ارزیابی شاخص کیفیت خاک تحت تأثیر تیمارهای مختلف کود روی و ارتباط آن با غلظت روی در دانه گندم

صدیقه رحیمی*، مجید افیونی، امیرحسین خوش‌گفتار منش و مجتبی نوروزی[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۹/۱۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۹/۴)

چکیده

مدیریت کوددهی به مثبت و یا منفی شدن کیفیت خاک منجر می‌شود و در نهایت بر عملکرد گیاه و تغذیه انسان اثرگذار است. هدف از این پژوهش محاسبهٔ شاخص کیفیت خاک تحت تأثیر تیمارهای مختلف کودی روی بود. پژوهش در مزرعه تحقیقات کشاورزی رودشت انجام شد. تیمارها شامل لجن فاضلاب و کود گاوی (در دو سطح ۵ و ۱۰ تن در هکتار)، خاکستر لاستیک (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار)، پودر لاستیک (۱ تن در هکتار)، کود شیمیایی سولفات روی (۴۰ کیلوگرم در هکتار) و شاهد بود. پس از اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک با تعیین حدود بحرانی، کلاس‌بندی و امتیازدهی برای هرکدام از ویژگی‌های خاک، شاخص کیفیت محاسبه شد. با افزودن سه ویژگی غلظت روی قابل دسترس، آب قابل دسترس و تنفس میکروبی، این شاخص به‌صورت گسترش یافته محاسبه شد. نتایج نشان داد که افزودن ۱۰ تن در هکتار لجن فاضلاب و خاکستر لاستیک به‌خاک نسبت به‌سایر تیمارها باعث‌شد تا مقدار روی قابل جذب نسبت به‌شاهد به‌ترتیب ۸۰۰ و ۶۶۱ درصد افزایش یابد. کاربرد مقدار مناسب (۱۰ تن در هکتار) کودهای آلی باعث بهبود کیفیت خاک شد. محاسبهٔ مقدار شاخص کیفیت خاک گسترش‌یافته بهتر توانست به شناخت اثر تیمارها بر خاک کمک کند. همچنین، رابطهٔ مثبت و معنی‌دار در سطح یک درصد بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد و میزان روی دانه گندم وجود داشت. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که می‌توان در خاک منطقه رودشت از تیمار لجن فاضلاب ۱۰ تن در هکتار به‌دلیل افزایش ماده آلی و روی در خاک، آن را به‌عنوان یک کود مناسب توصیه نمود.

واژه‌های کلیدی: شاخص کیفیت خاک، روی، لجن فاضلاب، کود گاوی، خاکستر لاستیک

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: aghababaiyan@yahoo.com

مقدمه

مفهوم ارزیابی کیفیت خاک بر پتانسیل عملکرد، سطوح عناصر غذایی، کیفیت محیط زیست، امنیت تغذیه‌ای و سلامتی انسان توجه کرده است (۲).

روی عنصری لازم در چرخه زندگی گیاه، دام و انسان می‌باشد. از این جهت، افزایش غلظت روی در دانه گندم یک هدف جهانی است. با گسترش شهرنشینی، صنعتی شدن و تولید محصولات جدید مانند لجن فاضلاب و لاستیک‌های فرسوده، لازم است تا راهکارهای جدیدی برای حل این معضلات یافت شود. یکی از این راه حل‌ها افزودن آنها به خاک به‌عنوان کود می‌باشد. لجن فاضلاب و لاستیک‌های فرسوده در کنار سایر کودهای آلی و شیمیایی می‌توانند اثرهای مثبت یا منفی بر کیفیت خاک داشته باشند.

ممکن است با داشتن فلزات سنگین و هدایت الکتریکی بالا بر کیفیت خاک اثر منفی گذارند و یا با تأمین برخی از عناصر مورد نیاز گیاهان اثر مثبت بر کیفیت خاک داشته باشند. کیفیت خاک را به‌طور مستقیم نمی‌توان اندازه‌گیری نمود اما اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک که به مدیریت حساس هستند را می‌توان در قالب شاخص استفاده کرد (۶). کیفیت خاک، یک مفهوم نسبی و وابسته به شرایط است. هرگونه تغییر مدیریتی و انجام عملیات کشاورزی بر خاک، می‌تواند نتایجی مثبت یا منفی بر ویژگی‌های خاک بگذارد. با اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و ارتباط بین آنها کیفیت خاک تعیین می‌شود. برای یک هدف مدیریتی یک ویژگی خاک می‌تواند به روش‌های متفاوتی امتیازبندی شود. در نهایت امتیازهایی که به هر ویژگی خاک داده شده است در کنار هم تحت یک شاخص کلی با نام کیفیت خاک بررسی می‌شوند. کیفیت خاک را می‌توان به‌وسیله ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژی یک خاک و اثر متقابل بین آنها تعیین کرد (۱۲). الیوت (۷) معتقد است که خصوصیات خاک به‌طور جداگانه برای اندازه‌گیری کیفیت خاک کافی نمی‌باشند و قراردادن ویژگی‌های خاک در یک شاخص، کیفیت خاک را بهتر توجیه می‌کند. همچنین لارسون و پیرس (۹) فرمولی را برای ارزیابی کیفیت خاک و رابطه آن با تغییرات عملیات‌های مدیریتی پیشنهاد نمودند. روش‌های متنوعی در منابع برای محاسبه‌ی شاخص کیفیت خاک وجود دارند که از روند امتیازدهی استفاده می‌نمایند. پس‌از امتیاز دادن به هر خصوصیت و قرار دادن آنها در یک رابطه، شاخص کیفیت خاک برآورد می‌شود. آماکر و همکاران (۵) شاخص کیفیت خاک را معادل با جمع ارزش خصوصیات خاک می‌دانند. آنکنا و همکاران (۳) نیز هر یک از خصوصیات خاک را پس از اندازه‌گیری و ارزیابی، کلاس‌بندی نموده و برای هر کدام از کلاس‌ها ارزشی معادل یک تا دو تعریف کرده و پس از آن شاخص کیفیت خاک را برآورد کردند. تاکنون خصوصیات کیفی خاک برای تعیین کیفیت آن تحت مدیریت کودی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران امتیازبندی نشده‌اند. این پژوهش به‌منظور دستیابی به اهداف زیر انجام شد: ۱) تأثیر تیمارهای لجن فاضلاب، کود گاوی، پودر و خاکستر لاستیک و کود شیمیایی سولفات روی بر برخی از ویژگی‌های کیفی خاک، ۲) محاسبه شاخص کیفیت خاک با تعیین ارزش خصوصیات کیفی خاک و گسترش شاخص کیفیت خاک و ۳) تعیین رابطه بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد گیاه گندم.

