دوره‌ی۳۴، شماره‌ی ۴، شماره‌ی پیاپی ۱۳۳، زمستان ۱۴۰۰، صفحه‌های ۱۰۳-۸۸
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2021.353673.1393

پژوهش‌های آبخیزداری

مقاله‌ی پژوهشی

CC BY

اثر گوگرد و سیلیکات سدیم بر تثبیت آهک خاک و مهارکردن فرسایش آبی در پیرامون کارخانه‌ی آهک (تربت حیدریه)

معصومه نعمت‌الهی
کارشناس‌ارشد آبخیزداری، گروه مهندسی طبیعت و گیاهان دارویی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تربت‌حیدریه، خراسان‌رضوی، ایران
مهدی بشیری
(نویسنده مسئول)* استادیار گروه مهندسی طبیعت و گیاهان دارویی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تربت‌حیدریه، خراسان‌رضوی، ایران
مریم آذرخشی
استادیار گروه مهندسی طبیعت و گیاهان دارویی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تربت‌حیدریه، خراسان‌رضوی، ایران
محمد رستمی‌خلج
استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان خراسان‌رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، خراسان‌رضوی، ایران

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: m.bashiri@torbath.ac.ir

تاریخ دریافت: ۳ اسفند ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۲۲ اردیبهشت ۱۴۰۰

چکیده

کربنات در خاک‌های آهکی باعث آلودگی منبع آب و خاک می‌شود. تثبیت‌کننده‌ها، یکی از روش‌های مؤثر در بهبود مشخصه‌های رفتاری خاک است. اثر منفرد و ترکیبی دو تیمار سیلیکات‌سدیم و گوگرد در تراز صفر (شاهد)، ۵، ۱۰ و ۱۵ g/m^2 بر تثبیت آهک و مهارکردن فرسایش در آزمایش عاملی در کرت‌هایی با شیب ۹٪ طبق کرت‌های بمعیار و با شبیه سازی باران با شدت ۱/۴ میلی‌متر بر دقیقه به‌مدت ۲۰ دقیقه بررسی شد. نتیجه نشان داد که تنها اثر اصلی سیلیکات‌سدیم بر متغیرهای حجم روان‌آب، وزن و غلظت ماده‌ی رسوب و ضریب روان‌آب معنادار است، اما بر متغیرهای اندازه‌ی نفوذ کل و درصد آهک اثر معناداری ندارد. دو عامل گوگرد و سیلیکات‌سدیم به‌شکل ترکیبی بر متغیرهای وزن ماده‌ی رسوب (با تراز معناداری ۰/۰۱۱)، غلظت ماده‌ی رسوب (با تراز معناداری ۰/۰۱۹) و درصد آهک (با تراز معناداری ۰/۰۰۰) اثر معناداری دارد. طبق نتیجه، اثر ترکیبی دو تیمار به‌طور قابل‌توجهی آهک نمونه‌های خاک را کاهش داد. می‌توان بیان داشت که دو تیمار در حالت ترکیبی، بیش‌ترین کارآیی را در تثبیت آهک دارد. سیلیکات‌سدیم در تثبیت خاک نقش موثری دارد، در نتیجه کاربرد منفرد سیلیکات‌سدیم به اندازه‌ی ۷/۵ g/m^2 و ترکیب آن با گوگرد به اندازه‌ی پنج گرم درمترمربع به‌ترتیب برای مهارکردن فرسایش و تثبیت آهک پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: تثبیت‌کننده، ماده‌ی رسوب، روان‌آب، شبیه‌ساز باران، کرت فرسایشی

مقدمه

امروزه مشکل آلودگی آب و خاک از عامل‌های مهم تهدیدکننده‌ی پایداری تولید کشاورزی و حیات دیگر زینندگان است (افشاری و همکاران ۲۰۱۶). بررسی آلوده‌شدن آب و خاک به‌دلیل ارتباط نزدیک آن با تغذیه‌ی انسان و دخالت مستقیم آن در تولید محصول کشاورزی از جنبه‌های محیط زیستی و سلامت جامعه‌های انسانی مهم است (بایبوردی ۲۰۰۹). توسعه‌ی صنعت اگر با بررسی‌ها و پژوهش‌های زیست‌محیطی همراه نباشد باعث بروز بسیاری از دشواری‌های زیست‌محیطی و به‌خطر انداختن حیات جامعه‌ی انسانی می‌شود. در نتیجه، بررسی نقش مرکزهای صنعتی در آلودگی خاک از مهم‌ترین کنش‌ها در زمینه‌ی مهارکردن آلودگی است (افشاری و همکاران ۲۰۱۶). با توجه به ضرورت بررسی امکان آلودگی خاک با صنعت‌های گوناگون، بررسی ویژگی‌های توزیع مکانی آلودگی در خاک‌های آلوده عامل مهمی در شناسایی جاهای آلوده و برطرف کردن آن است (نوروزی و روانبخش ۲۰۱۷). خاک‌های منطقه‌های معدنی و ساختمان‌های صنعتی وابسته در اثر تخریب، جابه‌جایی، تماس مواد معدنی و باطله‌ها، حضور مواد شیمیایی مصرفی، ورود پس‌آب‌ها، تماس با آب‌های سطحی حاوی عنصرها و ترکیبات سمی آلوده می‌شود. حضور پس‌ماندهای جامد و پس‌آب در منبع آبی با ویژگی انحلال‌پذیری زیاد باعث گسترش و انتقال آلودگی در آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود. رسوب تشکیل‌شده از این آب‌ها باعث تمرکزیافتن آلودگی در افق‌های مختلف خاک و تاثیر منفی زیست‌محیطی می‌شود.

آلودگی آب به مفهوم تغییرکردن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن در حدی است که آن را برای مصرف زیان‌بار یا بی‌کاربرد کند. این تغییر انسانی یا طبیعی است، گرچه در آب‌های سطحی راه دفع پسماندها ممکن است بر کیفیت آن‌ها مستقیم تأثیر بگزارد (سازمان ملی استاندارد ایران ۲۰۱۰). نقش انسان در انتقال مواد محلول در آب ناشی از عامل‌هایی مانند معدن-کاوی، فعالیت‌های صنعتی و تخلیه‌ی پس‌آب‌های شهری و کارخانه‌ها است. افزایش جمعیت منجر به گسترش صنایع شده است و مدیریت نادرست صنعتی منجر به آلودگی زمین و آسیب‌های جبران‌ناپذیر به طبیعت می‌شود (آبیاره و همکاران ۲۰۱۹). منبع‌های آبی از جمله آب‌های سطحی از نزدیک‌ترین جاهای تماس با مرکزهای صنعتی معدنی است. با چرخه‌ی آب در طبیعت نیز، کیفیت آن در پاسخ به محیط‌هایی که از آن‌ها عبور می‌کند عوض می‌شود (سازمان ملی استاندارد ایران ۲۰۱۰). باران و آب‌های سطحی در عبور از میان سازندهای مختلف زمین‌شناسی، نمک‌های آن‌ها را در خود حل می‌کنند. ازاین‌رو، کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی به نوع سازندی بستگی دارد که آب از میان فضاهای خالی آن می‌گذرد (ولایتی ۲۰۰۹). جریان آب و نمک‌ها در خاک سبب حرکت مجموعه‌ی آلاینده‌ها و درنتیجه آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود (مرادزاده و همکاران ۲۰۱۶) و مقدار آلودگی آب وابسته به تحرک مواد، اندازه‌ی دست‌رسی آن‌ها به سامانه‌ی آب زیرزمینی، ویژگی‌های آب‌خوان و آب‌وهوای منطقه است (سازمان ملی استاندارد ایران ۲۰۱۰).

