تعیین اثرات گوگرد کشاورزی بر ساختمان خاک با استفاده از هندسه فرکتالی و شاخص پایداری خاکدانه‌ها

علی‌داد کرمی[۱*] و کاظم خاوازی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۵/۲۷)

چکیده

به‌دلیل شرایط فیزیکی نامناسب و آهکی بودن خاک‌ها و وجود منبع عظیم گوگرد در کشور، بررسی تأثیر گوگرد بر ساختمان خاک و دیگر ویژگی‌های خاک ضروری است. بنابراین اثرات مقادیر مختلف گوگرد شامل: صفر، ۷۵۰، ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار به‌همراه باکتری *Halothiobacillus neapolitanus* بر ویژگی‌های خاک در تناوب گندم- ذرت در دو سال بررسی شد. پارامترهای pH، EC، سولفات، کربن آلی، ساختمان خاک و عملکرد گندم اندازه‌گیری شد. برای ارزیابی کمّی اثر گوگرد بر ساختمان خاک، با اندازه‌گیری توزیع اندازه خاکدانه ها، مقادیر شاخص‌های میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها (به‌ترتیب MWD و GMD) و مقادیر بُعد فرکتالی تعیین شد. نتایج نشان داد که با گذشت زمان و مقادیر بیشتر گوگرد همراه با باکتری *Halothiobacillus neapolitanus* پایداری خاکدانه‌ها افزایش داشت. تأثیر تیمارهای گوگرد بر MWD و GMD در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود و بر اساس شاخص‌های کمّی، ۲۸ درصد، اثرات مثبت بر ساختمان خاک داشت. گوگرد با کاهش ۳ درصدی بُعد فرکتالی، تأثیر مثبت معنی‌داری بر بهبود ساختمان خاک داشت. کاربرد گوگرد، مقدار pH خاک را کمی کاهش و قابلیت هدایت الکتریکی را ۱۲ درصد و سولفات خاک را تا ۴۰ درصد افزایش داد و با بهبود ساختمان و اصلاح شرایط فیزیکی خاک، در حفظ خاک و پایداری منابع تولید و حفاظت از محیط زیست بسیار تأثیرگذار است.

واژه‌های کلیدی: *Halothiobacillus neapolitanus*، بُعد فرکتالی، پایداری خاکدانه‌ها، خاک‌های آهکی

۱. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

۲. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: ad.karami@areeo.ac.ir

مقدمه

کشاورزی پایدار، مدیریت موفق منابع برای دستیابی به تعادل در راستای احتیاجات بشر و نگهداری یا ارتقای سطح کیفی محیط زیست و حفاظت منابع طبیعی معرفی شده است (۱۰). پایداری خاکدانه‌ها عامل مؤثری در فرسایش‌پذیری خاک بوده و علاوه بر تأثیر آن بر جدا شدن و انتقال ذرات توسط قطرات باران، اثر آن بر تشکیل سله سطحی نیز بسیار مهم است (۲۴). حفظ پایدار خاکدانه‌ها و ساختمان خاک، به حرکت و ذخیره‌سازی آب در خاک، تهویه، کنترل فرسایش و رشد محصول مفید بوده و قادر است محدوده وسیعی از فرایندهای فیزیکی و بیوژئوشیمیایی محیط زراعی و غیرزراعی را متأثر سازد و از ضروریات حفظ و ارتقای توان تولید است (۱۰).

روش‌های متعددی (میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها و پارامترهای فرکتالی) برای بیان توزیع اندازه خاکدانه‌ها ارائه شده است. پایداری خاکدانه‌ها به‌دلیل ایجاد شرایطی برای کاهش تخریب خاک، سله سطحی، رواناب، انتشار اکسیژن و با بهبود توزیع اندازه منافذ خاک و افزایش قابلیت دسترسی آب برای ریشه گیاهان، شاخص فیزیکی مهمی از کیفیت خاک است (۲۹). پارامترهای فرکتالی به‌طور فزاینده و مورد قبولی برای بیان کمّی توزیع اندازه خاکدانه‌ها مورد توجه قرار گرفته است (۳۴). هندسه فرکتالی برای مقیاس‌سازی ویژگی‌های خاک مانند ساختمان و تکه‌تکه شدن طبیعی یا مصنوعی خاک استفاده شده است (۳۱). پژوهشگران مختلف به‌طور موفقیت‌آمیزی از فرکتال‌ها برای مدل‌سازی توزیع اندازه ذرات، تخلخل خاک و مطالعه ساختمان خاک استفاده کرده‌اند (۴).

گوگرد به‌عنوان عنصر غذایی برای گیاهان نیز بسیار حائز اهمیت است. گرچه غلظت سولفور کمتر از نیتروژن در گیاه است ولی به‌عنوان یک عنصر ضروری در گیاه سازنده پروتئین‌ها، پپتیدها و تعدادی از متابولیسم‌ها مهم است (۱). امروزه کنترل زیست‌محیطی انتشار دی‌اکسید گوگرد، افزایش استفاده از کودهای با آنالیز بالا و عاری از گوگرد، کاهش استفاده از آفت‌کش‌های سولفوردار، استفاده از ارقام پرمحصول با نیاز غذایی بالا و افزایش کشت متراکم اهمیت توجه جدّی به گوگرد را دوچندان کرده است (۶). چرخه گوگرد به‌شدت با دینامیک ماده آلی خاک همراه بوده و عوامل کنترل کننده پایداری ماده آلی خاک، بر ذخیره گوگرد و اثرات زیستی گوگرد در اکوسیستم تأثیرگذار است (۱۴). در شرایط طبیعی منبع اصلی گوگرد ماده آلی است. گرچه سولفور یک عنصر ضروری بوده و جزء آمینواسیدها (میتیونین ۲۱ درصد و سیستئین ۲۷ درصد گوگرد) است و نقش فعّال‌سازی آنزیم‌های پروتئولیتیک و کلرفیل در تشکیل گلیکوسیدها و ترکیبات ثانویه را دارد ولی توجه مناسبی به آن نمی‌شود (۲۳). غلظت سولفور در برگ، مشابه فسفر و منیزیم است. استفاده از گوگرد همراه با باکتری تیوباسیلوس در بسیاری از موارد نتایج بهتری در اصلاح خاک و بهبود وضعیت تغذیه گیاه داشته است (۴۱).

گوگرد یکی از اقتصادی‌ترین و رایج‌ترین مواد اسیدزا معرفی شده که علاوه بر نقش تغذیه‌ای، نقش مهمی در اصلاح خاک‌های آهکی و تغییر اسیدیته خاک دارد (۸). به‌دلیل غیراقتصادی بودن گچ و یا گچ فسفردار و خطرات اسید سولفوریک در روابط اکولوژیکی خاک‌ها، از گوگرد عنصری برای اصلاح خاک شور و سدیمی استفاده شده و نتایج نشان داده که pH به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش و مقدار و شکل‌های نمک افزایش یافته و گوگرد عنصری به‌عنوان اصلاح کننده مناسبی برای خاک‌های شور و سدیمی توصیه شده است (۲۲). در بررسی تعدیل اثر شوری با گوگرد و مقادیر مختلف آب آبیاری مشخص شده که کاربرد گوگرد مقدار پرولین گیاه را بهتر کرده است (۲). عمده اراضی کشاورزی به‌خصوص خاک‌های آهکی تعداد خیلی کمی باکتری تیوباسیلوس دارند و با کاربرد گوگرد جمعیت تیوباسیلوس افزایش می‌یابد. همچنین، استفاده از تیوباسیلوس همراه با سولفور قابلیت دسترسی زیستی فسفر را برای دستیابی به کشاورزی پایدار بهبود می‌بخشد (۷). پتانسیل مصرف گوگرد در کشاورزی ایران بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ هزار تن در سال تخمین زده شده، ولی ابعاد گوناگون تحقیقاتی مصرف گوگرد هنوز مشخص نشده تا با برنامه ترویجی جامعی