مواد و روش‌ها

محل انجام پژوهش و خصوصیات خاک آن

این پژوهش در ایستگاه تحقیقات کشاورزی رودشت در شرق اصفهان با موقعیت جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۰ دقیقه شمالی و ۵۲ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۵۵ دقیقه شرقی انجام شد. منطقه رودشت دارای آب و هوای خشک با بارندگی سالیانه کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر و تبخیر و تعرق بیش از ۱۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد. خاک مورد مطالعه از لحاظ رده‌بندی آمریکایی (۲۰۱۰) Typic Haplocambids و دارای بافت رس سیلتی می‌باشد. قبل از شروع آزمایش نمونه‌های خاک (۳۰-۰ سانتی‌متر) از هر کرت جمع‌آوری و هواخشک شدند و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شدند. خاک مورد آزمایش

براساس حد بحرانی کمبود روی در خاک‌های منطقه (۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) دچار کمبود شدید روی قابل عصاره‌گیری با DTPA بود (جدول ۲)(۱۱).

آماده‌سازی کرت‌های آزمایش و اعمال تیمارهای کودی

این آزمایش در قالب کرت‌های خرد شده در زمان، پایه بلوک کامل تصادفی با ۸ تیمار کودی روی و ۲ مرحله زمانی نمونه‌برداری از خاک در ۳ تکرار انجام شد. تعداد ۲۴ کرت با ابعاد ۳ × ۵ متر و نواری با فاصله صفر تا ۵۰ سانتی‌متر بین کرت‌ها آماده شد. لجن فاضلاب از تصفیه‌خانه جنوب اصفهان تهیه شد و در دو سطح ۵ و ۱۰ تن در هکتار به‌کار برده شد. معیار انتخاب مقادیر لجن فاضلاب براساس مقدار گزارش شده توسط یگانه و همکاران (۱۴) درنظر گرفته شد. کود گاوی از رودشت تهیه گردید و براساس مصرف متداول کشاورزان رودشت، در دو سطح ۵ و۱۰ تن در هکتار به زمین افزوده شد.کود شیمیایی سولفات روی به‌مقدار ۴۰ کیلوگرم در هکتار (دارای ۲۸/۳ درصد روی) نیز براساس مقدار رایج مصرفی در اراضی کشاورزی به زمین افزوده شد. لاستیک از کارخانه لاستیک یزد تهیه و به اندازه ۲-۰/۵ سانتی‌متر پودر شد. بخشی از لاستیک‌های پودر شده به خاکستر لاستیک تبدیل شد.

مقادیر کاربرد پودر و خاکستر لاستیک براساس مقدار روی موجود در کود شیمیایی سولفات روی محاسبه شد (۱۳). پودر لاستیک (دارای ۱/۱۴ درصد روی) (جدول ۴) به مقدار ۱ تن در هکتار و خاکستر لاستیک به‌مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار به خاک اضافه شد و تیمارها تا عمق ۳۰ سانتی‌متری با خاک مخلوط شدند. لازم به ذکراست که انتخاب سطوح تیمارهای کود شیمیایی سولفات روی، پودر و خاکستر لاستیک به گونه‌ای انجام شد که تقریباً میزان روی یکسانی دارا باشند. همچنین یک تیمار شاهد بدون افزودن کود درنظر گرفته شد. برخی از ویژگی‌های لجن فاضلاب و کود گاوی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۳ آمده است. پس‌از گذشت ۳ هفته از اعمال تیمارهای کودی، گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.CV. Back Cross Roshan) کشت گردید. در طول دوره‌ی رشد، مراقبت‌های زراعی لازم نظیر آبیاری به‌صورت کرتی و براساس میزان تبخیر و تعرق ایستگاه هواشناسی ایستگاه تحقیقاتی رودشت تا حدود ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه و مبارزه با علف‌های هرز به‌صورت مکانیکی و شیمیایی انجام شد. مدیریت کودی براساس آزمون خاک و مدل توصیه کودی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور (۱۰) انجام شد. شوری آب آبیاری حدود ۱ دسی‌زیمنس بر متر بود. گندم‌های مورد آزمایش در مرحله رسیدگی کامل دانه برداشت شدند.