فرسایش خاک عامل اصلی تخریب زمین و یکی از دشواری‌های عمده در مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منبع‌های طبیعی کشور و آبخیزها است (آدمی و خالدی‌درویشان ۲۰۲۱). از مهم‌ترین راه‌کارهای مدیریت آب و خاک شناخت فرآیندهای موثر بر فرسایش است. در منطقه‌هایی که برای جلوگیری از فرسایش یا مهار آن اقدامی نشود، حاصل‌خیزی خاک از دست می‌رود و با ته‌نشست کردن مواد در آب‌راه‌ها و مخزن‌ها زیان‌های جبران‌ناپذیری می‌زند (اکبری و همکاران ۲۰۱۷). مهارکردن یا کاهش‌دادن زیان‌های ناشی از سیلاب، فرسایش و رسوب‌گذاری به آب‌راه‌ها، زمین کشاورزی و سازه‌های آبی مستلزم این است که فرآیند حرکت جریان، فرسایش بستر و انتقال رسوب بررسی شود (بشیری و همکاران ۲۰۱۵).

یکی از عمده‌ترین دشواری‌های کشاورزی ایران کاهش آثار بد ناشی از زیادی کربنات‌کلسیم در خاک است. بیش‌تر خاک‌های ایران در گروه خاک‌های شدیداً آهکی است (حسن‌پور ۲۰۱۶) و زیاد بودن پی‌اچ در آن‌ها دشواری‌های زیادی را در پی دارد (ملکوتی و همایی ۲۰۰۴، بنایی و همکاران ۲۰۰۴). خاک‌های آهکی به‌دلیل کربنات‌کلسیم تأثیر عمیقی بر ویژگی‌های ساختمانی، شیمیایی و زیستی خاک‌ها دارد (بشارتی و همکاران ۲۰۱۷). یکی از روش‌های به‌سازی خاک تقویت زمین با افزودن موادی به خاک است (حسن‌پور ۲۰۱۶). مواد افزوده از راه‌کارهای کاهش دشواری‌های مربوط به خاک و آب تثبیت خاک است (داس ۲۰۱۳). تثبیت خاک روشی متداول است که مهندسان برای به‌بود دادن ویژگی‌های خاک با انواع مواد تثبیت‌کننده اجرا می‌کنند (کاوسی و صائبی ۲۰۱۷). اصلاح کامل خاک‌های شدیداً آهکی شدنی نیست، ولی اگر آسیب شناخته شود می‌توان با به‌کارگیری بعضی روش‌ها تا حدی اثرهای بد ناشی از مقدار زیاد آهک در خاک را کاهش داد (بنایی و همکاران ۲۰۰۴).

برای اصلاح خاک‌های آهکی باید موادی به خاک اضافه کرد تا با افزایش‌دادن مقدار کلسیم محلول خاک، جای‌گزین سدیم در سطح ذره‌های خاک شود. از عامل‌های مؤثر در انتخاب نوع ماده‌ی تثبیت‌کننده، تأثیر آن بر ویژگی‌های ساختمانی و مکانیکی خاک و ویژگی‌های شیمیایی آن برای رسیدن به هدف‌های تثبیت است (طاهرخانی ۲۰۱۶). در این خاک‌ها

بیش‌تر گچ و گوگرد در جایگاه ماده‌ی اصلاح‌کننده به‌کارگرفته می‌شود (مقیمی و همکاران ۲۰۱۸). پژوهش‌های داخلی نشان داده است که روش‌های شیمیایی مانند باریم سولفات با حذف‌کردن کربنات بیش‌ترین کارآیی را با بازدهی ۷۴٪، و کلسیم آلومینات با ۴۳/۵۵٪ حذف‌کردن کربنات کم‌ترین بازده را دارد (محمودیان و همکاران ۲۰۱۵). اثر پوزولان‌های طبیعی و فشردگی خاک در مهارکردن فرسایش خاک‌های آهک‌رسی با آهک زیاد نشان داد که اثر اصلی تیمارها معنادار است (بشیری و کاوسی‌داودی ۲۰۱۷). اضافه کردن ۶٪ آهک به خاک کربنات‌دار باعث شد اندازه‌ی تورم آن به صفر برسد و مقاومت و دوام آن در حد شاخص‌های پذیرفتنی شود (کاتبی ۲۰۰۷). پلی‌الکترولیت آنیونی بر پایه‌ی آکلریل‌آمید در جایگاه تثبیت‌کننده‌ی خاک توانست ضمن دادن چسبندگی بهتر به ذره‌های خاک موجب بهبود ویژگی‌های خاک شود (ربیعی و همکاران ۲۰۱۲).

نتیجه‌ی پژوهش در زمینه‌ی تاثیر گوگرد عنصری و باکتری تیوباسیلوس بر ویژگی‌های شیمیایی خاک و جذب عنصرهای غذایی در گیاهان نشان داد که گوگرد به‌همراه تیوباسیلوس باعث کاهش چشم‌گیر پی‌اچ خاک و افزایش جذب عنصرها می شود (قادری و همکاران ۲۰۱۸الف). تاثیر گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر اکسیداسیون گوگرد و برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک نشان داد که با افزایش مقدار گوگرد و زمان خوابانـدن[1] آن، مقدار اکسیداسیون گوگرد کاهش یافت (قادری و همکاران ۲۰۱۸ب). بررسی کاربرد خاک‌پوش‌های نانورس، پلی‌وینیل‌استات و زغال زیستی اصلاح‌شده برای تثبیت و مهارکردن فرسایش خاک شنی و شنی آهک‌رسی نشان داد که تیمارها سبب کاهش معنی‌دار فرسایش بادی در زمان‌های مختلف در مقایسه با خاک شاهد شد (نورعلی‌وند و فرخیان‌فیروزی ۲۰۲۰).

