانتیمتر مکعب بود، استفاده گردید که خصوصیات آن در جدول (۱) ارائه شده است.

پس از این که خاک درون لوله‌ها با تراکم یکسان ریخته شد، کاملاً اشباع گردیدند؛ لوله‌ها روی قیف‌هایی که در یک تخته چوب تعبیه شده بود قرار داده شد و زیر این قیف‌ها استوانه‌ی مدرج جهت نمونه‌برداری قرار داده شد. سپس نیترات آمونیم محلول در آب با غلظت ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر روی خاک اشباع درون لوله‌ها ریخته شد. این غلظت برای نیترات برابر با ۷۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و برای آمونیم برابر با ۲۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. پس از نفوذ کامل محلول نیترات آمونیم، شیر آب ورودی باز گردید و بار آبی به اندازه‌ی ۱ سانتیمتر روی سطح خاک قرار داده شد و زه‌آب خروجی از انتهای ستون خاک در فواصل زمانی مختلف جمع و سپس اندازه‌گیری شد.

با مشتق‌گیری از معادله‌ی (۲) می‌توان مقدار  $D_h$  را از رابطه‌ی زیر به دست آورد:

$$\left(\frac{C}{C_0}\right)_{Max} = \frac{(\bar{v})^{1.5}}{2(\pi D_h l)^{0.5}} \quad (3)$$

که در آن:

$\left(\frac{C}{C_0}\right)_{Max}$ : ماکزیمم مقدار  $\left(\frac{C}{C_0}\right)$  در منحنی رخنه (BTC) می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

تیمارهای کاربرد ژئولیت در این پژوهش عبارتند از: تیمار شاهد (بدون ژئولیت) و چهار تیمار دیگر به ترتیب شامل ۲، ۴، ۸ و ۱۶ گرم ژئولیت در هر کیلوگرم خاک (معادل ۴۸۴۰، ۹۶۸۰، ۱۹۳۶۰ و ۳۸۷۲۰ کیلوگرم ژئولیت در هکتار). لازم به ذکر است که تیمار ۱۶ گرم ژئولیت در هر کیلوگرم خاک فقط جهت مشاهده‌ی تغییرات سرعت با کاربرد بیش‌تر ژئولیت سدیمی در ستون خاک در نظر گرفته شد. این تحقیق در قالب یک طرح آماری بلوک‌های کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام شد. جهت بررسی آب‌شویی یون نیترات و آمونیم در خاک حاوی مقادیر مختلف ژئولیت، از نمک خالص نیترات آمونیم به عنوان کود استفاده گردید. نیترات آمونیم به میزان ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار (۳۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص) به کار برده شد، که این مقدار کود برابر با حداکثر کودی است که به اراضی شالیزاری داده می‌شود. ژئولیت مورد استفاده از نوع سدیمی و به صورت پودری بوده است. برای تهیه‌ی ستون‌های خاک از لوله‌های پلی‌اتیلن به قطر داخلی ۱۰/۵

جدول (۱). خصوصیات خاک مورد استفاده در تحقیق

۰-۲۵	عمق (cm)
۳۲	شن (%)
۵۱	سیلت (%)
۱۷	رس (%)
لوم‌سیلتی	بافت
۴	هدایت الکتریکی عصاره اشباع (dS/m)
۷/۳۹	pH

حجم زه‌آب تجمعی خارج‌شده از ته ستون‌های خاک در مقابل زمان رسم گردید و خطوطی به نقاط به‌دست آمده برازش داده شد. سپس از تقسیم شیب خط به‌دست آمده (Q)، که بیانگر دبی خروجی از ستون‌های خاک می‌باشد. همچنین، در زمان‌ها یا حجم منفذی‌های<sup>۱</sup> متفاوت از زه‌آب خروجی نمونه‌هایی به حجم ۱۲۵ سانتیمتر مکعب تهیه گردید. سپس، غلظت یون نیترات با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر و یون آمونیم به روش نسلر اندازه‌گیری گردید (American Public Health Association. 1992). سطح مقطع ستون خاک (A) و تخلخل خاک (n)، سرعت واقعی آب در منافذ خاک بدست آمد. با توجه به تخلخل خاک درون لوله‌ها (n=۰/۴۶) میزان یک حجم منفذی برابر با ۱۳۵۲/۸۶ سانتیمتر مکعب به‌دست آمد. سپس مقادیر مختلف حجم منفذی و مقادیر غلظت یون نیترات و آمونیم به ترتیب روی محورهای افقی و عمودی دستگاه مختصات قرار داده شد و منحنی رخنه رسم گردید. نتایج حاصل از بررسی تأثیر زئولیت بر ننگه‌داشت نیترات و آمونیم، ابتدا وارد محیط نرم‌افزاری Excel گردید و سپس با استفاده از آزمون F و تحلیل یک عاملی و در سطح احتمال ۵ درصد در محیط نرم‌افزاری SPSS نسخه‌ی ۱۳، تحلیل آماری شد. هم-چنین، جهت مقایسه‌ی دو به دو میانگین‌ها از آزمون LSD در محیط نرم‌افزار MSTATC استفاده گردید.

