مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۴/ شماره ۲/ پیاپی ۳۷/ تابستان ۱۳۹۹ (۱۱-۲۲)

اثر زئولیت‌های طبیعی و اصلاح‌شده با سورفکتانت بر عملکرد کمی و کیفی گندم در آبیاری با پساب

محمد علوی[۱*]، جهانگیر عابدی کوپایی[۲] و بهروز مصطفی‌زاده فرد[۳]

چکیده

هدرروی کودهای نیتروژنه به‌دلیل پایین بودن کارآیی مصرف کود، موجب مسائل زیست‌محیطی می‌شود. بنابراین استفاده از مواد اصلاحی مانند زئولیت‌ها در خاک اهمیت پیدا می‌کند. پژوهش حاضر با اهداف بررسی تأثیر اندازهٔ ذرات (میلی‌متر و میکرومتر) و میزان کاربرد (۲۰ و ۶۰ گرم در کیلوگرم خاک) زئولیت کلینوپتیلولایت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت بر آبشویی نیترات خاک و عملکرد گیاه گندم با استفاده از ستون‌های خاک و برای آبیاری با پساب در محل گلخانهٔ پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان در سال زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۴ انجام شد. آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار برای هر تیمار طراحی شد. نتایج نشان داد استفاده از اصلاح‌کننده‌های زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت رشد گیاه گندم را بهبود بخشید و میزان نیتروژن برداشت‌شده توسط گیاه را افزایش داد؛ به‌گونه‌ای که غلظت نیتروژن دانه و نیتروژن برداشت‌شده توسط گیاه در ستون‌های دریافت کنندهٔ زئولیت طبیعی به‌طور معنی‌داری (۱/۴۵ و ۲/۴۹ درصد) بیشتر از ستون‌های دریافت‌کننده زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت بود. با افزایش سطح کاربرد اصلاح‌کننده میزان نیتروژن نیتراتی خروجی از ناحیهٔ ریشه به‌طور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) کاهش یافت؛ اما نوع اصلاح‌کننده بر میزان نیتروژن آبشویی شده اثر معنی‌داری نداشت.

واژه‌های کلیدی: اصلاح‌کنندهٔ خاک، آبشویی نیترات، اندازهٔ ذرات اصلاح کننده‌ها، ستون خاک، کلینوپتیلولایت.

ارجاع: علوی م، عابدی کوپایی ج. و مصطفی‌زاده فرد ب. ۱۳۹۹ اثر زئولیت‌های طبیعی و اصلاح‌شده با سورفکتانت بر عملکرد کمی و کیفی گندم در آبیاری با پساب. مجله پژوهش آب ایران. ۳۷: ۱۱-۲۲.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
*** نویسنده مسئول**: **mohammadalavi1991@gmail.com**
تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۷

مقدمه

بحران کمبود آب، یکی از مشکلاتی است که امروزه جهـان بـا آن مواجه است. محدودیت منابع آب و استفاده از آب‌های نامتعارف در کشاورزی، توجه پژوهشگران را به نقش آلاینده‌هـای فیزیکـی آب نیـز به خود معطوف کرده است؛ زیرا غلظت و ترکیبات مـواد حـل شـده در آب بیشترین تأثیر را بر رشد گیاه و ویژگی‌های خاک دارند (چوپان و همکاران، ۱۳۹۷). اسـتفاده صـحیح از پساب‌های شهری علاوه بر گسترش پوشش گیاهی، از یک طـرف، از آلودگی محیط‌زیست جلوگیری می‌کند و از طـرف دیگـر به‌دلیل دارا بودن مقادیر قابل توجهی از عناصر غذایی و مواد آلی، آثار مثبتی نیز بر حاصل‌خیزی خاک و رشد گیاهان می‌گذارد و باعث کاهش هزینه مصرف کود شیمیایی می‌شود (باتیستا و همکاران، ۲۰۱۰؛ شفق کلوانق و همکاران، ۱۳۹۴).

پـساب دارای مقادیر زیادی عناصر غذایی مانند نیتروژن و فسفر است که برای رشد گیاه باارزش هستند (لی و همکاران، ۲۰۰۷). حدود ۶۰ درصد سطح مزارع جهان را غلات تشکیل می‌دهند که از این مقدار ۳۳ درصد آن به کشت گندم اختصاص دارد (شعاعی و همکاران، ۱۳۸۸). گندم از جمله محصولات اساسی کشور بوده و سطح زیر کشت آن ۶/۶ میلیون هکتار است که حدود ۴/۲ میلیون هکتار آن به‌صورت دیم و بقیه به کشت آبی اختصاص دارد. میزان پروتئین دانۀ گندم از ۶ تا ۱۸ درصد متغیر است که این تغییرات ناشی از عوامل توارثی، وضعیت محیطی و مصرف کودهای شیمیایی است (ملکوتی و غیبی، ۱۳۷۹). در این ارتباط در دهه‌های اخیر کاربرد کود، از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تولید محصولات کشاورزی به‌ویژه گندم است (کوچکی و خواجه حسینی، ۱۳۹۱)، بنابراین ارائه روش‌هایی برای کنترل مصرف کودهای شیمیایی نیتروژن‌دار و افزایش تأثیرگذاری آن‌ها در کنار حصول به عملکرد مناسب به‌ویژه در زمین‌های زراعی دارای بافت سبک (به‌دلیل پتانسیل ذاتی این خاک‌ها در هدرروی عناصر غذایی) مهم است. ازجمله روش‌های مدیریتی که برای افزایش تأثیرگذاری و جلوگیری از هدرروی کودهای شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته، به‌کارگیری ترکیبات طبیعی چون کانی‌های زئولیت در مزارع کشاورزی به‌دلیل افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و تمایل زیاد آن‌ها برای جذب و نگه‌داری آمونیوم است (خاشعی سیوی و احمدی، ۱۳۹۴) که می‌توانند نقش مؤثری در کاهش شست‌وشوی عناصر غذایی خاک به‌ویژه نیتروژن و افزایش رشد گیاه داشته باشند.

زئولیت از آلومینوسیلیکات‌های بلورین که از واحدهای تتراهدرال SiO_4 و AlO_4 تشکیل شده است که می‌توان آن‌ها را به‌عنوان پلیمرهای معدنی در نظر گرفت (لی، ۲۰۰۳). علاوه بر این، ازآنجایی‌که آنیون‌ها و املاح خنثی جذب سطحی زئولیت‌ها نشده و از سطح منفی آن دفع می‌شوند، کاربرد زئولیت تنها منحصر به جداسازی و جذب کاتیون‌ها ست (برک، ۱۹۶۴). برای جلوگیری از حرکت آنیون‌ها مانند نیترات NO_3-N، به موادی نیاز است که دارای تمایل جذب آنیونی بالایی باشند که این مواد به‌طور طبیعی در دسترس نیستند (لی، ۲۰۰۳)، لذا استفاده از زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت به‌عنوان یک نوع تبادل کنندۀ آنیونی سازگار با محیط‌زیست و ارزان قیمت مطالعه شده است (لی و بومن، ۱۹۹۷).