برای کشاورزان منتقل شود (۸). گرچه تأثیر گوگرد بر pH خاک و حتی کاهش موضعی آن در خاک‌های آهکی ایران از جوانب بسیار با اهمیت گوگرد است ولی شناخت اثرات آن بر ساختمان خاک به‌عنوان یکی از ویژگی‌های بسیار مهم خاک، مغبون مانده است. در این پژوهش تأکید بر بیان کمّی ساختمان خاک و تأثیرپذیری مثبت آن از گوگرد، موضوعی است که بیشتر مورد توجه واقع شده است. امروزه به‌دلیل بحران آب و افت کیفیت آب‌های آبیاری و سایر عوامل مؤثر بر تخریب خاک لزوم توجه به ساختمان خاک، و بهبود آن را دو چندان می‌کند. بنابراین، در این تحقیق، اثرات گوگرد به همراه باکتری *Halothiobacillus neapolitanus* بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مخصوصاً ساختمان خاک که در فرایندهای مختلف آب و خاک نقش اساسی دارد، مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در مزرعه تحقیقاتی ایستگاه تحقیقات کشاورزی زرقان در استان فارس، برای ارزیابی اثرات گوگرد و باکتری *Halothiobacillus neapolitanus* بر ویژگی‌های خاک و مخصوصاً ساختمان خاک در تناوب کشت ذرت- گندم در سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۴ انجام شد. در هر سال کشت گندم از آبان‌ماه تا خردادماه و کشت ذرت علوفه‌ای از اوایل تیرماه تا اواسط مهرماه بود. تیمارهای پژوهش بر اساس پژوهش‌های انجام شده شامل: ۱- شاهد (بدون مصرف گوگرد در کشت گندم و بدون مصرف گوگرد در کشت ذرت)، ۲- مصرف ۷۵۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار در کشت گندم و بدون مصرف گوگرد در کشت ذرت، ۳- مصرف ۱۵۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار در کشت گندم و بدون مصرف گوگرد در کشت ذرت، ۴- مصرف ۳۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار در کشت گندم و بدون مصرف گوگرد در کشت ذرت، ۵- بدون مصرف گوگرد در کشت گندم و مصرف ۷۵۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار در کشت ذرت، ۶- بدون مصرف گوگرد در کشت گندم و مصرف ۱۵۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار در کشت ذرت و ۷- بدون مصرف گوگرد در کشت گندم و مصرف ۳۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار در کشت ذرت انتخاب شد. گوگرد مصرفی: گوگرد بنتونیت‌دار گرانوله‌ای با عنوان گوگرد پاستیلی بود که توسط پژوهشگاه صنعت نفت در خانگیران تولید و در اختیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب قرار گرفته بود.

باکتری *Halothiobacillus neapolitanus* از بانک ریزجانداران مؤسسه تحقیقات خاک و آب تهیه شد. برای تهیه مایه تلقیح باکتری از محیط کشت پستگیت (۷ گرم $Na_2S_2O_3.5H_2O$، ۳/۵ گرم $(NH_4)_2SO_4$، ۰/۷ گرم $MgSO_4$، ۰/۰۱ گرم $FeSO_4.7H_2O$، ۰/۴ گرم $CaCl_2.2H_2O$، ۱۵ میلی‌لیتر عناصر ریزمغذی) (۲۶) استفاده و حجم نهایی با آب مقطر استریل به ۱۰۰۰ میلی‌متر رسانیده شد. pH محیط پسگیت پس از تهیه با استفاده از KOH یک نرمال، روی هفت تنظیم شد. پس از تهیه محیط کشت، باکتری مورد نظر (در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و روی شیکر با چرخش ۱۲۰ دور در دقیقه به‌مدت چهار روز) تکثیر و با استفاده از ماده حامل پرلیت، مایه تلقیح‌های یک کیلوگرمی با تراکم جمعیت حدود 10^7 سلول در گرم مایه تلقیح تهیه و در پلاستیک‌های مناسب بسته‌بندی شدند.

قبل از کشت با پیاده کردن نقشه آزمایشی میزان گوگرد و باکتری مورد نیاز هر کرت بر اساس تیمار مربوطه تعیین و در سطح کرت به‌صورت یکنواخت توزیع و در حین عملیات کشت تقریباً تا عمق ۲۰ سانتی‌متری با خاک مخلوط شد. باکتری فقط به کرت‌هایی که تیمار گوگرد داشت بسته به میزان گوگرد کاربردی محاسبه و اضافه شد و به تیمار شاهد اضافه نشد.

ابعاد کرت ۶ در ۱۰ متر بود و برای کاشت گندم، ۱۰ خط یا پشته با فاصله ۶۰ سانتی‌متری و برای کاشت ذرت، ۸ خط یا پشته با فاصله ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بین تیمارها یک و نیم متر و فاصله بین تکرارها سه متر در نظر گرفته شد. آزمایش در کرت‌های ثابت انجام و در کشت اول پس از آماده‌سازی زمین، یک نمونه مرکب از خاک محل آزمایش و نمونه آب آبیاری تهیه و تجزیه کامل شد. عناصر پرمصرف مورد نیاز گیاه در هر کشت، بر اساس آزمون خاک و توصیه

مؤسسه تحقیقات خاک و آب مصرف شد. برای هر کشت، جدول عملیات زراعی تنظیم و کلیه عملیات (اعم از آماده سازی زمین، تاریخ کاشت و برداشت، تاریخ نمونه‌برداری‌ها، تاریخ‌های سبز شدن، ساقه رفتن و رسیدگی کامل، نوع و مقدار بذر و کود مصرفی، مبارزه با آفات و بیماری‌های گیاهی) یادداشت‌برداری شد. اطلاعات هواشناسی از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی برای کل دوره آزمایش تهیه شد. در زمان برداشت محصول ارتفاع بوته، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و عملکرد کاه (کیلوگرم در هکتار) برای گندم و عملکرد تر و خشک ذرت علوفه‌ای (کیلوگرم در هکتار) اندازه‌گیری شد. از زمان کاشت محصول (گندم یا ذرت) با فواصل دو ماه نمونه‌برداری خاک انجام شد و اسیدیته گل اشباع (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) و سولفات و در زمان برداشت محصول علاوه بر جرم مخصوص ظاهری، نفوذ آب به خاک (infiltration) نیز اندازه‌گیری و مدل‌های فیلیپ و کوستیاکوف بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش داده شد. همچنین در زمان برداشت در نمونه خاک pH، EC، سولفات، آهن، روی، منگنز، فسفر، نیتروژن و پتاسیم قابل استفاده، جرم مخصوص ظاهری و ماده آلی و در نمونه‌های دانه و کاه گندم مقادیر عناصر غذایی ماکرو و میکرو اندازه‌گیری شد. به‌دلیل محدودیت صفحات مقاله از ذکر برخی از ویژگی‌ها و نتایج پرهیز شده است. آبیاری به‌صورت جویچه‌ای سطحی بود و برای گندم بعد از خاک آب و پی‌آب، آبیاری زمستانه انجام نشد و در بهار هر ۱۰ روز یکبار و برای ذرت هر ۸ روز یک‌بار و سه آب آخر ذرت علوفه‌ای هر ۱۲ روز یک‌بار انجام شد.