## نتایج و بحث

### سرعت حرکت آب در خاک

به طوری که در شکل (۱) مشاهده می‌شود با افزایش مقدار کاربرد زئولیت تا ۱۲ گرم در هر کیلوگرم خاک، سرعت حرکت آب در منافذ خاک افزایش پیدا کرد، که با نتایج به‌دست آمده توسط سپاسخواه و یوسفی (۲۰۰۷)، و ژیبین و ژانبین (۲۰۰۱)، مطابقت دارد. تا این مقادیر کاربرد زئولیت در خاک (۱۲ گرم زئولیت در هر کیلوگرم

خاک)، خاصیت زئولیتی بودن بر خاصیت سدیمی بودن زئولیت غالب بود ولی از این مقدار کاربرد به بعد، سرعت حرکت آب در منافذ خاک کاهش پیدا کرد. این امر را می‌توان به این علت دانست که سدیم زیاد باعث پراکنده شدن ذرات خاک گردیده و ساختمان خاک را به هم زده است و در نتیجه، سرعت حرکت آب در منافذ خاک را کاهش داده است و خاصیت سدیمی بودن زئولیت بر خاصیت زئولیتی بودنش غالب شده است. تغییرات سرعت حرکت آب در منافذ خاک به صورت تابعی از میزان کاربرد زئولیت سدیمی در خاک را می‌توان با رابطه‌ی (۴) نشان داد:

$$\bar{V} = -0.00009Z^2 + 0.0022Z + 0.0164 \quad (4)$$

که در آن:

$\bar{V}$ : میانگین سرعت حرکت آب در منافذ خاک بر حسب cm/min و Z میزان کاربرد زئولیت بر حسب g/kg می‌باشد. مطابق شکل (۱) کاربرد ۱۶ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک سرعت حرکت آب را نسبت به تیمار ۸ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک کاهش داد. میانگین سرعت جریان آب در منافذ خاک در تیمارهای مختلف کاربرد زئولیت همراه با نتایج آزمون LSD و آنالیز واریانس در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه گردیده است. نتایج حاصل از آزمون آماری F در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای مختلف نشان داد. هم‌چنین، نتایج حاصل از آزمون LSD برای مقایسه دو به دو تیمارهای مختلف کاربرد زئولیت، در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری بین تیمار شاهد و تیمارهای ۴، ۸ و ۱۶ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک نشان داد، اما تیمار شاهد با تیمار کاربرد ۲ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک اختلاف معنی‌داری را نشان نداد. با توجه به جدول (۲) کاربرد ۲، ۴ و ۸ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک باعث افزایش میانگین سرعت حرکت آب در منافذ خاک، به میزان ۵/۰، ۱۹/۹ و ۶۸/۰ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید. هم‌چنین، کاربرد ۱۶ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک باعث کاهش میانگین سرعت حرکت آب در منافذ خاک به میزان ۵/۶ درصد

## یون نیترات

نسبت به تیمار ۸ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک و افزایش آن به میزان ۵۸/۶ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید. سپاسخواه و یوسفی (۲۰۰۷)، تأثیر کاربرد زئولیت کلسیمی و منیزیمی بر نگره‌داشت نیترات و آمونیم در خاک در شرایط رطوبت اشباع را مورد بررسی قرار دادند آنان گزارش کردند که کاربرد ۴ و ۸ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک، سرعت حرکت آب در منافذ خاک را به میزان ۳۵ و ۷۴ درصد افزایش می‌دهد که تأیید کننده‌ی اثر زئولیت در افزایش سرعت حرکت آب در خاک می‌باشد.

شکل (۲) منحنی رخنه (BTC) یون نیترات برای تیمارها و تکرارهای مختلف کاربرد زئولیت در خاک را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار یون نیترات خارج شده از ستون‌های خاک با افزایش مقادیر کاربرد زئولیت در خاک کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به ساختار شبکه‌ای زئولیت و در نتیجه به دام افتادن یون نیترات نسبت داد. منحنی رخنه (شکل ۲) همچنین نشان می‌دهد که شیب منحنی در حجم‌های تخلخل پایین زیاد است و غلظت یون نیترات در زه آب خروجی به سرعت افزایش پیدا می‌کند و به نقطه‌ی