افزودن ۴٪ آهک به همراه ۴٪ خاکستر پوسته‌ی نارگیل منجر به بهبود ویژگی‌های خاک و تثبیت خاک شد (اگوندیپ و نوچیری ۲۰۱۷). پژوهش بر بهبود خاک‌های آهکی با رس کاولینیت نشان داد که افزودن ۹٪ رس کاولینیت محتوای آب بهینه را بسیار کاهش می‌دهد و باعث بهبود خاک‌های آهکی می‌شود (المسالامی و همکاران ۲۰۱۸). پژوهش‌های تجربی بر ویژگی‌های مکانیکی لس تثبیت‌شده با سدیم کربوکسی متیل سلولز[2] منجر به افزایش مقاومت فشاری، استحکام کششی، و کاهش چگالی خشک خاک لس شد (هنگ وانگ ۲۰۱۹). بررسی اثر پودر سنگ‌آهک در بهبود و تثبیت خاک رس متورم نشان داد که پودر سنگ‌آهک باعث افزایش مقاومت فشاری خاک رس و بهبود و تثبیت خاک رس متورم شد (توماس و همکاران ۲۰۱۹). ارزیابی اثربخشی درمان حرارتی و دَرهَم کردن آن با ذره‌های درشت‌دانه در تثبیت خاک‌های آهک‌رسی نشان داد که با افزایش گرما توان تورم خاک کاهش می‌یابد، و با افزودن ۳۰٪ ذره‌های درشت به نمونه‌های خاک، ویژگی‌هایی مانند بیشینه‌ی چگالی خشک و مقاومت فشاری نمونه‌ها بهبود می‌یابد و خاک آهک‌رسی تثبیت می‌شود (ترابی‌کاوه و حیدری ۲۰۲۰). بیوچار و پلی‌اکریل‌آمید نیز در خاک‌های لس و آهک‌رس باعث بهبود معنادار ضریب روان‌آب و افزایش نفوذ شد، ولی اثر بیوچار در مهارکردن هدررفت خاک بیش‌تر بود (صادقی و همکاران ۲۰۲۱).

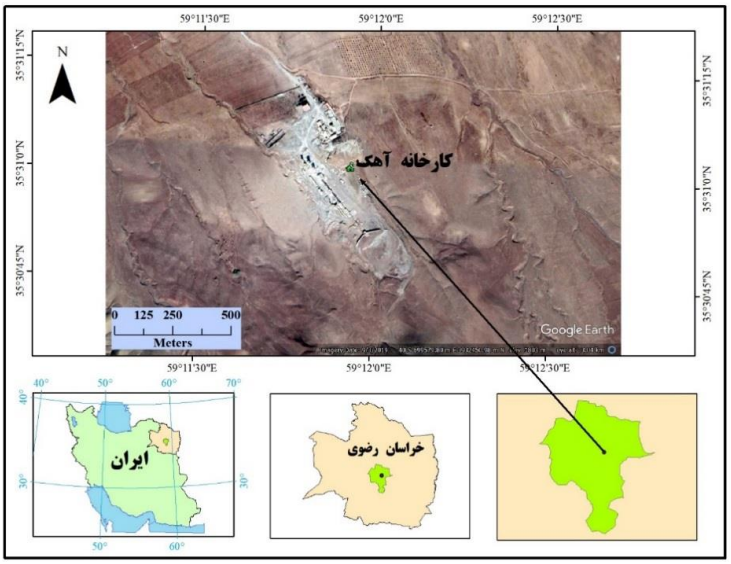
از سال‌های دراز کارخانه‌ی آهک روستای غنچی تربت‌حیدریه محیط و زمین پیرامون خود را با گسیل‌کردن گردوغبار حاوی آهک فراوان آلوده کرده‌است. این گردوغبارها روی سطح خاک می‌نشیند، و سپس خاک‌های آلوده به آهک فراوان با آب‌های سطحی به آب منتقل می‌شود، که خطر محیط‌زیستی ثانویه‌یی است، به‌ویژه زمانی که این خاک‌ها برای کشاورزی به‌کار گرفته شود. علاوه بر محدودیت آب که عمده‌ترین محدودیت برای گسترش فعالیت‌های کشاورزی است قلیاییت، شوری و پستی‌وبلندی نیز محدودیت‌هایی را ایجاد کرده است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی خراسان‌رضوی ۲۰۰۷). با توجه به سازندهای حساس به انحلال در منطقه، انواع فرسایش‌های شیاری و خندقی مشاهده شده است. دست‌یابی به دو هدف در پژوهش در نظر بود، نخست بررسی کارآیی دو تیمار گوگرد و سیلیکات سدیم به‌شکل انفرادی و ترکیبی در تثبیت آهک در خاک و جلوگیری از ورود آن به روان‌آب‌ها، و دوم معرفی بهترین ترکیب در تثبیت خاک منطقه در برابر فرسایش آبی.

مواد و روش‌ها

نمونه‌ی خاک از زمین پیرامون کارخانه‌ی آهک (چهار کیلومتری غرب روستای غنچی در ۳۵ کیلومتری شهر تربت‌حیدریه در طول جغرافیایی ۵۹° و ۱۲′ و ۰۰″ شرقی و عرض جغرافیایی ۵۷° و ۳۰° و ۵۷″ شمالی) جمع‌آوری شد (شکل ۱). خاک‌های این محدوده بر اثر فعالیت‌های صنعتی کارخانه، به‌شدت با آهک آلوده شده است، که این آلودگی منبع‌های آبی منطقه را نیز در برابر خطر آلودگی گذارده است. اقلیم منطقه بر پایه‌ی روش دومارتن نیمه‌خشک است. متوسط دمای آن ۱۳/۷ °C و متوسط روزهای یخبندان سالانه ۵۱ روز است. متوسط بارندگی درازمدت منطقه (دوره‌ی آماری ۴۰ ساله‌ی ۱۳۸۵-۱۳۴۶) ۲۴۶/۰۵ میلی‌متر است

1- Incubation
2- Carboxy Methyl Cellulose

(سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی خراسان‌رضوی ۲۰۰۷). نوع خاکی که کارخانه روی آن ساخته‌شده اریدی‌سول[3] است که نشان‌دهنده‌ی خاک منطقه‌های خشک است. این خاک افق مالیک ندارد و از نوع خاک‌های قهوه‌یی متمایل به قرمز و میانه‌بافت است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی نمونه‌برداری خاک و تصویر هوایی منطقه.

پژوهش به روش آزمایش عاملی با شبیه‌ساز باران و کرت فرسایشی انجام شد. عامل‌ها گوگرد و سیلیکات سدیم در ترازهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ g/m^2 بود. دلیل انتخاب این تیمارها این بود که گوگرد در بهبود ویژگی‌های ساختمانی و شیمیایی خاک (ذبیحی و نوری‌حسینی ۲۰۱۷) و کاهش پی‌اچ و قلیاییت آهک (قادری و همکاران ۲۰۱۸الف) اثر مثبتی دارد. سیلیکات سدیم نیز ویژگی‌های مثبتی مانند افزایش مقاومت فشاری خاک (هوات و همکاران ۲۰۱۲) افزایش قدرت، دوام و تثبیت خاک (مارتو و همکاران ۲۰۱۴، توماس و همکاران ۲۰۱۹) و کاهش شکل‌پذیری (تاج‌الدین و همکاران ۲۰۱۵) نشان داده است. در محلول‌هایی با مقدار مختلف سیلیکات سدیم، کربنات‌کلسیم بیش‌ترین اندازه‌ی رسوب را داشته است (کلرمیر و همکاران ۲۰۱۰).