برای بررسی تأثیر کمّی گوگرد بر ساختمان خاک، با اندازه گیری توزیع اندازه خاکدانه‌ها مقادیر شاخص‌های میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها (به‌ترتیب MWD و GMD) و بُعد فرکتالی تعیین شد. برای به‌دست آوردن میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، با استفاده از سری الک با قطرهای ۰/۴۲، ۰/۸۴، ۲، ۴/۷۵، ۶/۴، ۱۲/۷ و ۳۸ میلی‌متر، توزیع اندازه خاکدانه‌ها تعیین شد (۲۰). برای محاسبه MWD و GMD از معادله‌های زیر استفاده شد:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n} \bar{x}_i w_i \qquad (1)$$

$$GMD = \exp\left[\left(\sum_{i=1}^{n} w_i \log \bar{x}_i\right) / \sum_{i=1}^{n} w_i \right] \qquad (2)$$

که در آنها w_i نسبت وزن خاکدانه‌ها در یک کلاس اندازه‌ای با میانگین قطری $\bar{x}_i$، i: شاخص اندازه کلاس و n تعداد غربال است. برای محاسبه بُعد فرکتالی از مدل‌های فرکتالی به‌شرح زیر استفاده شد:

$$N(d_i) = \frac{M(d_i)}{(d_i^{3} \rho_i)} \qquad (3)$$

که در آن $N(d_i)$ تعداد خاکدانه‌ها، d_i میانگین قطر خاکدانه‌ها (m)، $M(d_i)$ جرم خاکدانه‌ها (kg) و ρ_i جرم ویژه ظاهری خاکدانه‌ها ($Mg\ m^{-3}$) است. کلاس صفر بزرگ‌ترین خاکدانه‌ها است. تعداد خاکدانه‌ها از بزرگ‌ترین کلاس تا کلاس k ام از فرمول $N_k = \sum_{i=0}^{k} N(d_i)$ محاسبه و با استفاده از مدل فرکتالی زیر D_n تعیین شد:

$$N_k = A d_k^{-D_n} \quad 0 < D_n < 3 \qquad (4)$$

که در آن d_k میانگین قطر خاکدانه‌ها برای کلاس k ام است. شیب منحنی $\log N_k$ در مقابل $\log d_k$ همان $-D_n$ است (۳۱). در این مدل شکل خاکدانه‌ها مستقل از مقیاس فرض می‌شوند. A فراوانی خاکدانه‌های بزرگ‌تر را نشان می‌دهد و برای تعیین تفاوت کمّی میان تیمارها به‌کار برده می‌شود. از مدل تایلر و ویت‌کرفت (۳۹) به شرح زیر استفاده شد:

$$\frac{M(x < X)}{M_t} = \left(\frac{x}{XL}\right)^{3-D_m} \qquad (5)$$

که در آن D_m بُعد فرکتال جرمی، $M(x<X)$ جرم تجمعی خاکدانه‌ها روی غربال‌ها با اندازه‌های کوچک‌تر از X و M_t جرم کل خاکدانه‌ها، XL بزرگ‌ترین اندازه منفذ غربال و x میانگین قطر خاکدانه‌ها در هر کلاس است.

پس از الک کردن، با رگرسیون لگاریتمی داده‌ها مقدار D_m محاسبه شد (۱۵). در این مدل جرم مخصوص ظاهری و شکل

جدول ۱. تجزیه واریانس اثر گوگرد همراه با باکتری اکسید کننده گوگرد بر برخی از ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات								
		MWD	GMD	Dn	Dm	pH	EC	SO_4	P	Mn
بلوک	۲	۱/۲۷^{ns}	۰/۰۵^{ns}	۰/۰۱^{ns}	۰/۰۰۵^{ns}	۰/۰۱۷^{ns}	۰/۰۳۴^{ns}	۴۳/۲^{ns}	۱۷۱*	۳۷/۴*
تیمار	۶	۵/۰*	۰/۰۷*	۰/۰۲*	۰/۰۰۴*	۰/۰۵۲*	۰/۵۲۰*	۶۴/۰*	۲۸/۳*	۲۳/۶*
ضریب تغییرات	---	۱۲/۵	۸/۱	۲/۴	۱/۴	۱/۷	۱۵/۶	۲۸/۳	۳۶/۹	۲/۷

ns و * به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، GMD: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها، Dn: بُعد فرکتالی مدل ریو و اسپوزیتو، Dm: بعد فرکتالی مدل تایلر و ویت کرفت، pH: اسیدیته گل اشباع، EC: قابلیت هدایت الکتریکی، SO_4: سولفات، P: فسفر و Mn: منگنز خاک اندازه‌گیری شده در تاریخ ۹۳/۴/۲۴

خاکدانه‌ها مستقل از مقیاس فرض می‌شوند و برای ذرات خاک نیز می‌توان از آن استفاده کرد. نتایج به‌دست آمده به‌صورت بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار با نرم‌افزار SAS آنالیز و برای ویژگی‌هایی که اختلاف معنی‌دار داشتند در سطح پنج درصد مقایسه میانگین با آزمون دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

در تجزیه نمونه خاک اولیه و بدون اعمال تیمار نتایج نشان داد که میزان شوری خاک ۰/۹۷ دسی‌زیمنس‌برمتر، اسیدیته گل اشباع ۷/۹، کربنات کلسیم معادل ۴۰ درصد، کربن آلی ۰/۶۹ درصد، سولفات خاک ۲۲/۸ میلی‌اکی‌والان بر لیتر، فسفر، پتاسیم، مس، منگنز، آهن و روی به‌ترتیب ۹/۸، ۵۲۸، ۱/۷۴، ۱۵/۵۶، ۱۰/۶۶ و ۰/۸۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و میزان شن، سیلت و رس خاک به‌ترتیب ۱۸، ۵۴ و ۲۸ درصد و بافت خاک Silty Clay Loam بود. تجزیه واریانس اثر گوگرد همراه با باکتری اکسید کننده گوگرد بر برخی از ویژگی‌ها برای نمونه در جدول (۱) ارائه شده است.

بیشترین پایداری خاکدانه‌ها از تیمار ۷ (عدم مصرف گوگرد در کشت گندم و کاربرد ۳۰۰۰ کیلوگرم گوگرد همراه با *Halothiobacillus neapolitanus* در کشت ذرت) مشاهده شد. احتمالاً تأثیرپذیری ساختمان خاک از گوگرد فرایندی طولانی مدت است. از تیماری بیشترین پایداری خاکدانه‌ها حاصل شد که در کشت قبلی یا کشت ذرت بیشترین گوگرد را دریافت کرده بود. تیمارهای مختلف گوگرد اختلاف معنی‌داری بر مقادیر MWD و GMD داشتند. جالب اینکه به‌غیر از تیمار ۶، مقادیر پایین‌تر MWD و GMD از کاربرد مقادیر کمتر گوگرد به‌دست آمد (شکل ۱).

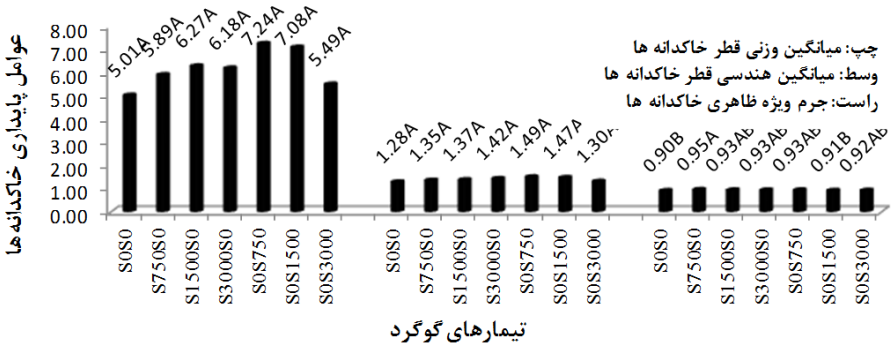
مقادیر بیشتر MWD و GMD بیانگر خاکدانه‌های بزرگ‌تر و خاکدانه‌سازی بیشتر است (۴). نتایج این پژوهش نیز حاکی از تأثیر مثبت گوگرد بر خاکدانه‌سازی بر اساس شاخص‌های MWD و GMD است. مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمارهای مختلف اختلاف معنی‌داری نداشت.