نمونه‌برداری از خاک و اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک در مراحل پنجه‌زنی و برداشت گندم بنا به نوع آزمایش به‌صورت مرکب و دست‌نخورده توسط سیلندرهایی از خاک صورت‌گرفت. حدود ۱ کیلوگرم خاک از هر کرت برای نمونه مرکب برداشته شد. پس از آن، ویژگی‌های فیزیکی جرم مخصوص ظاهری، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت و میزان آب قابل دسترس (۸) و ویژگی‌های شیمیایی قابلیت هدایت الکتریکی، pH، نیتروژن کل به‌روش کلدال، فسفر قابل دسترس به‌روش اولسن، ماده آلی به‌روش سوزاندن تر، آهن، روی، سرب و کادمیم قابل عصاره‌گیری باDTPA (۱) و پارامتر زیستی تنفس میکروبی (۴) اندازه‌گیری شد. محاسبات آماری و آنالیز همبستگی توسط نرم‌افزارهای SAS و SPSS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD انجام شد.

محاسبه شاخص کیفیت خاک به روش امتیازدهی

پس از اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک، با درنظر گرفتن دامنه تغییرات و میانگین داده‌های حاصل از آزمایش خاک و با توجه به منابع موجود برای عناصر و شرایط بهینه مورد نیاز گیاه برای رشد، کلاس‌بندی برای هر ویژگی انجام گرفت (جدول ۱). هر تیمار می‌تواند اثر مثبت یا منفی بر ویژگی‌های خاک داشته باشد. پس با دادن امتیاز به‌مقدار هر ویژگی از خاک و جمع کردن

جدول ۱. روند امتیازدهی برای ویژگی‌های مورد مطالعه تحت تأثیر تیمارهای مختلف کودی روی

ویژگی های فیزیکی خاک	مقدار	توصیف	امتیاز
جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	۱/۲۵<	خوب	۱
	۱/۲۵≥	ضعیف	۰
هدایت هیدرولیکی (سانتی‌متر بر ساعت)	۲۵>	خوب	۱
	۵-۲۵	متوسط	۰
	۵<	ضعیف	-۱
آب قابل دسترس (درصد)	۵<	ضعیف	۰
	۵≥	خوب	۱
ویژگی‌های شیمیایی خاک	مقدار	توصیف	امتیاز
قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	۴<	خوب	۱
	۶-۴	متوسط	۰
	۶>	ضعیف	-۱
pH	۷<	خوب	۱
	۸-۷	متوسط	۰
	۸>۶>	ضعیف	-۱
آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۵<	ضعیف	-۱
	۱۰-۵	متوسط	۰
	۱۰≥	خوب	۱
روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۱>	خوب	۱
	۱-۰/۵	متوسط	۰
	۰/۵<	ضعیف	-۱
نیتروژن (درصد)	۰۵/۰<	ضعیف	-۱
	۰/۰۵-۰/۱	متوسط	۰
	۰/۱>	خوب	۱
فسفر (میلی‌گرم بر کیلو گرم)	۲۵<	ضعیف	-۱
	۵۰-۲۵	متوسط	۰
	۵۰>	خوب	۱
ماده آلی (درصد)	۰/۵<	ضعیف	-۱
	۱-۰/۵	متوسط	۰
	۱>	خوب	۱
ویژگی زیستی خاک	مقدار	توصیف	امتیاز
تنفس میکروبی برای ۷ روز (میلی‌گرم کربن-دی‌اکسیدکربن بر کیلوگرم خاک بر روز)	۵۰≥	خوب	۱
	۵۰<	ضعیف	۰

امتیازها در شاخص کیفیت خاک، می‌توان اثرهای مثبت و منفی را در کنار هم بررسی کرد. این مطلب باعث درک بهتر اثر تیمارها بر کیفیت خاک می‌شود. در این مطالعه از رابطه‌ی ۱ و ۲ استفاده شد.

جدول ۲. برخی از خصوصیات خاک منطقه مورد مطالعه

خصوصیات	pH	قابلیت هدایت الکتریکی	ماده آلی	کربنات کلسیم معادل	نیتروژن کل	روی قابل عصاره‌گیری با TPA	فسفر قابل جذب
		dS/m	درصد			mg/kg	
مقدار	۷/۸	۶/۵۳	۰/۴۵	۳۰	۰/۰۳۳	۰/۱۶	۲۵

جدول ۳. برخی از خصوصیات شیمیایی لجن فاضلاب و کود گاوی

خصوصیات	pH	EC dS/m	ماده آلی	نیتروژن	پتاسیم	فسفر	روی	آهن	کادمیم	سرب
			درصد			mg/kg				
لجن فاضلاب	۶/۶	۸/۲	۲۳	۲/۱	۰/۲۷	۰/۳۲	۵۱۰	۱۴۷۴	۱/۲	۴۷
کود گاوی	۷/۶	۱۴/۵	۱۷	۱/۶	۰/۴۱	۰/۱۷	۷۶	۸۴۵	۰/۸	۱۴

رابطه (۱):

Soil Quality Index= $\sum_{i=1}^{n}(wFe, wOM, wN, wP, wEC, wpH, wBD, wKs)$ [۱]

در رابطه (۱) به‌ترتیب آهن Fe ، ماده آلی OM ، نیتروژن N ، فسفر P ، شوری EC ، pH، جرم مخصوص ظاهری BD و هدایت هدرولیکی اشباع Ks و مقدار امتیاز هر ویژگی w می‌باشد. رابطه (۱) پس از افزودن مقادیر امتیاز سه ویژگی تنفس میکروبی، میزان آب قابل دسترس و غلظت روی خاک به‌صورت شاخص کیفیت خاک گسترش‌یافته محاسبه شد.