کرت‌های فرسایشی به‌شکل مستطیلی و محیط بسته در اندازه‌های ۰/۵×۱ m بود. در انتهای هر کرت یک مخزن جمع آورنده‌ی روان‌آب و رسوب با درپوش کار گذاشته‌شد. برای آماده‌سازی کرت‌های فرسایشی بعد از جمع‌آوری خاک، با شن در کف کرت‌ها صافی‌یی به کلفتی ۱۰ سانتی‌متر ایجاد شد. کرت‌ها با وزن مناسب (برای دست‌یابی به جرم مخصوص نمونه‌ی طبیعی به روش کوبیدگی) از خاک به کلفتی ۲۰ سانتی‌متری پر شد، و برای انجام آزمایش تسطیح شد (بشیری و همکاران ۲۰۱۵، خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۶). شیب ثابت ۹٪ منطبق با کرت‌های بمعیار (ویشمایر و اسمیت ۱۹۷۸) برای کرت های آزمایشی به‌کار برده‌شد. چون مشخص شده‌است که ظرفیت روان‌آب از شیب‌های همگن در خلال رگبارهای متوسط تا شدید معمولاً برای بردن همه‌ی مواد جداشده در درجه‌ی شیب‌های بیش‌تر از ۳ - ۲٪ کافی است (ریمال و لال ۲۰۰۹).

دستگاه شبیه‌ساز باران به‌کار برده‌شده مدل F۱ بود که در آن آب با فشارهای ۰/۵ تا ۱ Bar تنظیم می‌شود، و توان ایجاد قطره با قطرهای تا ۶ میلی‌متر و بارانی با شدت‌های ۵۰ تا ۱۶۰ میلی‌متر در ساعت دارد. ارتفاع بارش در این دستگاه تا بیش از ۴m افزایش و سطح خاک پوشش‌داده‌شده در این ارتفاع ۹m^2 است (شرکت آذرخاک‌آب ارومیه ۲۰۱۷) به دلیل تأثیر معنی‌دار شدت بارندگی در ایجاد فرسایش و تولید رسوب، بر پایه‌ی منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی ایستگاه منطقه، شدّت بارش مبنا ۱/۴ mm/min گرفته شد که بارندگی با دوره‌ی بازگشت‌های ۱۰۰ ساله در منطقه است (سازمان مدیریت و برنامه ریزی خراسان‌رضوی ۲۰۰۷).

یکی از معیارهای شبیه‌سازی دل‌خواه باران توزیع مناسب اندازه‌ی قطره است. کم‌ترین اندازه‌ی قطره‌ی باران‌های طبیعی در محدوده‌ی نزدیک به ۰ و بیش‌ترین آن ۶ تا ۶/۲ میلی‌متر

3- Aridisol

است که با روش گلوله‌ی آردی[4] محاسبه شد (محمودآبادی و همکاران ۲۰۰۷). اندازه‌ی ضریب یک‌نواختی باران تولیدشده با شبیه‌ساز نیز با ضریب یک‌نواختی کریستینسن[5] محاسبه شد (معروف‌پور و همکاران ۲۰۱۰). برای بررسی سرعت حد قطره‌ی باران، انرژی جنبشی قطره‌های باران، و انرژی جنبشی رگبار روش گان و کینزر (۱۹۴۹) بر پایه‌ی داده‌های آزمایشی به‌کاربرده شد.

برای تهیه‌ی نمونه‌های خاک و تخمین مقدار خاک نیازداشته‌ی آزمایش ابتدا تعدادی کلوخه به‌شکل تصادفی از جاهای مختلف منطقه انتخاب و جرم مخصوص ظاهری تر آن در آزمایشگاه به روش پارافین محاسبه شد (هیرماس و فارکویم ۲۰۰۷). بر پایه‌ی جرم مخصوص ظاهری‌تر کلوخه‌ها، وزن نمونه‌ی خاک برای هر آزمایش با هدف دست‌یابی به جرم مخصوص طبیعی خاک با روش کوبیدگی برآورد شد (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۶). این اندازه‌ی خاک از لایه‌ی ۵cm سطح خاک منطقه برداشته شد.

برای بررسی اثر تیمارها بر مهار فرسایش، تثبیت آهک و پی‌رو آن کاهش آلودگی روان‌آب، تیمارها شامل سیلیکات سدیم و گوگرد با ترازهای مختلف (گوگرد معدنی خواف با خلوص ۲۵ تا ۳۰٪ و سیلیکات‌سدیم با خلوص ۹۹٪، شرکت فناوران آریامحور)، جداگانه و در ترکیب با هم در سطح کرت‌ها به‌کار برده شد. برای هر تراز از تیمارها جداگانه و در ترکیب باهم، سه تکرار انجام شد که در مجموع ۴۸ کرت آزمایش شد (شکل ۲).

در آزمایش هر تیمار، کرت‌ها جداگانه با ۱L آب حاوی تیمار محلول‌پاشی شد. پس از آماده‌سازی یک ساعت به نمونه‌های خاک استراحت داده شد. با دستگاه شبیه‌ساز باران ۲۰ دقیقه بارندگی بر تیمارها داده شد، و روان‌آب خروجی جمع‌آوری و حجم آن با استوانه‌ی مدرج اندازه‌گیری شد. اندازه‌ی رسوب مانده روی کاغذ پس از عبوردادن از کاغذ صافی ۴۲ میکرونی (واتمن) به مدت ۲۴ ساعت در کوره (۱۰۵ °C) خشک و وزن کرده شد (فرضی و همکاران ۲۰۱۶). پس از انجام هر آزمایش خاک قبلی برداشته و خاک جدید درون کرت ریخته می‌شد. نمونه‌های خاک کاملاً تصادفی از جاهای مختلف برداشته شد و درصد آهک خاک در آزمایشگاه با روش تیتراسیون به‌دست آمد. درصد آهک نمونه‌های شاهد به روش خنثاسازی با اسیدکلریدریک (آلیسون و مودی ۱۹۶۵) بررسی شد. اندازه‌ی آهک در نمونه‌های روان‌آب جمع‌آوری از کرت‌های فرسایشی (سختی آب که نشان‌دهنده‌ی درصد آهک نمونه‌ها است (لئوپرت و سوارز ۱۹۹۶))، با روش تیتراسیون (تعیین غلظت محلول مجهول) اندازه‌گیری و ثبت شد.

شکل ۲- شبیه‌ساز باران و کرت‌های فرسایشی.

بانک اطلاعاتی داده‌های نهایی در نرم‌افزار SPSSv.26 درست شد. تحلیل پراش با درنظر گرفتن اثر اصلی و ترکیبی تیمارها بر متغیرهای وابسته‌ی حجم روان‌آب، وزن ماده‌ی رسوب، غلظت ماده‌ی رسوب و ضریب روان‌آب، اندازه‌ی نفوذ، و درصد آهک انجام شد. برای متغیرهای وابسته آزمون بهنجار بودن توزیع داده‌ها به روش شاپیرو ویلک (تعداد داده‌های کم‌تر از ۵۰) و در تراز معنی‌داری ۰/۰۵ انجام و داده‌ها بهنجار شد. اگر میان متغیرها و عامل‌ها اختلاف کلی معناداری بود، به روش دانکن منشأ اختلاف‌ها شناسایی شد (بی‌همتا و زارع‌چاهوکی ۲۰۱۱).