ملکیان و همکاران (۲۰۱۱) گزارش دادند که مقدار عملکرد دانه، وزن خشک و غلظت نیتروژن دانۀ گیاه ذرت به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر زئولیت افزایش یافته است. با توجه به مطالب ارائه شده، هدف از اجرای این مطالعه بررسی اثر اندازۀ زئولیت و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت و میزان کاربرد آن‌ها در کاهش آبشویی نیتروژن از طریق زه‌آب در اثر کاربرد کود نیتروژنه همراه آبیاری با پساب و همچنین بررسی کارآیی زئولیت و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت بر عملکرد کمی و کیفی گیاه گندم در یک خاک با بافت سبک است. نتایج حاصل از بررسی سطوح مختلف زئولیت بر عملکرد و اجزای عملکرد لوبیا قرمز تحت تنش خشکی در شرایط آب و هوایی کرمانشاه نشان داد که سطوح مختلف زئولیت بر تعداد غلاف در بوته در سطح آماری پنج درصد و بر ارتفاع بوته، تعداد دانه در غلاف، وزن صد دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیکی و شاخص برداشت در سطح آماری یک درصد معنی‌دار شد و این صفت‌ها را افزایش داد (حبیب‌پور کاشفی و همکاران، ۱۳۹۶). حسینی چمنی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی تأثیر زئولیت، دور آبیاری و قارچ مایکوریزا بر عملکرد و کارآیی مصرف آب گیاه ماش پرداختند که نتایج حاصل از مطالعات آن‌ها حاکی از معنی‌دار بودن اثر زئولیت بر عملکرد دانه بود و همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که با استفاده از قارچ مایکوریزا و

زئولیت می‌توان فاصلهٔ آبیاری در گیاه ماش را در منطقهٔ مورد مطالعه از ۷ به ۱۰ روز یک‌بار افزایش داد.

با توجه به گزارش‌های فوق در زمینهٔ مؤثر بودن زئولیت در کاهش آبشویی نیترات، تاکنون مطالعه جامعی دربارهٔ تأثیر کاربرد زئولیت ایرانی بر ویژگی‌های خاک و گیاه گندم انجام نشده است. همچنین تاکنون پژوهش‌های اندکی در مورد جذب نیترات با استفاده از زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت و اثر آن در اندازهٔ میکرون بر جذب نیترات در خاک صورت گرفته است. لذا با توجه به کمبود آب، ضرورت استفاده از پساب برای آبیاری و استراتژیک بودن این گیاه برای کشور، انجام این مطالعه ضروری است.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های زئولیت

در این مطالعه، زئولیت طبیعی از نوع کانی کلینوپتیلولایت بود و از سنگ‌های آتش‌فشانی معدن سمنان تهیه شد. این پژوهش از اندازه‌های میلی‌متری و میکرون برای زئولیت استفاده شد. ذرات میلی‌متری به‌وسیلهٔ الک‌های با مش ۱۲ و ۱۸ (۱/۶۸ و ۱ میلی‌متری) و ذرات میکرون به کمک دستگاه جت میل (Jet mill)، خُرد و با الک‌های با مش ۲۳۰ و ۲۷۰ (۶۳ و ۵۳ میکرون) جداسازی شدند. برای 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. مقادیر CEC برای زئولیت میلی‌متری و میکرون به‌ترتیب $cmol\ kg^{-1}$ ۱۴۰ و ۱۶۰ و مقادیر ECEC این نمونه‌ها به‌ترتیب $mmol\ kg^{-1}$ ۷۵ و ۱۰۵ تعیین شد.

تهیه زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت

برای 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 به‌صورت کاملاً دولایه‌ای (Bilayer) یا بخشی دولایه‌ای روی زئولیت قرار گرفته باشد. مقدار زئولیت اصلاح‌شده موردنیاز در ابعاد میلی‌متر و میکرومتر برای اصلاح خاک محاسبه و برای تهیه زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت از HDTMA-Br(Mereck) استفاده و زئولیت به‌اندازه ۲۰۰ درصد ECEC تغییر سطح داده شد. برای این منظور ۵۵۰ گرم از زئولیت در اندازهٔ 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 و محلول رویی دور ریخته شد. زئولیت اصلاح‌شده حاصل دو بار با آب دیونیزه شده شسته و پس‌ازآن هوا خشک گردید (لی و همکاران، ۲۰۰۷؛ ژینگ، ۲۰۱۶). روش مشابهی برای تغییر سطح زئولیت با اندازهٔ ذرات میکرون به‌کاربرده شد، با این تفاوت که غلظت محلول HDTMA برابر با ۷۰ میلی‌مولار بود.

مطالعهٔ مزرعه‌ای و جمع‌آوری داده‌ها

این تحقیق در سال زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۴ در محل گلخانهٔ پژوهشی دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان در ۲۷ ستون استوانه‌ای از جنس پلی‌اتیلن با قطر داخلی برابر با ۱۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۵ سانتی‌متر انجام شد. این آزمایش مشتمل بر ۹ تیمار و ۳ تکرار بود. طرح از نظر آماری در قالب آزمایش فاکتوریل با ۳ فاکتور انجام شد. فاکتور اول سطح کاربرد اصلاح‌کننده (۲۰ و ۶۰ گرم در کیلوگرم خاک)، فاکتور دوم اندازهٔ ذرات اصلاح‌کننده (میلی‌متر و میکرون) و فاکتور سوم نوع اصلاح‌کننده (زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت) است. تیمارهای پژوهش مطابق جدول ۱ است. خاک مورد استفاده در این پژوهش از منطقه مرتعی ورودی شهر تیران واقع در استان اصفهان به‌صورت لایه‌ای تهیه و بعد از آوردن به محل گلخانه، هوا خشک و سپس با هم مخلوط و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. بافت خاک با توجه به درصد شن، سیلت و رس نمونهٔ خاک، از نوع خاک لوم شنی است. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک موردنظر در جدول ۲ ارائه‌شده است. در کف هر ستون لایه‌ای به ضخامت ۵ سانتی‌متر از شن به‌عنوان فیلتر قرارگرفت. همچنین برای اجتناب از وقوع جریان ترجیحی (Preferential flow) در دیواره‌های ستون خاک، بدنهٔ داخلی آن‌ها با گریس چرب و به‌وسیلهٔ 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 مرحله به مرحله پر کردن ستون‌ها با استفاده از روش وزنی، ریخته شد تا از ایجاد

خلل و فرج بزرگ در خاک جلوگیری و وضعیتی مشابه با وضعیت طبیعی خاک ایجاد شود. 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 برای آبیاری در نظر گرفته شد. برای جمع‌آوری زه‌آب، سوراخی‌هایی به ابعاد ۲۵ میلی‌متر در کف هر ستون ایجاد شد که به‌وسیله تبدیل و لوله‌های پلاستیکی به ظروف دربسته‌ای متصل شدند، به این صورت زه‌آب مستقیماً از ستون خاک به ظروف جمع‌آوری دربسته منتقل شد و درنتیجه تبخیر زه‌آب به حداقل رسید. به‌محض جمع‌آوری نمونه‌ها، ظروف نمونه‌برداری به آزمایشگاه منتقل و تا زمان اندازه‌گیری پارامترهای موردنظر در دمای ۴ درجه سلسیوس در یخچال نگهداری شدند. برای اندازه‌گیری غلظت (NO_3-N) موجود در زهاب از روش رنگ‌سنجی استفاده شد (کنی و نیلسون، ۱۹۸۲).

