

اثر زئولیت‌های طبیعی و اصلاح‌شده با سورفکتانت بر آبشویی نیترات در آبیاری با پساب تصفیه شده شهری

محمد علوی^{۱*}، جهانگیر عابدی کوپایی و بهروز مصطفی‌زاده فرد

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

mohammadalavi1991@gmail.com

استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

koupai@cc.iut.ac.ir

استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

behrouz@cc.iut.ac.ir

چکیده

به دلیل کمبود آب استفاده از پساب‌ها برای آبیاری اهمیت بیشتری پیدا کرده است. همچنین کاربرد مواد طبیعی و غیر سمی مانند زئولیت که سبب افزایش راندمان کاربرد کود می‌شود و هم‌زمان آبشویی نیترات خاک را کاهش می‌دهند، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. پژوهش حاضر با اهداف بررسی تأثیر دو اندازه برای ذرات شامل ۱ تا ۱/۶۸ میلی متری و ۵۳ تا ۶۳ میکرون و مقدار کاربرد (۲۰ و ۶۰ گرم در کیلوگرم خاک) زئولیت کلینوپتیلولایت طبیعی (Cp) و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت (SMZ) بر آبشویی نیترات و آمونیوم خاک و عملکرد گیاه گندم با استفاده از ستون‌های خاک و برای آبیاری با پساب در فصل زراعی ۹۵-۱۳۹۴ انجام شد. خاک‌های مورد آزمایش در استوانه‌هایی از جنس پلی‌اتیلن با قطر داخلی ۱۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۵ سانتی‌متر مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفتند. آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار برای هر تیمار طراحی گردید. نتایج نشان داد میزان کل نیتروژن نیتراتی (NO₃-N) خارج‌شده از ستون‌های خاک اصلاح‌شده با SMZ و Cp در مقایسه با تیمار کنترل که بدون مواد اصلاح‌کننده بود به ترتیب ۳۲٪ و ۲۷٪ کاهش یافت. همچنین، استفاده از اصلاح‌کننده‌های Cp و SMZ رشد گیاه گندم را بهبود بخشید. اندازه ذرات اصلاح‌کننده‌ها اثر معنی‌داری بر آبشویی نیترات و رشد گیاه گندم نداشت. به‌طور کلی نتایج نشان داد که اصلاح‌کننده‌های Cp و SMZ به‌عنوان موادی سازگار با محیط‌زیست در کنترل آبشویی نیترات خاک و بهبود عملکرد گیاه گندم مؤثر می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: اصلاح‌کننده خاک، کلینوپتیلولایت، ستون خاک، گندم، اندازه ذرات اصلاح‌کننده‌ها

۱ - آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

* - دریافت: دی ۱۳۹۶ و پذیرش: اردیبهشت ۱۳۹۷

مقدمه

با رشد جمعیت و افزایش نیاز به آب آبیاری از یک سو و از سوی دیگر عواملی چون تغییر الگوی مصرف، تغییر در الگوهای بارندگی و گرم شدن تدریجی جهان که موجب پدیدار شدن خشک‌سالی دوره‌ای گردیده، همچنین عدم سرمایه‌گذاری کافی و مناسب، مدیریت نامناسب منابع آبی موجود و رشد مصرف سرانه آب همگی باعث شده‌اند منابع آبی موجود پاسخگوی نیازهای جمعیت امروز و آینده نباشد (خدارحمی، ۱۳۸۹) لذا استفاده از پساب‌ها در کشاورزی به‌عنوان منبعی سرشار از عناصر غذایی موردنیاز گیاه، به‌طور گسترده در مناطقی که با کمبود آب شیرین مواجه هستند، پذیرفته‌شده است (ندو و همکاران، ۲۰۱۲). پساب دارای مقادیر زیادی عناصر غذایی مانند نیتروژن و فسفر است که برای رشد گیاه باارزش هستند، اما اگر استفاده از آن‌ها به‌صورت صحیح مدیریت نشود، خطر بالقوه آلودگی را در بر خواهند داشت (لی و همکاران، ۲۰۰۷). به‌طوری‌که غلظت بالای نترات در منابع آب مشکلات اکولوژیک و حیاتی بسیاری در بردارد. نتایج تحقیقات حاکی از ارتباط میزان بالای نترات و بروز بیماری متوگلوبینمیا در نوزادان، دیابت کودکان، سقط‌جنین در انسان و حیوان و سرطان دستگاه گوارش و مثانه می‌باشد (گانگیش و اونله، ۲۰۰۵؛ فیوترل، ۲۰۰۴). از سوی دیگر تحقیقات مختلف نشان می‌دهد استفاده از فاضلاب شهری در کشاورزی باعث افزایش درصد مواد آلی و بهبود حاصلخیزی خاک می‌گردد (قنبری و همکاران، ۱۳۸۶).

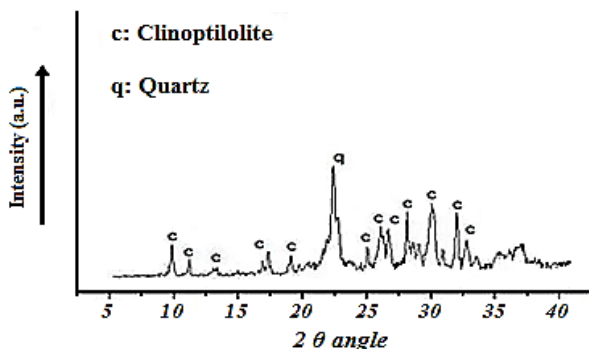
نیتروژن مهم‌ترین عنصر غذایی موردنیاز گندم است و مدیریت مصرف بهینه آن برای موفقیت در افزایش تولید دانه و پروتئین گندم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (ملکوتی، ۱۳۷۹). لذا تلفات نیتروژن از مزارع تحت آبیاری به‌ویژه در خاک‌های شنی سبب آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی، افزایش کاربرد نیتروژن برای گیاهان و ضرر و زیان اقتصادی می‌شود که این مسئله به دلیل بار منفی نترات و عدم تمایل ذرات خاک در جذب آن اتفاق می‌افتد (لی، ۲۰۰۳). به‌طورکلی برای کاهش آبشویی نیتروژن مواد مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از آن‌ها می‌توان به کودهای کندرها، بازدارندگان نیتراتی و

زئولیت‌ها اشاره کرد. که در میان موارد فوق، زئولیت‌ها به دلیل فراوانی و تبادل کاتیونی بالا به‌عنوان اصلاح‌کننده ارزان‌قیمت خاک به‌منظور کنترل رهاسازی آمونیوم و افزایش راندمان کاربرد کود استفاده می‌شود (حسینی ابری و همکاران، ۱۳۸۹؛ ملکوتی و سپهر، ۱۳۸۲).

زئولیت از آلومینوسیلیکات‌های بلورین است که از واحدهای تتراهدرال SiO_4 و AlO_4 تشکیل شده که می‌توان آن‌ها را به‌عنوان پلیمرهای معدنی در نظر گرفت (لی، ۲۰۰۳)؛ اما برای جلوگیری از حرکت آنیون‌ها، به موادی نیاز است که دارای تمایل جذب آنیونی بالایی باشند که این مواد به‌طور طبیعی در دسترس نمی‌باشند (لی، ۲۰۰۳). لذا استفاده از زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت (SMZ) به‌عنوان یک نوع تبادل‌کننده آنیونی سازگار با محیط‌زیست، در حذف آلاینده‌های آنیونی از آب مورد مطالعه قرار گرفته است (لی و بومن، ۱۹۹۷). هزینه کاربرد این ماده به‌عنوان یک تبادل‌کننده آنیونی حدود ۱۰٪ رزین‌های مصنوعی تبادل‌کننده آنیونی، برآورد شده است (لی، ۲۰۰۳).

فرگوسن و پیر (۱۹۸۷) با افزودن زئولیت به خاک شنی پژوهش‌های را در مورد کیفیت رشد چمن انجام دادند. در این تحقیق مشخص شد که زئولیت علاوه بر کاهش آبشویی نترات و آمونیوم و افزایش بازه مصرف نیتروژن، قابلیت نگهداری آب را در خاک افزایش می‌دهد و محیط مناسبی را برای جوانه‌زنی و استقرار گیاه آماده می‌سازد. لی (۲۰۰۳) مقدار جذب و رهاسازی نترات را با کاربرد زئولیت‌های ساخته‌شده از زئولیت‌های اصلاح‌شده مورد بررسی قرارداد. آزمایش‌های ستونی نشان دادند که مقدار جذب یون نترات در حالت اصلاح‌شده با سورفکتانت حدود ۴۰ درصد بیشتر از زئولیت طبیعی است. عابدی کوپایی و همکاران (۱۳۸۹) در یک بررسی گلدانی تأثیر مثبت کار آبی زئولیت را در کاهش آبشویی اوره نشان دادند. تحقیق آنها با چهار سطح کاربرد زئولیت و با دو ابعاد میلیمتری و میکرومتری نشان داد که ذرات ریزتر عملکرد بهتری را در جذب نترات نشان دادند. طاهری سودجانی و همکاران (۱۳۹۱) در یک بررسی تأثیر مثبت زئولیت‌های میکرومتری بر میزان جذب نترات پساب در خاک را نشان دادند. به‌طوری‌که با ریزتر شدن

به جامد ۳:۱) سپس به مدت ۲۴ ساعت در آن با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا خشک گردد (۱۵). الگوی پراش پرتوایکس نمونه در دامنه $2\theta = 5 - 20$ به وسیله دستگاه پراش‌سنج پرتوایکس تعیین شد. نتایج تعیین کانی با استفاده از پراش پرتوایکس نشان داد که زئولیت مورد استفاده دارای درصد بالای کانی کلینوپتیلولایت (%) است (شکل ۱). همچنین تجزیه عنصری نمونه با استفاده از دستگاه تجزیه عنصری (Spectro X-lab 2000 X-Ray) انجام شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. در این تحقیق از اندازه‌های میلی‌متری و میکرون برای زئولیت استفاده شد. ذرات میلی‌متری به وسیله الک‌های با مش ۱۲ و ۱۸ (۱/۶۸ و ۱ میلی‌متری) جداسازی شدند. برای تهیه ذرات میکرون به کمک دستگاه آسیاب جت (Jet mill) زئولیت‌ها خرد شدند و با الک‌های با مش ۲۳۰ و ۲۷۰ (۶۳ و ۵۳ میکرون) ذرات مورد نظر جدا شدند. به منظور بررسی خواص جذبی زئولیت، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات سدیم (چمپمن، ۱۹۶۵) و ظرفیت تبادل کاتیون خارجی زئولیت (ECEC) به روش مینگ و دیکسون (۱۹۸۷) اندازه‌گیری شد. این آزمایش برای دو اندازه میلی‌متر و میکرون و در سه تکرار انجام شد. مقادیر CEC برای زئولیت میلی‌متری و میکرون به ترتیب 140 cmol kg^{-1} و ۱۶۰ بودند و مقادیر ECEC این نمونه‌ها به ترتیب 75 mmol kg^{-1} و ۱۰۵ تعیین شد.



شکل ۱- الگوی پراش پرتوایکس نمونه زئولیت مورد استفاده

اندازه ذرات و افزایش میزان کاربرد زئولیت جذب نیترات توسط خاک به طور معنی‌داری افزایش یافت و همچنین نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش دور آبیاری میزان جذب نیترات در خاک کاهش می‌یابد. همچنین در پژوهشی دیگر ملکیان و همکاران (۲۰۱۱) در کشت لایسمتری ذرت، تأثیر کاربرد زئولیت‌های طبیعی و اصلاح‌شده با سورفکتانت به صورت لایه‌ای به ضخامت ۳ سانتی‌متر در سطح خاک و با دو ابعاد میلی‌متری و نانومتری برای جلوگیری از آبشویی نیترات را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان داد که هر دو اصلاح‌کننده باعث کاهش شست‌شوی نیترات از خاک، افزایش میزان جذب نیترات و آمونیاک و افزایش عملکرد محصول ذرت شدند. بر خلاف نتایج عابدی کویابی و همکاران (۱۳۸۹) و طاهری سودجانی و همکاران (۱۳۹۱) در این پژوهش اثر ذرات اصلاح‌کننده تفاوت معنی‌داری در میزان نیترات و نیتروژن جذب شده ایجاد نکرد. دانستن این مسئله که چه زئولیتی و در چه ابعادی، تأثیر بهتری بر آبشویی نیترات دارد و همچنین اقتصادی و مقرون‌به‌صرفه تر است، بحثی بسیار ضروری بشمار می‌رود؛ بنابراین با توجه به گزارش‌های فوق در زمینه مؤثر بودن زئولیت در کاهش آبشویی نیترات، در تحقیق حاضر از ابعاد میلی‌متری و میکرون استفاده شد تا این مسئله به صورت کامل‌تری بررسی شود. همچنین مطالعات کمی راجع به آبشویی نیترات با اعمال زئولیت اصلاح‌شده برای کشت گیاه گندم انجام شده است. لذا با توجه به استراتژیک بودن این گیاه برای کشور، کمبود آب و ضرورت استفاده از پساب در آبیاری انجام این مطالعه ضروری است.