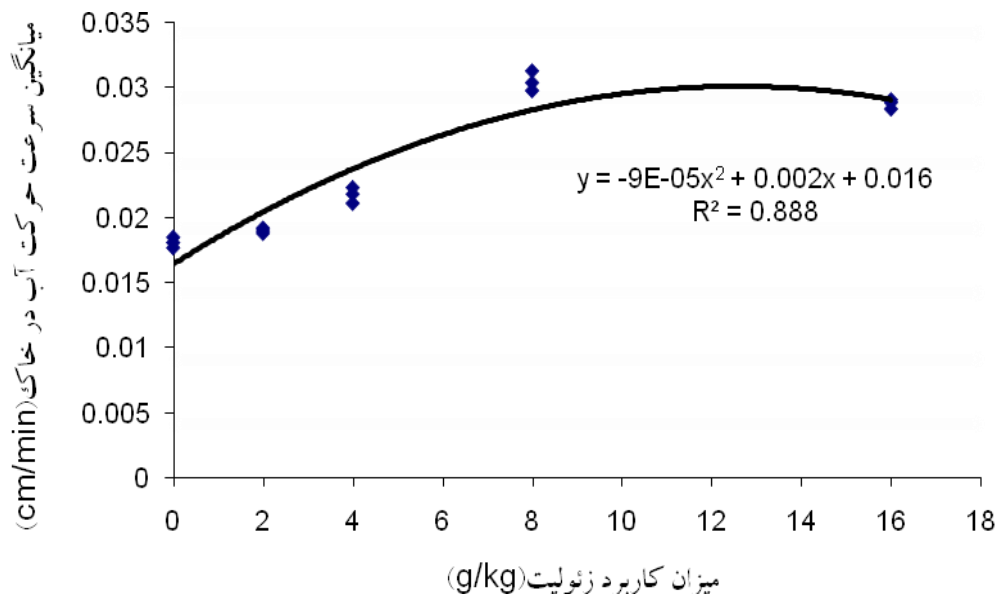
جدول (۲). آنالیز واریانس سرعت حرکت آب در منافذ خاک

شاخص	مجموع مجذورات	درجه‌ی آزادی	میانگین مجذورات	F	معنی‌داری
بین گروهی	۰/۰۰۰۴	۴	۰/۰۰۰۵	۳۷۷/۴۰۵	۰/۰۰۰۵
درون گروهی	۰/۰۰۰۷	۱۰	۰/۰۰۰۸		
مجموع	۰/۰۰۱۱	۱۴			

جدول (۳). میانگین سرعت حرکت آب در منافذ خاک در مقادیر مختلف کاربرد زئولیت

زئولیت (g/kg)	۰	۲	۴	۸	۱۶
میانگین V (cm/min)	۰/۸۱	۰/۹۰	۰/۱۷	۰/۰۴	۰/۸۷
آزمون LSD	a*	b	c	d	e

\* میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.



شکل (۱). تغییرات سرعت حرکت آب در منافذ خاک در تیمارها و تکرارهای مختلف کاربرد زئولیت

ماکزیمم نیترات به انتهای ستون خاک و یا در حجم منفذی کمتر از یک می‌شود (Leij and van Genuchten, 2002). به‌طور متوسط، پس از عبور ۳۹/۱ سانتیمتر آب از خاک اشباع مقدار یون نیترات خروجی برای تیمارهای بدون زئولیت تقریباً برابر مقدار اضافه شده به سطح خاک می‌باشد (سطح زیر منحنی درو) که این امر نشان‌دهنده‌ی شسته شدن تقریباً تمامی یون نیترات در طی آزمایش می‌باشد، اما در تیمارهای حاوی زئولیت، سطح زیر منحنی رخنه کمتر از مقدار یون نیترات اضافه شده به سطح خاک می‌باشد که این امر بیانگر اثر زئولیت در ننگه‌داشت یون نیترات می‌باشد. این روند در مقدار حداکثر املاح خروجی در منحنی رخنه به خوبی قابل مشاهده است. با توجه به شکل (۳) با افزایش مقادیر زئولیت کاربردی، درصد نیترات خارج‌شده از ستون خاک طبق رابطه‌ی (۵) به صورت خطی کاهش می‌یابد.

$$LN = -5.795Z + 93.76 \quad (5)$$

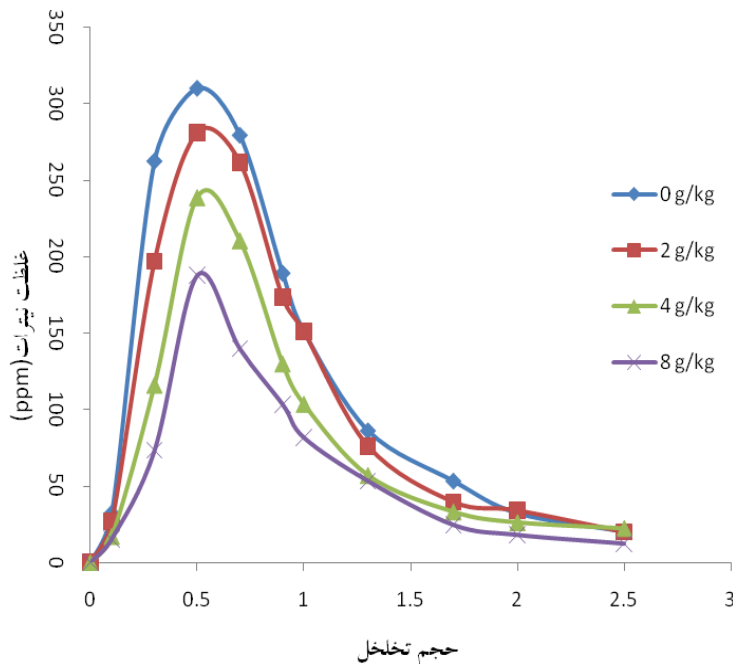
که در آن:

Z: مقدار زئولیت کاربردی بر حسب گرم در هر کیلوگرم خاک و LN: درصد نیترات خارج‌شده از ستون خاک می‌-