نتایج و بحث

مقدار آهک در خاک منطقه ۳۵٪ محاسبه شد. ضریب یک‌نواختی بارش در شدت ۷۸٪ به دست آمد، که توزیع

4- Flour Pellet Method
5- Christiansen Uniformity

مناسب بارش در سطح کرت‌ها را نشان می‌دهد. میانگین وزنی قطـر قطره‌ها از رابطه‌ی شبیه‌سـازی قطره‌ها میلی‌متر ۰/۷۲ ، و سـرعت حد قطره‌ی بـاران و انرژی جنبشـی آن به‌ترتیب ۳/۴۲ m/s و ۱/۱۳ ژول به‌دسـت آمد. نتیجه‌ی تحلیل پراش دوطرفه در بررسـی اثر جداگانه و ترکیبـی دو عامل گوگرد و سیلیکات سدیم بر متغیرها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- نتیجه‌ی تحلیل اثر اصلی و ترکیبی دو تیمار گوگرد و سیلیکات سدیم بر متغیرهای پژوهش.

متغیر	تیمار	مجموع مربع‌ها	درجه‌ی آزادی	آماره	تراز معناداری
	سیلیکات‌سدیم	۵/۲۹۸	۳	۳/۹۴۵	۰/۰۱۷
حجم روان‌آب	گوگرد	۰/۹۱۸	۳	۰/۶۸۴	۰/۵۶۸
	سیلیکات سدیم * گوگرد	۳/۸۸۰	۹	۰/۹۶۳	۰/۴۸۷
	سیلیکات سدیم	۲۸۱/۰۸	۳	۲۵/۹۶	۰/۰۰۰
وزن ماده‌ی رسوب	گوگرد	۲۵/۹۵	۳	۲/۳۹	۰/۰۸۶
	سیلیکات سدیم * گوگرد	۹۶/۹۳	۹	۲/۹۸	۰/۰۱۱
	سیلیکات سدیم	۸/۷۲۷	۳	۱۵/۱۸۸	۰/۰۰۰
غلظت ماده‌ی رسوب	گوگرد	۰/۲۳۹	۳	۰/۴۱۶	۰/۷۴۳
	سیلیکات سدیم * گوگرد	۴/۶۱۰	۹	۲/۶۷۴	۰/۰۱۹
	سیلیکات سدیم	۰/۱۰۸	۳	۳/۹۴۵	۰/۰۱۷
ضریب روان‌آب	گوگرد	۰/۰۱۹	۳	۰/۶۸۴	۰/۵۶۸
	سیلیکات سدیم * گوگرد	۰/۰۷۹	۹	۰/۹۶۳	۰/۴۸۷
	سیلیکات سدیم	۳/۶۴۱	۳	۲/۳۴۶	۰/۰۹۱
اندازه‌ی نفوذ	گوگرد	۱/۳۲۸	۳	۰/۸۵۶	۰/۴۷۴
	سیلیکات سدیم * گوگرد	۴/۱۲۹	۹	۰/۸۸۷	۰/۵۴۷
	سیلیکات سدیم	۳/۱۵۴	۳	۱/۷۵۰	۰/۱۷۷
درصد آهک	گوگرد	۳/۴۸۳	۳	۱/۹۳۳	۰/۱۴۴
	سیلیکات سدیم * گوگرد	۳/۲۱۶	۹	۵/۹۵۰	۰/۰۰۰

تحلیـل پـراش دوطرفه (جـدول ۱) نشـان داد کـه از میان دو عامل سـیلیکات سـدیم و گوگـرد به‌شـکل جداگانه، تنها سـیلیکات سدیم بر متغیرهای وابسـته‌ی حجم روان‌آب، وزن ماده‌ی رسـوب، غلظت ماده‌ی رسـوب و ضریـب روان‌آب اثر معناداری داشت، اما بر متغیرهای وابسته‌ی اندازه‌ی نفوذ و درصد آهک اثر معناداری نداشـت. دو عامل گوگرد و سیلیکات سدیم به‌شکل ترکیبی بر متغیرهای وزن ماده‌ی رسوب، غلظت ماده‌ی رسوب و درصد آهک اثر معناداری داشت، اما بر متغیرهای حجم روان‌آب، ضریب روان‌آب و اندازه‌ی نفوذ اثر معناداری نداشت.

اثر اصلی تیمار سیلیکات سدیم بر متغیر وابسته‌ی حجم روان‌آب معنادار بود، به این معنی که این تیمار باعث کاهش تولید حجم روان‌آب شـد. اما اثر اصلی تیمار گوگـرد و اثر ترکیبی تیمارها بر این متغیر معنـادار نبود و تأثیری در اندازه‌ی حجم روان آب نداشـت. دلیل آن را ممکن است به ویژگی ایجاد چسبندگی در ذره‌های خاک با سـیلیکات سـدیم در مقایسه با گوگرد نسبت داد، کـه بر اندازه‌ی آب‌گذری و در نتیجه حجم روان‌آب اثرگزار اسـت. پژوهش تاج‌بخش و همکاران (۲۰۱۷) نیز نشان داد که افزودن خاکسـتر پوسـته‌ی برنج به آهک در جایگاه کاتالیزور، با تسـریع‌کردن واکنـش پوزولانی و ایجادکردن چسـبندگی، آب‌گذری را نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش می‌دهد.

تیمار گوگرد بـه تنهایی اثرمعناداری بـر درصد آهک خروجی نداشـت. بر پایه‌ی پژوهش‌هایی که بر خاک‌هـای آهکی انجام گرفته اسـت می‌توان بیان داشت که علت تاثیرگزار نبودن تیمار اصلی گوگـرد در کاهش قلیاییت آهـک و کاهش درصد آهک خارج‌شده از سطح کرت‌های فرسایشـی گوگرد اکسیدنشده یا نبود باکتری تیوباسیلوس برای اکسیدکردن گوگرد است (قادری و همـکاران ۲۰۱۸الف). مقدار کم تیمـار اصلی گوگرد به‌دلیل اقتصادی و کاربردی‌بودن نتیجه‌ی پژوهش نیز ممکن است دلیل دیگری باشد. پژوهش بشیری و کاوسـی‌داودی (۲۰۱۷) نشان داد که اثر اصلی تیمارهای فشـردگی خاک و پوزولان نسبت به تولید روان‌آب معنادار است، اما اثر ترکیبی آن‌ها معنادار نیست. بین اثر اصلی تیمار گوگرد و اثر اصلی تیمار سـیلیکات سـدیم و اثر ترکیبی تیمارها نسـبت به متغیر وزن ماده‌ی رسـوب، اثر اصلی تیمار گوگـرد معنادار نبود (جدول ۱). اما اثر اصلی تیمار

سیلیکات سدیم و اثر ترکیبی تیمارها نشان‌دهنده‌ی اثر مثبت و معناداری در متغیر وزن ماده‌ی رسوب است، و اندازه‌ی ماده‌ی رسوب خروجی از کرت‌های آزمایشی را کاهش داد. در نمودار اثر ترکیبی با افزایش تیمار سیلیکات سدیم، میانگین وزن ماده‌ی رسوب روند کاهشی داشت، و در مقدار سیلیکات سدیم در تراز ۷/۵ و ۰ اختلاف میانگین وزن ماده‌ی رسوب با توجه به اندازه‌ی گوگرد زیادتر بود، ولی در تیمار سیلیکات سدیم در تراز ۵ و ۲/۵ g/m^2 از اندازه‌ی این اختلاف‌ها در تیمارهای مختلف گوگرد کاسته شد. شریفی و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان دادند که تثبیت‌کننده‌ها منجر به کاهش ۹۰٪ ماده‌ی رسوب ناشی از باران شد، و افزایش غلظت تثبیت‌کننده‌ها در همه‌ی تراکم‌ها تا حد آستانه‌ی مشخصی در کاهش اندازه‌ی ماده‌ی رسوب خروجی تأثیر مثبت داشت. سیلیکات سدیم با گذشت زمان باعث بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش قدرت خاک می‌شود (مایتا و همکاران ۲۰۱۰).