جدول ۱- مشخصات تیمارهای مورد مطالعه

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

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تهیه شده از منطقه تیران

پارامتر	مقدار	واحد
شن	۶۲/۸	(%)
سیلت	۲۱/۵	(%)
رس	۱۶/۷	(%)
pH*	۷/۵	-
EC*	۰/۹۵	(dS m^{-1})
CEC	۷/۱	(cmol kg^{-1})
OC	۰/۸۵	(%)
Na*	۴۹/۳	(mg kg^{-1})
نیتروژن کل (N)	۰/۰۳	(%)
K*	۱۰۶/۱	(mg kg^{-1})
P*	۵/۱۸	(mg kg^{-1})

* اندازه‌گیری در عصاره ۲:۱ (خاک و آب مقطر)

کشت بذر گیاه گندم، رقم پیشتاز (*Adlan/Ias 58*) در عمق ۱ سانتی‌متری داخل خاک انجام شد. از آنجایی‌که عناصر N-P-K از جمله عناصر مورد نیاز برای رشد کلیهٔ گیاهان هستند، این عناصر پس از انجام تجزیهٔ خاک و تعیین میزان قابل دسترس عناصر غذایی موجود در خاک، در اختیار گیاه قرار داده شد. 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 توصیهٔ فنی کود و نیاز خاک، کودهای سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم قبل از کشت تماماً در یک نوبت به خاک داده شد.

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پساب دانشگاه صنعتی اصفهان

پارامتر	مقدار در پساب	واحد
TSS	۵۴۴/۹۳	(mg lit^{-1})
Turbidity	۵۵/۸۳	(NTU)
pH	۷/۸	-
EC	۱/۱۴	(dS m^{-1})
SAR	۸/۲۵	(meq $L)^{0.5}$
NO_3-N	۸/۹	(mg L^{-1})
NH_4-N	۱۸/۵۲	(mg L^{-1})
K	۱۵/۴۲	(mg L^{-1})
P	۲/۱	(mg L^{-1})
Na	۸۴/۹	(mg L^{-1})

عملیات برداشت پس از رسیدگی فیزیولوژیکی دانه‌ها و با انجام ۱۴ مرتبه آبیاری برای تمام تیمارها انجام شد. زمان آبیاری ستون‌های خاک ۵۰ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه در نظر گرفته شد. در طول زمان کشت به‌صورت روزانه ستون‌های شاهد رطوبتی وزن شده و با رسیدن وزن آن‌ها به وزن ۵۰ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه عمل آبیاری انجام شد. برای آبیاری، از پساب خروجی حوضچه‌های تصفیهٔ اولیهٔ فاضلاب واقع در دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شد. در طول اجرای آزمایش، ۴ مرتبه (یک‌بار در ماه) پساب دانشگاه صنعتی اصفهان تحلیل و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن اندازه‌گیری شد. میانگین نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

برای اندازه‌گیری شاخص سطح برگ (LAI)، سطح برگ‌های سبز گیاه توسط خط‌کشی با دقت یک میلی‌متری اندازه‌گیری شد (اوون، ۱۹۶۸؛ داکمین و همکاران، ۲۰۰۵).

$$LA = a\,(L \times W) \quad (1)$$

$$LAI = \frac{LA}{A} \quad (2)$$

که در آن‌ها LA سطح برگ (مترمربع)، L طول برگ، W عرض برگ، A مساحت ستون آزمایشی (مترمربع) و a ضریب کاهشی وابسته به شکل برگ که برای گیاه گندم برابر ۰/۸۷ است.

ارتفاع گیاه قبل از برداشت و از قسمت طوقه تا انتهای آخرین برگ بالغ (برگ پرچم) و قطر ساقه به‌ترتیب توسط خط کش میلی‌متری و کولیس مکانیکی با دقت میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در برداشت گیاهان، اندام هوایی از ناحیهٔ طوقه توسط یک تیغ بریده شد. سپس نمونه‌ها درون پاکت‌های کاغذی مخصوص در داخل خشک‌کن با دمای ۷۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند. پس از ۴۸ ساعت وزن خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. بلافاصله پس از قرائت وزن خشک اندام هوایی، دانه‌ها از سنبله جدا و وزن آن‌ها با ترازو، با دقت ۰/۰۲ گرم اندازه‌گیری شد. همچنین برای تعیین نیتروژن اندام هوایی و دانه از روش نووزامسکی و همکاران (۱۹۷۴) استفاده شد. در برداشت ریشه‌ها، ابتدا خاک درون ستون با دقت خارج شد. سپس ریشه‌ها درون تشت‌های آب قرار گرفتند. پس از سست شدن خاک اطراف ریشه، ریشه با احتیاط از خاک جدا و محتاطانه در برابر جریان آب، شست‌وشو تا ذرات غیر از ریشه (مانند ذرات خاک، مواد آلی و ...)، تا حد امکان از آن جدا شوند. در آخر از طریق اختلاف حجم ایجادشده پس از قرارگیری ریشه در حجم مشخصی از آب، حجم ریشه برحسب سانتی‌مترمکعب در بوته محاسبه شد (زایکین، ۱۹۷۶). پس از اندازه‌گیری حجم ریشه، وزن خشک ریشه‌ها نیز همانند اندام هوایی، اندازه‌گیری و تجزیهٔ آماری صفت‌ها و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای SAS 9.4 و Excel انجام شد. همچنین مقایسهٔ میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD و در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

بررسی اثر زئولیت بر صفت‌های کمی گندم

با توجه به نتایج تجزیه واریانس جدول ۴، اثر نوع اصلاح‌کننده بر عملکرد دانه و وزن خشک در سطوح ۱ و ۵ درصد معنی‌دار شد. میزان مادهٔ خشک گیاه و همچنین عملکرد دانه در تیمار زئولیت طبیعی نسبت به تیمارهای زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت به‌طور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) بیشتر است؛ به‌طوری‌که بیشترین عملکرد دانه و وزن خشک گیاه گندم (۱/۳۳ و ۳/۱۷ گرم در بوته) در تیمار زئولیت طبیعی به دست آمد؛ در حالیکه نسبت به شرایط کنترل‌شده میزان عملکرد دانه (۲/۳ و ۰/۸ درصد) و وزن خشک (۱۰/۸۴ و ۹/۸ درصد) به‌ترتیب در تیمارهای زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت افزایش یافت (جدول ۵). نتایج مشابهی توسط دیگر متخصصان برای سایر گیاهان زراعی و باغی به دست آمده است (بیلو و جنتری، ۱۹۸۷؛ راپ، ۱۹۸۹؛ باربر و همکاران، ۱۹۹۴). زئولیت طبیعی از طریق جذب داخلی آمونیوم می‌تواند آن را به‌طور فیزیکی از فعالیت میکروارگانیسم‌ها و نیترات‌سازی حفظ کند. همچنین این نتایج می‌تواند به‌دلیل تفاوت در جذب و واجذب NH_4^+ و NO_3-N به‌ترتیب از زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت باشد (ملکیان و همکاران، ۲۰۱۱). جذب و واجذب NH_4^+ روی زئولیت طبیعی در اثر تبادل کاتیونی و انتشار است (اکبری، ۱۳۸۴)؛ در حالیکه جذب و واجذب NO_3-N روی زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت به تبادلات آنیونی سطحی نسبت داده می‌شود (بای بوردی، ۱۳۸۱). این بدان معناست که احتمالاً زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت نسبت به زئولیت طبیعی در رهاسازی به‌موقع نیتروژن مورد نیاز برای رشد گیاه قدری ضعیف‌تر عمل

کرده است؛ بنابراین می‌توان بیان نمود که زئولیت طبیعی بدین سبب باعث افزایش کارایی کود نیتروژنی و در نتیجه رشد بهتر گیاه می‌شود.