حداکثر می‌رسد. سپس در ادامه نیز با شیب کم‌تری کاهش می‌یابد. در انتهای آزمایش؛ یعنی حجم منفذی بالا، شیب منحنی کم شده و غلظت نیترات در زه‌آب خروجی تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد. برای یون نیترات، غلظت ماکزیمم نیترات خروجی در منحنی‌های رخنه‌ی به‌دست آمده برای تیمارهای مختلف زئولیت در حجم تخلخل ۰/۵ اتفاق افتاد. با توجه به اصول نظری باید غلظت ماکزیمم نیترات خروجی در نزدیکی حجم تخلخل برابر با یک به‌دست آید، اما این امر تحقق نیافت. علت این امر را می‌توان به بیش-تر بودن سهم انتقال املاح به صورت جریان روان، پدیده‌ی جذب منفی در تیمارهای مختلف زئولیت نسبت داد. عامل دیگری که باعث گردیده تا غلظت ماکزیمم یون نیترات خروجی در حجم منفذی برابر با یک اتفاق نیفتد احتمالاً سرعت جریان غیر یکنواخت محلول خاک در خلل و فرج خاک بوده است. با توجه به این که سرعت جریان آب در خلل و فرج درشت‌تر، بیش‌تر از سرعت جریان در خلل و فرج کوچک‌تر است و در جداره‌ی منافذ خاک سرعت جریان صفر است و به سمت مرکز افزایش پیدا می‌کند، بنابراین سرعت جریان در مرکز منافذ عبور جریان به حداکثر مقدار خود رسیده و باعث زودتر رسیدن غلظت

در هر کیلوگرم خاک معنی‌دار نیست؛ ولی برای تیمارهای کاربرد ۴ و ۸ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد (جدول ۴). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که زئولیت سدیمی در کاهش شست و شوی نیترات از خاک مؤثر می‌باشد. سپاسخواه و یوسفی (۲۰۰۷) گزارش کردند که بعد از خروج ۴۰ سانتیمتر آب از ستون‌های خاک مقدار کل یون نیترات خارج شده از خاک در تیمارهای ۴ و ۸ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک به ترتیب برابر ۷۵ و ۶۳ درصد مقدار اضافه شده به سطح خاک می‌باشد که تصدیق کننده‌ی اثر زئولیت بر نگه‌داشتن نیترات می‌باشد.

باشد. میزان شست و شوی یون نیترات برای مقادیر کاربرد صفر، ۲، ۴ و ۸ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک به ترتیب برابر ۹۲/۵، ۸۶/۹، ۶۶/۰ و ۴۸/۵ درصد مقدار زئولیت اضافه شده به سطح خاک بوده که باعث کاهش شست و شوی نیترات در خاک، به میزان ۶/۰۰، ۲۸/۷ و ۴۷/۶ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید. آزمون F جهت تحلیل آماری نتایج درصد نیترات خروجی از ته ستون خاک و اختلاف بین تیمارها در سه تکرار انجام شد که در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردید. آزمون LSD نیز برای مقایسه‌ی دو به دو تیمارها نشان داد که اختلاف درصد نیترات خروجی در تیمار فاقد زئولیت با تیمار ۲ گرم زئولیت



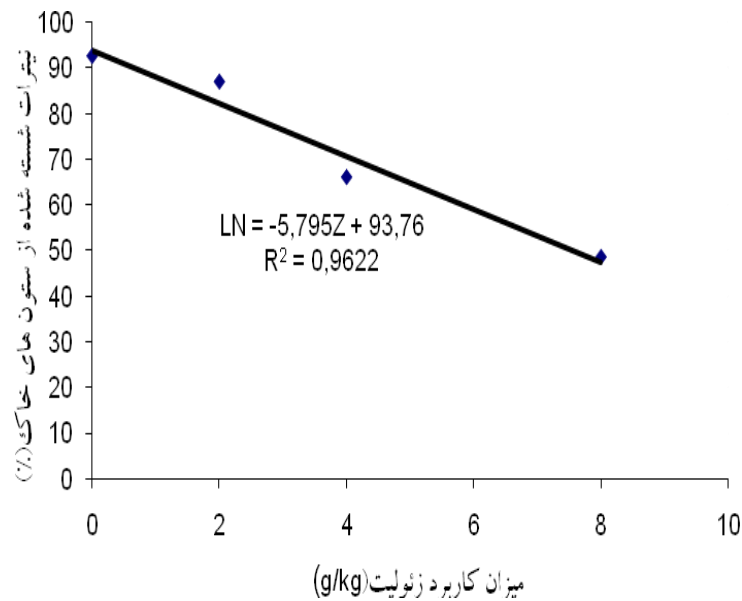
شکل (۲). منحنی رخنه‌ی تغییرات میانگین غلظت یون نیترات ( $\text{NO}_3^-$ ) در تیمارهای مختلف کاربرد زئولیت در هر کیلوگرم خاک

جدول (۴). میانگین درصد نیترات خارج شده از ستون‌های خاک در تیمارهای مختلف و مقایسه‌ی

#### آنها با آزمون LSD

مقادیر کاربرد زئولیت (g/kg)			
۸	۴	۲	۰
۴۸/۵	۶۶/۰	۸۶/۹	۹۲/۵
d	c	ba	a*

\* میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.