مواد و روش‌ها

خصوصیات زئولیت

زئولیت طبیعی کاربردی در این مطالعه از نوع کانی کلینوپتیلولایت بوده و از سنگ‌های آتش‌فشانی معدن سمنان تهیه شد. برای از بین بردن ناخالصی‌ها، زئولیت سه مرتبه با آب دیونیزه شده شستشو داده شد (نسبت فاز مایع

جدول ۱- نتایج تجزیه عنصری زئولیت مورد مطالعه

عنصر	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	LOI*
درصد وزنی	۶۶/۵	۱۱/۸۱	۲/۰۱	۱/۳۰	۳/۱۱	۰/۷۳	۱۲/۰۵

* درصد کلی آب و مواد فرار (Loss of ignition)

تهیه زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت

به منظور جذب آنیون‌های معدنی در سطح زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت، سطح اصلاح‌شده باید دارای مکان‌های تبادلی با بار مثبت باشد. این مکان‌ها زمانی شکل می‌گیرند که سورفکتانت به صورت کاملاً دو لایه‌ای (Bilayer) و یا بخشی دو لایه‌ای روی زئولیت قرار گرفته باشد. پژوهش‌های پیشین نشان داده است که برای تشکیل سورفکتانت کاملاً دو لایه‌ای نسبت HDTMA (Hexadecyltrimethylammonium) جذب‌شده به ظرفیت تبادل کاتیونی خارجی زئولیت (ECEC) باید ۲:۱ باشد (۲۰۰ درصد ECEC) (لی، ۲۰۰۳). مقدار زئولیت اصلاح‌شده مورد نیاز در ابعاد میلی‌متر و میکرومتر برای اصلاح خاک محاسبه شده و برای تهیه SMZ از HDTMA-Br (Mereck) استفاده شد و زئولیت به اندازه ۲۰۰ درصد ECEC تغییر سطح داده شد. به این منظور ۵۵۰ گرم از زئولیت در اندازه میلی‌متر با ۱۶۵۰ میلی‌لیتر از محلول HDTMA با غلظت ۵۰ میلی‌مولار به مدت ۲۴ ساعت در همزن با دور ۱۵۰ دور در دقیقه مخلوط شد. مخلوط حاصل به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۴۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شده و محلول رویی دور ریخته شد. زئولیت اصلاح‌شده حاصل دو بار با آب دیونیزه شده شسته شد و پس از آن هوا خشک گردید (ژینگ، ۲۰۱۶؛ لی، ۲۰۰۳). روش مشابهی برای تغییر سطح زئولیت با اندازه ذرات میکرون به کار برده شد با این تفاوت که غلظت محلول HDTMA برابر با ۷۰ میلی‌مولار بود.

اصفهان در سال زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۴ انجام شد. برای آبیاری از پساب تصفیه‌شده استفاده شد. پساب مورد استفاده در این آزمایش پساب خروجی حوضچه‌های تصفیه اولیه فاضلاب واقع در دانشگاه صنعتی اصفهان بود. در طول اجرای آزمایش، ۴ مرتبه (یکبار در ماه) پساب دانشگاه صنعتی اصفهان مورد تحلیل قرار گرفته شد و ویژگی‌های فیزیکی (کل مواد جامد معلق و کدورت) و ویژگی‌های شیمیایی (pH، EC)، برخی از ترکیبات آنیونی و کاتیونی) آن اندازه‌گیری شد. میانگین نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. خاک مورد استفاده در این پژوهش از منطقه مرتعی ورودی شهر تیران واقع در استان اصفهان به صورت لایه‌ای تهیه گردید. جهت یکنواختی بیشتر پس از جداسازی سنگ و کلوخ و بقایای گیاهی، خاک از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. با توجه به درصد شن، سیلت و رس نمونه خاک و با استفاده از مثلث بافت خاک، بافت خاک لوم شنی است. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد نظر در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پساب دانشگاه صنعتی اصفهان

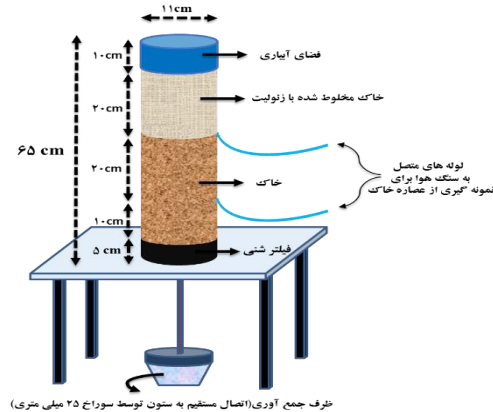
پارامتر	مقدار در پساب
TSS (mg L ⁻¹)	۵۴۴/۹۳
Turbidity (NTU)	۵۵/۸۳
pH	۷/۸
EC (dS m ⁻¹)	۱/۱۴
SAR (meq L) ^{0.5}	۸/۲۵
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	۸/۹
NH ₄ -N (mg L ⁻¹)	۱۸/۵۲
K (mg L ⁻¹)	۱۵/۴۲

مطالعه گلخانه‌ای و جمع آوری داده‌ها

این تحقیق باهدف بررسی اندازه ذرات، سطح کاربرد و نوع زئولیت در جذب نترات پساب در محل گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تهیه‌شده از منطقه تبران

P (mg/kg)	K (mg/kg)	NO ₃ -N (mg/kg)	Na (mg/kg)	OC (%)	CEC (cmol/kg)	SAR (meq/L) ^{0.5}	EC (dS/m)	pH	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	پارامتر مقدار
۱۸/۵	۳۰۶/۱	۳۰	۴۹/۳	۰/۸۵	۷/۱	۲/۵۶	۰/۹۵	۷/۵	۱۶/۷	۲۱/۵	۶۲/۸	



شکل ۲- شمای یک ستون آزمایشی خاک

شدند، به این صورت زه آب مستقیماً از ستون خاک به ظروف جمع‌آوری در بسته منتقل شد و در نتیجه تاخیر زه آب به حداقل رسید. پس از آماده‌سازی ستون‌ها و پر کردن آن‌ها عملیات کاشت بذر گیاه گندم رقم پیش‌تاز (Adlan/Ias 58) در تاریخ ۱۳۹۴/۱۲/۱۲ و در عمق ۱ سانتی‌متری داخل خاک انجام شد. در هر یک از ستون‌ها با توجه به تراکم کاشت گندم و سطح ستون آزمایشی تعداد ۴ عدد بذر کشت شد. پس از رشد گیاه و رسیدن به مرحله ۲ برگی، تعداد گیاهان استقرار یافته به ۲ عدد کاهش داده شد. عملیات برداشت پس از رسیدگی فیزیولوژیکی دانه‌ها و با انجام ۱۴ مرتبه آبیاری در تاریخ ۱۳۹۵/۴/۱۹، برای تمام تیمارها انجام شد.

این آزمایش مشتمل بر نه تیمار و سه تکرار بود. طرح از نظر آماری در قالب طرح فاکتوریل با سه فاکتور انجام گرفت. فاکتور اول سطح کاربرد اصلاح‌کننده (۲۰ و ۶۰ گرم در کیلوگرم خاک)، فاکتور دوم اندازه ذرات اصلاح‌کننده (میلی‌متر و میکرون) و فاکتور سوم نوع اصلاح‌کننده (زئولیت طبیعی و اصلاح‌شده با سورفکتانت) می‌باشد. تیمارهای تحقیق مطابق جدول ۴ می‌باشد.

آبیاری ستون‌ها به روش یکجا به کمک بشرهای آزمایشگاهی انجام شد. میزان آب آبیاری (پساب) که به هر ستون خاک داده می‌شد از راه توزین مرتب ستون‌های

برای اجرای طرح آزمایشی و به‌منظور کنترل کلیه عوامل مؤثر بر محیط، آزمایش‌ها در داخل ۲۷ ستون استوانه‌ای از جنس پلی‌اتیلن با قطر داخلی برابر با ۱۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۵ سانتی‌متر انجام شد. قبل از پر کردن ستون‌ها، در دو عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری خاک سنگ‌های سرامیکی معروف به سنگ هوا برای نمونه‌گیری از عصاره خاک در طول آزمایش، نصب گردیدند. در کف هر ستون لایه‌ای به ضخامت پنج سانتی‌متر از شن به‌عنوان فیلتر قرار گرفت. همچنین برای اجتناب از وقوع جریان ترجیحی در دیواره‌های ستون خاک، بدنه داخلی آن‌ها با گریس چرب شد و به‌وسیله ذرات شن پوشانده شد (لی، ۲۰۰۳). سپس مطابق تیمارها ترکیب خاک و زئولیت به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر به‌صورت لایه‌ای و مطابق با چگالی ظاهری خاک از طریق مرحله‌به‌مرحله پر کردن ستون‌ها با استفاده از روش وزنی، ریخته شد تا از ایجاد خلل و فرج بزرگ در خاک جلوگیری شود و شرایطی مشابه با شرایط طبیعی خاک ایجاد گردد. اصلاح‌کننده‌های خاک در عمق ۲۰ سانتی‌متری سطح خاک ستون‌ها و پیش از کاشت گیاه، با خاک مخلوط شدند. در نهایت ۱۰ سانتی‌متر بالایی هر ستون خاک نیز فضای خالی به‌منظور آبیاری در نظر گرفته شد (شکل ۲). برای جمع‌آوری زه آب، سوراخی‌هایی به ابعاد ۲۵ میلی‌متر در کف هر ستون ایجاد شد که به‌وسیله تبدیل و لوله‌های پلاستیکی به ظروف در بسته‌ای متصل

جمع‌آوری نمونه‌ها، ظروف نمونه‌برداری به آزمایشگاه منتقل و تا زمان اندازه‌گیری پارامترهای موردنظر در دمای چهار درجه سانتی‌گراد در یخچال نگهداری شدند. نمونه‌برداری از محلول خاک به‌وسیله‌ی سنگ‌های سرامیکی معروف به سنگ هوا در زمان‌های ۳۶ و ۶۸ روز پس از کاشت گیاه در دو عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری سطح خاک به کمک پمپ خلأ صورت گرفت. همچنین در انتهای فصل رشد نمونه‌برداری خاک از عمق‌های ۲۵-۰ و ۵۰-۲۵ سانتی‌متری خاک برای تجزیه‌های شیمیایی خاک انجام شد. از هر عمق سه نمونه خاک برداشت شد. برای اندازه‌گیری غلظت (NO₃-N) موجود در زهاب و خاک از روش رنگ سنتزی استفاده شد (کنی و نلسون، ۱۹۸۲). همچنین غلظت یون آمونیوم (NH₄⁺) در خاک با استفاده از روش استاندارد نسلر و با دستگاه اسپکتوفتومتری قرائت شد (آفا، ۱۹۹۰).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

نتایج با استفاده از تجزیه واریانس (ANOVA) با نرم‌افزار SAS 9.4 مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD و در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت. برای رسم نمودارهای مربوطه از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

خاک تا زمان تخلیه ۵۰ درصد آب قابل‌دسترس انجام شد (مصطفی زاده و موسوی، ۱۳۹۳).