نتایج مشابهی را غلامحسینی و همکاران (۱۳۸۷) برای گیاه کلزا، حسینی ابری و همکاران (۱۳۸۹) برای گیاه گلرنگ، خاشعی و همکاران (۲۰۰۷)، لطیفه و همکاران (۲۰۱۱) و ملکیان و همکاران (۲۰۱۱) برای گیاه ذرت، حسینی چمنی و همکاران (۱۳۹۸) برای گیاه ماش گزارش شده است؛ در حالی که اندازهٔ ذرات اصلاح‌کنندهٔ 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 هستند (جدول ۴). کاربرد سطح بالاتر اصلاح‌کننده به‌طور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) وضعیت رشد بهتری را برای گیاه نسبت به کاربرد کمتر اصلاح‌کننده ایجاد کرده است (جدول ۵). 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 که این تفاوت در سطح بالای کاربرد اصلاح‌کننده‌ها معنی‌دار است (شکل ۱). با بررسی اثر متقابل تیمارها بیشترین میزان وزن خشک و عملکرد دانه در تیمار Zmb و به‌ترتیب ۳/۴۹ گرم در بوته و ۱/۳۷ گرم در بوته مشاهده شد.

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر نوع اصلاح‌کننده بر وزن خشک و حجم ریشه در سطح ۵ درصد معنی‌دار است (جدول ۴). میزان وزن خشک و حجم ریشه گیاه در تیمارهای زئولیت طبیعی نسبت به زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت به‌طور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) بیشتر است (جدول ۵). بیشترین وزن خشک ریشه و حجم ریشه گیاه در تیمار زئولیت طبیعی به‌ترتیب به مقدار ۲۵۸ میلی‌گرم در بوته و ۲/۱۶ سانتی‌مترمکعب در بوته مشاهده شد. در مقایسه با شرایط کنترل‌شده مقادیر وزن خشک ریشه و حجم ریشه گیاه به‌ترتیب در تیمارهای زئولیت طبیعی ۶/۶۱ و ۵/۳۷ و در تیمارهای زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت اندازهٔ ذرات اصلاح‌کننده، تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک و حجم ریشه ندارد (جدول ۴)؛ اما سطح کاربرد اصلاح‌کننده و اثر متقابل نوع و سطح کاربرد اصلاح‌کننده داری اثر معنی‌داری در سطح ۱ و ۵ درصد است (جدول ۴). کاربرد سطح بیشتر اصلاح‌کننده به‌طور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) وضعیت رشد بهتری را برای رشد ریشه نسبت به کاربرد کمتر اصلاح‌کننده ایجاد کرده است (جدول ۵). بررسی اثر متقابل تیمارها نشان می‌دهد که وزن خشک و حجم ریشه در اثر کاربرد اصلاح‌کننده‌های خاک در مقایسه با تیمار کنترل بیشتر که این تفاوت در سطح بالای کاربرد اصلاح‌کننده‌ها معنی‌دار است (شکل ۱). با بررسی اثر متقابل تیمارها بیشترین میزان حجم ریشه و وزن خشک ریشه به‌ترتیب در تیمارهای ZMb و Zmb (۲/۶۴ سانتی‌مترمکعب در بوته و ۲۷۱ میلی‌گرم در بوته) مشاهده شد. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌کنید میزان حجم ریشه در تیمارهای Zma، Zmb، ZMb، Smb،Sma و SMb نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب ۰/۵، ۱۱/۲۲، ۲۸/۷۸، ۰/۵، ۸/۷۸ و ۹/۲۷ درصد افزایش یافت و با تیمارهای ZMa و SMa اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین وزن خشک ریشه در تیمارهای Zma، Zmb، ZMa، ZMb، Sma، SMa،Smb و SMb نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب ۲/۰۷، ۱۲/۴۵، ۱/۶۶، ۱۲/۰۳، ۱/۶۶، ۱۰/۳۷، ۲/۰۷ و ۱۰/۳۷ درصد افزایش یافت (شکل ۱).

نتایج تجزیه واریانس حداکثر شاخص سطح برگ (LAI) نشان داد که تیمارهای کاربردی اثر معنی‌داری بر این پارامتر ندارند (جدول ۴). همچنین کاربرد زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت در اندازه‌ها و سطوح کاربردی مختلف تأثیر معنی‌داری بر ارتفاع و قطر گیاه اندازه‌گیری شده در انتهای فصل رشد نداشته است (جدول ۵). به‌طور کلی بیشترین شاخص سطح برگ (۲/۷۳)، ارتفاع گیاه (۵۰/۷ سانتی‌متر) و قطر ساقه (۲/۲۹ میلی-متر) در تیمار Zmb مشاهده شد

بررسی اثر زئولیت بر صفت‌های کیفی گندم

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تیمارهای اعمال شده بر میزان نیتروژن ساقه و برگ اثر معنی‌داری نداشت (جدول ۶) که با نتایج رنجبر چوبه و همکاران (۱۳۸۳) برای گیاه توتون، پرین و همکاران (۱۹۹۸)، خاشعی سیوکی و همکاران (۱۳۸۷) و ملکیان و همکاران (۲۰۱۱) برای گیاه ذرت و پرز و همکاران (۲۰۰۸) برای زیتون مطابقت دارد.

میزان نیتروژن دانه و نیتروژن برداشت شده توسط گیاه به‌طور معنی‌داری (در سطح ۱ درصد) تحت تأثیر نوع