تأثیر تیمارهای مختلف بر بُعد فرکتالی

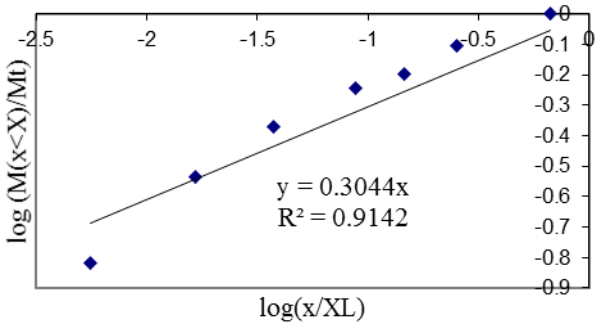
با توجه به اینکه خاکدانه‌های خاک شکل هندسی منظمی ندارند و از هندسه اقلیدسی نمی‌توان ساختمان خاک را کمّی کرد از هندسه فرکتالی برای بیان کمّی ساختمان خاک که خاکدانه‌های خاک شبه‌فرکتالی هستند، استفاده شد. برای نمونه با استفاده از معادله ۵ و با لگاریتم‌گیری مقدار بُعد فرکتالی و ضریب همبستگی برای یک نمونه خاک در شکل (۲) ارائه شد که در آن D_m - ۳ برابر ۰/۳۰۴۴ و ضریب تبیین برابر ۰/۹۱ و ضریب همبستگی ۰/۹۶ است.

بُعد فرکتالی ریو و اسپوزیتو (۳۱) و تایلر و ویت‌کرفت (۳۹) در شکل (۳) ارائه شده است.

بُعد فرکتالی مدل‌های استفاده شده تحت تأثیر تیمارهای گوگرد اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد را نشان داد.



شکل ۱. تأثیر تیمارهای مختلف گوگرد بر پایداری خاکدانه‌ها علامت S بیانگر گوگرد و عدد کنار آن میزان کاربرد را نشان می‌دهد. S اول و دوم به‌ترتیب گوگرد مصرفی برای کشت اول و دوم است.



شکل ۲. نمونه‌ای از نمودار مربوط به محاسبه بُعد فرکتالی از مدل تایلر و ویت‌کرفت

شکل ۳. تأثیر تیمارهای مختلف گوگرد همراه با باکتری بر بُعد فرکتالی. علامت S بیانگر گوگرد و عدد کنار آن میزان کاربرد، S اول و دوم به‌ترتیب گوگرد مصرفی برای کشت اول و دوم را نشان می‌دهد.

مقادیر کوچک‌تر بُعد فرکتالی، بیانگر پایداری بیشتر خاکدانه‌ها است. مقادیر کوچک‌تر بُعد فرکتالی خاکدانه‌ها بیانگر این است که خاکدانه‌های بزرگ‌تر بیشتر بوده و مقادیر بزرگ‌تر بُعد فرکتالی بیانگر غالب بودن خاکدانه‌های کوچک‌تر در توزیع اندازه خاکدانه‌ها است (۴). از بُعد فرکتالی تکه تکه شدن یا پراکنده شدن (D_n) و بُعد فرکتالی جرمی (D_m) به‌عنوان شاخص‌هایی

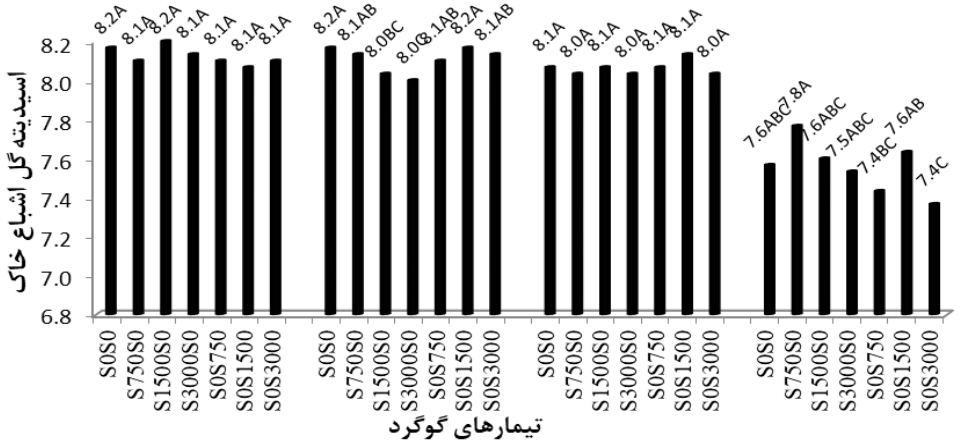
برای ارزیابی تأثیر عملیات زراعی، تیمارهای رطوبتی و اصلاح کننده‌های خاک بر توزیع اندازه خاکدانه‌ها استفاده شده است (۱۵). با استفاده از داده‌های سری الک خشک مقدار D_n خاکدانه ها از مدل پیشنهادی ریو و اسپوزیتو (۳۱) نیز برآورد شده و به عنوان شاخصی برای تعیین فرسایش‌پذیری خاک معرفی شده است. در پژوهش مذکور نیز تأیید شده که مقادیر بالاتر D_n بیانگر پایداری کمتر خاکدانه‌ها بوده است (۴).

در تحقیق رضایی و همکاران (۳۰) که از روش تایلر و ویت‌کرفت بُعد فرکتالی برای توزیع اندازه ذرات محاسبه شده بیان شده است که خاک‌هایی با بافت ریزتر بُعد فرکتالی بزرگ‌تر و خاک‌های درشت بافت بُعد فرکتالی کوچک‌تری را داشتند. همچنین بُعد فرکتالی با افزایش رس افزایش و با افزایش شن کاهش داشته است. با تعیین بُعد فرکتالی توزیع اندازه ذرات و رابطه آن با ویژگی‌های خاک نشان داده شده که با افزایش ذرات ریز خاک، بُعد فرکتالی افزایش و با افزایش ذرات درشت بُعد فرکتالی کاهش داشته است (۴۵). همچنین بُعد فرکتالی با مقدار آب خاک و مقدار نمک خاک رابطه مثبت و با جرم مخصوص ظاهری همبستگی منفی داشته است. بُعد فرکتالی توزیع اندازه ذرات، ویژگی‌های توزیع اندازه ذرات، ناهمگونی و حاصلخیزی خاک را نشان داده و به‌عنوان شاخص جامع و کمّی برای برآورد ویژگی‌های رطوبتی خاک استفاده شده است (۳۹). به‌دلیل اینکه درصد اندازه ذرات تغییرات مکانی متوسطی داشته است ولی بُعد فرکتالی تغییرات مکانی بسیار کمتر از اندازه ذرات داشته، بر کاربرد بُعد فرکتالی تأکید شده است (۴۳).

بیشترین مقدار بُعد فرکتالی مدل تایلر و ویت‌کرفت و ریو و اسپوزیتو از تیمار S0S ۱۵۰۰ (عدم مصرف گوگرد در کشت گندم و استفاده از ۱۵۰۰ کیلوگرم در هکتار گوگرد به همراه *Halothiobacillus neapolitanus* در کشت ذرت) و کمترین مقدار آن از تیمار S0S ۳۰۰۰ (عدم مصرف گوگرد در کشت گندم و استفاده از ۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار گوگرد به‌همراه *Halothiobacillus neapolitanus* در کشت ذرت) حاصل شد که حاکی از تأثیر مثبت گوگرد بر خاکدانه‌سازی و پایداری خاکدانه‌ها است. مقادیر MWD و GMD تحت تأثیر گوگرد در مقایسه با شاهد افزایش و مقادیر بُعد فرکتالی کاهش داشت که بیانگر خاکدانه‌سازی و پایداری خاکدانه‌ها است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که بیشترین مقدار گوگرد، بیشترین پایداری خاکدانه‌ها و بهبود ساختمان خاک را به‌دنبال داشته است. برای قضاوت دقیق‌تر نیاز به زمان بیشتر است. بُعد فرکتالی همبستگی منفی و معنی‌داری با ذرات درشت و همبستگی مثبت و معنی‌داری با ذرات ریز داشته است (۳۳). بُعد فرکتالی می‌تواند در بیان ویژگی‌های توزیع اندازه ذرات و روابط آن با تخریب اراضی استفاده شود (۳۶). روند معنی‌داری بین بُعد فرکتالی و درصد شن، سیلت و رس خاک وجود داشته و مقادیر بُعد فرکتالی توانسته میزان جدا شدن ذرات خاک و بیابان‌زایی را نشان دهد (۴۴). با استفاده از بُعد فرکتالی و توزیع اندازه ذرات خاک، فرسایش آبی و بادی و بیابان‌زایی در حوضه‌های آبخیز کوچک تعیین شده است (۱۸). مقادیر بُعد فرکتالی همبستگی مثبت (نمایی) با درصد رس و سیلت داشته و همبستگی منفی (چند جمله‌ای) با درصد شن داشته و استفاده از هندسه فرکتالی برای ارزیابی فرسایش خاک توصیه شده و نشان داده شده که مقادیر بُعد فرکتالی به جابه‌جا شدن و رسوب ذرات ریز حساس است (۴۰). در بررسی اثرات کاربری‌های مختلف بر ساختمان خاک و بُعد فرکتالی مشخص شده که با کشت اراضی مرتعی و جنگلی بُعد فرکتالی افزایش یافته و مقدار بُعد فرکتالی با MWD، ماده آلی خاک، هدایت هیدرولیکی و خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر همبستگی منفی و با جرم مخصوص ظاهری و تخلخل کل همبستگی مثبت داشته است (۴۶).