شکل (۳). درصد‌های نیترات خارج‌شده از ستون‌های خاک به ازای مقادیر مختلف زئولیت کاربردی

### یون آمونیم

اصلی پایین بودن میزان یون آمونیم خروجی در تمامی تیمارها را می‌توان مثبت بودن بار یون آمونیم و جذب آن توسط کلوئیدهای خاک دانست. پایین‌تر بودن میزان یون آمونیم خروجی در تیمارهای دارای زئولیت و معنی‌دار بودن اختلاف بین آن‌ها با تیمار شاهد را می‌توان به علت جذب و تبادل یون آمونیم در مقایسه با یون سدیم دانست که باعث خروج کم‌تر یون آمونیم در تیمارهای دارای زئولیت نسبت به تیمار شاهد گردیده است.

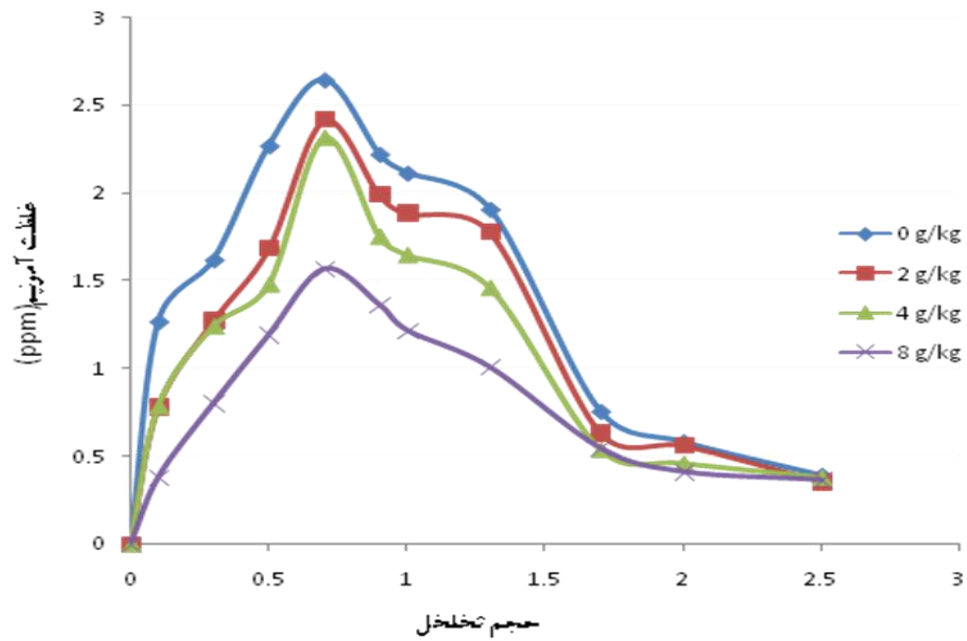
آزمون F جهت تحلیل آماری درصد آمونیم خروجی از ته ستون خاک و اختلاف بین تیمارها در سه تکرار انجام و مشاهده گردید که اختلافات در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار است. با توجه به جدول (۵) و منحنی رخنه‌ی مربوط به تیمارها و تکرارهای مختلف یون آمونیم (شکل ۴) می‌توان نتیجه گرفت که میزان یون آمونیم خروجی از ستون‌های خاک برای تمامی تیمارها نسبت به غلظت اولیه‌ی آن (۲۲۵۰ میلی‌گرم برلیتر) ناچیز می‌باشد. علت

جدول (۵). میانگین درصد آمونیم خارج‌شده از ستون‌های خاک در تیمارهای مختلف و مقایسه‌ی آن‌ها با آزمون LSD

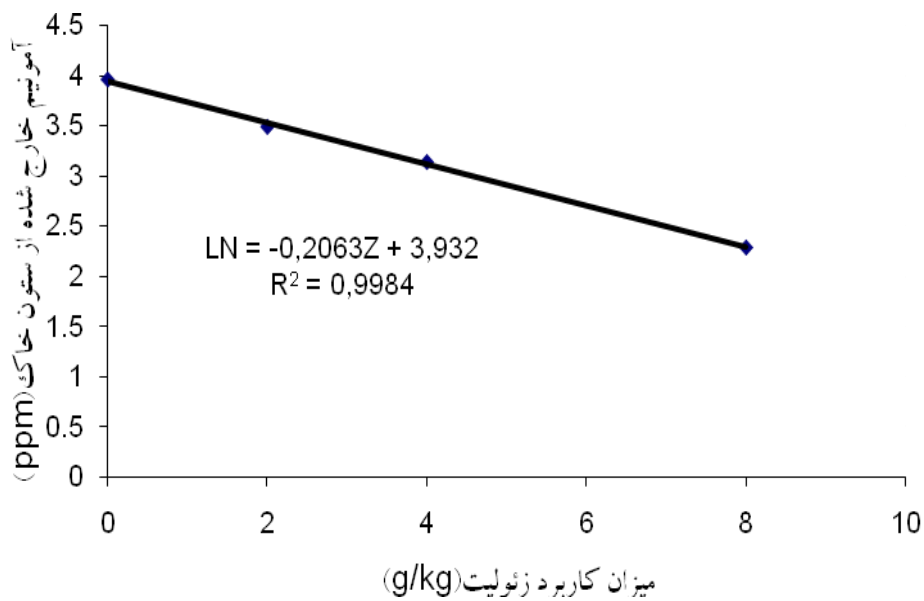
مقادیر کاربرد زئولیت (g/kg)			
۸	۴	۲	۰
۲/۲۸	۳/۱۳	۳/۴۸	۳/۹۵
d	c	b	*a

\* میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.