اصلاح‌کننده، سطح کاربرد اصلاح‌کننده و اثر متقابل نوع و سطح کاربرد اصلاح‌کننده قرارگرفته است (جدول ۶). نتایج به‌دست آمده با نتایج رنجبر چوبه و همکاران (۱۳۸۳) برای گیاه توتون، پرین و همکاران (۱۹۹۸)، خاشعی سیوکی و همکاران (۱۳۸۷) و ملکیان و همکاران (۲۰۱۱) برای گیاه ذرت و پرز و همکاران (۲۰۰۸) برای زیتون مطابقت دارد. غلظت نیتروژن دانه و نیتروژن برداشت‌شده توسط گیاه در ستون‌های دریافت‌کننده زئولیت طبیعی به‌طور معنی‌داری (۱/۴۵ و ۲/۴۹ درصد) بیشتر از ستون‌های دریافت‌کننده زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت هستند. همچنین افزایش سطح کاربردی اصلاح‌کننده به‌طور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) سبب افزایش میزان غلظت نیتروژن دانه و نیتروژن برداشت‌شده توسط گیاه شده است. نتایج همچنین نشان داد که به‌دلیل کاهش تلفات نیتروژن در اثر کاربرد اصلاح‌کننده‌های زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت، وضعیت رشد بهتری برای گیاه در مقایسه با تیمار کنترل فراهم شده است. میزان نیتروژن دانه و نیتروژن برداشت شده توسط گیاه در اثر کاربرد زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت نسبت به تیمار کنترل افزایش داشته، که این اختلاف در سطح بالای کاربرد اصلاح‌کننده‌ها معنی‌دار است؛ به‌گونه‌ای که میزان غلظت نیتروژن دانه و نیتروژن برداشت‌شده توسط گیاه در تیمارهای Zmb، ZMb، Smb و SMb نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب ۵/۳۷، ۴/۸۸، ۲/۴۴ و ۲/۴۴ درصد افزایش یافت. همچنین نیتروژن برداشت شده توسط گیاه در تیمارهای Zmb، Smb،ZMb وSMb نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب ۱۵/۴۷، ۱۴/۵۵، ۹/۷۳ و ۹/۵۷ افزایش یافت و با تیمارهای Zma، Sma،ZMa و SMa اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۲) که دلیل آن مهیا بودن نیتروژن بیشتر برای جذب در تیمارهای اصلاح‌شده است.

جدول ۴- تجزیه واریانس عملکرد وزن خشک گیاه یا زیتوده (گرم در بوته)، عملکرد دانه (گرم در بوته)، شاخص سطح برگ LAI، ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)، قطر ساقه (میلی‌متر)،حجم ریشه (سانتی‌مترمکعب در بوته) و وزن خشک‌ریشه (میلی‌گرم در بوته)

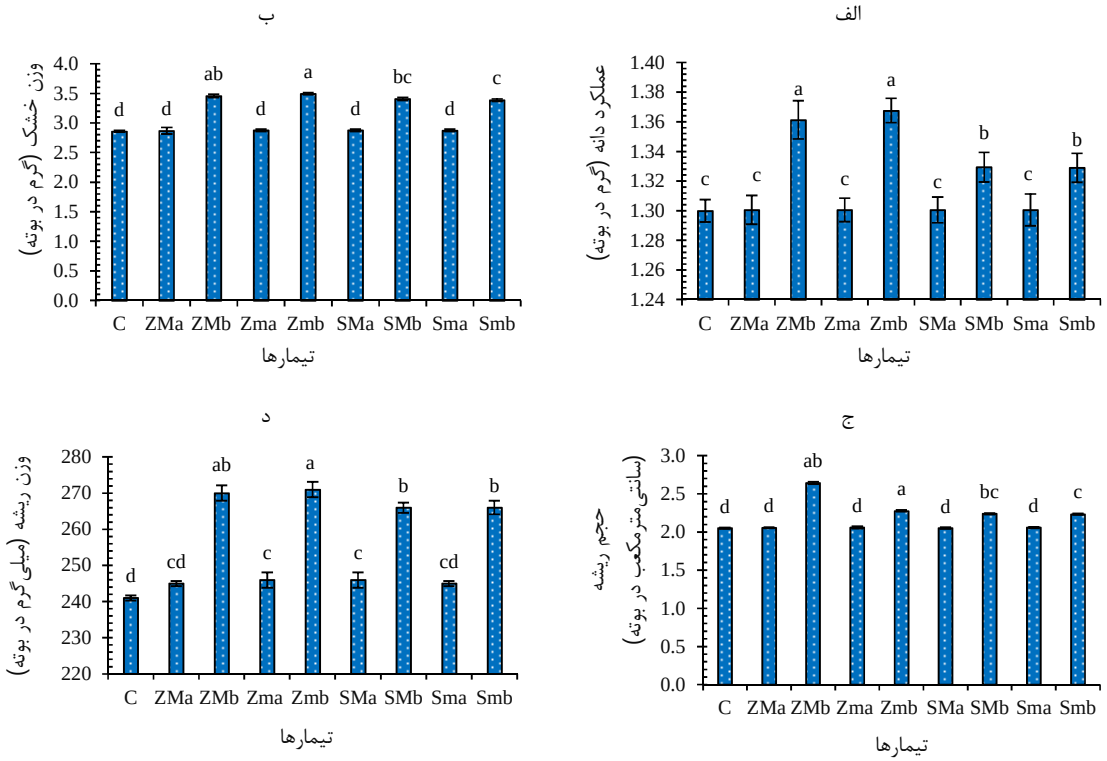
منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		عملکرد دانه (گرم در بوته)	وزن خشک (گرم در بوته)	حجم ریشه (سانتی‌مترمکعب در بوته)	وزن خشک ریشه (میلی گرم در بوته)	LAI	ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)	قطر ساقه (میلی‌متر)
نوع اصلاح‌کننده	۱	۰/۰۰۱۸۶۴۴۵**	۰/۰۰۸۴۳۷۵*	۰/۰۰۱۹۴۴*	۳۰/۳۷۵*	۰/۰۰۰۳۳۷۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۹۸۳۷۵
اندازه ذرات اصلاح‌کننده	۱	۰/۰۰۰۰۱۳۰۳	۰/۰۰۰۲۰۴۱۷	۰/۰۰۰۱۸۱۵	۰/۳۷۵	۰/۰۰۰۰۳۷۵	۰/۰۶	۰/۰۰۱۸۳۷۵
سطح کاربرد اصلاح‌کننده	۱	۰/۰۱۲۸۰۹۶۸**	۱/۸۹۸۴۳۷۵**	۰/۲۳۴۰۳۷۵**	۳۱۰۵/۳۷۵**	۰/۰۰۳۰۳۷۵	۱۳/۵۰	۰/۰۷۵۹۳۷۵
اثر متقابل نوع در اندازه ذرات اصلاح‌کننده	۱	۰/۰۰۰۰۱۶۸۶	۰/۰۰۱۸۳۷۵	۰/۰۰۰۰۹۶	۳/۳۷۵	۰/۰۰۰۹۳۷۵	۲/۵۳۵	۰/۰۲۷۳۳۷۵
اثر متقابل نوع در سطح کاربرد اصلاح‌کننده	۱	۰/۰۰۱۸۶۷۸۹**	۰/۰۱۰۰۰۴۱۷*	۰/۰۰۱۵۳۶*	۳۰/۳۷۵*	۰/۰۰۰۹۳۷۵	۱/۲۱۵	۰/۰۰۰۹۳۷۵
اثر متقابل اندازه ذرات در سطح کاربرد	۱	۰/۰۰۰۰۱۲۱۶	۰/۰۰۰۰۳۷۵	۰/۰۰۰۰۱۳۵	۰/۳۷۵	۰/۰۰۰۹۳۷۵	۰/۲۴	۰/۰۰۳۰۳۷۵
اثر متقابل نوع در اندازه ذرات در سطح کاربرد	۱	۰/۰۰۰۰۱۷۲۰	۰/۰۰۰۷۰۴۱۷	۰/۰۰۰۱۵	۰/۳۷۵	۰/۰۰۰۹۳۷۵	۰/۱۳۵	۰/۰۳۱۵۳۷۵
ضریب تغییرات		۷/۱	۶/۷۸	۶/۷۷	۶/۹۶	۴/۱۴	۶/۳۶	۸/۰۱

** و * به‌ترتیب نشانگر معنی‌دار بودن اثر تیمار آزمایشی در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد می‌باشند.