از آنجایی‌که عناصر N-P-K از جمله عناصر موردنیاز جهت رشد کلیه گیاهان می‌باشند، این عناصر پس از انجام تجزیه خاک و تعیین عناصر غذایی موجود در خاک و میزان قابل‌دسترس بودن آن‌ها، در اختیار گیاه قرار داده شد. بر اساس توصیه فنی، نیاز خاک به کود نیتروژنه، ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت اوره بود که این کود از طریق آب آبیاری به صورت کودآبیاری در اختیار گیاه قرار داده شد. میانگین غلظت نیتروژن نیتراتی پساب ۸/۹ میلی‌گرم در لیتر بود (جدول ۲) که این میزان معادل ۸۵ کیلوگرم بر هکتار نیتروژن در طول دوره رشد بود. مجموع نیتروژن اعمال‌شده از طریق کود اوره و نیتروژن ورودی از طریق آب آبیاری (پساب) برابر با مقدار توصیه‌شده برای گیاه گندم بود. این میزان در دو نوبت به‌طور مساوی در مراحل جوانه‌زنی و پنجه‌زنی گیاه در اختیار آن قرار گرفت. همچنین با توجه به توصیه فنی کود و نیاز خاک، کودهای سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم قبل از کشت تماماً در یک نوبت به خاک داده شد (ملکوتی و غیبی، ۱۳۷۹).

در طول دوره رشد گیاه ۱۴ مرتبه نمونه‌برداری از محلول خروجی ستون‌های آزمایشگاهی انجام شد. حجم زه آب جمع‌آوری‌شده از ستون‌ها با بشر مدرج اندازه‌گیری و به ظروف نمونه‌برداری منتقل شد. به‌محض

جدول ۴- مشخصات تیمارهای مورد مطالعه

اندازه ذرات	سطح کاربرد	علامت اختصاری	نوع اصلاح‌کننده
M (میلی‌متر)	a (۲۰ گرم در کیلوگرم خاک)	ZMa	Z (زئولیت طبیعی)
M (میلی‌متر)	a (۲۰ گرم در کیلوگرم خاک)	SMa	S (زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت)
m (میکرون)	a (۲۰ گرم در کیلوگرم خاک)	Zma	Z (زئولیت طبیعی)
m (میکرون)	a (۲۰ گرم در کیلوگرم خاک)	Sma	S (زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت)
M (میلی‌متر)	b (۶۰ گرم در کیلوگرم خاک)	ZMb	Z (زئولیت طبیعی)
M (میلی‌متر)	b (۶۰ گرم در کیلوگرم خاک)	SMb	S (زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت)
m (میکرون)	b (۶۰ گرم در کیلوگرم خاک)	Zmb	Z (زئولیت طبیعی)
m (میکرون)	b (۶۰ گرم در کیلوگرم خاک)	Smb	S (زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت)
-	-	C (شاهد)	-

مورد آزمایش نشان می‌دهد. همان‌طور که روند تغییرات نشان می‌دهد، در همه تیمارها بیشترین میزان غلظت NO₃-N در زه آب خروجی پس از کود دهی رخ داده است (شکل ۳). معمولاً بازدهی کود اوره بسیار پایین

نتایج و بحث

آبشویی نترات

میانگین غلظت NO₃-N زه آب در طول دوره رشد گندم روند مشابهی را برای تمام ستون‌های خاک

بیش از ۸۰ میلی‌مول در کیلوگرم نیترات است (لی، ۲۰۰۳). به همین دلیل کاربرد SMZ در خاک سبب کاهش آبتشویی نیترات به خارج از ناحیه ریشه شده است. نتایج تجزیه واریانس حداکثر غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ زه آب ستون‌ها و همچنین متوسط غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ زه آب در طول دوره رشد در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به این جدول، نوع اصلاح‌کننده دارای اثر معنی‌داری به ترتیب در سطح ۱ و ۵ درصد بر حداکثر و متوسط غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ بوده است. میزان حداکثر و متوسط غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ در زهاب ستون‌های خاک اصلاح‌شده با SMZ به‌طور معنی‌داری (در سطح پنج درصد) نسبت به زه آب ستون‌های اصلاح‌شده با Cp کمتر است (جدول ۶). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه میانگین‌ها، میزان حداکثر و متوسط غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ در زهاب ستون‌های اصلاح‌شده با Cp و SMZ نسبت به ستون‌های بدون اصلاح‌کننده (شاهد) به‌طور معنی‌داری به ترتیب به میزان ۲۵/۰۳، ۳۳/۷۹، ۱۹/۵ و ۲۷/۳ درصد کاهش یافت (جدول ۶)؛ بنابراین استفاده ترکیبی از کودهای نیتروژن دار در کنار اصلاح‌کننده‌های خاک از نوع زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت توانست غلظت نیترات خروجی را به شکلی ملموس و قابل‌توجه کاهش دهد. سطح کاربرد اصلاح‌کننده نیز تأثیر معنی‌داری (در سطح یک درصد) بر میزان حداکثر و متوسط غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ موجود در زهاب داشته است (جدول ۵). به‌طوری‌که کاربرد زئولیت در سطح ۶۰ گرم در کیلوگرم نسبت به ۲۰ گرم در کیلوگرم باعث کاهش ۴۲/۹۳ و ۲۲/۸۵ درصدی بر میزان حداکثر و متوسط غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ موجود در زهاب شده است (جدول ۶). طباطبایی و لیاقت (۲۰۰۴) بیان کردند که کاهش اندازه ذرات در زئولیت باعث افزایش سطح ویژه زئولیت شده و میزان جذب را افزایش داده است.

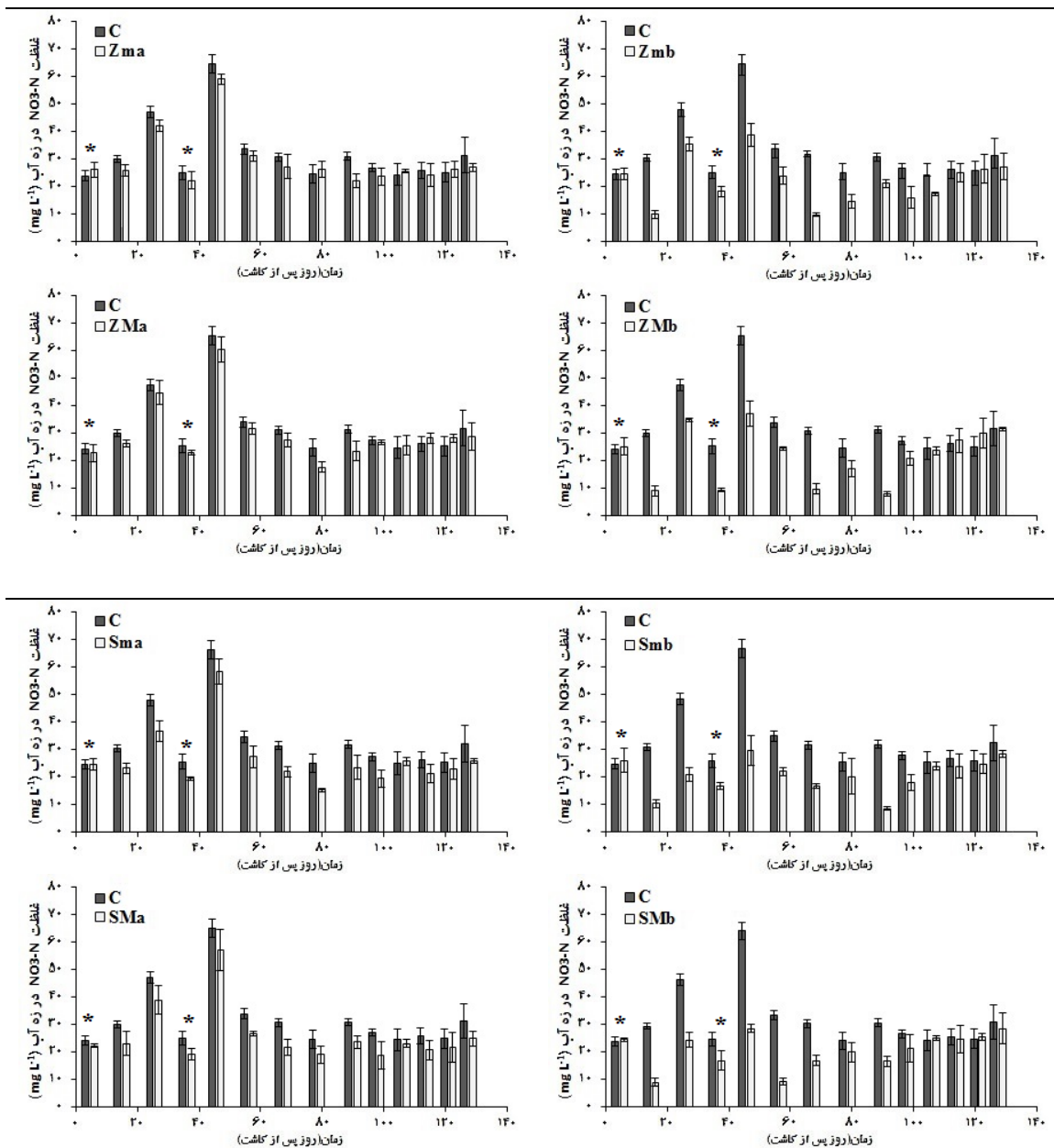
همچنین عابدی کوپایی و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که ذرات ریزتر عملکرد بهتری را در جذب نیترات نشان دادند و این به دلیل افزایش سطح ویژه ذرات است که توانایی بیشتری در جذب مواد مغذی را دارند. اگرچه نتایج پژوهش‌های این پژوهشگران نشان می‌دهد که جاذب‌های با اندازه ذرات کوچک‌تر دارای سطح ویژه بیشتری بوده و در نتیجه دارای ظرفیت بیشتری می‌باشند،

است که موجب اتلاف بیش از ۵۰ درصد نیتروژن آن می‌شود و همین امر دلیل مصرف بیش‌ازحد این کود در مصارف کشاورزی به شمار می‌آید (بای بردی و سیادت، ۱۳۸۴). در طول فصل رشد غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ خروجی در زه آب ستون‌های بدون اصلاح‌کننده خاک (شاهد) بین ۲۳/۹۶ و ۶۴/۸۴ میلی‌گرم در لیتر بوده است؛ اما کاربرد هر نوع اصلاح‌کننده خاک سبب کاهش غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ زه آب شده است که البته میزان کاهش در کاربرد بیشتر اصلاح‌کننده (۶۰ گرم در کیلوگرم خاک) بارزتر بوده است (شکل ۳). غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ خروجی در زه آب ستون‌هایی که با ۲۰ گرم در کیلوگرم زئولیت اصلاح‌شده‌اند در طول فصل رشد بین ۱۷/۳۹ تا ۵۹/۷ میلی‌گرم در لیتر بود. درحالی‌که کاربرد زئولیت در سطح ۶۰ گرم در کیلوگرم محدوده غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ را به ۷/۸۳ تا ۳۸/۸۴ میلی‌گرم کاهش داده است. ملکیان و همکاران (۲۰۱۱) نیز با کاربرد مقادیر بالاتر زئولیت به‌صورت لایه‌ای در خاک بیان کردند که جذب نیترات به‌صورت معنی‌داری افزایش یافته است. همچنین این نتایج با یافته‌های سپاس خواه و یوسفی (۲۰۰۷)، عابدی کوپایی (۲۰۱۰) و صادقی لاری و همکاران (۱۳۸۹) مطابقت دارد. از طرفی میزان CEC محاسبه‌شده خاک در عمق ۲۰ سانتی‌متری ZMb Zmb، ZMa و ZMa به ترتیب ۱۵/۳، ۱۴/۹، ۹/۲ و ۹ سانتی‌مول در کیلوگرم بودند، درحالی‌که این میزان برای خاک ستون‌های تیمار کنترل برابر ۷/۱ سانتی‌مول در کیلوگرم بود.