DevelopSoil Quality Index= $\sum_{i=1}^{n}(wFe, wOM, wN, wP, wEC, wpH, wBD, wKs)wZn, wAWC, wBR)$ [۲]

در این رابطه غلظت روی Zn ، مقدار آب قابل استفاده AWC و تنفس میکروبی BR می‌باشد.

نتایج و بحث

خصوصیات خاک و کودهای آلی

خاک این منطقه جزو خاک‌های شور طبقه‌بندی می‌شود. همچنین این‌خاک دارای مقدار کم ماده آلی و درصد بالای آهک است که می‌تواند بر قابلیت دسترسی عناصر کم‌مصرف خصوصاً روی تأثیرگذار باشد (جدول۲).

تأثیر کاربرد تیمارهای مختلف کودی روی بر برخی از ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک

لجن فاضلاب نسبت به کود گاوی، pH اسیدی‌تری داشته و هدایت الکتریکی کمتری دارد. همچنین لجن فاضلاب نسبت به کود گاوی دارای مقدار بیشتری از ماده آلی و عناصر پرمصرف (مانند نیتروژن و فسفر) و عناصر کم‌مصرف (مانند روی وآهن) می‌باشد (جدول ۳). تیمار لجن ۱۰ تن در هکتار و پس از آن خاکستر لاستیک، بیشترین اثر را بر مقدار روی قابل دسترس خاک داشتند (جدول ۵). افزودن ۱۰ تن در هکتار لجن فاضلاب و خاکستر لاستیک به خاک باعث افزایش روی قابل جذب نسبت به شاهد به‌ترتیب به مقدار ۸۰۰ و ۶۶۱ درصد شد. تیمارهای ۱۰ تن در هکتار لجن و کود گاوی و پس از آن خاکستر لاستیک، بیشترین اثر را بر مقدار آهن قابل دسترس خاک داشتند. افزودن لجن فاضلاب به میزان ۱۰ تن در هکتار سبب افزایش غلظت آهن قابل جذب از ۳/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد به ۹/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم در مرحله‌ی برداشت گندم شد. تیمارهای۱۰ تن در هکتار لجن وکود گاوی، بیشترین اثر را بر مقدار ماده آلی خاک، نیتروژن کل و فسفر قابل دسترس داشتند. البته تیمار۱۰ تن در هکتار

جدول ۴. غلظت عناصر کم‌مصرف و سنگین در پودر لاستیک برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم

عنصر	روی	آهن	سرب	کادمیم
غلظت	۱۱۴۰۰	۱۰۵	۱۷/۶۴	۲/۲۳

جدول ۵. مقایسه میانگین ویژگی‌های شیمیایی خاک در دو مرحله نمونه‌برداری

مراحل	خصوصیات / خاک تیمار	روی قابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	آهن قابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	ماده آلی (درصد)	نیتروژن کل (درصد)	فسفر قابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	pH
پنجه‌زنی	لجن ۱۰	۰/۵۳^{de}	۵/۶۴^{d}	۰/۸۲^{ef}	۰/۰۶۶^{ab}	۴۳/۶^{de}	۵/۹۵^{cd}	۷/۷۴^{defg}
	لجن ۵	۰/۳۶^{def}	۴/۷۳^{e}	۰/۷۸^{ef}	۰/۰۶^{b}	۴۱/۸^{e}	۵/۶۲^{d}	۷/۷۷^{cde}
	کود گاوی ۱۰	۰/۱۹^{ef}	۵/۱۹^{de}	۰/۸۵^{cde}	۰/۰۶۲^{ab}	۴۳/۹۶^{de}	۷/۳^{a}	۷/۷۷^{bcd}
	کود گاوی ۵	۰/۱۹^{ef}	۴/۶۹^{e}	۰/۸۳^{def}	۰/۰۶^{b}	۴۲/۳۳^{e}	۶/۵۸^{b}	۷/۷۸^{abcd}
	پودر لاستیک	۰/۳^{ef}	۴/۶۱^{e}	۰/۵۱^{h}	۰/۰۳۲^{d}	۲۸/۹^{fg}	۶/۲^{bc}	۷/۸۲^{ab}
	خاکستر لاستیک	۰/۴۶^{def}	۴/۷۷^{e}	۰/۶۶^{g}	۰/۰۴^{cd}	۳۱/۲^{f}	۶/۲^{bc}	۷/۷۶^{def}
	سولفات روی	۰/۲۲^{ef}	۴/۵۳^{e}	۰/۴^{i}	۰/۰۳۴^{cd}	۲۵/۹۳^{ghi}	۶/۲۶^{bc}	۷/۸۱^{abc}
	شاهد	۰/۱۶^{f}	۳/۴۳^{f}	۰/۴۵^{hi}	۰/۰۳۳^{d}	۲۵^{hi}	۶/۵۳^{b}	۷/۸۳^{a}
برداشت	لجن ۱۰	۲/۷۹^{a}	۹/۶^{a}	۱/۱۲^{a}	۰/۰۷۱^{a}	۵۸/۹۶^{a}	۴/۶۸^{e}	۷/۷^{g}
	لجن ۵	۱/۹۳^{c}	۸/۷۱^{b}	۰/۹۳^{bcd}	۰/۰۶۴^{ab}	۵۰/۱۳^{bc}	۴/۵۹^{e}	۷/۷۲^{fg}
	کود گاوی ۱۰	۰/۴۲^{def}	۸/۶۹^{b}	۰/۹۷^{b}	۰/۰۶۷^{ab}	۵۲/۵۳^{b}	۴/۷۳^{e}	۷/۷۳^{defg}
	کود گاوی ۵	۰/۴^{def}	۸/۳^{b}	۰/۹۴^{bc}	۰/۰۶۴^{ab}	۴۶/۹۳^{cd}	۴/۶۲^{e}	۷/۷۵^{def}
	پودر لاستیک	۰/۷۲^{d}	۶/۶۵^{c}	۰/۷۴^{fg}	۰/۰۳۵^{cd}	۲۷/۹۶^{fgh}	۴/۵۸^{e}	۷/۷۶^{cdf}
	خاکستر لاستیک	۲/۳۶^{b}	۶/۸۶^{c}	۰/۷۷^{ef}	۰/۰۴۳^{c}	۲۹/۵۶^{f}	۴/۶^{e}	۷/۷۲^{efg}
	سولفات روی	۰/۴۸^{def}	۴/۹۷^{de}	۰/۷۴^{fg}	۰/۰۳۷^{cd}	۲۵/۰۶^{hi}	۴/۶۶^{e}	۷/۷۴^{defg}
	شاهد	۰/۳۱^{ef}	۳/۷۶^{f}	۰/۷۳^{fg}	۰/۰۳۷^{cd}	۲۳/۳^{i}	۴/۶۶^{e}	۷/۷۸^{bcd}