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های[1] عملکرد وزن خشک گیاه یا زیتوده (گرم در بوته)، عملکرد دانه (گرم در بوته)، شاخص سطح برگ LAI، ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)، قطر ساقه (میلی‌متر)، حجم ریشه (سانتی‌مترمکعب در بوته) و وزن خشک‌ریشه (میلی‌گرم در بوته)

تیمار آزمایشی	عملکرد دانه (گرم در بوته)	وزن خشک (گرم در بوته)	حجم ریشه (سانتی‌مترمکعب در بوته)	وزن خشک‌ریشه (میلی‌گرم در بوته)	LAI	ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)	قطر ساقه (میلی‌متر)
نوع اصلاح‌کننده							
زئولیت طبیعی	۱/۳۳۲۵۰۸^{a}	۳/۱۷۳۳۳^{a}	۲/۱۶^{a}	۲۵۸^{a}	۲/۶۹^{a}	۵۰/۰۲^{a}	۲/۲۴^{a}
زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت	۱/۳۱۴۸۸^{b}	۳/۱۳۵۸۳^{b}	۲/۱۵^{b}	۲۵۵/۷۵^{b}	۲/۷۰^{a}	۴۹/۹۸^{a}	۲/۱۸^{a}
اندازه ذرات اصلاح‌کننده							
میلی‌متر	۱/۳۲۲۹۵۸^{a}	۳/۱۵۱۶۷^{a}	۲/۱۵^{a}	۲۵۶/۷۵^{a}	۲/۶۹^{a}	۵۰/۰۵^{a}	۲/۲۲^{a}
میکرومتر	۱/۳۲۴۴۳۱^{a}	۳/۱۵۷۵^{a}	۲/۱۶^{a}	۲۵۷^{a}	۲/۶۹^{a}	۴۹/۹۵^{a}	۲/۲۰^{a}
سطح کاربرد اصلاح‌کننده ($g\ kg^{-1}$)							
۲۰	۱/۳۰۰۵۹۲^{b}	۲/۸۷۳۳۳^{b}	۲/۰۵^{b}	۲۴۵/۵^{b}	۲/۶۹^{a}	۴۹/۲۵^{a}	۲/۲۷^{a}
۶۰	۱/۳۴۶۷۹۷^{a}	۳/۴۳۵۸۳^{a}	۲/۲۵^{a}	۲۶۸/۲۵^{a}	۲/۷۱^{a}	۵۰/۷۵^{a}	۲/۱۶^{a}

۱- اعداد هر تیمار آزمایشی در هر ستون که دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

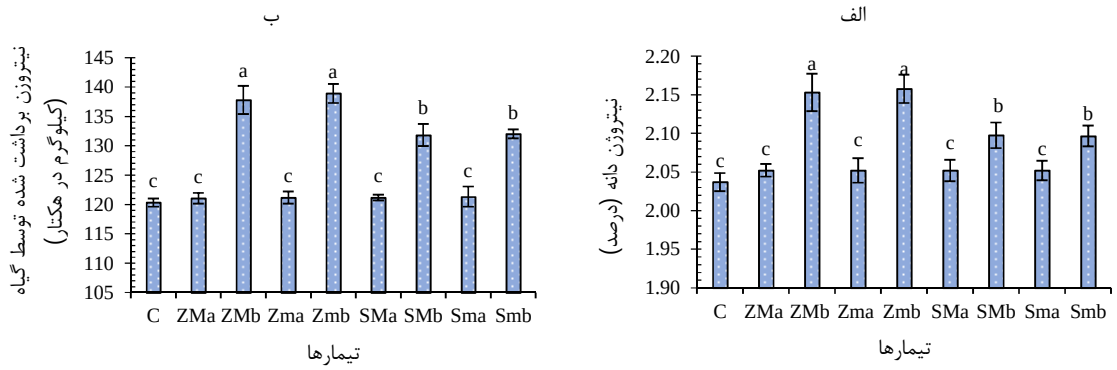


شکل ۱- آثار متقابل تیمارهای اعمال‌شده بر الف) عملکرد دانه، ب) وزن خشک، ج) حجم ریشه و د) وزن ریشه

جدول ۶- تجزیهٔ واریانس میزان نیتروژن کاه گندم (درصد)، نیتروژن دانهٔ گندم (درصد) نیتروژن برداشت شده توسط گیاه (کیلوگرم بر هکتار)، میزان زه‌آب خروجی در طول دوره رشد (میلی‌متر) و مقدار کل نیترات آبشویی شده (کیلوگرم بر هکتار)

		میانگین مربعات				
منبع تغییرات	درجه آزادی	N کاه گندم (درصد)	N دانه گندم (درصد)	N برداشت‌شده توسط گیاه (کیلوگرم بر هکتار)	میزان زه‌آب (میلی‌متر)	نیترات آبشویی شده (کیلوگرم بر هکتار)
نوع اصلاح‌کننده	۱	۰/۰۰۰۰۳۰۳۷	۰/۰۰۵۰۷۵۰۴**	۵۹/۷۶۷۵۵۹**	۷/۶۹۵۳۳۷۵۰	۱۸/۰۹۸۰۳۴
اندازه ذرات اصلاح‌کننده	۱	۰/۰۰۰۰۱۸۳۸	۰/۰۰۰۰۰۵۰۴	۰/۹۲۵۲۷۶	۰/۲۳۴۰۳۷۵۰	۲/۱۹۴۳۳۵۴
سطح کاربرد اصلاح‌کننده	۱	۰/۰۰۰۱۳۵۳۸	۰/۰۳۳۰۷۸۳۸**	۱۱۶۹/۳۹۱۳۷۶**	۹۵/۱۶۱۸۳۷۵۰	۲۵۲/۱۹۵۱۸۳۴**
اثر متقابل نوع در اندازه ذرات اصلاح‌کننده	۱	۰/۰۰۰۰۱۸۳۸	۰/۰۰۰۰۱۲۰۴	۰/۲۹۲۴۳۰	۲/۷۹۴۸۳۷۵۰	۰/۰۰۰۳۶۰۴
اثر متقابل نوع در سطح کاربرد اصلاح‌کننده	۱	۰/۰۰۰۰۶۳۳۸	۰/۰۰۵۰۷۵۰۴**	۶۵/۰۶۴۸۸۳**	۸/۶۷۶۰۳۷۵۰	۱/۹۴۷۶۹۰۴
اثر متقابل اندازه ذرات در سطح کاربرد	۱	۰/۰۰۰۰۰۳۳۷	۰/۰۰۰۰۰۵۰۴	۰/۳۸۱۲۳۹	۱/۱۴۸۴۳۷۵۰	۰/۲۳۸۲۰۳۴
اثر متقابل نوع در اندازه ذرات در سطح کاربرد	۱	۰/۰۰۰۰۰۳۳۷	۰/۰۰۰۰۱۲۰۴	۰/۳۲۰۶۰۳	۰/۹۰۰۹۳۷۵۰	۰/۴۵۴۵۷۵۴
خطای آزمایش	۱۶	۰/۰۰۰۰۳۳۳۷	۰/۰۰۰۵۰۶۲۵	۴/۳۷۱۹۳۸	۲۵/۰۲۲۴۵	۵/۵۲۹۱۳۷۵
ضریب تغییرات		۲/۳۹	۲/۰۷۷	۲/۶۳	۸/۶۸	۸/۸۵

** و * به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ معنی‌دار بودن اثر تیمار آزمایشی در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد هستند.