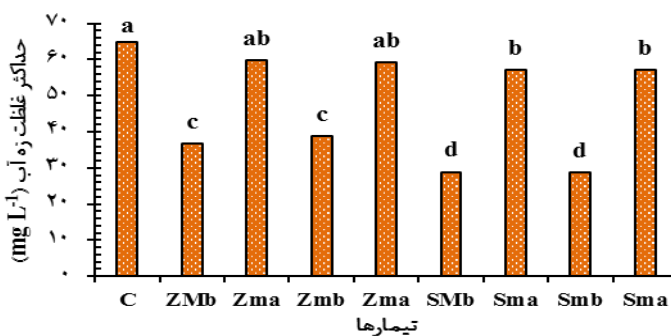
با توجه به این مطالب، نتایج حاصل‌شده در ستون‌هایی که با زئولیت اصلاح‌شده‌اند، قابل‌توجه است. مطابق با شکل ۳ در طول فصل رشد، غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ در ستون‌های اصلاح‌شده با میزان کمتر اصلاح‌کننده SMZ (۲۰ گرم در کیلوگرم خاک) بین ۱۴/۸۶ و ۵۷/۱۳ میلی‌گرم در لیتر بود درحالی‌که این میزان در زه آب ستون‌های اصلاح‌شده با میزان بیشتر اصلاح‌کننده SMZ (۶۰ گرم در کیلوگرم خاک) بین ۸/۱۱ و ۲۸/۸۵ میلی‌گرم در لیتر متغیر بود. لی و همکاران (۲۰۰۳) نشان دادند که برای جذب آنیون‌ها، بار سطح زئولیت‌ها باید به‌وسیله‌ی HDTMA به بار مثبت تغییر یابد. به دلیل قرارگیری HDTMA به‌صورت دولایه‌ای بر سطح SMZ، نیترات به‌راحتی بر سطح آن جذب شده و به‌این‌ترتیب SMZ قادر به جذب

معنی‌داری متوسط غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ زه آب را نسبت به Cp کاهش داده است، ولی میزان کل $\text{NO}_3\text{-N}$ آبشویی شده در طول دوره رشد تحت تأثیر نوع اصلاح‌کننده قرار نگرفته است (جدول ۵) نتیجه به‌دست‌آمده احتمالاً به دلیل تفاوت در جذب و واجذب NH_4^+ و $\text{NO}_3\text{-N}$ به ترتیب از Cp و SMZ در طول دوره مطالعه است. از طرفی میزان $\text{NO}_3\text{-N}$ آبشویی شده علاوه بر غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ زهاب تحت تأثیر حجم زهاب خروجی نیز قرار دارد. البته میزان زه آب خروجی در طول دوره رشد تحت تأثیر تیمارهای اعمال‌شده قرار نگرفت است (جدول ۵)، حجم زهاب در طول دوره رشد با توجه به میزان برداشت گیاه، تبخیر و میزان آبیاری متغیر است. به همین دلیل باوجود معنی‌دار بودن اثر اصلاح‌کننده بر غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ زه آب، میزان $\text{NO}_3\text{-N}$ کل خروجی تحت تأثیر نوع اصلاح‌کننده قرار نگرفته است. سطح کاربرد اصلاح‌کننده تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر میزان $\text{NO}_3\text{-N}$ خروجی از ستون‌ها داشته است (جدول ۵). با افزایش سطح کاربرد اصلاح‌کننده میزان $\text{NO}_3\text{-N}$ خروجی از ناحیه ریشه به‌طور معنی‌داری (در سطح پنج درصد) کاهش یافته است (جدول ۶). میزان کل $\text{NO}_3\text{-N}$ خروجی از ناحیه ریشه در طول دوره رشد و برای ستون‌های تیمار کنترل ۳۲/۱۹ کیلوگرم بر هکتار بوده است. کاربرد اصلاح‌کننده خاک سبب کاهش میزان $\text{NO}_3\text{-N}$ خروجی نسبت به تیمار کنترل‌شده است که اختلاف بین تیمار کنترل و سطح بالای کاربرد اصلاح‌کننده در سطح پنج درصد معنی‌دار است (جدول ۶). میزان کل $\text{NO}_3\text{-N}$ خارج‌شده از ستون‌های اصلاح‌شده با SMZ و Cp به ترتیب ۳۲ و ۲۷ درصد از تیمار کنترل کمتر بود.

اما نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که اندازه ذرات اصلاح‌کننده اثر معنی‌داری بر غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ زه آب نداشته است (جدول ۵). دلیل این موضوع را می‌توان این واقعیت دانست که اندازه ذرات بر واجذب NH_4^+ و $\text{NO}_3\text{-N}$ به ترتیب از Cp و SMZ نیز مؤثر است. هر چه اندازه ذرات Cp و SMZ کوچک‌تر باشند، میزان N ره‌اشده نیز بیشتر خواهد بود (پرین و همکاران، ۱۹۹۸). ملکیان و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقات خود برای جذب نترات از دو اندازه زئولیت، میلی‌متر و نانومتر استفاده کردند، اما تفاوت معنی‌داری در میزان نترات و نیتروژن جذب‌شده مشاهده نمودند. با توجه به نتایج تجزیه واریانس در جدول ۵، اثر متقابل نوع اصلاح‌کننده در سطح کاربرد اصلاح‌کننده برای میزان حداکثر غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ زه آب در سطح پنج درصد معنی‌دار شد. با بررسی اثر متقابل تیمارها بیشترین (۶۴/۸۴ میلی‌گرم در لیتر) و کمترین (۲۸/۶۳ میلی‌گرم در لیتر) میزان حداکثر غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ زه آب در تیمارهای C و Smb مشاهده شد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌کنید میزان حداکثر غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ زه آب در تیمارهای Zma، Zmb، ZMa، ZMb، Sma، Smb، SMa و SMb نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۸/۷۴، ۴۰/۱، ۷/۹۱، ۴۰/۰۹، ۱۱/۹۲، ۵۵/۸۵، ۱۱/۸۹ و ۵۵/۵۱ درصد کاهش یافت. نتیجه به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که کاربرد زئولیت اصلاح‌شده با سطوح کاربرد بیشتر در خاک‌های کشاورزی می‌تواند در کاهش آبشویی نترات پس از کود دهی مؤثرتر از زئولیت طبیعی عمل کند. نتیجه تجزیه واریانس میزان کل $\text{NO}_3\text{-N}$ آبشویی شده در طول دوره رشد نشان داد که اثر نوع اصلاح‌کننده بر میزان نیتروژن آبشویی شده معنی‌دار نمی‌باشد (جدول ۵). اگرچه SMZ به‌طور



شکل ۳- غلظت NO₃-N زه آب در طول دوره رشد برای انواع خاک (Z: زئولیت طبیعی S: زئولیت اصلاح شده با سورفکتانت، C: کنترل) با اندازه ذرات اصلاح کننده (M: میلی متر و m: میکرومتر) و شدت مختلف کاربرد اصلاح کننده (a: ۲۰ گرم در کیلو گرم خاک و b: ۶۰ گرم در کیلوگرم خاک). علامت * در بالای هر نمودار نشانگر کودآبیاری در آن روز است



شکل ۴- اثر متقابل تیمارهای اعمال شده بر حداکثر غلظت NO₃-N در زهاب (میلی گرم در لیتر) در طول دوره رشد گندم ستون‌هایی که دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند

جدول ۵- تجزیه واریانس حداکثر و میانگین غلظت NO₃-N در زهاب (میلی‌گرم در لیتر)، مقدار کل نیترات آبشویی شده (کیلوگرم بر هکتار) و میزان زهاب خروجی (میلی‌متر)

میزان زه آب خروجی	میانگین مربعات		درجه آزادی	منبع تغییرات	
	نیترات آبشویی شده	متوسط غلظت NO ₃ -N زه آب			حداکثر غلظت NO ₃ -N زه آب
۷/۶۹۵۳۳۷۵۰	۱۸/۰۹۸۰۳۴	۳۶/۶۴۲۴۵۹۴*	۱۹۳/۵۴۰۳۲۲**	۱	نوع اصلاح‌کننده
۰/۲۳۴۰۳۷۵۰	۲/۱۹۴۳۳۵۴	۰/۶۱۷۲۸۳۴	۰/۶۵۹۳۵۴	۱	اندازه ذرات اصلاح‌کننده
۹۵/۱۶۱۸۳۷۵۰	۲۵۲/۱۹۵۱۸۳۴**	۲۳۴/۸۴۳۹۸۴۴**	۳۷۵۴/۸۰۱۵۳۶**	۱	سطح کاربرد اصلاح‌کننده
۲/۷۹۴۸۳۷۵۰	۰/۰۰۰۳۶۰۴	۰/۴۴۳۰۸۸۴	۱/۲۲۳۱۱۴	۱	اثر متقابل نوع در اندازه ذرات اصلاح‌کننده
۸/۶۷۶۰۳۷۵۰	۱/۹۴۷۶۹۰۴	۷/۸۲۱۵۵۸۴	۶۷/۸۹۸۹۷۶*	۱	اثر متقابل نوع در سطح کاربرد اصلاح‌کننده
۱/۱۴۴۳۳۷۵۰	۰/۲۳۸۲۰۳۴	۰/۲۷۱۵۷۵۴	۲/۲۲۵۲۸۶	۱	اثر متقابل اندازه ذرات در سطح کاربرد
۰/۹۰۰۹۳۷۵۰	۰/۴۵۴۵۷۵۴	۰/۳۱۶۷۱۰۴	۳/۰۵۸۷۷۶	۱	اثر متقابل نوع در اندازه ذرات در سطح کاربرد
۲۵/۰۲۲۴۵	۵/۵۲۹۱۳۷۵	۴/۴۳۷۴۴۴۰	۱۴/۶۷۷۲۰۱	۱۶	خطای آزمایش

** و * به ترتیب نشانگر معنی‌دار بودن اثر تیمار آزمایشی در سطوح احتمال یک و پنج درصد می‌باشند.

جدول ۶- مقایسه میانگین‌های یک اندازه ذرات و سطح کاربرد اصلاح‌کننده بر حداکثر و میانگین غلظت NO₃-N در زه آب (میلی‌گرم در لیتر) و مقدار کل نیترات آبشویی شده (کیلوگرم بر هکتار)

نیترات آبشویی شده	متوسط غلظت NO ₃ -N زه آب	حداکثر غلظت NO ₃ -N زه آب	تیمار آزمایشی
نوع اصلاح‌کننده			
۲۷/۴۳ ^a	۲۵/۵۱ ^a	۴۸/۶۱ ^a	Cp
۲۵/۶۹ ^a	۲۳/۰۴ ^b	۴۲/۹۳ ^b	SMZ
اندازه ذرات اصلاح‌کننده			
۲۶/۸۶ ^a	۲۴/۴۳ ^a	۴۵/۶۱ ^a	میلی‌متر
۲۶/۲۵ ^a	۲۴/۱۱ ^a	۴۵/۹۴ ^a	میکرومتر
سطح کاربرد اصلاح‌کننده (g kg ⁻¹)			
۲۹/۸۰ ^a	۲۷/۴ ^a	۵۸/۲۸ ^a	۲۰
۲۳/۳۱ ^b	۲۱/۱۴ ^b	۳۳/۲۶ ^b	۶۰

اعداد هر تیمار آزمایشی در هر ستون که دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند

غلظت NO₃-N محلول خاک

عمق ۴۰ سانتی‌متری خاک نتیجه به‌دست‌آمده برعکس است. این اختلاف در زمان ۳۶DAP در سطح پنج درصد معنی‌دار است (جدول ۷). این نتیجه با نتایج به‌دست‌آمده در رابطه با متوسط غلظت NO₃-N در زه آب خروجی از ستون‌ها تطابق دارد. به‌این ترتیب SMZ در نگهداشت نیترات در لایه سطحی نسبت به Cp موفق‌تر عمل نموده است. نتایج آنالیز واریانس همچنین نشان داد که اثر اندازه ذرات اصلاح‌کننده بر غلظت NO₃-N محلول خاک در

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، اثر نوع اصلاح‌کننده در اولین نمونه‌برداری محلول خاک (۳۶ روز پس از کاشت گیاه، ۳۶ DAP) در هر دو عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. در ستون‌های اصلاح‌شده با SMZ غلظت NO₃-N محلول خاک در لایه سطحی (عمق ۲۰ سانتی‌متری) ۱۸/۳۱ درصد بیشتر از ستون‌های اصلاح‌شده با Cp است. درحالی‌که در

SMA و SMB نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۶/۴۲، ۲۵/۷۲، ۴/۱، ۱۸/۱۲، ۱۴/۰۳، ۵۷/۸۸، ۴/۸۹ و ۶۰/۸۰ درصد افزایش یافت. درحالی که تیمار کنترل در لایه دوم خاک (عمق ۴۰ سانتی متری) دارای غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ (۲۵/۵۲ میلی گرم در لیتر) بیشتری است.