تأثیر تیمارهای مختلف گوگرد بر اسیدیته گل اشباع خاک

مقادیر pH خاک نوسانات زیادی در طول فصل کشت داشت. ولی آنچه که مشهود است در اواسط کشت مقادیر pH خاک کاهش داشت. لازم به ذکر است که گوگرد در نقاطی از خاک که قرار گرفته توانسته pH را کاهش دهد ولی چون اندازه‌گیری در آن نقاط میسّر نبود و اندازه‌گیری pH در کل توده خاک



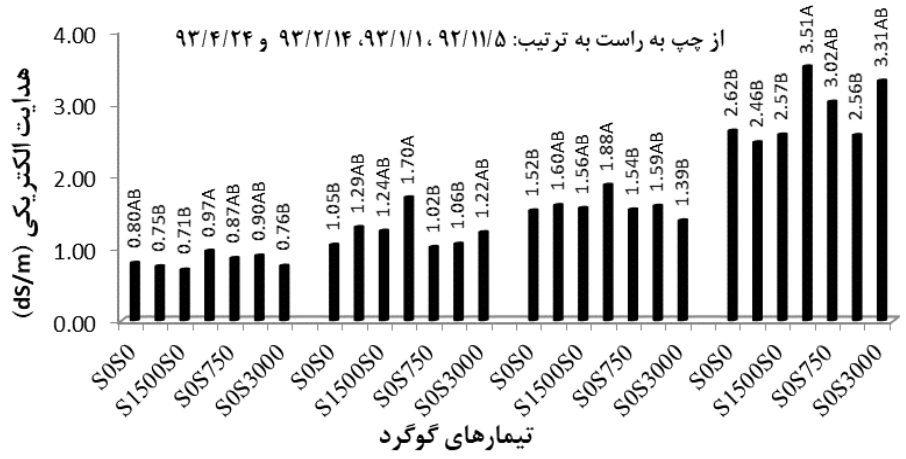
از چپ به راست به ترتیب: ۹۲/۱۱/۵، ۹۳/۱/۱، ۹۳/۲/۱۴ و ۹۳/۴/۲۴

شکل ۴. تأثیر تیمارهای مختلف گوگرد بر اسیدیته گل اشباع خاک

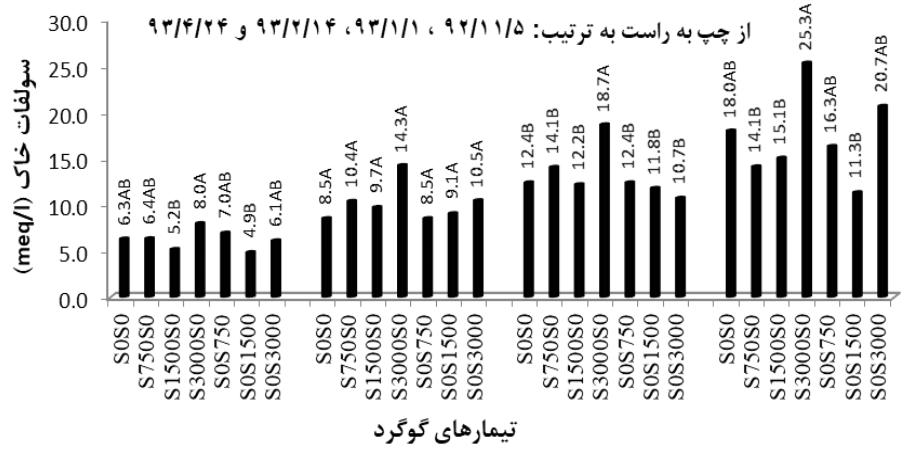
به‌دلیل بافری بودن خاک، نتوانست کاهش pH توسط گوگرد را به‌خوبی نشان دهد. در اواسط فصل کشت که گیاه شرایط مناسب رشدی را دارد این کاهش pH قابلیت دسترسی عناصر غذایی را افزایش داده که اهمیت زیادی در تولید محصول در کشاورزی دارد. بدین صورت که از کاربرد ۳۰۰۰ کیلوگرم گوگرد همراه با باکتری در کشت قبل به‌عنوان تیمار برگزیده، میزان سولفات، کربن آلی، فسفر، پتاسیم، مس، منگنز، آهن و روی خاک را به‌ترتیب ۴۰، ۵، ۲۰، ۲، ۱۰، ۱۷، ۵ و ۲۲ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت. گوگرد به‌دلیل تأثیری که بر شرایط شیمیایی خاک نظیر کاهش pH دارد، موجب افزایش فراهمی عناصر غذایی برای گندم شده است (۱۳). چیزی که قابل ذکر است اینکه با افزایش کاربرد گوگرد، pH خاک کاهش داشت (شکل ۴). مناسب‌ترین pH برای جذب عناصر غذایی توسط گیاهان ۷- ۶/۵ بیان شده و در pH بالاتر برخی از عناصر نامحلول شده و در pH کمتر از ۵ حلالیت زیاد برخی از عناصر موجب مسمومیت گیاه می‌شود (۳۷). از آنجایی که ۶۵ درصد از اراضی کشاورزی کشور (حدود ۷/۸ میلیون هکتار) pH قلیایی دارند، کاهش pH به‌وسیله گوگرد بسیار ارزشمند است. استفاده از اسید سولفوریک و گوگرد عنصری که بتواند pH خاک را در مقیاس کوچک در اطراف ریشه‌ها کاهش داده و قابلیت جذب عناصر غذایی فسفر، آهن و روی را افزایش دهد، به‌عنوان یک راهکار عملی و مؤثر اشاره شده است (۸). در اصلاح خاک سدیمی با سولفور نیز، pH خاک از ۱۰/۱ به ۸/۴ کاهش و مقدار نمک‌های تشکیل شده جدید از ۱۶ تا ۳۳ درصد افزایش داشت (۲۲)، که نتایج این تحقیق را تأیید می‌کند. احتمالاً pH به‌صورت موضعی کاهش شدیدتر و در نقطه‌ای که گرانول گوگرد قرار گرفته، اثرات مثبت گوگرد بارزتر است که سنجش آن با دشواری همراه است. به‌خاطر بافری بودن خاک‌های آهکی اثرات اصلاحی اکسید شدن گوگرد بر اسیدیته خاک موضعی و موقتی است (۴۲). با کاربرد ۲/۵ گرم در کیلوگرم گوگرد عنصری در خاک آهکی، pH از ۷/۸ به ۶/۵ کاهش یافته و با کاربرد توأم سولفور با بیوچار وزن خشک ریشه و قسمت هوایی، وزن دانه، شدت فتوسنتز و تعرق و هدایت روزنه‌ای گیاه ذرت به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است (۲۸). کاربرد گوگرد در باغ‌های سیب آذربایجان غربی، pH خاک را کاهش داده و کلرفیل برگ، غلظت آهن، روی، و فسفر میوه را افزایش داده و در خاک‌های آهکی کاربرد دو کیلوگرم سولفور برای هر درخت سیب توصیه شده است (۱۲).