شکل (۴). منحنی رخنه تغییرات میانگین غلظت یون آمونیم ( $\text{NH}_4^+$ ) در تیمارهای مختلف کاربرد زئولیت در هر کیلوگرم خاک



شکل (۵). درصد‌های آمونیم خارج شده از ستون‌های خاک به ازای مقادیر مختلف زئولیت کاربردی

که در آن  $Z$ : مقدار زئولیت کاربردی بر حسب گرم در هر کیلوگرم خاک و  $NL$ : درصد آمونیم خارج شده از ستون خاک می‌باشد.

با توجه به شکل (۵)، درصد یون آمونیم خروجی با افزایش کاربرد زئولیت در خاک طبق رابطه‌ی (۶) به صورت خطی کاهش می‌یابد:

$$NL = -0.2063Z + 3.932 \quad (6)$$

جدول (۶). میانگین مقادیر سدیم خروجی از ته ستون خاک در انتهای آزمایش در تیمارهای مختلف بر حسب ppm و مقایسه‌ی آنها با آزمون LSD

مقادیر کاربرد زئولیت (g/kg)			
۸	۴	۲	۰
۲۶/۲۸	۱۷/۱۲	۱۰/۸۱	۱/۴۵
a	b	c	d*

\* میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

$$Ca^{+2} + Mg^{+2} = (EC \times 10) - Na^+ \quad (۷)$$

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{(Ca^{+2} + Mg^{+2})}{2}}} \quad (۸)$$

که در آن:

$Ca^{+2} + Mg^{+2}$ : مقادیر کلسیم و منیزیم محلول خاک (meq/Lit)،  $Na^+$ : مقدار سدیم خروجی در انتهای آزمایش (meq/Lit) و  $EC$ : هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (dS/m) می‌باشد.

#### ضرایب انتشار هیدرودینامیکی یون نیترات در خاک

برای محاسبه‌ی ضریب انتشار هیدرودینامیکی یون نیترات ( $D_h$ ) در خاک از رابطه‌ی شماره‌ی (۳) استفاده گردید که نتایج حاصله در جدول شماره‌ی (۷) ارائه شده است. آزمون  $F$  برای مقادیر ضریب انتشار هیدرودینامیکی و اختلاف بین تیمارها در سه تکرار انجام گردید و مشاهده گردید که اختلاف در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. آزمون LSD نیز برای مقایسه دو به دو بین تیمارها انجام شد و نشان داد که اختلاف تیمار بین بدون کاربرد زئولیت با تیمار ۸ گرم زئولیت در کیلوگرم خاک در سطح ۵ درصد معنی‌دار است اما بین تیمارهای ۲ و ۴ گرم زئولیت در کیلوگرم خاک اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۷). مقدار  $D_h$  بستگی به  $(C/C_o)_{max}$  و میانگین سرعت حرکت آب در منافذ خاک ( $\bar{V}$ ) دارد؛ به طوری که با افزایش مقدار

آزمون LSD نیز برای مقایسه‌ی دو به دو بین تیمارها انجام شد و نتایج به دست آمده نشان داد که اختلاف بین درصد آمونیم خروجی در تیمار بدون کاربرد زئولیت با تیمارهای دیگر معنی‌دار می‌باشد (جدول ۵).

#### یون سدیم

میزان مجموع سدیم تبادلی و محلول اولیه‌ی موجود در زئولیت سدیمی و خاک مورد استفاده در این پژوهش به-ترتیب برابر ۱۰۹۸۶ میلی‌گرم در هر کیلوگرم زئولیت و ۳۵/۸ میلی‌گرم در هر کیلوگرم خاک برآورد گردید. با توجه به مقدار سدیم کل در زئولیت و مقدار آن در خاک، میزان مجموع سدیم تبادلی و محلول اولیه موجود در تیمار کاربرد صفر، ۲، ۴ و ۸ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک به ترتیب برابر ۳۵/۸، ۵۷/۷، ۷۹/۶ و ۱۲۳/۴ ppm محاسبه گردید. در تمامی تیمارها مقدار سدیم خارج شده از ستون خاک در انتهای آزمایش تقریباً به حد ثابتی می‌رسد که این حد ثابت برای تیمارهای مختلف با هم تفاوت دارد. در جدول (۶) مقادیر سدیم خارج شده از ته ستون خاک در انتهای آزمایش در تیمارهای مختلف بر حسب ppm و نتایج مقایسه‌ی میانگین‌ها با آزمون LSD آورده شده است.