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده معنی‌داری و حروف مشابه نشان‌دهنده غیرمعنی‌داری است.

لجن فاضلاب مقدار بیشتری ماده آلی به خاک اضافه کرد و نشان دهنده‌ی آن است که مقدار و نوع کود آلی بر مقدار ماده آلی و همچنین مقدار عناصر پرمصرف خاک مؤثر است. لجن فاضلاب نسبت به کود گاوی مقدار بیشتری از عناصر پرمصرف را دارا بود (جدول ۳).

هدایت الکتریکی و pH خاک در مرحله‌ی برداشت نسبت به پنجه‌زنی کمتر بود. آب‌شویی املاح در طی آبیاری باعث کاهش هدایت الکتریکی خاک با گذشت زمان شده است و کاهش pH خاک را احتمالاً می‌توان به تجزیه مواد اضافه شده به خاک و گسترش ریشه و افزایش ترشحات و اسیدهای آلی ناشی از آن مربوط دانست. هدایت هیدرولیکی اشباع در مرحله‌ی پنجه‌زنی برای تمام تیمارهای اعمالی به خاک بیشتر از مرحله‌ی برداشت بود. علت آن را می‌توان به وجود خلل و فرج بیشتر در خاک در زمان کشت و کار نسبت داد. البته با گذشت زمان و طی آبیاری‌های مکرر، خلل و فرج خاک به خاطر ضعیف بودن خاکدانه‌ها و تخریب آنها مسدود شده و هدایت

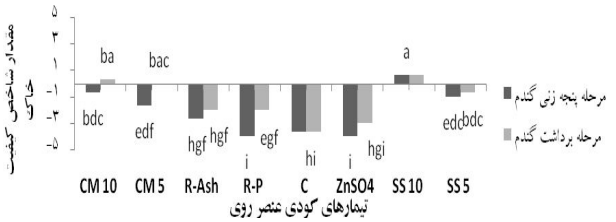
جدول ۶. مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی و زیستی خاک در دو مرحله نمونه‌برداری

مراحل نمونه‌برداری	خصوصیات خاک / تیمار	هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر ساعت)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	مقدار آب قابل دسترس (درصد)	تنفس میکروبی پایه (میلی‌گرم کربن دی‌اکسیدکربن بر کیلوگرم خاک بر روز)
پنجه‌زنی	لجن ۱۰	۶/۳۰^{b}	۱/۲^{de}	۸/۱۵^{a}	۱۲^{cd}
	لجن ۵	۲/۹۹^{d}	۱/۱۴^{e}	۵/۰۴^{bcde}	۹/۴۲^{de}
	کود گاوی ۱۰	۸/۴^{a}	۱/۲۵^{bcd}	۷/۴۵^{ab}	۶/۴۲^{ef}
	کود گاوی ۵	۴/۷۳^{c}	۱/۱۵^{de}	۵/۰۷^{bcde}	۸/۵۷^{de}
	پودر لاستیک	۰/۸۸^{ef}	۱/۲۳^{cde}	۶/۵۳^{abc}	۲/۵۷^{f}
	خاکستر لاستیک	۱/۱۲^{e}	۱/۱۷^{de}	۶/۳۲^{abcd}	۹/۴۲^{de}
	سولفات روی	۳/۸۱^{d}	۱/۱۴^{e}	۴/۳۹^{cde}	۶/۸۵^{def}
	شاهد	۶/۲۶^{b}	۱/۱۷^{de}	۶/۹۵^{abc}	۸/۵۷^{de}
برداشت	لجن ۱۰	۰/۶۶^{ef}	۱/۳۴^{ab}	۷/۰۶^{abc}	۱۸/۴۲^{ab}
	لجن ۵	۰/۱۱^{f}	۱/۳۵^{ab}	۳/۶۱^{de}	۱۶/۲۸^{bc}
	کود گاوی ۱۰	۰/۶۳^{ef}	۱/۳۲^{abc}	۷/۱۲^{abc}	۲۳/۱۴^{a}
	کود گاوی ۵	۰/۴۷^{ef}	۱/۳۰^{abc}	۷/۳^{ab}	۱۹/۹۲^{ab}
	پودر لاستیک	۰/۲۰^{f}	۱/۳۵^{ab}	۵/۰۵^{bcde}	۱۰/۷۱^{de}
	خاکستر لاستیک	۰/۲۵^{ef}	۱/۳۸^{a}	۷/۸۸^{a}	۹/۴۲^{de}
	سولفات روی	۰/۷۳^{ef}	۱/۳۵^{ab}	۲/۷۲^{e}	۱۱/۳۵^{cde}
	شاهد	۰/۳۷^{ef}	۱/۳۶^{a}	۵/۹۳^{abcd}	۷/۷۱^{def}