تأثیر تیمارهای مختلف گوگرد بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک

برعکس pH خاک، قابلیت هدایت الکتریکی خاک تغییرات گسترده‌تری داشت. نتیجه قابل تأمل اینکه، با گرم شدن هوا و



شکل ۵. تأثیر تیمارهای مختلف گوگرد بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک

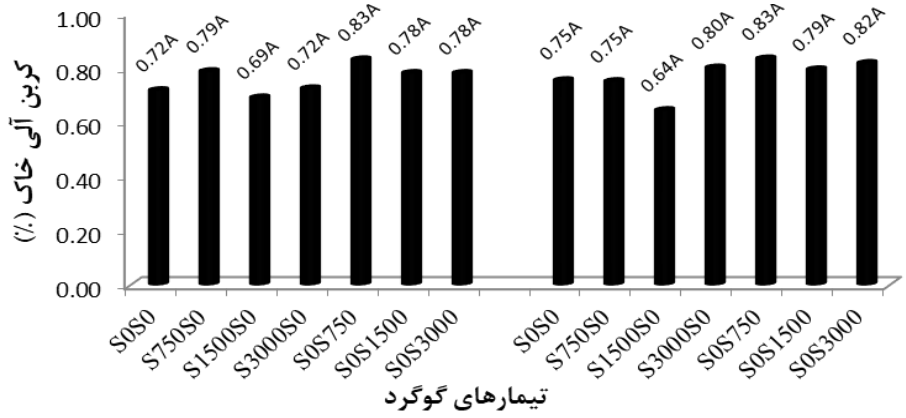


شکل ۶. تأثیر تیمارهای مختلف گوگرد بر مقدار سولفات خاک

در ماه‌های خشک فصل زراعی، بیشترین شوری خاک از بیشترین مقدار گوگرد کاربردی حاصل شد (شکل ۵). احتمالاً گوگرد افزوده شده به خاک ضمن اینکه خود املاح محلول خاک را افزایش داده است با فرایند اکسیده شدن، pH را کاهش داده و موجب افزایش یون‌های محلول در خاک شده و شوری خاک را افزایش داده است. مشابه این تحقیق در امارات نیز در یک خاک آهکی با کاربرد ۵ و ۱۰ تن در هکتار سولفور عنصری، EC به ترتیب ۲/۵ و ۲/۹۵ واحد افزایش یافته و کاربرد ۵ تن در هکتار سولفور عنصری همراه با کود نیتروژن برای رشد و جذب بیشتر عناصر غذایی توصیه شده است (۲۷). همچنین در آزمایش گلخانه‌ای با به‌کارگیری گوگرد تلقیح شده با باکتری‌های اکسید کننده گوگرد برای محصول ذرت، pH خاک کاهش و EC خاک افزایش یافته است (۳۸).

تأثیر تیمارهای مختلف گوگرد بر مقدار سولفات خاک

بیشترین مقدار سولفات خاک از کاربرد بیشترین مقدار گوگرد در خاک (۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد (شکل ۶). این نتیجه از دو جنبه قابل بررسی است. یکی اینکه در خاک‌های آهکی که همه خاک‌های استان و عمده خاک‌های کشور را تشکیل می‌دهد، این افزایش سولفات تأثیرات مفیدی بر قابلیت دسترسی عناصر گذاشته و شرایط را از جنبه‌های مختلفی بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر با اقلیم خشکی که بر خاک‌های منطقه حاکم است، افزایش سولفات مواد محلول در خاک را افزایش داده و باعث افزایش شوری خاک خواهد شد که جنبه منفی قضیه است. کاربرد گوگرد



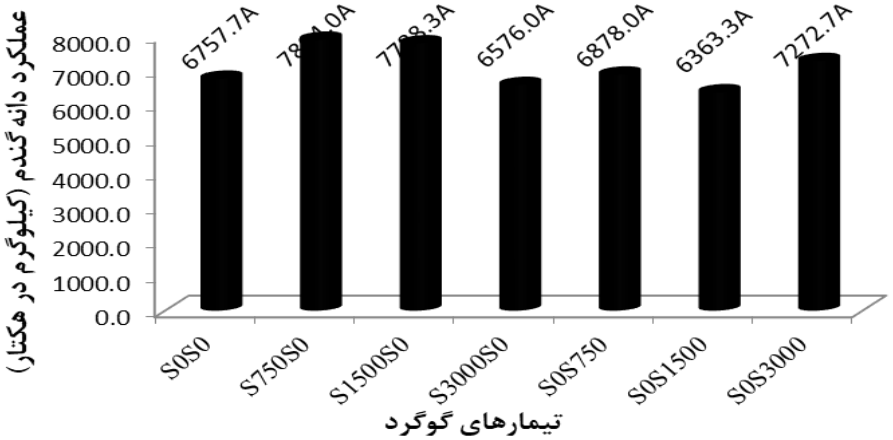
چپ: ۹۳/۲/۱۴ راست: ۹۳/۴/۲۴

شکل ۷. تأثیر تیمارهای مختلف گوگرد بر مقدار کربن آلی خاک

عنصری، شوری را به‌مقدار قابل ملاحظه‌ای و حلالیت فسفر، آهن و روی را به‌طور معنی‌داری در یک خاک آهکی افزایش داده است (۱۶). سولفات مهم‌ترین شکل گوگردی است که توسط گیاه جذب می‌شود و تبدیل گوگرد آلی به سولفات غیرآلی (معدنی شدن) و فرایند عکس آن، مهم‌ترین نقش را در چرخه گوگرد در خاک و میکروبیولوژی دارند (۹). افزایش سولفات حاکی از آزاد شدن سریع آن در مراحل اولیه تجزیه بقایا گزارش شده است و با افزایش مقادیر گوگرد و دوره آزمایش میزان سولفات خاک افزایش یافته است (۳۵). نیتروژن به‌عنوان گلوگاه تغذیه گیاهان در خاک‌های کشور بسیار مهم است، با استفاده از کودهای گوگرددار و مخصوصاً سولفات، ماده آلی و به تبع آن نیتروژن خاک افزایش یافته که از جوانب مهم کاربرد گوگرد به حساب می‌آید. بدون توجه به pH اولیه خاک، افزودن گوگرد عنصری قابلیت دسترسی فسفر را در اراضی کشاورزی افزایش داده است (۱۷). سولفور عنصری، پتانسیل اسیدی کردن خاک را دارد و با افزایش فرایندهای تشکیل سیدروفور گیاهی، جذب آهن توسط گیاه را افزایش می‌دهد (۱۹). سولفور با کاهش pH در اپوپلاست انتقال آهن در آوندها و تجمع آن در گیاه را افزایش داده است (۲۸).

تأثیر تیمارهای مختلف گوگرد بر مقدار کربن آلی خاک

درخصوص تأثیر گوگرد بر کربن آلی خاک فرصت بیشتری لازم است تا بتوان قضاوت دقیق‌تری کرد (شکل ۷). واضح است که اگر گوگرد بر عملکرد محصول و گسترش ریشه تأثیر مثبتی داشته باشد، در طولانی بر کربن آلی خاک نیز اثر افزایشی خواهد گذاشت. گوگرد آلی ۵۵ درصد و گوگرد معدنی ۴۵ درصد از ترکیبات گوگردی را تشکیل داده (۵) و وجود ماده آلی کافی در خاک، در فعّال‌سازی ریزجانداران اکسید کننده گوگرد و تبدیل گوگرد به‌شکل سولفات قابل جذب، بسیار مهم و ضروری است. ترکیبات آلی شیمیایی آزاد شده از مواد آلی مانند کلات‌ها عمل کرده و حلالیت عناصر غذایی و قابلیت دسترسی آنها را برای گیاه افزایش داده است (۲۵). اصلاح کننده‌های‌آلی در سلامت خاک و قابلیت دسترسی عناصر غذایی مؤثر گزارش شده است (۱۱). قابلیت دسترسی زیستی آهن و روی در غذا با نسبت فیتات به این عناصر سنجیده می‌شود که با کاربرد توأم سولفور و بیوچار، جذب آهن و روی افزایش و میزان فیتات کاهش داشته است (۲۸). گوگرد با ماده آلی خاک اثر متقابل داشته بدین صورت که ماده آلی با فراهم کردن شرایط برای اکسایش گوگرد توسط میکروارگانیسم‌های دگرپرور اکسایش بیولوژیک گوگرد را در خاک‌های آهکی افزایش داده و از طرفی کاربرد گوگرد با کاهش pH خاک، تحریک‌پذیری عناصر غذایی در اطراف ریشه را افزایش و موجب جذب بیشتر عناصر غذایی توسط گیاه شده است و با تقویت بنیه گیاهی بیوماس تولیدی افزایش یافته و منجر به افزایش ماده آلی خاک می‌شود (۱۳).