اثر تیمار سیلیکات سدیم بر متغیرهای حجم روان‌آب، وزن و غلظت ماده‌ی رسوب و ضریب روان‌آب (جدول ۲ تا ۵)، و اثر متقابل سیلیکات سدیم و گوگرد بر متغیرهای وزن و غلظت ماده‌ی رسوب و درصد آهک معنادار بود (شکل ۳ تا ۵).

با آزمون دانکن در تیمار سیلیکات سدیم (جدول ۲) مشخص شد که این تیمار در تراز ۷/۵ و ۰ g/m^2 به‌طور معناداری حجم روان‌آب کم‌تری تولید کرد، و تیمار سیلیکات سدیم در تراز ۷/۵ g/m^2 بهترین کارآیی را در کاهش تولید روان‌آب داشت. تیمار سیلیکات سدیم به دلیل ایجاد چسبندگی خاک، در اندازه‌ی ۷/۵ g/m^2، اندازه‌ی روان‌آب را نسبت به تراز‌های ۲/۵ و پنج g/m^2 کاهش معنادار داد. تیمار اصلی سیلیکات سدیم باعث کاهش حجم روان‌آب خروجی از کرت‌های آزمایشی شد، و پی‌رو آن ضریب روان‌آب را کاهش داد، درنتیجه تیمار سیلیکات سدیم اثر مثبت و معناداری بر حجم روان‌آب خروجی و ضریب روان‌آب داشت. تیمار اصلی گوگرد تأثیری در کم‌کردن اندازه‌ی حجم روان‌آب خروجی نداشت، پس نمی‌تواند اثر مثبت و معناداری بر ضریب روان‌آب داشته باشد. پژوهش المسالامی و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که افزودن ۹٪ رس کاولینیت با کاهش زیاد محتوای آب بهینه و افزایش بیشینه‌ی تراکم در شرایط خشک باعث بهبود خاک‌های آهکی شد.

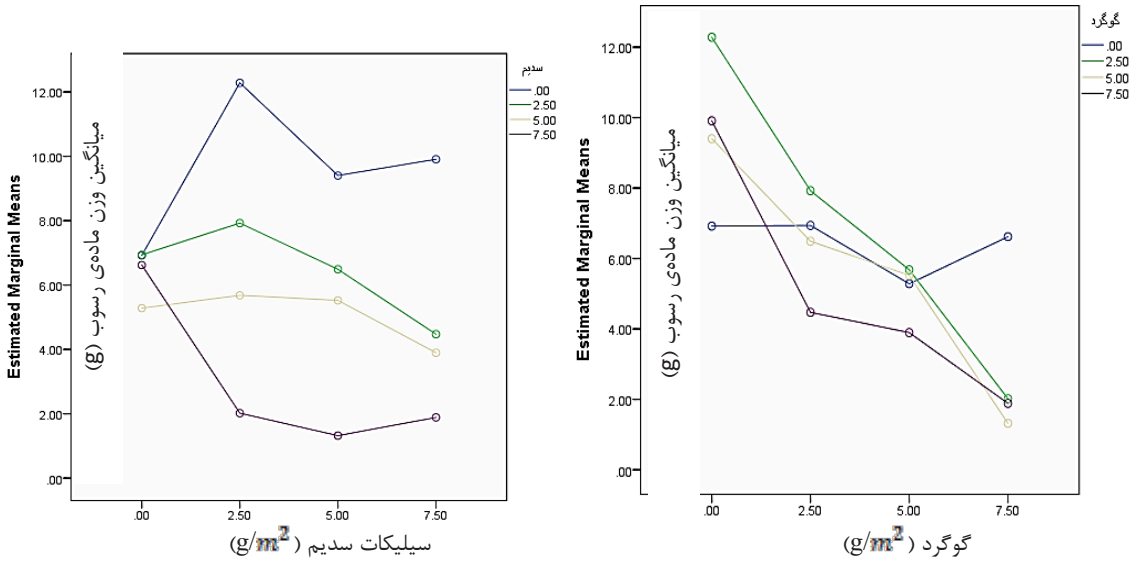
نمودار اثر ترکیبی (شکل ۳) نشان می‌دهد که با افزایش اندازه‌ی تیمار گوگرد میانگین وزن ماده‌ی رسوب کاهش یافت، اما اختلاف میانگین وزن ماده‌ی رسوب در تیمار گوگرد در تراز ۷/۵ و ۲/۵ g/m^2 بر پایه‌ی اندازه‌ی سیلیکات سدیم افزایش یافت.

جدول ۲- نتیجه‌ی بررسی زیرمجموعه‌های همگن ترازهای مختلف سیلیکات سدیم بر حجم روان‌آب.

سیلیکات سدیم (g/m^2)	تعداد کرت	گروه ۱	گروه ۲
۷/۵		۱/۴۰	
۰	۱۲	۱/۶۸	۱/۶۸
۵			۲/۰۸
۲/۵			۲/۲۵
تراز معناداری		۰/۳۰۹	۰/۹۵۷

جدول ۳- نتیجه‌ی بررسی زیرمجموعه‌های همگن ترازهای مختلف سیلیکات سدیم بر وزن ماده‌ی رسوب.

سیلیکات سدیم (g/m^2)	تعداد کرت	گروه ۱	گروه ۲	گروه ۳
۷/۵		۲/۹۶		
۵	۱۲		۵/۰۹	
۲/۵			۶/۴۵	
۰				۹/۶۲
تراز معناداری		۱/۰۰	۰/۰۸۹	۱/۰۰

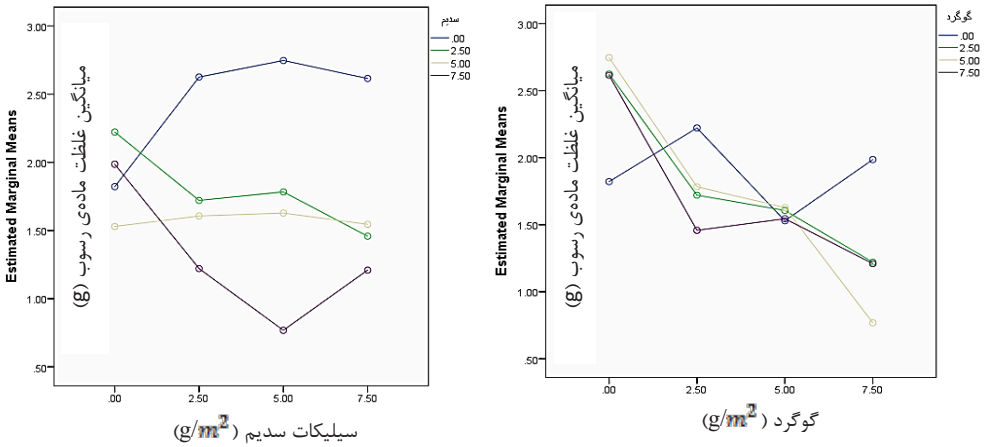


شکل ۳- نمودار اثر ترکیبی تیمار سیلیکات سدیم و گوگرد بر میانگین وزن رسوب.