شکل ۲- اثرات متقابل تیمارهای اعمال‌شده بر الف) نیتروژن دانه و ب) نیتروژن برداشت‌شده توسط گیاه

بررسی اثر زئولیت بر آبشویی نیتروژن

نتیجهٔ آنالیز واریانس میزان کل NO_3-N آبشویی شده در طول دورهٔ رشد نشان داد که اثر نوع اصلاح‌کننده بر میزان نیتروژن آبشویی شده معنی‌دار نیست (جدول ۶). اگرچه زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت به‌طور معنی‌داری متوسط غلظت NO_3-N زه‌آب را نسبت به زئولیت طبیعی کاهش داده، میزان کل NO_3-N آبشویی شده در طول دورهٔ رشد تحت تأثیر نوع اصلاح‌کننده قرار نگرفته است (جدول ۶) نتیجهٔ به دست‌آمده احتمالاً به‌دلیل تفاوت در جذب و واجذب NH_4^+ و NO_3-N به‌ترتیب از زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت در طول دوره مطالعه است. از طرفی میزان NO_3-N آبشویی شده علاوه بر غلظت NO_3-N زهاب تحت تأثیر حجم زه‌آب خروجی نیز قرار دارد، البته میزان زه‌آب خروجی در طول دورهٔ رشد تحت تأثیر تیمارهای اعمال‌شده قرار نگرفت است (جدول ۶). حجم زهاب در طول دوره رشد با توجه به میزان برداشت گیاه، تبخیر و میزان آبیاری متغیر است؛ به همین دلیل با وجود معنی‌دار بودن اثر اصلاح‌کننده بر غلظت NO_3-N زه‌آب، میزان NO_3-N کل خروجی تحت تأثیر نوع اصلاح‌کننده قرار نگرفته است.

جدول ۷- مقایسه میانگین‌های[1] میزان نیتروژن کاه گندم (درصد)، نیتروژن دانه گندم (درصد) نیتروژن برداشت‌شده توسط گیاه (کیلوگرم بر هکتار) و مقدار کل نیترات آبشویی شده (کیلوگرم بر هکتار

تیمار آزمایشی	N کاه گندم (درصد)	N دانه گندم (درصد)	N برداشت‌شده توسط گیاه (کیلوگرم بر هکتار)	میزان زه‌آب (میلی‌متر)
نوع اصلاح‌کننده				
زئولیت طبیعی	۰/۴۲^{a}	۲/۱۰^{a}	۱۲۹/۷۴^{a}	۲۷/۴۲^{a}
زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت	۰/۴۱^{a}	۲/۰۷^{b}	۱۲۶/۵۹^{b}	۲۵/۶۹^{a}
اندازه ذرات اصلاح‌کننده				
میلی‌متر	۰/۴۱^{a}	۲/۰۹^{a}	۱۲۸/۳۶^{a}	۲۶/۸۶^{a}
میکرومتر	۰/۴۲^{a}	۲/۰۹^{a}	۱۲۷/۹۷^{a}	۲۶/۲۵^{a}
سطح کاربرد اصلاح‌کننده($g\ kg^{-1}$)				
۲۰	۰/۴۱^{a}	۲/۰۵^{b}	۱۲۱/۱۸^{b}	۲۹/۸۰^{a}
۶۰	۰/۴۲^{a}	۲/۱۳^{a}	۱۳۵/۱۵^{a}	۲۳/۳۱^{b}

۱- اعداد هر تیمار آزمایشی در هر ستون که دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

سطح کاربرد اصلاح‌کننده تأثیر معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر میزان NO_3-N خروجی از ستون‌ها داشته است (جدول ۶). با افزایش سطح کاربرد اصلاح‌کننده میزان NO_3-N خروجی از ناحیه ریشه به‌طور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) کاهش‌یافته است (جدول ۷). بیشترین میزان NO_3-N آبشویی شده در سطح ۲۰ گرم بر کیلوگرم (۲۹/۸۰ کیلوگرم بر هکتار) و کمترین میزان NO_3-N آبشویی شده در سطح ۶۰ گرم بر کیلوگرم (۲۳/۳۱ کیلوگرم بر هکتار) به دست آمد. با افزایش سطح کاربرد اصلاح‌کننده، به‌دلیل افزایش جذب نیتروژن توسط ذرات زئولیت، کاهش شست‌وشوی نیتروژن اتفاق می‌افتد. در آزمایش‌های غلامحسینی و همکاران (۱۳۸۷) و ملکیان و همکاران (۲۰۱۱) نیز نتایجی مشابه با نتایج این پژوهش حاصل‌شده است. به‌طور کلی کاهش شست‌وشوی نیتروژن از طریق کاربرد زئولیت، ناشی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد شیمیایی و ساختمانی این مواد طبیعی است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر کاربرد زئولیت‌های طبیعی زئولیت طبیعی و اصلاح‌شده با سورفکتانت به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های خاک برای کنترل آبشویی نیترات و رشد گیاه گندم تحت آبیاری با پساب تصفیه‌شده انجام شد. نتایج نشان داد که کاربرد زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت به میزان ۶۰ گرم در کیلوگرم خاک بر کاهش آبشویی نیترات و رشد گیاه گندم مؤثر است. غلظت نیتروژن دانه و نیتروژن برداشت شده توسط گیاه در تیمار زئولیت طبیعی نسبت به تیمار زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. این بدان معنی است که مصرف زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح‌شده با سورفکتانت به‌عنوان اصلاح‌کنندهٔ خاک، آبشویی نیترات را به‌طور معنی‌داری کاهش و به‌تبع آن مقدار نیتروژن خاک در لایهٔ اول را افزایش می‌دهد. درنتیجه با افزایش فراهمی طولانی مدت نیتروژن در محیط ریشه نه‌تنها آلودگی محیط‌زیست کاهش می‌یابد، بلکه بازدهی محصول افزایش می‌یابد و به بهبود رشد گیاه کمک می‌کند. اندازهٔ ذرات اصلاح‌کننده‌ها اثر معنی‌داری بر آبشویی نیترات و رشد گیاه گندم نداشت. همچنین کاربرد اصلاح‌کننده‌ها در سطح ۲۰ گرم در کیلوگرم در کاهش آبشویی نیترات و رشد گیاه گندم چندان مؤثر نبود.

منابع

۱. اکبری ب. ۱۳۸۴. بررسی میزان اثربخشی نانو تکنولوژی در شاخه‌های مختلف بهداشت محیط. هشتمین همایش ملی بهداشت محیط. ۱۹-۱۷ آبان. بیمارستان امام خمینی تهران. ۱-۷.