شکل ۸. تأثیر تیمارهای مختلف گوگرد بر عملکرد دانه گندم

تأثیر تیمارهای مختلف گوگرد بر عملکرد دانه گندم

گرچه تیمارهای مختلف گوگرد تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه گندم نداشت (شکل ۸) ولی ارتفاع بوته گندم اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد داشت و بیشترین ارتفاع بوته از کاربرد بیشترین مقدار گوگرد (۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار در کشت قبل) حاصل شد. گرچه طول خوشه گندم و تعداد خوشه در مترمربع اختلاف معنی‌داری با تیمارهای مختلف گوگرد نداشتند ولی بیشترین مقادیر آنها از کاربرد بیشترین مقدار گوگرد حاصل شد. اکسیداسیون گوگرد و تولید اسید سولفوریک در نقاط ریز اطراف ریشه‌ها افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی، افزایش جذب عناصر توسط گیاه و در نهایت افزایش رشد و عملکرد گیاه را سبب شده است (۲۱). بیشترین مقدار پروتئین، رطوبت، رشد گیاه و بیشترین رشد واقعی گندم با کاربرد توأم نیتروژن و گوگرد به‌دست آمده است (۳۲). همچنین امکان دستیابی به بیشترین ویژگی‌های فیزیولوژیک و کیفیت گندم نان با کاربرد خاکی و محلول پاشی نیتروژن و گوگرد حاصل شده است (۳۲). اخیراً از اثرات مفید گوگرد در متابولیسم گوگرد، ایجاد تحمل به خشکی گوگرد بیان شده است. تنظیم آنتاگونیستی متابولیسم گوگرد در برگ‌ها و ریشه‌ها، تحمل به خشکی گیاه را به‌صورت موفقیت‌آمیزی افزایش داده است (۳). گرچه کاربرد گوگرد موجب اختلاف معنی‌دار بر تعداد دانه در خوشه گندم نشد ولی بیشترین تعداد دانه در خوشه گندم از کاربرد ۳۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار حاصل شد.

نتیجه‌گیری

از آنجایی که بیان کمّی پارامترهای فیزیکی مخصوصاً ساختمان خاک، در مدل‌سازی و ارزیابی کیفیت خاک اهمیت زیادی دارد شناخت تأثیرپذیری آنها از گوگرد بسیار ارزنده است. نتایج نشان داد گوگرد در کاهش pH موضعی خاک، بهبود ساختمان خاک، مهیاسازی شرایط خاک برای افزایش عملکرد، تأثیر مثبت دارد که استفاده از آن در اراضی کشاورزی با خاک‌های آهکی، الزامی انکارناپذیر است. گوگرد کشاورزی فراوری شده توسط پژوهشکده صنعت نفت که در این پژوهش استفاده شد، مزیّتی داشت که پس از اتمام آزمایش و عملیات زراعی تقریباً آثاری از گوگرد مزبور در خاک مشاهده نشد. تکرار تحقیقات مشابهی در اراضی کشاوری مورد نیاز است تا اثرات گوناگون گوگرد کشاورزی بر شرایط فیزیکوشیمیایی خاک و تولید بهینه سایر محصولات مشخص شود.

سپاسگزاری

از حمایت مالی پژوهشکده صنعت نفت و مؤسسه تحقیقات خاک و آب برای انجام این پژوهش صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Abdallah, M., L. Dubousset, F. Meuriot, P. Etienne J. C. Avice and A. Ourry. 2010. Effect of mineral sulphur availability on nitrogen and sulphur uptake and remobilization during the vegetative growth of *Brassica napus* L. *Journal of Experimental Botany* 1(10): 2335-2346.
2. Abdelhamid, M., E. Eldardir and M. Abd El-Had. 2013. Ameliorate salinity effect through sulphur application and its effect on some soil and plant characters under different water quantities. *Agricultural Science* 4(1): 39-47.
3. Ahmad, N., M. Malagoli, M. Wirtz and R. Hell. 2016. Drought stress in maize causes differential acclimation responses of glutathione and sulfur metabolism in leaves and roots. *BMC Plant Biology* 16(247): 1-15.
4. Ahmadi, A., M. R. Neyshabouri, H. Rouhipour and H. Asadi. 2011. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility. *Journal of Hydrology* 400: 305–311.
5. Al-Sid-Cheikh, M., M. Pédrot, A. Dia, H. Guenet, D. Vantelon, M. Davranche, G. Gruau and T. Delhaye. 2015. Interactions between natural organic matter, sulfur, arsenic and iron oxides in re-oxidation compounds within riparian wetlands: NanoSIMS and X-ray adsorption spectroscopy evidences. *Science of the Total Environment* 515–516: 118–128.
6. Assefa, M. K., S. V. Tucher and U. Schmidhalter. 2014. Soil sulfur availability due to mineralization: Soil amended with biogas residues. *Journal of Soil Science and Environmental Management* 5(1): 13-19.
7. Babana, A. H., F. Samaké and K. Maïga. 2011. Characterization of some agricultural soils: presence and activity of Tilemsi rock phosphate-solubilizing Thiobacilli. *British Microbiology Resarch Journal* 1: 1-9.
8. Besharati, H. 2017. Effects of sulfur application and Thiobacillus inoculation on soil nutrient availability, wheat yield and plant nutrient concentration in calcareous soils with different calcium carbonate content. *Journal of Plant Nutrition* 40(3): 447–456.
9. Blum, S. C., J. Lehmann, D. Solomon, E. F. Caires and L. R. F. Alleoni. 2013. Sulfur forms in organic substrates affecting S mineralization in soil. *Geoderma* 200-201: 156–164.
10. Bronik, C. G. and R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3-22.
11. de Cesare Barbosa, G. M., J. F. De Oliveira, M. Miyazawa, D. B. Ruiz and J. T. Filho. 2015. Aggregation and clay dispersion of anoxisol treated with swine and poultry manures. *Soil and Tillage Research* 146: 279–285.
12. Dilmaghani, M. R., S. Hemmaty and L. Naseri. 2012. Effects of sulfur application on soil ph and uptake of phosphorus, ironand zinc in apple trees. *Journal of Plant Physiology and Breeding* 2(1): 1-10.
13. El-Fatah, M. S. and S. M. Khaled. 2010. Influence of organic matter and different rates of sulfur and nitrogen on dry matter and mineral composition of wheat plant in new reclaimed sandy soil. *Journal of American Science* 6(11): 1078- 1084.
14. Fonte, S. J., M. Nesper, D. Hegglin, J. E. Velásquez, B. Ramirez, I. M. Rao, S. M. Bernasconi, S. M. Bünemann, E. Frossard and A. Oberson. 2014. Pasture degradationimpacts soil phosphorus storage via changes to aggregate-associated soil organicmatter in highly weathered tropical soils. *Soil Biology and Biochemestry* 68: 150–157.
15. Gulser, C. 2006. Effect of forage cropping treatments on soil structure relationships with fractal dimensions. *Geoderma* 131: 33–44.
16. Heydarnezhad, F., P. Shahinrokhsar, H. Shokri Vahed and H. Besharati. 2012. Influence of elemental sulfur and sulfur oxidizing bacteria on some nutrient deficiency in calcareous soils. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 4(12): 735-739.
17. Jaggi, R. C., M. S. Aulakh and R. Sharma. 2005. Impacts of elemental S applied under various temperature and moisture regimes on pH and available P in acidic, neutral and alkaline soils. *Biology and Fertility of Soils* 41: 52–58.
18. Jia, X. H., X. R. Li, J. G. Zhang and Z. S. Zhang. 2009. Analysis of spatial variability of the fractal dimension of soil particle size in Ammopiptanthus mongolicus' desert habitat. *Environmental Geology* 58: 953-962.
19. Jin, C. W., X. H. Yu and S. J. Zhao. 2005. Latent function of microorganisms on plant iron acquisition. *Plant Nutrition and Fertitizer Science* 11: 688–695.
20. Karami, A., M. Homaee, S. Afzalinia, H. Ruhipour and S. Basirat. 2012. Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties. *Agriculture Ecosystem and Environment* 148: 22– 28.
21. Khadem, A., A. Golchin, S. Shafiee and A. Zare. 2014. Effect of manures and sulfur on nutrients uptake of corn. *Applied Field Crops Research*103: 1-10.
22. Kubenkulov, K., A. Naushabayev and D. Hopkins. 2013. Reclamation efficiency of elemental sulfur on the Soda saline soil. *World Applied Sciences Journal* 23(9): 1245-1252.
23. Malavolta, E. 2006. Manual of Mineral Nutrition of Plants [Manual de nutrição mineral de plantas]. Editora Ceres, Piracicaba, Brazil.
24. Martinez-Mena, M., A. G. Williams, J. L. Ternan and C. Fitzjohn, 1998. Role of antecedent soil water content on aggregates stability in a semi-arid environment. *Soil and Tillage Research* 48: 71–80.