با توجه به روابط (۷) و (۸) مقدار SAR خاک در تیمارهای صفر، ۲، ۴ و ۸ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک بترتیب برابر با ۰/۰۱۴، ۰/۱۰۶، ۰/۱۶۸ و ۰/۲۵۹ به دست آمد. بنابراین، با توجه به مقدار SAR محاسبه شده، اضافه کردن زئولیت سدیمی به خاک تا میزان ۸ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک مشکلی از نظر سدیمی شدن خاک ایجاد نمی‌نماید.

$D_h$  ضریب انتشار هیدرودینامیک املاح ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ) و  $\bar{v}^2$  مجذور میانگین سرعت حرکت آب در منافذ خاک ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ ) می‌باشد.

یوسفی و سپاسخواه (۲۰۰۷) نیز در تحقیقات خود گزارش کردند که ضریب پراکندگی هیدرودینامیک املاح در خاک با میانگین سرعت حرکت آب در منافذ خاک رابطه‌ی خطی نداشته و هم‌بستگی خوبی را با مجذور سرعت حرکت آب در خاک نشان می‌دهد و با افزایش مقدار ژئولیت کاربردی، ضریب پراکندگی هیدرودینامیکی افزایش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

الف- میزان شست و شوی یون نیترات برای مقادیر مختلف کاربرد صفر، ۲، ۴ و ۸ گرم ژئولیت در هر کیلوگرم خاک بترتیب برابر ۹۲/۵، ۸۶/۹، ۶۶/۰ و ۴۸/۵ درصد مقدار اضافه شده به خاک بوده که باعث کاهش شست و شوی نیترات در خاک، به میزان ۶/۰۰، ۲۸/۷ و ۴۷/۶ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید؛

ب- کاربرد ۲، ۴، ۸ و ۱۶ گرم ژئولیت در هر کیلوگرم خاک باعث افزایش میانگین سرعت حرکت آب در منافذ خاک، به میزان ۵/۰، ۱۹/۹، ۶۸/۰ و ۵۸/۶ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید،

ژئولیت کاربردی مقدار  $D_h$  افزایش یافت. افزایش مقدار ژئولیت کاربردی باعث افزایش ضریب انتشار هیدرودینامیک نیترات در خاک شد. با توجه به جدول (۷) کاربرد ۲، ۴ و ۸ گرم ژئولیت در کیلوگرم خاک باعث افزایش ضریب انتشار هیدرودینامیک نیترات در خاک، به میزان ۴۲/۰۴، ۱۸۹/۷۲ و ۸۵۱/۰۰ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید. این افزایش در حالی است که با افزایش میانگین سرعت حرکت آب در منافذ خاک تا کاربرد ۸ گرم ژئولیت در کیلوگرم خاک و کاهش مقدار  $(C/C_0)_{\max}$  در تیمار کاربرد بیش‌تر ژئولیت نسبت به کاربرد کم‌تر آن، مقدار  $D_h$  نیز افزایش پیدا کرد. این امر با توجه به این‌که انتقال املاح عمدتاً با حالت جریان روان املاح صورت می‌گیرد صحیح به نظر می‌رسد و از آن‌جاکه که سرعت جریان در منافذ درشت خاک بیش‌تر می‌باشد، مقدار املاح به صورت نامتقارن در منافذ خاک پخش شده و باعث ایجاد شیب غلظت و انتشار هیدرودینامیکی املاح در خاک می‌شود. همان‌طور که از شکل (۶) پیداست، ضریب انتشار هیدرودینامیک یون نیترات در خاک با میانگین سرعت حرکت آب در منافذ خاک رابطه‌ی توانی داشته و با افزایش مقدار ژئولیت ضریب انتشار هیدرودینامیکی نیترات در خاک اشباع افزایش بیش‌تری می‌یابد. این رابطه به صورت معادله‌ی (۹) می‌باشد:

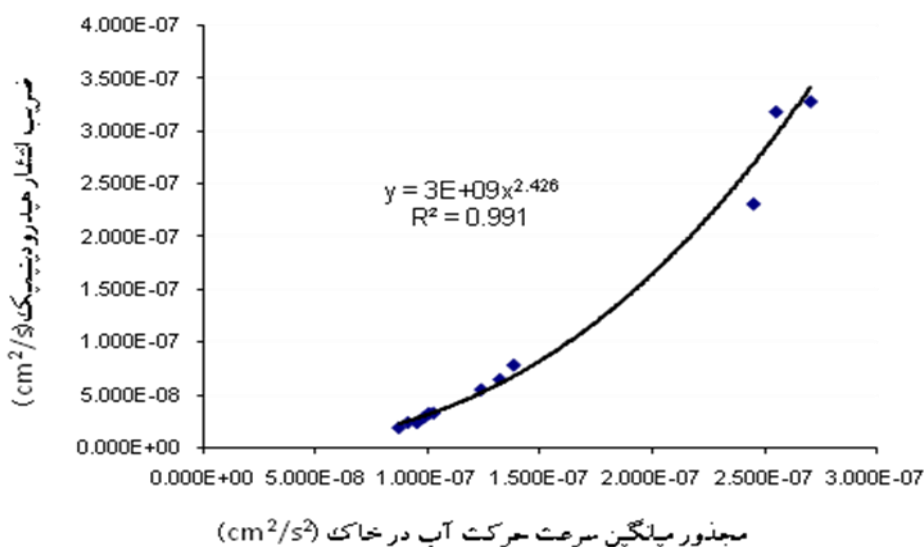
$$D_h = 3 \times 10^9 (\bar{v}^2)^{2.4261} \quad (9)$$

که در آن:

جدول (۷). میانگین ضریب انتشار هیدرودینامیک ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) برای مقادیر مختلف کاربرد ژئولیت در خاک

مقادیر کاربرد ژئولیت (g/kg)			
۸	۴	۲	۰
$2/925 \times 10^{-7}$	$6/613 \times 10^{-8}$	$3/193 \times 10^{-8}$	$2/248 \times 10^{-8}$
a	b	b	b*

\* میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.