نتیجه به دست آمده نشان می دهد که در اثر کاربرد اصلاح کننده های خاک، نیترات در لایه سطحی خاک باقی مانده است، درحالی که در تیمار کنترل از لایه های سطحی خاک شسته شده است. Cp و SMZ به ترتیب تبادل کننده های کاتیونی (سیلجیج و همکاران، ۲۰۱۰؛ هانگ و همکاران، ۲۰۱۰) و آنیونی (اسچیک و همکاران، ۲۰۱۱؛ بومن و همکاران، ۱۹۹۵) می باشند. این اصلاح کننده ها قادر به جذب نیتروژن به شکل NH_4^+ (توسط Cp) و NO_3^- (توسط SMZ) و سپس رهاسازی تدریجی آن همانند کودهای کندرهش می باشند (لی، ۲۰۰۳؛ پرین و همکاران، ۱۹۹۸). به این ترتیب در اثر کاربرد Cp و SMZ، گیاه در معرض نیتروژن بیشتر و در نتیجه شرایط رشد بهتری نسبت به تیمار کنترل است.

غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ و $\text{NH}_4\text{-N}$ خاک

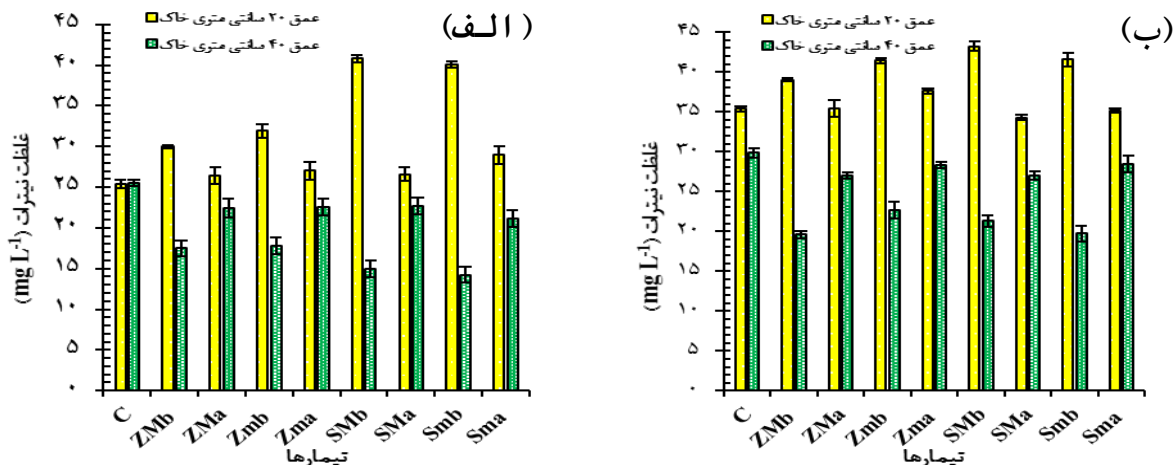
نتایج آنالیز واریانس داده ها نشان داد که تنها اثر سطح کاربردی اصلاح کننده بر غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ خاک در لایه اول در سطح یک درصد معنی دار بوده است (جدول ۹). غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ خاک در لایه اول در ستون های اصلاح شده با سطح کاربرد بیشتر به طور معنی داری (در سطح پنج درصد) نسبت به سطح کاربرد کمتر (۳۳/۶۸ درصد) بیشتر است (جدول ۱۰). متوسط غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ در لایه خاک در تیمارهای مختلف و در تیمار کنترل در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، متوسط غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ در دو عمق خاک ستون های دریافت کننده سطح بالای اصلاح کننده و به طور بارزی از ستون های دریافت کننده سطح پایین اصلاح کننده و همچنین ستون های اصلاح نشده (کنترل) متفاوت است. بیشترین غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ در لایه اول و دوم خاک به ترتیب در تیمارهای SMB و C برابر با ۴۷/۷۰ و ۳۷/۴۴ میلی گرم در کیلوگرم به دست آمد و کمترین غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ در لایه اول و دوم خاک به ترتیب در تیمارهای

عمق ۲۰ سانتی متری در هر دو زمان نمونه برداری در سطح پنج درصد معنی دار است. درحالی که این اثر در عمق ۴۰ سانتی متری فقط در دومین نمونه برداری (DAP) (۶۸) در سطح پنج درصد معنی دار است (جدول ۷). در هر دو نمونه برداری، غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ عمق ۲۰ سانتی متری در تیمارهای با ابعاد میکرومتر به طور معنی داری (در سطح پنج درصد) بیش از غلظت نیترات در تیمارهای میلی متر است (جدول ۸). دلیل این امر را می توان در مؤثرتر بودن اصلاح کننده های میکرومتری در نگهداشت نیترات در لایه سطحی نسبت به اصلاح کننده های میلی متری دانست. از طرفی به طور معنی داری (در سطح پنج درصد) بالاتر بودن میزان غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ محلول خاک در تیمارهای میکرومتر، در عمق ۴۰ سانتی متری و در زمان DAP ، می تواند حاکی از رهاسازی بیشتر نیترات توسط اصلاح کننده میکرومتری نسبت به اصلاح کننده میلی متری باشد.

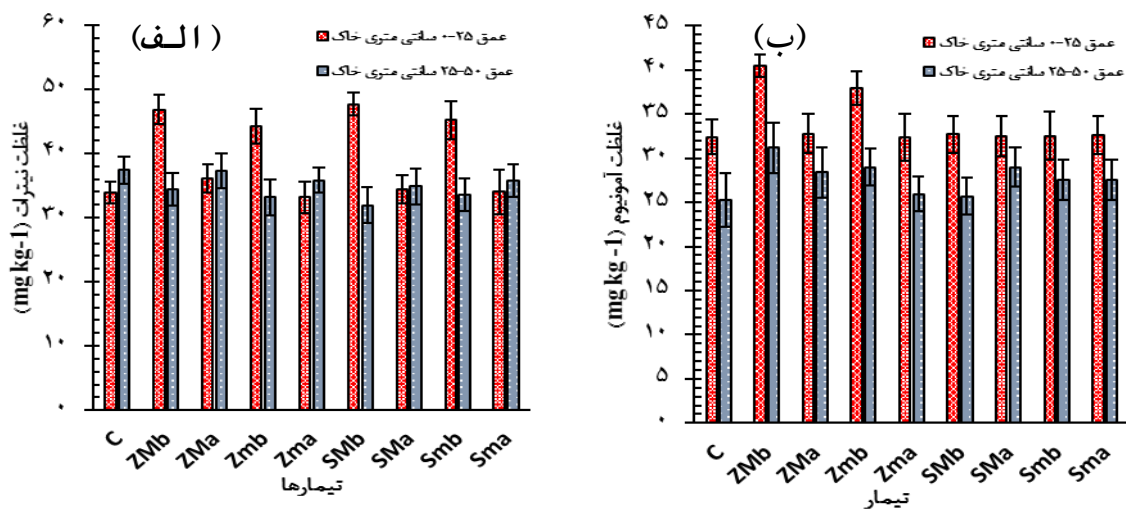
بر اساس نتایج تجزیه واریانس، سطح کاربرد اصلاح کننده در هر نمونه برداری و در هر دو عمق نمونه برداری تأثیر معنی داری (در سطح یک درصد) بر غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ محلول خاک داشته است (جدول ۷). در هر دو نمونه برداری در اثر کاربرد اصلاح کننده در سطح ۶۰ گرم در کیلوگرم، غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ محلول خاک در عمق ۲۰ سانتی متری خاک به طور معنی داری (در سطح پنج درصد) نسبت به سطح کاربرد ۲۰ گرم در کیلوگرم بیشتر بود. درحالی که در لایه دوم سطح کاربرد کمتر غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ بیشتری را سبب شده است (جدول ۸). این بدین معنی است که با کاربرد اصلاح کننده در سطح بالاتر، نیترات در لایه سطحی خاک نگاه داشته شده و از ورود آن به لایه های پایین تر جلوگیری شده است. این نتیجه با نتایج به دست آمده در رابطه با کمتر بودن آبشویی نیترات در اثر کاربرد اصلاح کننده در سطح بالاتر مطابقت دارد. میانگین غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ در تیمارهای مختلف و کنترل در دو زمان نمونه برداری (DAP و DAP) در دو عمق نمونه برداری (۲۰ و ۴۰ سانتی متری) در شکل ۵ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می شود، غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ محلول خاک در لایه اول خاک (عمق ۲۰ سانتی متری) در نمونه برداری اول تحت تیمارهای Smb, Sma, ZMb, ZMa, Zmb, Zma

اصلاح‌کننده و همچنین ستون‌های اصلاح‌نشده (کنترل) آبشویی $\text{NO}_3\text{-N}$ از لایه اول خاک و ورود آن به لایه دوم، بیشتر بودن غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ در لایه دوم را نسبت به لایه اول نتیجه می‌دهد (شکل ۶ الف). آبشویی نترات از لایه اول به لایه‌های پایین‌تر دسترسی گیاه را به منبع نیتروژن کاهش می‌دهد درحالی‌که Cp و SMZ جاذب‌های خوبی برای NH_4^+ و NO_3^- هستند و پس از اشباع شدن به‌عنوان یک کود کند رهش عمل کرده (پارک و کومارانی، ۱۹۹۸) و امکان استفاده مجدد از منبع نیتروژن را مهیا می‌کنند (پرین و همکاران، ۱۹۹۸).

Zma و SMb برابر با $33/20$ و $31/94$ میلی‌گرم در کیلوگرم بوده است (شکل ۶ الف). ستون‌های خاک اصلاح‌شده با سطح زیاد اصلاح‌کننده غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ در لایه اول خاک (۲۵-۰ سانتی‌متری) به‌طور مشخصی بیشتر از لایه دوم خاک (۵۰-۲۵ سانتی‌متری) است. درحالی‌که این روند در سایر ستون‌ها برعکس است (شکل ۶ الف) که با نتایج زویینگمن و همکاران (۲۰۰۹) و ملکیان و همکاران (۲۰۱۱) تطابق داشت. نتیجه به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که کاربرد Cp و SMZ در سطح بیشتر سبب نگهداشت $\text{NO}_3\text{-N}$ در لایه سطحی خاک شده است. علت این امر را می‌توان ویژگی‌های جذب کاتیونی و آنیونی Cp و SMZ دانست. در ستون‌های اصلاح‌شده با سطح پایین



شکل ۵- غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ محلول خاک در دو عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری خاک در ۳۶ روز (الف) و ۶۸ روز (ب) پس از کاشت گیاه گندم برای تیمارهای مورد مطالعه



شکل ۶- غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ (میلی‌گرم در کیلوگرم) خاک و (ب) غلظت $\text{NH}_4\text{-N}$ (میلی‌گرم در کیلوگرم) خاک در انتهای فصل رشد گندم برای تیمارهای مورد مطالعه

جدول ۷- تجزیه واریانس غلظت NO₃-N محلول خاک (میلی گرم در لیتر) در دو عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی متری و در ۳۶ و ۶۸ روز پس از کاشت (DAP)

میانگین مربعات				درجه آزادی	منبع تغییرات
۶۸ DPA		۳۶ DPA			
عمق ۴۰ سانتی متری	عمق ۲۰ سانتی متری	عمق ۴۰ سانتی متری	عمق ۲۰ سانتی متری		
۰/۵۲۲۳۰۳۵۴	۰/۲۲۲۹۱۵۴	۱۹/۶۵۶۶**	۱۶۷/۵۷۱۴۹۵۴**	۱	نوع اصلاح کننده
۶/۹۳۶۹۷۵۴*	۵/۵۲۰۹۶۳۴*	۱/۳۵۰۹۰۱۵	۶/۳۴۹۹۵۹۴*	۱	اندازه ذرات اصلاح کننده
۲۸۴/۵۶۳۹۹۵۳۴**	۱۹۳/۸۹۸۲۹۵۴**	۲۲۰/۵۲۳۴۳۷۵**	۴۲۷/۹۸۴۱۵۸۴**	۱	سطح کاربرد اصلاح کننده
۷/۹۶۶۰۸۰۴*	۱۰/۸۹۸۵۸۰۴**	۲/۹۲۷۴۱۳۵	۰/۳۳۶۳۰۳۴	۱	اثر متقابل نوع در اندازه ذرات اصلاح کننده
۰/۶۸۲۴۲۵۴	۲۳/۷۵۴۶۳۰۴**	۸/۹۸۱۷۱۳۵	۱۰۶/۶۶۰۵۸۴۴**	۱	اثر متقابل نوع در سطح کاربرد اصلاح کننده
۰/۶۰۹۶۰۹۴	۱/۸۸۶۶۴۳۴	۰/۳۷۸۰۰۶۰	۱/۱۳۴۰۴۵۴	۱	اثر متقابل اندازه ذرات در سطح کاربرد
۸/۵۵۷۳۹۸۴*	۲/۸۷۹۴۱۵۴	۰/۱۹۶۵۶۶۰	۷/۲۳۶۹۱۸۴	۱	اثر متقابل نوع در اندازه ذرات در سطح کاربرد
۱/۰۹۲۳۶۹۰	۰/۶۶۵۱۹۴۲	۲/۰۹۹۷۹۴۵	۱/۲۶۳۰۰۴۰	۱۶	خطای آزمایش