25. McCauley, A., C. Jones and J. Jacobsen. 2009. Soil pH and organic matter. *Nutrient Management Modules* 8: 1–12.
26. Postgate, J. R. 1966. Media for sulphur bacteria. *Laboratory Practice* 15: 1239-1244
27. Rahman, M. M., A. A. Soaud, F. H. AL Darwish, F. Golam and M. S. Azirun. 2011. Growth and nutrient uptake of maize plants as affected by elemental sulfur and nitrogen fertilizer in sandy calcareous soil. *African Journal of Biotechnology* 10(60): 12882-12889.
28. Ramzani, P. M. A., M. Khalid, S. Anjum, W. Khan, M. Iqbal and S. Kausar. 2017. Improving iron bioavailability and nutritional value of maize (*Zea mays* L.) in sulfur-treated calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science* 63(9): 1255–1266.
29. Rawlins, B. G., G. Turner, J. Wragg, P. Mc Lachlan and R. M. Lark. 2015. An improved method for measurement of soil aggregate stability using laser granulometry applied at regional scale. *European Journal of Soil Science* 66: 604–614.
30. Rezaee, L., M. Shabanpour and N. Davatgar. 2011. Estimating the soil water retention curve from soil particle size distribution using the Arya and Paris model for Iranian soils. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 35: 649-657.
31. Rieu, M. and G. Sposito. 1991. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: Π. Applications. *Soil Science Society of America Journal* 55: 1239-1244.
32. Saeed, B., H. Gul, F. Ali, A. Zaman Khan, S. Anwar, N. Nasrullah, S. Alam, S. Khalid, A. Naz, H. Fayyaz and A. Azra. 2013. Contribution of soil and foliar fertilization of nitrogen and sulfur on physiological and quality assessment of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Natural Science* 5(9): 1012-1018.
33. Salako F. 2006. Fractal scaling of soil particles in agricultural landscapes of Nigerian savannas. *International Agrophysics* 20: 337-344.
34. Sepaskhah, A. R., S. A. A. Moosavi and L. Boersma. 2000. Evaluation of fractal dimension for analysis of aggregate stability. *Iran Agricultural Research* 19: 99–114.
35. Skwierawska, M., L. Zawartka and B. Zawadzki. 2008. The effect of different rates and forms of sulphur applied on changes of soil agrochemical properties. *Plant Soil and Environment* 54(4): 171–177.
36. Su, Y. Z., H. L. Zhao, W. Z. Zhao and T. H. Zhang. 2004. Fractal features of soil particle sizedistribution and the implication for indicating desertification. *Geoderma* 122: 43-49.
37. Tabatabai, M. A. 1986. Sulfur in Agriculture, 1st Ed., American Society of Agronomy Inc.
38. Tarabily, K. A., A. A. Soaud, M. E. Saleh and S. Matsumoto. 2006. Isolation and characterization of sulfur oxidizing bacteria, including strains of Rhizobium, from calcareous sandy soils and their effects on nutrient uptake and growth of maize (*Zea mays* L.). *Australian Journal of Agricultural Research* 57(1): 101-111.
39. Tyler, S. W. and S. W. Wheatcraft. 1992. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. *Soil Science. Society of. America. Journal* 56: 362-369.
40. Wang, Y., M. Shao and L. Gao. 2010. Spatial variability of soil particle size distribution and fractal features in water-wind erosion Crisscross region on the loess plateau of China. *Soil Science* 175(12): 579-585.
41. Yadegari, M. and R. Barzegar. 2010. Effect of sulfur and thiobacillus on nutrient availability, vegetative groth and essence production at *Melissa officinalis* L. *Journal of Herbal Drugs* 1: 35-40.
42. Ye, R., A. L. Wrighf, W. H. Orem and J. M. McCray. 2010. Sulfur distribution and transformations in Everglades's agricultural area soil as influenced by sulfur amendment. *Soil Science* 175: 263-269.
43. Zhao, M. Y., W. W. Zhao and Y. X. Liu. 2015. Comparative analysis of soil particle size distribution and its influence factors in different scales: a case study in the Loess Hilly-gully area. *Acta Ecologica Sinica* 35(14): 4625-4632.
44. Zhao, P. P., M. A. Shao and J. Zhuang. 2009. Fractal features of particle size redistributions of deposited soils on the dam farmlands. *Soil Science* 174: 403-407.
45. Zhao, W. J., Z. Cui and H. Ma. 2017. Fractal features of soil particle-size distributions and their relationships with soil properties in gravel-mulched fields. *Arabian Journal of Geosciences* 10: 211-217.
46. Zolfaghari, A. A. and M. A. Hajabbasi. 2008. Effect of different land use treatments on soil structural quality and relations with fractal dimension. *International Journal of Soil Science* 3(2): 101-108.

Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)
Vol. 23, No. 2, Summer 2019, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Determination of Agricultural Sulfur Effects on the Soil Structure Using Fractal Geometery and Aggregate Stability Indices

A. Karami[1*] and K. Khavazi[2]

(Received: February 17-2018; Accepted: August 18-2018)

Abstract

Due to unsuitable soil physical conditions, calcareous soils, and the existence of a huge amount of sulfur in the country, the study of sulfur effects on the soil structure and other soil properties is necessary. Therefore, the effects of different rates of sulfur including: 0, 750, 1500 and 3000 kg/ha, when accompanied by Halothiobacillus neapolitanus bacteria, on the soil properties in the corn-wheat rotation in two years were investigated. Parameters of soil pH, EC, sulphate, organic carbon, soil structure and wheat yield were measured. For the quantification of soil structure and quantity evaluation of sulfur effect on the soil structure, with measuring the aggregate size distribution, the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of the aggregate indices, and the amounts of fractal dimension were determined. The r results indicated that with the progress of the experiment and further application of sulfur along with thiobacillus bacteria, aggregation and aggregate stability were increased. The effect of sulfur treatments on MWD and GMD was significant; based on quantification indices, it had 28 percent positive effect on the soil structure. Sulfur with 3 percent reduction of fractal dimension had a significantly positive effect on the soil structure. Application of sulfur decreased a small amount of soil pH and increased 12 percent of the soil EC and 40 percent of the soil sulphate. So soil structure improvement and reclamation of soil physical condition can be very effective on the soil conservation and sustainability of the production resources and the conservation of environment.

Keywords: Aggregate stability, Calcareous soils, Fractal dimension, Halothiobacillus neapolitanus

1. Department of Soil and Water Research, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran.
2. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.
*: Corresponding Author, Email: ad.karami@areeo.ac.ir