۲. بای‌بوردی م. ۱۳۸۱. پیدایش و رده‌بندی خاک. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ نهم. ۷۱۶ ص.

۳. چوپان ی. خاشعی سیوکی ع. و شهیدی ع. ۱۳۹۷. اثر آبیاری با فاضلاب تصفیه شده شهر تربت حیدریه بر عملکرد مرفولوژیک پنبه رقم ورامین. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۲(۱): ۶۷-۷۷.

۴. حبیب‌پور کاشفی ا. قرینه م. ح. و شافعی‌نیا ر. ۱۳۹۶. تأثیر سطوح مختلف زئولیت بر عملکرد و اجزای عملکرد لوبیا قرمز (Phasaeolus vulgaris

L) تحت تنش خشکی در شرایط آب و هوایی کرمانشاه. دو فصلنامه فنآوری تولیدات گیاهی ۹(۱): ۱۴۱-۱۵۱.

۵. حسینی ابری س، ع، صالح پرهیزکار م، ر، ارادتمند اصلی د، و مرادی پ، ۱۳۸۹. تأثیر سطوح مختلف زئولیت بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه گلرنگ. دومین همایش ملی کشاورزی و توسعه پایدار (فرصت‌ها و چالش‌های پیش‌رو). ۱۲-۱۱ اسفند. شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز. ۱-۱۰.

۶. حسینی چمنی ع، قرینه م، ح، بخشنده ع، و لطفی جلال‌آبادی ا. ۱۳۹۸. تأثیر دور آبیاری، قارچ مایکوریزا و زئولیت بر عملکرد و کارآیی مصرف آب گیاه ماش، به زراعی کشاورزی. ۲۱(۲): ۱۳۰-۱۱۹.

۷. خاشعی سیوکی ع، و احمدی م، ۱۳۹۴. زئولیت‌ها: معرفی، خواص و کاربرد آن. بیرجند، انتشارات دانشگاه بیرجند، چاپ اول. ۱۰۳ ص.

۸. خاشعی سیوکی ع، کوچک‌زاده م، و شهابی‌فر م، ۱۳۸۷. تأثیر کاربرد زئولیت طبیعی کلینوپتیلولایت و رطوبت خاک بر اجزای عملکرد ذرت. مجله پژوهش‌های خاک (علوم آب و خاک) ۲۲(۲): ۲۳۵-۲۴۲.

۹. کوچکی ع، و خواجه حسینی م، ۱۳۹۱. زراعت نوین، جهاد دانشگاهی (دانشگاه مشهد)، چاپ دوم، ۷۱۲ ص.

۱۰. رنجبر چوبه م، اصفهانی م، کاووسی م، و یزدانی م، ۱۳۸۳. تأثیر آبیاری و مصرف زئولیت طبیعی بر عملکرد کمی و کیفی توتون کوکر ۳۴۷. پژوهش‌نامه علم کشاورزی. ۱(۲): ۷۱-۷۲.

۱۱. شفق کلوانق ج، زهتاب سلماسی س، نصراله زاده ص، هاشمی عمیدی ن، و دست برهان س، ۱۳۹۴. ارزیابی عملکرد و پروتئین دانه جو در واکنش به نیتروژن و تداخل علف‌های هرز. نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار. ۲۵(۴): ۱۱۹-۱۳۴.

۱۲. شعاعی ش، رفیعی ف، و کاشانی ع، ۱۳۸۸. تأثیر تناوب و کود نیتروژن بر غلظت P، N و K و عملکرد گندم. دانش نوین کشاورزی. ۱۷: ۲۷-۳۶.

۱۳. غلامحسینی م، آقاعلیخانی م، و ملکوتی م، ج، ۱۳۸۷. تأثیر سطوح مختلف نیتروژن و زئولیت بر عملکرد کمّی و کیفی علوفه کلزای پاییزه. نشریه علوم آب و خاک- علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۲(۴۵): ۵۴۸-۵۳۷.

۱۴. ملکوتی م، ج، و غیبی م، ن، 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. چاپ دوم. ۹۲ ص.

15. Barber K. L. Pierzynski G. M. and Vanderlip R. L. 1994. Ammonium/nitrate ratio effects on dry matter partitioning and radiation use efficiency of corn. Journal of Plant Nutrition. 17(5): 869-882.
16. Batista A. P. Monterio V. H. Coelho S. R. and Sampaio S. R. 2010. The effect of irrigation with swine wastewater on yield and seed quality of dry beans. Usebof manures and organic wastes to improve soil quality and nutrient balances, Western Parana state University, Brazil
17. Below F. E. and Gentry L. E. 1987. Effect of mixed N nutrition on nutrient accumulation, partitioning, and productivity of corn. Journal of Fertilizer Issues. 4(3): 79-85.
18. Breck D. W. 1964. Crystaline molecular sieves. Journal of Chemical Education. 41(12): 678-689.
19. Chapman H. D. 1965. Cation exchange capacity, In: Black, C. A. (Ed.), Method of Soil Analysis. SSA, Madison, Wisc. pp. 891-901.
20. Duchemin B. Hadria R. Erraki S. Boulet G. and Maisongrande P. 2005. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. Agricultural Water Management. 79: 1-27.
21. Keeney D. R. and Nelson D. W. 1982. N-inorganic forms Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. 2: 643-698.
22. 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.
23. 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.

24. 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.
25. Li Z. 2003. Use of surfactant-modified zeolite as fertilizer carriers to control nitrate release. Microporous Mesoporous Materials. 61(3): 181-188.
26. 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.
27. Malekian R. Abedi-Kuopai J. and Eslamian S. S. 2011. Influences of clinoptilolite and surfactant-modified clinoptilolite zeolite on nitrate leaching and plant growth, Journal of Hazardous Materials. 185: 970-976.
28. Mig D. W. and Dixon J. B. 1987. Quantitative determination of clinoptilolite in soils by a cation-exchange capacity method. Clays Clay Minerals. 35(6): 463-468.
29. Novozamsky I. van Eck R. van Schouwenburg J. and Walinga I. 1974. Total nitrogen determination in plant material by means of the indophenol blue method. Netherlands Journal of Agricultural Science. 22: 3-5.
30. Owen P. C. 1968. A measuring scale for areas of cereals leaves. Experimental Agricultural. 4: 275-278.
31. Perez R. Caballero J. Gil C. Benitez J. and Gonazalez L. 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 Biological Science. 2(1): 321-324.
32. 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.
33. Rehakova M. Covanova S. Dzivak M. Rimar J. and Gaval'ova Z. 2004. Agricultural and agrochemical uses of natural zeolite of the clinoptilolite type. Current Opinion Solid State Materials Science. 8(6): 397-404.
34. Rupp L. A. 1989. Greenhouse culture, in: James, D. W., and K. F. Toppers (Eds.), Utah fertilizer guide, Cooperative Extension Service, Utah State University, Logan, UT. pp. 42-54.
35. Xing Xuebing. 2016. Ionic-liquid-crafted zeolite for the removal of anionic dye methyl orange. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 59: 237-243.
36. Zykin V. A. 1976. The root system of wheat and the possibility of improving it by breeding. Vestnik S-kh. Nauki Moscow. 11: 43-48.