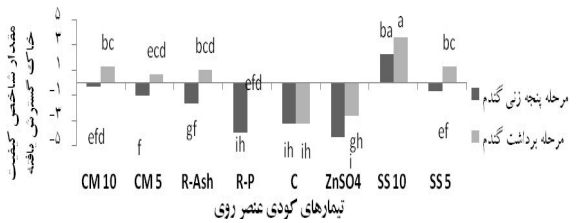
حروف غیر مشابه نشان‌دهنده معنی داری و حروف مشابه نشان‌دهنده غیر معنی‌داری است.

هیدرولیکی کاهش یافته است. بیشترین هدایت هیدرولیکی اشباع مربوط به تیمار۱۰ تن در هکتار کود گاوی و پس از آن لجن فاضلاب بود.

افزودن کود گاوی ۱۰ تن در هکتار باعث افزایش هدایت هیدرولیکی از ۶/۲۶ سانتی‌متر بر ساعت در تیمار شاهد به ۸/۴ سانتی‌متر بر ساعت شد. در مرحله‌ی پنجه‌زنی بین تیمارهای کودی، تفاوت معنی‌داری برای ویژگی جرم مخصوص ظاهری نبود، اما کمتر از مرحله‌ی برداشت گندم بود. علت کاهش این ویژگی در مرحله پنجه‌زنی، افزوده شدن تیمارها با جرم مخصوص کمتر به خاک می‌باشد. با گذشت زمان و تجزیه شدن تیمارها و یا آب‌شویی مواد آلی، جرم مخصوص ظاهری افزایش یافت. مقدار آب قابل دسترس خاک با افزایش تیمارهای آلی افزایش یافته بود. افزودن ۱۰ تن در هکتار لجن فاضلاب باعث افزایش میزان آب قابل دسترس از ۶/۹۵ درصد در تیمار شاهد به ۸/۱۵ درصد در مرحله‌ی پنجه‌زنی شد. علت آن‌را می‌توان به اضافه‌نمودن بقایای تازه به خاک که باعث افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک می‌شود نسبت داد. در مرحله‌ی برداشت، بیشترین مقدار آب قابل دسترس مربوط به تیمارهای کودگاوی ۵ تن در هکتار و خاکستر لاستیک بود که نسبت به شاهد مقدار آب قابل دسترس خاک را به‌ترتیب ۲۳/۱۰ و ۳۲/۹ درصد افزایش دادند. با افزایش تیمارهای آلی به خاک تنفس میکروبی خاک نیز افزایش پیدا کرد. در مرحله‌ی برداشت، بیشترین اثر بر روی تنفس میکروبی مربوط به تیمار کود گاوی ۱۰ تن در هکتار بود؛ به‌طوری که افزودن این تیمار به‌خاک مقدار تنفس



شکل۱. مقدار شاخص کیفیت خاک محاسبه شده تحت تأثیر تیمارهای کودی روی در دو مرحله نمونه‌برداری



شکل۲. مقدار شاخص کیفیت خاک گسترش یافته تحت تأثیر تیمارهای کودی روی در دو مرحله نمونه‌برداری

(CM10: کود گاوی ۱۰ تن در هکتار، CM5: کود گاوی ۵ تن در هکتار، R-Ash: خاکستر لاستیک، R-P: پودر لاستیک، C: شاهد، ZnSO4: کود شیمیایی سولفات روی، SS10: لجن فاضلاب ۱۰ تن در هکتار و SS 5: لجن فاضلاب ۵ تن در هکتار)

حروف غیرمشابه نشان دهنده معنی‌داری و حروف مشابه نشان دهنده غیرمعنی‌داری است

میکروبی پایه خاک را نسبت به شاهد ۲۰۰ درصد افزایش داد. اگرچه اختلاف معنی‌داری بین آن با تیمارهای کود گاوی ۵ و لجن ۵ و ۱۰ تن در هکتار مشاهده نشد(جدول ۶). کاربرد تیمارهای آلی و صنعتی در خاک تأثیری بر آلودگی خاک با فلزات سنگین سرب و کادمیم نداشت.