** و * به ترتیب نشانگر معنی دار بودن اثر تیمار آزمایشی در سطوح احتمال یک و پنج درصد می باشند

جدول ۸- مقایسه میانگین های^۱ غلظت NO₃-N محلول خاک (میلی گرم در لیتر) در دو عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی متری خاک و در ۳۶ و ۶۸ روز پس از کاشت (DAP)

۶۸ DAP		۳۶ DAP		تیمار آزمایشی
عمق ۴۰ سانتی متر	عمق ۲۰ سانتی متر	عمق ۴۰ سانتی متر	عمق ۲۰ سانتی متر	
				نوع اصلاح کننده
۲۴/۴۱ ^a	۳۸/۳۸ ^a	۲۰/۰۷ ^a	۲۸/۸۳ ^b	Cp
۲۴/۱۱ ^a	۳۸/۵۷ ^a	۱۸/۲۶ ^b	۳۴/۱۱ ^a	SMZ
				اندازه ذرات اصلاح کننده
۲۳/۷۳ ^b	۳۸ ^b	۱۹/۴۰ ^a	۳۰/۹۵ ^b	میلی متر
۲۴/۸۰ ^a	۳۸/۹۶ ^a	۱۸/۹۳ ^a	۳۱/۹۸ ^a	میکرومتر
				سطح کاربرد اصلاح کننده (g kg ⁻¹)
۲۷/۷۱ ^a	۳۵/۶۳ ^b	۲۲/۲۰ ^a	۲۷/۲۵ ^b	۲۰
۲۰/۸۲ ^b	۴۱/۳۳ ^a	۱۶/۱۳ ^b	۳۵/۶۹ ^a	۶۰

اعداد هر تیمار آزمایشی در هر ستون که دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد تفاوت معنی دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد می باشند

معنی داری (در سطح پنج درصد) نسبت به غلظت NH₄-N خاک در لایه اول (۲۵-۰ سانتی متری) ستون های اصلاح شده با SMZ، ۱۰/۱۵ درصد بیشتر است (جدول ۱۰). نتایج همچنین نشان داد که میزان NH₄-N در لایه دوم خاک (۲۵-۵۰ سانتی متری) در انتهای فصل رشد در تیمارهای اصلاح شده با Cp نسبت به تیمارهای SMZ بیشتر است، اگرچه این اختلاف معنی دار نیست (جدول

نتایج آنالیز واریانس غلظت NH₄-N خاک در انتهای فصل رشد و در دو لایه ۲۵-۰ و ۵۰-۲۵ سانتی متری نشان داد که نوع اصلاح کننده فقط برای لایه اول (۲۵-۰ سانتی متری) اثر معنی داری (در سطح پنج درصد) بر میزان غلظت NH₄-N خاک داشت است (جدول ۹). میزان غلظت NH₄-N خاک در لایه اول (۲۵-۰ سانتی متری) ستون های اصلاح شده با Cp به طور

دست آمد. با توجه به شکل ۶ (ب)، کاربرد Cp در سطح بالاتر (Zmb و ZMb) سبب افزایش غلظت NH_4-N در لایه اول (۲۵-۰ سانتی‌متری) شده است. علت آن را می‌توان در توانایی Cp در جذب آمونیوم و جلوگیری از دسترسی باکتری‌های اکسیدکننده آمونیوم دانست. نتایج همچنین نشان داد که غلظت NH_4-N در هر دو لایه خاک در تیمار ZMb در مقایسه با تیمار Zmb بیشتر است (شکل ۶ ب). این نتیجه نشان می‌دهد که رهاسازی آمونیوم از Cp با اندازه ذرات بزرگ‌تر نسبت به Cp با اندازه ذرات کوچک‌تر کندتر صورت می‌گیرد. علت این امر می‌تواند به دلیل افزایش طول مسیر دیفیوژن در ذرات بزرگ‌تر و همچنین کاهش نسبت مساحت خارجی به جرم باشد (پرین و همکاران، ۱۹۹۸). به‌طورکلی نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که زئولیت طبیعی با سطح کاربرد بالاتر جاذب مناسبی برای آمونیوم بوده که می‌تواند به‌عنوان کود کند رهش آمونیوم در مصارف کشاورزی بکار گرفته شود.

۹). نتایج این مطالعه با نتایج مکون و توکر (۱۹۸۵)، روزیچ و همکاران (۲۰۰۰)، سپاس خواه و یوسفی (۲۰۰۷)، سلیمانی و همکاران (۲۰۰۸) و ملکیان و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد. نتایج آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سطح کاربردی اصلاح‌کننده تنها بر غلظت NH_4-N خاک در لایه اول (۲۵-۰ سانتی‌متری) در سطح پنج درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۹). غلظت NH_4-N خاک در لایه اول در ستون‌های اصلاح‌شده با سطح کاربرد بیشتر به‌طور معنی‌داری (در سطح پنج درصد) نسبت به سطح کاربرد کمتر ۱۰/۲۵ درصد بیشتر است (جدول ۱۰). شکل ۶ (ب) متوسط غلظت NH_4-N در انتهای فصل رشد در دو لایه خاک و برای تیمارهای مختلف و کنترل را نشان می‌دهد. بیشترین غلظت NH_4-N در لایه اول خاک و لایه دوم خاک در تیمار ZMb به ترتیب برابر با ۴۰/۴۷ و ۳۱/۱۷ میلی‌گرم در کیلوگرم و کمترین غلظت NH_4-N در لایه اول خاک در تیمار Zma و برابر با ۳۲/۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم و در لایه دوم خاک در تیمار C و برابر با ۲۵/۲۸ میلی‌گرم در کیلوگرم به

جدول ۹- تجزیه واریانس غلظت NO_3-N و NH_4-N خاک (میلی‌گرم در لیتر) در انتهای فصل رشد

میانگین مربعات				درجه آزادی	منبع تغییرات
NH_4-N		NO_3-N			
عمق ۲۵-۵۰	عمق ۰-۲۵	عمق ۲۵-۵۰	عمق ۰-۲۵		
۸/۶۶۱۶۱۳۵۰	۶۵/۰۲۳۵۸۴*	۷/۶۶۰۱۷۹۶۵	۰/۳۷۰۳۳۲۴	۱	نوع اصلاح‌کننده
۶/۸۸۲۲۴۶	۳/۴۱۱۰۹۶	۰/۰۱۴۲۱۱۱	۲۵/۸۴۱۳۵۱۳	۱	اندازه ذرات اصلاح‌کننده
۲/۴۳۰۷۹۳۵۰	۶۷/۲۳۴۵۳۷۵۰*	۴۲/۴۷۴۹۸۹۰۹	۸۰۶/۳۴۱۹۶۸۷**	۱	سطح کاربرد اصلاح‌کننده
۹/۵۴۸۲۹۳۵	۳/۲۰۱۷۸۱۵۰	۹/۹۹۷۴۵۲۵۳	۲/۲۵۹۷۷۹	۱	اثر متقابل نوع در اندازه ذرات اصلاح‌کننده
۳۰/۸۳۵۷۳۴	۶۴/۷۴۷۳۵*	۰/۰۱۹۸۴۴۴۰	۲/۵۹۲۵۸۵۱	۱	اثر متقابل نوع در سطح کاربرد اصلاح‌کننده
۴/۹۷۴۰۶۱۵	۲/۱۸۸۸۹۶	۰/۲۴۵۲۸۴۷۸	۱/۱۶۰۴۲۹۵	۱	اثر متقابل اندازه ذرات در سطح کاربرد
۳/۴۲۹۲۱۶	۱/۱۶۹۵۳۳۵۰	۰/۰۹۷۰۳۳۲۵	۲/۰۰۱۳۳۳۴	۱	اثر متقابل نوع در اندازه ذرات در سطح کاربرد
۱۰/۹۴۲۰۶۹	۹/۸۰۵۶۵۰۷	۱۳/۳۸۴۳۹۱۱	۱۳/۰۰۰۱۵۷	۱۶	خطای آزمایش

** و * به ترتیب نشانگر معنی‌دار بودن اثر تیمار آزمایشی در سطوح احتمال یک و پنج درصد می‌باشند

جدول ۱۰- مقایسه میانگین‌های ۱ غلظت $\text{NO}_3\text{-N}$ و $\text{NH}_4\text{-N}$ خاک (میلی گرم در کیلوگرم) در انتهای فصل رشد

$\text{NH}_4\text{-N}$		$\text{NO}_3\text{-N}$		تیمار آزمایشی
عمق ۵۰-۲۵	عمق ۰-۲۵	عمق ۵۰-۲۵	عمق ۰-۲۵	
نوع اصلاح‌کننده				
۲۸/۶۳ ^a	۳۵/۸۹ ^a	۳۵/۱۷ ^a	۴۰/۰۸ ^a	Cp
۲۷/۴۲ ^a	۳۲/۵۹ ^b	۳۴/۰۴ ^a	۴۰/۳۳ ^a	SMZ
اندازه ذرات اصلاح‌کننده				
۲۸/۵۶ ^a	۳۴/۶۳ ^a	۳۴/۶۳ ^a	۴۱/۲۵ ^a	میلی‌متر
۲۷/۴۹ ^a	۳۳/۸۶ ^a	۳۴/۶ ^a	۳۹/۱۷ ^a	میکرومتر
سطح کاربرد اصلاح‌کننده (g kg^{-1})				
۲۷/۷۱ ^a	۳۲/۵۷ ^b	۳۵/۹۴ ^a	۳۴/۴۱ ^b	۲۰
۲۸/۳۴ ^a	۳۵/۹۱ ^a	۳۳/۲۸ ^a	۴۶ ^a	۶۰

اعداد هر تیمار آزمایشی در هر ستون که دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند

صفات کمی و کیفی گیاه گندم عملکرد دانه و وزن خشک

با توجه به نتایج تجزیه واریانس جدول ۱۱، اثر نوع اصلاح‌کننده بر عملکرد دانه و وزن خشک در سطوح یک و پنج درصد معنی‌دار شد. میزان ماده خشک گیاه و همچنین عملکرد دانه در تیمار Cp نسبت به تیمارهای SMZ به‌طور معنی‌داری (در سطح پنج درصد) بیشتر است به‌طوری‌که بیش‌ترین عملکرد دانه و وزن خشک گیاه گندم (۳/۱۷ و ۱/۳۳) گرم در بوته) در تیمار Cp به دست آمد درحالی‌که نسبت به شرایط کنترل‌شده میزان عملکرد دانه (۲/۳ و ۰/۸ درصد) و وزن خشک (۱۰/۸۴ و ۹/۸ درصد) به ترتیب در تیمارهای Cp و SMZ افزایش یافت (جدول ۱۲). نتیجه به‌دست‌آمده احتمالاً به دلیل تفاوت در نسبت NO_3^- به NH_4^+ محلول خاک و در نتیجه تولید پنجه‌های بیشتر در گیاهان رشد داده‌شده در طول دوره رشد و در دو تیمار شده است. ژوزف و همکاران (۱۹۹۳) نشان دادند که گیاه گندم در حضور مجموع NO_3^- و NH_4^+ نسبت به حضور NO_3^- به‌تنهایی دارای شرایط رشد ایده آل تری است. نتایج مشابهی توسط سایر متخصصین برای سایر گیاهان زراعی و باغی به‌دست‌آمده است (باربر و همکاران، ۱۹۹۴؛ بیلو و جتتری، ۱۹۸۷؛ راپ، ۱۹۸۹). Cp از طریق جذب داخلی آمونیوم می‌تواند آن را به‌طور فیزیکی از فعالیت میکروارگانیسم‌ها و نیترات سازی حفظ کند. همچنین این نتایج می‌تواند به دلیل