شکل (۶). رابطه‌ی بین ضریب انتشار هیدرودینامیک نیترات و مجذور سرعت حرکت آب در خلل و فرج خاک برای تیمارها و تکرارهای مختلف کاربرد زئولیت

کیلوگرم خاک باعث افزایش ضریب انتشار هیدرودینامیکی نیترات در خاک، به میزان ۴۲/۰، ۱۸۹/۷ و ۸۵۱/۰ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید و با توجه به این که میزان سدیم خروجی اندازه‌گیری شده از ستون‌های خاک در انتهای آزمایش ناچیز بود (به‌طور میانگین مقدار سدیمی که به‌طور ثابت از ستون خاک در انتهای آزمایش از تیمارهای ۰، ۲، ۴ و ۸ گرم زئولیت در کیلوگرم خاک خارج شد به ترتیب برابر با ۱/۴۵، ۱۰/۸۱، ۱۷/۱۲ و ۲۶/۲۸ میلی‌گرم برلیتر می‌باشد)، و همچنین با توجه به میزان SAR محاسبه شده (مقدار SAR خاک در تیمارهای صفر، ۲، ۴ و ۸ گرم زئولیت در کیلوگرم خاک که به ترتیب برابر با ۰/۱۰۶، ۰/۱۶۸ و ۰/۲۵۹ می‌باشد) بنابراین اضافه کردن زئولیت سدیمی به خاک در تیمارهای مختلف ذکر شده تا میزان ۸ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک مشکلی به لحاظ سدیمی شدن خاک ایجاد نمی‌نماید.

ج- کاربرد ۱۶ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک باعث کاهش میانگین سرعت حرکت آب در منافذ خاک، به میزان ۵/۶ درصد نسبت به تیمار ۸ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک و افزایش آن به میزان ۵۸/۶ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید. حداکثر سرعت حرکت آب در منافذ خاک در تیمار کاربرد ۸ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک اتفاق افتاد؛

د- مقدار کل آمونیم خارج شده از ستون خاک در تیمارهای صفر، ۲، ۴ و ۸ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک به ترتیب برابر ۴/۰، ۳/۵، ۳/۱ و ۲/۳ درصد از مقدار اضافه شده به خاک بود. علت اصلی پایین بودن میزان یون آمونیم خروجی در تمامی تیمارها نسبت به غلظت اولیه‌ی آنها (۲۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) را می‌توان مثبت بودن بار یون آمونیم و جذب آن توسط کلوئیدهای خاک ذکر نمود؛

ه- افزایش مقدار زئولیت کاربردی باعث افزایش ضریب انتشار هیدرودینامیکی نیترات در خاک شد. کاربرد ۲، ۴ و ۸ گرم زئولیت در هر

## تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مسئولان شرکت افرنده توسکا به خاطر تأمین زئولیت مورد نیاز این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

## منابع

- ۱- خدابنده، ن. ۱۳۶۹. زراعت غلات. انتشارات دانشگاه تهران. جلد اول.
- ۲- کاووسی، م. و م. رحیمی. ۱۳۷۹. بررسی تأثیر کاربرد زئولیت بر عملکرد برنج در دو خاک سبک و سنگین. وزارت جهاد کشاورزی. سازمان تحقیقات آموزش کشاورزی. مؤسسه-ی تحقیقات برنج کشور.
- 3- American Public Health Association. 1992. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, Washington, DC 20005.
- 4- Eberl, D. 2002. Controlled release fertilizer using zeolites. U.S. Geological Survey Technology. [URL: and http://www.usge.gov/tech-transfer/factsheets/94-066b.html](http://www.usge.gov/tech-transfer/factsheets/94-066b.html).
- 5- Jury, W. A., and Sposito, G. 1985. Field calibration validation of solute transport models for the unsaturated zone. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 1331-1341.
- 6- Kavooosi, M. 2007. Effect of zeolite application on rice yield, nitrogen recovery, and nitrogen use efficiency. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 38: 69-76.
- 7- Leij FJ, van Genuchten MTh (2002) Solute transport. In 'Soil physics companion'. (Ed. AW Warrick) pp. 189-248. (CRC Press: New York)
- 8- Sepaskhah, A.R, and Yoesefi, F. (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.
- 9- Xiubin, H., and Zhanbin, H. 2001. Zeolite application for enhancing water infiltration and retention in loess soil. Resources, Conservation and Recycling, 34: 45-52.