شاخص کیفیت خاک

تیمارهای۱۰ تن در هکتار لجن فاضلاب و کود گاوی در مرحله‌ی برداشت گندم بیشترین تأثیر مثبت را بر کیفیت خاک داشتند. همچنین لجن فاضلاب ۱۰ تن در هکتار در هر دو مرحله‌ی نمونه‌برداری توانسته بر شاخص کیفیت خاک مؤثر باشد، به این معنا که لجن فاضلاب به‌مقدار ۱۰ تن در هکتار توانسته با اثر مثبت بر خاک در تمام مراحل رشد گیاه مفید واقع شود. لازم به‌ذکر است که تیمار ۱۰ تن در هکتار کود گاوی در مرحله‌ی برداشت گندم نیز مانند تیمار ۱۰ تن در هکتار لجن فاضلاب اثر مثبتی بر مقدار شاخص کیفیت خاک داشت و با یکدیگر تفاوت معنی‌دار نداشتند. منفی‌ترین شاخص‌های محاسبه شده مربوط به اعمال تیمارهای سولفات روی، پودر لاستیک و شاهد در مرحله‌ی پنجه‌زنی می‌باشد که با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند. در واقع نشان دهنده‌ی آن است که در اثر کاربرد این تیمارها به خاک اثرات منفی بر ویژگی‌های خاک بیشتر از اثرات مثبت آن بوده است (شکل ۱).

در فرمول شاخص کیفیت خاک گسترش یافته، سه ویژگی دیگر روی قابل دسترس خاک، میزان آب قابل استفاده و تنفس میکروبی استفاده شد. برای این‌منظور، مقدار شاخص‌های کیفیت خاک گسترش یافته تغییرات بیشتری نسبت به شاخص کیفیت خاک ساده داشت. تیمار۱۰ تن در هکتار لجن فاضلاب نسبت به بقیه‌ی تیمارها در هر دو مرحله پنجه‌زنی و برداشت اثر مثبت‌تری را بر مقدار شاخص کیفیت خاک گسترش یافته داشت. پس از آن تیمار لجن ۵ تن در هکتار و کود گاوی ۵ و ۱۰ تن در هکتار و خاکستر لاستیک در مرحله‌ی برداشت بیشترین اثر را بر مقدار کیفیت خاک داشتند که با یکدیگر تفاوت معنی‌داری را نداشتند. دلیل آنکه مقدار شاخص کیفیت خاک گسترش یافته درکاربرد تیمارهای آلی مانند لجن فاضلاب و کود گاوی در مرحله‌ی برداشت افزایش داشت این است که مجموع اثرهای مثبت ناشی از کاربرد آنها بیشتر از مجموع اثرهای منفی آنها بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک است (شکل ۲). به‌نظر می‌رسد که به‌طور کلی شاخص کیفیت خاک گسترش یافته نسبت به شاخص کیفیت خاک ساده بهتر می‌تواند اثرهای ناشی از کاربرد تیمارها را به خاک نشان

جدول۷. همبستگی بین عملکرد گیاه گندم و شاخص کیفیت خاک در مرحله‌ی برداشت

	شاخص کیفیت خاک	شاخص کیفیت خاک گسترش یافته	عملکرد کل	عملکرد دانه	وزن هزاردانه	روی دانه
شاخص کیفیت خاک	۱					
شاخص کیفیت خاک گسترش یافته	۰/۸۸۱**	۱				
عملکرد کل	۰/۸۷۷**	۰/۸۶۵**	۱			
عملکرد دانه	۰/۷۹۵**	۰/۷۹۸**	۰/۸۶۷**	۱		
وزن هزاردانه	۰/۸۱۱**	۰/۷۵۱**	۰/۷۴۵**	۰/۶۶۲**	۱	
روی دانه	۰/۷۳۱**	۰/۸۵۰**	۰/۸۰۶**	۰/۷۶۳**	۰/۶۵۸**	۱

** : همبستگی معنی دار در سطح ۱ درصد * : همبستگی معنی‌دار در سطح ۵ درصد

دهد. با توجه به جدول ۵ و۶ اهمیت تیمارهای آلی مانند لجن فاضلاب و کود گاوی بیشتر از سایر تیمارها مشخص گردید. در واقع تیمارهای آلی نقش مثبت‌تری بر ویژگی‌های خاک داشتند و به‌همین علت باعث دریافت امتیازهای بالاتری برای هر کدام از ویژگی‌های خاک شدند. اگرچه تیمارهایی مانند خاکستر و پودر لاستیک در مقایسه با کود شیمیایی سولفات روی باعث افزایش روی خاک شدند اما از طرف دیگر این تیمارها با اثر نامناسب بر سایر ویژگی‌های خاک مانند عدم دسترسی فسفر، ماده آلی، نیتروژن و کاهش تنفس میکروبی و آب قابل استفاده امتیاز منفی دریافت کرده و به‌همین علت در محاسبهٔ شاخص کیفیت خاک مجموع امتیازشان منفی شد.