تفاوت در جذب و واجذب NH_4^+ و $\text{NO}_3\text{-N}$ به ترتیب از Cp و SMZ در طول دوره مطالعه باشد. جذب و واجذب NH_4^+ روی Cp در اثر تبادل کاتیونی و دیفیوژن است (اکبری، ۱۳۸۴)، درحالی‌که جذب و واجذب $\text{NO}_3\text{-N}$ روی SMZ به تبادلات آنیونی سطحی نسبت داده می‌شود (بای بوردی، ۱۳۸۱). این بدان معناست که احتمالاً SMZ نسبت به Cp در رهاسازی به‌موقع نیتروژن موردنیاز برای رشد گیاه قدری ضعیف‌تر عمل نموده است؛ بنابراین می‌توان بیان نمود که Cp بدین سبب باعث افزایش کارایی کود نیتروژنی و در نتیجه رشد بهتر گیاه می‌گردد. نتایج مشابهی توسط حسینی ابری و همکاران (۱۳۸۹) برای گیاه گلرنگ، غلامحسینی و همکاران (۱۳۸۷) برای گیاه کلزا، خاشعی و همکاران (۲۰۰۷)، لطیفه و همکاران (۲۰۱۱) و ملکیان و همکاران (۲۰۱۱) برای گیاه ذرت گزارش شده است. درحالی‌که اندازه ذرات اصلاح‌کننده تأثیر معنی‌داری را بر میزان عملکرد وزن خشک گیاه و همچنین عملکرد دانه نداشته است، سطح کاربرد اصلاح‌کننده و اثر متقابل نوع و سطح کاربرد اصلاح‌کننده دارای اثر معنی‌داری بر این دو پارامتر گیاهی می‌باشند (جدول ۱۱). کاربرد سطح بالاتر اصلاح‌کننده به‌طور معنی‌داری (در سطح پنج درصد) شرایط رشد بهتری را برای گیاه نسبت به کاربرد کمتر اصلاح‌کننده ایجاد کرده است (جدول ۱۲). بررسی اثر متقابل تیمارها نشان می‌دهد که عملکرد وزن خشک گیاه و عملکرد دانه در اثر کاربرد اصلاح‌کننده‌های خاک در مقایسه با تیمار

کنترل بیشتر است که این تفاوت در سطح بالای کاربرد اصلاح‌کننده‌ها معنی‌دار است (جدول ۱۳). با بررسی اثر متقابل تیمارها بیشترین میزان وزن خشک و عملکرد دانه در تیمار Zmb و به ترتیب ۳/۴۹ گرم در بوته و ۱/۳۷ گرم در بوته مشاهده شد.

جدول ۱۱- تجزیه واریانس عملکرد وزن خشک گیاه یا زیتوده (گرم در بوته)، عملکرد دانه (گرم در بوته)، شاخص سطح برگ LAI، ارتفاع گیاه (سانتی‌متر) و قطر ساقه (میلی‌متر)

میانگین مربعات					درجه آزادی	منبع تغییرات
قطر ساقه	ارتفاع گیاه	LAI	وزن خشک (زیتوده)	عملکرد دانه		
۰/۰۱۹۸۳۷۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰۳۳۷۵	۰/۰۰۸۴۳۷۵*	۰/۰۰۱۸۶۴۴۵**	۱	نوع اصلاح‌کننده
۰/۰۰۱۸۳۷۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۰۳۷۵	۰/۰۰۰۲۰۴۱۷	۰/۰۰۰۰۱۳۰۳	۱	اندازه ذرات اصلاح‌کننده
۰/۰۷۵۹۳۷۵	۱۳/۵۰	۰/۰۰۳۰۳۷۵	۱/۸۹۸۴۳۷۵**	۰/۰۱۲۸۰۹۶۸**	۱	سطح کاربرد اصلاح‌کننده
۰/۰۲۷۳۳۷۵	۲/۵۳۵	۰/۰۰۰۹۳۷۵	۰/۰۰۱۸۳۷۵	۰/۰۰۰۰۱۶۸۶	۱	اثر متقابل نوع در اندازه ذرات اصلاح‌کننده
۰/۰۰۰۹۳۷۵	۱/۲۱۵	۰/۰۰۰۹۳۷۵	۰/۰۱۰۰۰۴۱۷*	۰/۰۰۱۸۶۷۸۹**	۱	اثر متقابل نوع در سطح کاربرد اصلاح‌کننده
۰/۰۰۳۰۳۷۵	۰/۲۴	۰/۰۰۰۳۳۷۵	۰/۰۰۰۰۳۷۵	۰/۰۰۰۰۱۲۱۶	۱	اثر متقابل اندازه ذرات در سطح کاربرد
۰/۰۳۱۵۳۷۵	۰/۱۳۵	۰/۰۰۰۹۳۷۵	۰/۰۰۰۷۰۴۱۷	۰/۰۰۰۰۱۷۲۰	۱	اثر متقابل نوع در اندازه ذرات در سطح کاربرد
۰/۰۷۰۵۷۵	۱۰/۱۲۵	۰/۰۱۲۴۶۲۵	۱/۹۴۵۳۹۵۸۳	۰/۰۱۹۷۱۷۴۵	۱۶	خطای آزمایش

** و * به ترتیب نشانگر معنی‌دار بودن اثر تیمار آزمایشی در سطوح احتمال یک و پنج درصد می‌باشند

جدول ۱۲- مقایسه میانگین‌های یک عملکرد وزن خشک گیاه یا زیتوده (گرم در بوته)، عملکرد دانه (گرم در بوته)، شاخص سطح برگ LAI، ارتفاع گیاه (سانتی‌متر) و قطر ساقه (میلی‌متر)

قطر ساقه	ارتفاع گیاه	LAI	وزن خشک (زیتوده)	عملکرد دانه	تیمار آزمایشی
نوع اصلاح‌کننده					
۲/۲۴ ^a	۵۰/۰۲ ^a	۲/۶۹ ^a	۳/۱۷۳۳۳ ^a	۱/۳۳۲۵۰۸ ^a	Cp
۲/۱۸ ^a	۴۹/۹۸ ^a	۲/۷۰ ^a	۳/۱۳۵۸۳ ^b	۱/۳۱۴۸۸ ^b	SMZ
اندازه ذرات اصلاح‌کننده					
۲/۲۳ ^a	۵۰/۰۵ ^a	۲/۶۹ ^a	۳/۱۵۱۶۷ ^a	۱/۳۲۲۹۵۸ ^a	میلی‌متر
۲/۲۰ ^a	۴۹/۹۵ ^a	۲/۶۹ ^a	۳/۱۵۷۵ ^a	۱/۳۲۴۴۳ ^a	میکرومتر
سطح کاربرد اصلاح‌کننده (g kg ⁻¹)					
۲/۲۷ ^a	۴۹/۲۵ ^a	۲/۶۹ ^a	۲/۸۷۳۳۳ ^b	۱/۳۰۰۵۹۲ ^b	۲۰
۲/۱۶ ^a	۵۰/۷۵ ^a	۲/۷۱ ^a	۳/۴۳۵۸۳ ^a	۱/۳۴۶۷۹۷ ^a	۶۰

اعداد هر تیمار آزمایشی در هر ستون که دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

مختلف تأثیر معنی‌داری بر ارتفاع و قطر گیاه اندازه‌گیری شده در انتهای فصل رشد نداشته است (جدول ۱۲)؛ اما به‌طورکلی بیش‌ترین شاخص سطح برگ (۲/۷۳)، ارتفاع گیاه (۵۰/۷ سانتی‌متر) و قطر ساقه (۲/۲۹ میلی‌متر) در تیمار Zmb مشاهده شد.

شاخص سطح برگ، ارتفاع گیاه و قطر ساقه

نتایج تجزیه واریانس حداکثر شاخص سطح برگ (LAI) نشان داد که تیمارهای کاربردی دارای اثر معنی‌داری بر این پارامتر نمی‌باشند (جدول ۱۱). همچنین کاربرد Cp و SMZ در اندازه‌ها و سطوح کاربردی

جدول ۱۳- اثرات متقابل یک تیمارهای مورد مطالعه بر عملکرد وزن خشک گیاه یا زیتوده (گرم در بوته)، عملکرد دانه (گرم در بوته)، شاخص سطح برگ LAI، ارتفاع گیاه (سانتی‌متر) و قطر ساقه (میلی‌متر)

تیمار آزمایشی	عملکرد دانه	وزن خشک (زیتوده)	(LAI)	ارتفاع گیاه	قطر ساقه
Sma	۱/۳ ^c	۲/۸۷ ^d	۲/۶۹ ^a	۴۸/۹ ^a	۲/۰۳ ^a
Smb	۱/۳۳ ^b	۳/۳۹ ^c	۲/۷ ^a	۵۰/۳ ^a	۲/۲۵ ^a
SMA	۱/۳ ^c	۲/۸۸ ^d	۲/۷ ^a	۵۰ ^a	۲/۲۱ ^a
SMb	۱/۳۳ ^b	۳/۴۱ ^{bc}	۲/۷۱ ^a	۵۰/۷ ^a	۲/۲۴ ^a
Zma	۱/۳ ^c	۲/۸۸ ^d	۲/۶۷ ^a	۴۹/۳ ^a	۲/۲۴ ^a
Zmb	۱/۳۷ ^a	۳/۴۹ ^a	۲/۷۳ ^a	۵۰/۷ ^a	۲/۲۹ ^a
ZMa	۱/۳ ^c	۲/۸۷ ^d	۲/۶۸ ^a	۴۸/۸ ^a	۲/۱۴ ^a
ZMb	۱/۳۶ ^a	۳/۴۶ ^{ab}	۲/۶۹ ^a	۵۰/۷ ^a	۲/۲۹ ^a
C	۱/۳ ^c	۲/۸۶ ^d	۲/۶۷ ^a	۴۹ ^a	۲/۱۴ ^a

اعداد هر تیمار آزمایشی در هر ستون که دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

نتیجه‌گیری کلی

این مطالعه باهدف بررسی اثر زئولیت‌های طبیعی Cp و اصلاح‌شده با سورفکتانت (SMZ) به‌منظور کنترل آبشویی نیترات تحت آبیاری با پساب تصفیه‌شده انجام شد. بدین منظور زئولیت‌های طبیعی و اصلاح‌شده با سورفکتانت در دو اندازه میلی‌متر و میکرومتر و در دو سطح ۲۰ و ۶۰ گرم در کیلوگرم خاک به‌کاربرده شدند. نتایج نشان داد که کاربرد Cp و SMZ به میزان ۶۰ گرم در کیلوگرم خاک بر کاهش آبشویی نیترات و رشد گیاه گندم مؤثر می‌باشد. همچنین کاربرد زئولیت اصلاح‌شده در خاک می‌تواند در کاهش آبشویی نیترات پس از کود دهی مؤثرتر از زئولیت طبیعی عمل کند این بدان معنی

است که مصرف Cp و SMZ به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک، آبشویی نیترات را به‌طور معنی‌داری کاهش و به‌تبع آن مقدار نیتروژن خاک در لایه اول را افزایش می‌دهد. در نتیجه با افزایش فراهمی طولانی‌مدت نیتروژن در محیط ریشه نه‌تنها آلودگی محیط‌زیست کاهش می‌یابد بلکه بازدهی محصول افزایش می‌یابد و به بهبود رشد گیاه کمک می‌کند. اندازه ذرات اصلاح‌کننده‌ها اثر معنی‌داری بر آبشویی نیترات و رشد گیاه گندم نداشت. اثر نوع اصلاح‌کننده بر میزان نیتروژن آبشویی شده معنی‌دار نبود. همچنین کاربرد اصلاح‌کننده‌ها در سطح ۲۰ گرم در کیلوگرم در کاهش آبشویی نیترات و رشد گیاه گندم چندان مؤثر نبود.

فهرست منابع

۱. اکبری، ب. ۱۳۸۴. بررسی میزان اثربخشی نانو تکنولوژی در شاخه‌های مختلف بهداشت محیط. هشتمین همایش ملی بهداشت محیط. بیمارستان امام خمینی تهران.
۲. بای بوردی، م. ۱۳۸۱. پیدایش و رده‌بندی خاک. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ نهم.
۳. بای بوردی، م. و ح. سیادت. ۱۳۸۴. کشاورزی، کودها و محیط‌زیست (ترجمه)، انتشارات نزهت.