مشاهده‌های نتیجه‌ی آزمون تیمار سیلیکات سدیم (جدول ۳) نشان می‌دهد که این تیمار در تراز ۷/۵ g/m^2 ماده‌ی رسوب کم‌تری تولید کرد. پژوهش مارتو و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که سیلیکات سدیم باعث افزایش قدرت و بهبود ویژگی‌های ساختاری خاک می‌شود. هوات و همکاران (۲۰۱۲) نیز نشان دادند که افزودن سیلیکات سدیم باعث افزایش مقاومت فشاری خاک و بهبود ویژگی‌های ساختمانی و شیمیایی خاک می‌شود. این نتیجه با بررسی‌های ربیعی و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد که نشان دادند کاربرد پلی‌الکترولیت آنیونی بر پایه‌ی آکلریل‌آمید ممکن است ضمن چسبندگی بهتر ذره‌ی خاک موجب تقویت ویژگی‌های خاک شود. بنابراین هم‌سو با یافته‌های توماس و همکاران (۲۰۱۰)، نتیجه‌ی ما نشان‌دهنده‌ی آن است که سیلیکات سدیم افزودنی مناسبی است که ممکن است باعث بهبود و افزایش قدرت و دوام خاک و سرانجام تثبیت خاک شود.

جدول ۴- نتیجه‌ی بررسی زیرمجموعه‌های همگن ترازهای مختلف سیلیکات سدیم بر غلظت رسوب.

سیلیکات سدیم (g/m^2)	تعداد کرت	گروه ۱	گروه ۲	گروه ۳
۷/۵	۱۲	۱/۲۹		
۵		۱/۵۷	۱/۵۷	
۲/۵			۱/۷۹	
۰				۲/۴۵
تراز معناداری		۰/۱۲۵	۰/۲۳۰	۱/۰۰۰



شکل ۴- نمودار اثر ترکیبی سیلیکات سدیم و گوگرد بر میانگین غلظت رسوب.

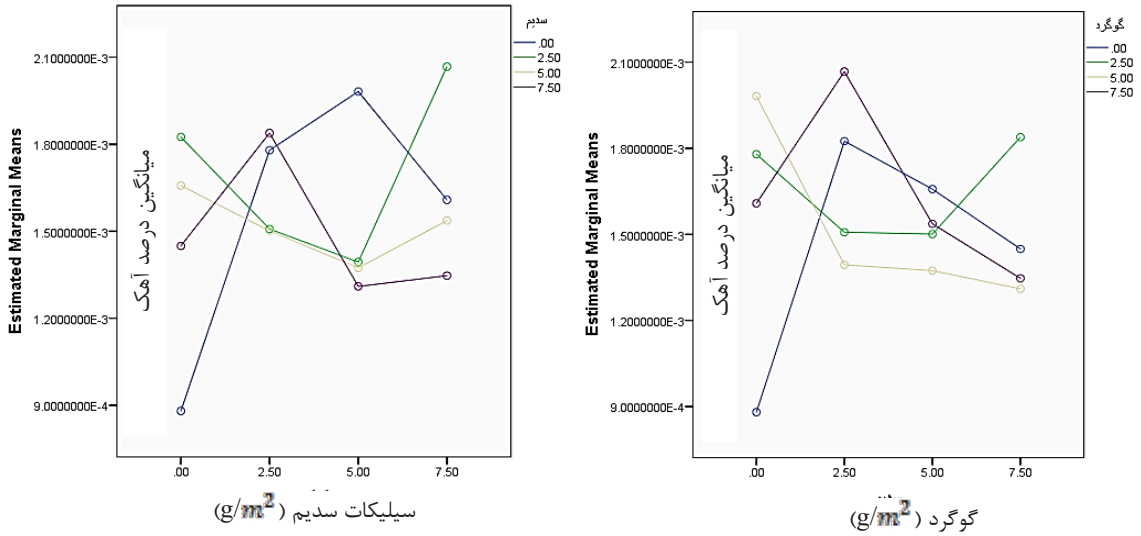
بین اثر اصلی تیمار گوگرد، اثر اصلی تیمار سیلیکات سدیم، و اثر ترکیبی تیمارها نسبت به غلظت ماده‌ی رسوب، تنها اثر اصلی تیمار سیلیکات سدیم و اثر ترکیبی تیمارها معنادار بود، اما اثر اصلی تیمار گوگرد معنادار نبود.

در تیمار سیلیکات سدیم (جدول ۴) اختلاف معناداری در سه گروه مشاهده نشد. تیمار سیلیکات سدیم در تراز ۷/۵ g/m^2 در گروه اول غلظت ماده‌ی رسوب کم‌تری تولید کرد، و تیمار سیلیکات سدیم در تراز ۰ نشان‌دهنده‌ی اختلاف معنادار با دیگر تیمارها است. درنتیجه غلظت ماده‌ی رسوب زیادتری تولید کرد. تیمار اصلی سیلیکات‌سدیم و اثر ترکیبی آن با گوگرد اثر معناداری نسبت به وزن ماده‌ی رسوب و غلظت ماده‌ی رسوب داشت، و باعث کاهش ماده‌ی رسوب و غلظت ماده‌ی رسوب خروجی از کرت‌های فرسایشی شد. درنتیجه تیمار سیلیکات سدیم و ترکیب آن با گوگرد باعث چسبندگی ذره‌ی خاک شد و مانع پاشیدن ذره‌های خاک و افزایش مقاومت خاک در هنگام بارش شد.

با افزایش یافتن مقدار تیمار سیلیکات سدیم میانگین غلظت ماده‌ی رسوب روند کاهشی پیدا کرد (شکل ۴)، اما اختلاف میانگین غلظت ماده‌ی رسوب در تیمار سیلیکات سدیم در تراز ۵ و ۲/۵، به‌دلیل مقدار گوگرد کم‌تر شد. در تیمار سیلیکات سدیم در تراز ۷/۵ g/m^2 به اندازه‌ی این اختلاف‌ها در تیمار گوگرد در تراز ۵ و ۰ افزوده شد. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده با پژوهش تاج‌الدین و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد که نشان دادند افزودن سیلیکات سدیم سبب کاهش شکل‌پذیری و افزایش مقاومت فشاری خاک می‌شود. بر پایه‌ی این نمودار اختلاف میانگین غلظت ماده‌ی رسوب در تیمار گوگرد در ترازهای ۷/۵، ۵ و ۲/۵ g/m^2 به‌دلیل مقدار تیمار سیلیکات سدیم در تراز ۷/۵ و ۰ g/m^2 زیادتر بود. اما در تیمار گوگرد در ترازهای ۷/۵، ۵ و ۲/۵ g/m^2 به اندازه‌ی اختلاف در تیمار سیلیکات سدیم (در تراز ۵ و ۲/۵ g/m^2) افزوده شد.

جدول۵- نتیجه‌ی بررسی زیرمجموعه‌های همگن ترازهای مختلف سیلیکات سدیم بر ضریب روان‌آب.