همبستگی شاخص کیفیت خاک با اجزای عملکرد، عملکرد و غلظت روی دانه گندم

جدول۷ همبستگی بین ویژگی‌های گیاه گندم و شاخص کیفیت خاک را در مرحله‌ی برداشت نشان می‌دهد. شاخص کیفیت خاک ساده وگسترش یافته با عملکرد کل گندم، عملکرد دانه، وزن هزار دانه و میزان روی دانه همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح یک درصد داشت. به‌نظر می‌رسد که هر چقدر شاخص کیفیت خاک بهتر و مثبت‌تر ارزیابی شده باشد در نتیجه رشد و عملکرد گیاه نیز بهتر بوده است. همچنین در شرایط بهینه‌ی خاک که با شاخص کیفیت خاک ارزیابی می‌شود، غلظت روی دانه‌ی گندم نیز افزایش یافته است. عملکرد کل گیاه گندم با عملکرد دانه و وزن هزاردانه و روی دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت. با بهبود کیفیت خاک بخش اعظمی از عملکرد کل به‌صورت عملکرد دانه شد. در واقع بجای تولید کاه و کلش، میزان بیشتری دانه تولید شده است. لازم به‌ذکر است که میزان روی دانه‌ی گندم با شاخص کیفیت خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت که نشان دهندهٔ توانایی خاک با اعمال تیمارهای کودی مناسب برای افزایش میزان عناصر کم‌مصرف از جمله روی در دانه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

تیمارهای آلی مانند لجن فاضلاب و کود گاوی نسبت به‌سایر تیمارها تأثیر بیشتری بر مقدار شاخص کیفیت خاک داشتند.کاربرد تیمارهای آلی به میزان ۱۰تن در هکتار به‌افزایش اثرهای مثبت بر ویژگی‌های خاک کمک کرد. نتایج همبستگی مثبت و معنی‌دار(در سطح یک درصد) بین شاخص کیفیت خاک ساده وگسترش‌یافته با ویژگی‌های گیاه گندم مانند عملکرد کل، عملکرد دانه، وزن هزاردانه و روی دانه نشان‌داد

که هرچقدر هریک‌از شاخص‌های کیفیت خاک بیشتر باشد، رشد گیاه نیز در شرایط بهینه‌تری‌بوده و به‌هدف غنی‌سازی محصولات زراعی با عناصر کم‌مصرف مانند روی نزدیک‌تر می‌شویم. برای تعیین شاخص کیفیت خاک در مقیاس‌های کوچک‌تر مانند مزارع بهتراست، به‌دیگر شاخص‌های مدیریتی مانند کیفیت آب، روش آبیاری، تناوب زراعی و شخم‌ورزی نیز توجه‌شود.همچنین پیشنهاد می‌شود برای تعیین شاخص کیفیت خاک به‌غیراز روند امتیازدهی (روش کیفی- تجربی) از روش آماری تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نیز استفاده‌شود. به‌منظور بررسی غنی‌سازی محصولات کشاورزی با عناصر کم‌مصرف به‌غیراز اثرکاربرد تیمارهای مختلف بر کیفیت خاک، اثر ارقام مختلف گیاهی نیز درنظر گرفته‌شود.

منابع مورد استفاده

۱. خوش‌گفتار منش، ا. ح.، ۱۳۸۶. *ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای گیاه و مدیریت بهینه کودی*، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲. ملکوتی، م. ج.، ز. خوگر. ز. خادمی. ۱۳۸۳. *روش‌های نوین تغذیه گندم (مجموعه مقالات)*، وزارت جهاد کشاورزی دفتر طرح خودکفایی گندم. انتشارات سنا.

3. Alef, K. and P. Nanniperi. 2003. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. PP. 214-216.

4. Elliot, E. T. 1994. The potential use of soil biotic activity as an indicator of productivity, sustainability and pollution. PP. 250-256. *In*: C. E. Pankhurst, B.M. Doube, V.V.S.R. Gupta & P.R. Grace (Eds.), Soil biota: management in sustainable farming systems. Melbourne, Australia: CSIRO.

5. Klute, A. and C. Dirkwen. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. PP. 687-734. *In*: A. Klute (Ed.), Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. Monogr. 9, ASA and SSSA, Madison, WI.

6. Larson, W. E., F. J., Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. (Eds.), Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World. Bangkok, Thailand: International Board for soil research and management. Technical papers 2:175-203.

7. Amacher, M. C., Katheriane, P. O. and Charles, H. P. 2007. Soil Vital Signs: A New Soil Quality Index (SQI) for Assessing Forest Soil Health. Res. Pap. RMRS-RP-65WWW. Fort Collins,CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 12 p.

8. Ancona, V., D. E. Bruno., N. Lopez., G. Pappagallo and V. F. Uricchio. 2010. A Modified Soil Quality Index to Assess the Influence of Soil Degradation Processes on Desertification Risk. Ital. J. Agron 3: 45-55.

9. Andrews, S. S., D. L. Karlen., C. A. Cambardella. 2004. The soil management assessment framework: Aquantitative soil quality evaluation method. Soil Sci. Soc. Am. J. 68: 1945-1962.

10. Milani, P. M., M. J. Malakouti, Z. Khademi, M.R. Balali, and M. Mashayekhi. 1998. A fertilizer recommendation model for the wheat field of Iran. Soil and Water Research Inst. Tehran, Iran.

11. Mortvedt, J. J. 1985. Plant uptake of heavy metals in zinc fertilizers made from industrial by-products. J. Environ. Qual. 14: 424-427.

12. Papendick, R. I., J. Parr. 1992. Soil quality-the key to a sustainable agriculture. Am. J. Altern. Agric. 7:2-3.

13. Taheri. S., A. H. Khoshgoftarmanesh., H. Shariatmadari and R. L. Chaney. 2011. Kinetics of zinc release from ground tire rubber and rubber ash in a calcareous soil as alternatives to Zn fertilizers. Plant and Soil 341:89–97.

14. Yeganeh M., M. Afyuni., A. H. Khoshgoftarmanesh., Y. Rezaeinejad., and R. Schulin. 2010. Transport of zinc, copper and lead in a sewage sludge amended calcareous soil. Soil Use and Management, 26, 176-182.