۴. حسینی ابری، س. ع.، م. ر. صالح پرهیزکار، د. ارادتمند اصلی و پ. مرادی. ۱۳۸۹. تأثیر سطوح مختلف زئولیت بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه گلرنگ. دومین همایش ملی کشاورزی و توسعه پایدار (فرصت‌ها و چالش‌های پیش رو). شیراز. دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز.
۵. خدارحمی، ر. ۱۳۸۹. اهمیت و ضرورت بازچرخانی پساب در توسعه پایدار کشاورزی. همایش ملی مدیریت پسماند و پساب‌های کشاورزی. تهران. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.
۶. صادقی لاری، ع.، ه. معاضد، ع. ر. هوشمند و م. چرم. ۱۳۸۹. تأثیر کاربرد زئولیت سدیمی بر نگهداشت نیترات و آمونیوم در یک خاک اشباع لوم سیلتی. علوم و مهندسی آبیاری دانشگاه شهید چمران اهواز. ۳۳(۱): ۴۳-۳۱.
۷. طاهری سودجانی، ه.، س. ح. طباطبایی، م. قبادی نیا، ح. کاظمیان. ۱۳۹۱. تأثیر روش کاربرد، اندازه ذرات و میزان زئولیت بر نگهداشت نیترات در خاک آبیاری شده با پساب شهری. نشریه علوم آب و خاک-علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۸(۶۷): ۵۷-۴۷.
۸. عابدی کوپایی، ج.، س. ف. موسوی و آ. معتمدی. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر کاربرد زئولیت کلینوپتیلولایت در کاهش آبشویی کود اوره از خاک، آب و فاضلاب. ۳: ۵۱-۵۷.
۹. غلامحسینی، م.، م. آقاعلیخانی، م. ج. ملکوتی. ۱۳۸۷. تأثیر سطوح مختلف نیتروژن و زئولیت بر عملکرد کمی و کیفی علوفه کلزای پاییزه. نشریه علوم آب و خاک-علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۲(۴۵): ۵۴۸-۵۳۷.
۱۰. قنبری، ا.، ج. عابدی کوپایی، ج. طایبی سمیرمی. ۱۳۸۶. اثر آبیاری با پساب فاضلاب تصفیه‌شده شهری روی عملکرد و کیفیت گندم و برخی ویژگی‌های خاک در منطقه سیستان. نشریه علوم آب و خاک-علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۰(۴): ۷۵-۵۹.
۱۱. مصطفی‌زاده فرد، ب. و ف. موسوی. ۱۳۹۳. آبیاری سطحی: تئوری و عمل (ترجمه)، نوشته دلبیو. آر. واکر و گ. وی. اسکوربو، چاپ پنجم، انتشارات کنکاش.
۱۲. ملکوتی، م. ج. و م. ن. غیبی. ۱۳۷۹. تعیین حد بحرانی عناصر غذایی مؤثر در خاک، گیاه و میوه در راستای افزایش عملکرد کمی و کیفی محصولات استراتژیک کشور، نشر آموزش کشاورزی، صفحه ۹۵-۸۲.
۱۳. ملکوتی، م. ج.، ا. سپهر. ۱۳۸۲. تغذیه بهینه دانه‌های روغنی. انتشارات خانیزان تهران.
۱۴. ملکوتی، م. م. ۱۳۷۹. تغذیه متعادل گندم. نشر آموزش کشاورزی.
۱۵. مهدوی، ع.، ع. م. لیاقت، ی. شیخ محمدی. ۱۳۹۰. حذف نیترات از زه آب کشاورزی با استفاده از زئولیت اصلاح‌شده. مجله پژوهش آب ایران. ۵(۸): ۱۳۴-۱۲۴.
16. APHA. 1990. *Standard methods for the examination of water and wastewater (19th Ed.)*, American Public. Health Association, Washington, DC.
17. Barber, K. L., G. M. Pierzynski and R. L. Vanderlip. 1994. Ammonium/nitrate ratio effects on dry matter partitioning and radiation use efficiency of corn. *Journal of Plant Nutrition*. 17(5): 869-882.
18. Below, F. E. and L. E. Gentry. 1987. Effect of mixed N nutrition on nutrient accumulation, partitioning, and productivity of corn. *Journal of Fertilizer Issues*. 4(3): 79-85.
19. Bowman, R.S., Haggerty, G.M., Huddleston R.G., Neel, D. and Flynn, M. (1995). Sorption of nonpolar organics, inorganic cations, and inorganic anions by surfactant-modified zeolites, In: Sabatini, D.A. et al. (Eds.), *surfactant-enhanced remediation of*

- subsurface contamination*. pp. 54-64. ACS Symposium Series 594, American Chemical Society, Washington, DC.
20. Cakicioglu-Ozkan, F., Ulku, S. (2005). The effect of HCl treatment on water vapor adsorption characteristics of clinoptilolite rich natural zeolite. *Microporous and Mesoporous Materials*. 77, 47-53.
 21. Chapman, H.D. (1965). *Cation exchange capacity*, In: Black, C. A. (Ed.), *Method of Soil Analysis*. pp. 891-901. SSA, Madison, Wisc.
 22. Ferguson, G.A., and Pepper, I. L. (1987). Ammonium retention in sand amended with clinoptilolite. *Soil Science Society of America Journal*, 51, 231-234.
 23. Fewtrell, L. (2004). Drinking-water nitrate, methemoglobinemia, and global burden of disease: a discussion. *Environmental Health Perspectives*, 112(14), 1371-1374.
 24. GÜNGÖR, K., and ÜNLÜ, K. (2005). Nitrite and nitrate removal efficiencies of soil aquifer treatment columns. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 29, 159-170.
 25. Huang, H., Xiao, X., Yan, B., and Yang, L. (2010). Ammonium removal from aqueous solutions by using natural Chinese (Chende) zeolite as adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 247-252.
 26. Joseph, P. A. and R. Prasad. 1993. Correlation studies on ammonium/nitrate concentrations in soil and growth and yield of wheat. *Journal of Agronomy Crop Science*. 171(1): 26-30.
 27. Keeney, D.R. and Nelson, D.W. (1982). *N-inorganic forms Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties (2nd Ed.)*, American society of Agronomy, Madison, WI.
 28. Khasheei, S., Kuchakzaden, A. M., Shahbifar, J. and Abassi, H. 2007. Application of natural zeolite of clinoptilolite of corn yield under water depletion. *Journal of agricultural science Technology*. 73(3).611-619.
 29. Latifah, O., Ahmed, O. H. and Muhamad, A. M. 2011. Enhancing nutrient use efficiency of maize (*Zea mays* L.) from mixing urea with zeolite and peat soil water. *International Journal of Physical Sciences*. 6(14): 3330-3335.
 30. Lei, X., Sugiura, N., Feng, C., and Maekawa, T. (2007). Pretreatment of anaerobic digestion effluent with ammonia stripping and biogas purification. *Journal of Hazardous Materials*, 145, 391-397.
 31. Li, Z. (2003). Use of surfactant-modified zeolite as fertilizer carriers to control nitrate release. *Microporous and Mesoporous Materials*, 61(1-3), 181-188.
 32. Li, Z., Willms, C., and Roy, S. (2003b). Desorption of hexadecyl trimethyl ammonium from charged surface. *Environmental and Engineering Geoscience*, 10(1), 37-45.
 33. Li, Z.H. and Bowman, R.S. (1997). Cointerion effects on the sorption of cationic surfactant and chromate on natural clinoptilolite. *Environmental Science & Technology*, 31(8), 2407-2412.
 34. Mackown, C.T., and Tusker, T.C. (1985). Ammonium nitrogen movement in a coarse-textured soil amended with zeolite. *Soil Science Society of America Journal*, 49(1), 235-238.
 35. Malekian, R., Abedi-Kuopai, J., and Eslamian, S.S., Mousavi, S.F., Abbaspour, K.C., and Afyuni, M. (2011). The effect of Ionic strength on Ion-exchange the ammonium removal and release using natural Iranian zeolite. *Applied Clay Science*, 51(3), 323-329.
 36. Mig, D.W., and Dixon, J.B. (1987). Quantitative determination of clinoptilolite in soils by a cation-exchange capacity method. *Clays and Clay Minerals*, 35(6), 463-468.
 37. Nadav, I., Arye, G., Tarchitzky, J., and Chen, Y. (2012). Enhanced infiltration regime for treated-wastewater purification in soil aquifer treatment (SAT). *Journal of Hydrology*, 421, 275-283.
 38. Park, M., and Komarneni, S. (1998). Ammonium nitrate occlusion vs. nitrate ion exchange in natural zeolite. *Soil Science Society of America Journal*, 62(5), 1455-1459.
 39. Perrin, T.S., Drost, D.T., Boettinger, J.L., and Norton, J.M. (1998). Ammonium-loaded clinoptilolite: A slow-release nitrogen fertilizer for sweet corn. *Journal of Plant Nutrition*, 21(3), 515-530.

40. Rozic, M., Cerjan-stefanovic, S., Kurajica, S., Vancina, V., Hozdic, E. (2000). Ammoniacal nitrogen removal from water by treatment with clays and zeolites. *Water Research*, 34, 3675-3681.
41. Rupp, L. A. 1989. Greenhouse culture, in: James, D. W., and K. F. Toppers (Eds.), Utah fertilizer guide, Cooperative Extension Service, PP. 42-54. Utah State University, Logan, UT.
42. Schick, J., Caillet, P., Paillaud, J.L., Patarin, J., and Mangold-Callarec, C. (2011). Batch-wise nitrate removal from water on a surfactant-modified zeolite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 132(3), 395-400.
43. Sepaskhah, A.R., and Yousefi, 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.
44. Siljeg, M., Foglar, L., and Kukucka, M. (2010). The ground water ammonium sorption onto Croatia and Serbian clinoptilolite. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1-3), 572-577.
45. Soleimani, M., Ansari, A., Haj-Abbasi, M., and Abedi-koupaei, J. (2008). Investigation of nitrate and ammonium removal from groundwater by mineral filter. *Journal of Hazardous Materials*, 67, 18-26.
46. Tabatabaei, S.H., and Liaghat, A. (2004). Use of zeolite to control heavy metal municipal wastewater applied for irrigation. *Journal of Ion Exchange*, 15(2), 62-67.
47. Xing, X., (2016). Ionic-liquid-crafted zeolite for the removal of anionic dye methyl orange. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 59, 237-243.
48. Zwingmann, N., Singh, B., Mackinnon, D.R., and Gilkes, R. (2009). Zeolite from alkali modified kaolin increases NH_4^+ retention by sandy soil: Column experiments. *Applied Clay Science*, 46(1), 7-12.

Effect of Natural and Surfactant-Modified Zeolites on Nitrate Leaching under Irrigation with Treated Urban Wastewater

M. Alavi¹*, J. Abedi-Koupai and B. Mostafazadeh-Fard

Master of Science, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology.

mohammadalavi1991@gmail.com

Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

koupai@cc.iut.ac.ir

Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

behrouz@cc.iut.ac.ir

Abstract

Due to shortage of water, use of wastewater for irrigation is becoming more important. Also, using natural and non-toxic materials that increase fertilizer application efficiency and decrease nitrate leaching has gained increasing attention. The aims of this study were to investigate the effect of two sizes for particles, i.e. 1-1.68 mm and 53-63 μm , and two application rates (20 and 60 grams per kilogram of soil) of natural zeolite of clinoptilolite (Cp) and surfactant-modified zeolite (SMZ) on soil nitrate and ammonium leaching and wheat plant performance under irrigation by treated urban wastewater. The experiment was conducted in 2015-16 growing season. The experimental soils were placed in Polyethylene columns with 11 cm inner diameter and 65 cm height. The treatments were factorial combination of the variables in completely randomized design with three replications. The results showed that the total amount of released $\text{NO}_3\text{-N}$ from columns modified by SMZ and CP were 32% and 21% lower as compared to the control treatment. Also, these amendments improved wheat plant growth. There was no significant effect on nitrate leaching due to the particle size of the two soil amendments. CP and SMZ amendments are eco-friendly materials and results of the study showed that they were effective in controlling soil nitrate leaching and improving wheat plant growth.

Keywords: Clinoptilolite, Soil column, Wheat, Soil amendments, Particle size

1 - Corresponding author: Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology.

*- Received :December 2017 and Accepted: May 2018