سیلیکات سدیم (g/m^2)	تعداد کرت	گروه ۱	گروه ۲
۷/۵	۱۲	۰/۲۰	
صفر		۰/۲۴	۰/۲۴
۵			۰/۲۹
۲/۵			۰/۳۲
تراز معناداری		۰/۳۰۹	۰/۰۵۷



شکل ۵- نمودار اثر اصلی تیمار سیلیکات سدیم بر میانگین درصد آهک.

بین اثر اصلی تیمار گوگرد، اثر اصلی تیمار سیلیکات سدیم، و اثر ترکیبی تیمارها نسبت به متغیر وابسته‌ی اندازه‌ی نفوذ هیچ اثر معناداری نبود، اما بین اثر اصلی تیمار گوگرد، اثر اصلی تیمار سیلیکات سدیم، و اثر ترکیبی تیمارها نسبت به متغیر وابسته‌ی درصد آهک تنها اثر ترکیبی تیمارها بر متغیر وابسته‌ی درصد آهک معنادار شد، و باعث کاهش درصد آهک نمونه های روان‌آب خروجی کرت‌ها شد. پژوهش و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که حذف آهک بر درصد ذره‌های رس، لای و شن خیلی‌ریز در تراز احتمال ۵٪ تأثیر معنی‌داری داشت، اما بر شن تأثیر معناداری نداشت. محمودیان و همکاران (۲۰۱۵) نیز نشان دادند که باریم سولفات با بازده حذف کربنات ۷۴٪ بیش‌ترین کارآیی دارد، و کلسیم‌آلومینات با ۴۳/۵۵٪ حذف کربنات کم‌ترین بازده را داشت. سیلیکات سدیم می‌تواند باعث ته‌نشستن آهک شود (کلرمیر و همکاران ۲۰۱۰)، که در نتیجه اندازه‌ی آن را در روان‌آب کاهش می‌دهد.

با افزایش تیمار سیلیکات سدیم میانگین درصد آهک کاهش یافت (شکل ۵). در مقدار سیلیکات سدیم در تراز ۵ و ۷/۵ g/m^2 نیز اختلاف میانگین درصد آهک به دلیل مقدار گوگرد کم‌تر بود. پژوهش کلرمیر و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که تثبیت کربنات‌کلسیم بی‌شکل در محیط‌های غنی از سیلیس معدنی باعث می‌شود که در محلول‌هایی که اندازه‌ی سیلیکات سدیم آن مختلف است، اندازه‌ی ماده‌ی رسوب کربنات کلسیم بیش‌ترین باشد، زیرا سدیم سیلیکات در صنعت برای افزایش دادن چسبندگی به‌کار می‌رود و می‌تواند محیطی واکنشی با خاصیت قلیایی تولید کند. با افزایش اندازه‌ی تیمار گوگرد میانگین درصد آهک کاهش یافت، اما در تیمار گوگرد در تراز ۰ اختلاف میانگین درصد آهک با توجه به مقدار مختلف سیلیکات‌سدیم زیاد بود. این نتیجه نشان‌می‌دهد که گوگرد تنها قلیاییت خاک را کاهش داد، ولی این تیمار به‌تنهایی آهک خاک را تثبیت نکرد. این نتیجه مطابق با پژوهش ذبیحی و نوری‌حسینی (۲۰۱۷) است که نشان دادند مصرف درست گوگرد باعث بهبودیافتن شرایط ساختمانی و شیمیایی خاک و جلوگیری از آسیب‌های محیط‌زیستی و افزایش عمل‌کرد گیاهان می شود، زیرا ترکیب دو تیمار گوگرد و سیلیکات سدیم با اثرگزاری بر قلیاییت محیط اثر مناسبی بر ته‌نشست و تثبیت خاک دارند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

اثر گوگرد و سیلیکات‌سدیم بر تثبیت آهک در خاک و مهار فرسایش بررسی شد. از آن‌جا که اثر ترکیبی دو تیمار آهک نمونه‌های خاک را بسیار کاهش داد، می‌توان دانست که ترکیب دو تیمار کارآیی موثرتری در تثبیت آهک خاک‌های آهکی دارد. در این خاک‌ها، آهک عامل تثبیت خاک است. تیمار گوگرد به‌تنهایی اثر معناداری بر تثبیت آهک خاک منطقه ندارد، اما می‌توان با مقدارهای بیش‌تر گوگرد اکسیدشده و به‌همراه باکتری تیوباسیلوس درصد آهک و قلیاییت آن را در روان‌آب خروجی کاهش داد. تیمار سیلیکات سدیم اثر معناداری بر تثبیت آهک خاک منطقه داشت، و اثر ترکیبی مثبت و معناداری بین دو تیمار گوگرد و سیلیکات سدیم در تثبیت آهک خاک بود. ارزش اقتصادی تیمارهای پژوهش در مقدار به‌کار برده‌شده در پژوهش نسبت به تثبیت‌کننده‌های خاک معرفی‌شده‌ی پیشین مانند نانوذره‌ها ناچیز بود، بنابراین

امـــکان کاربرد این تیمارها به‌شـــیوه‌یی کاربردی و به‌صرفه در مقیاس وســـیع هســـت. نتیجه‌ی این پژوهـــش در چهارچوب کرت‌های آزمایشـــگاهی و با شبیه‌ساز باران بود، بنابراین لازم اســـت تأثیر ترکیبی تیمارهای ســـیلیکات سدیم و گوگرد در خاک‌هـــای مختلف عرصه‌های طبیعی، و شـــدت و مدت‌های متفاوت بارش نیز بررســـی، و گامی پایه‌یی در از میان‌برداشتن دشواری‌های مدیریت منبع‌های ارزشمند آب و خاک برداشته شود.

فهرست منابع

Abyareh M, Nejadkoorki F, Ekhtesasi M, Akhavan-ghalibaf M. 2019. Evaluation of heavy metals contamination in surface soil caused by steel industry.Journal of Research in Environmental Health. 4(4): 302–310. (In Persian).

Adami M, Khaledi-Darvishan A. 2021. Evaluation of runoff components in laboratory plots with straw conservation treatment.Watershed Management Researches Journal. 34(1): 112–125. (In Persian).

Afshari A,khademi H,Alamdari P. 2016. Determination of natural and anthropogenic factors on pollution of heavy metals in the central Zanjan (Based on Multivariate Analysis). Journal of Water and Soil. Agricultural Sciences and Technology. 29(5):1320–1332. (In Persian).

Akbari M, Bashiri M, Rangavar A. 2017. Application of data-mining algorithms in the sensitivity analysis and zoning of areas prone to gully erosion in the indicator Watersheds of Khorasan Razavi Province. Environmental Erosion Research Journal. 7(2):16–42. (In Persian).

Allison LE, Moodie CD. 1965. Carbonate. In: Black CA (Ed.) Chemical and microbiological properties. Methods of soil analysis. Part 2. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. Madison, pp. 1379–1396.

Azar-Khak-Ab Company of Urmia. 2017. Rainfall simulator catalog for F1 model. Urmia. West Azerbaijan. (In Persian).

Banaei M, Momeni A, Bybordi M, Makajooti MJ. 2004. The Iran soils and new developments in identification. Management and Utilization. Soil and Water Research Institute. Sana Publication. 1st ed. 500 p. (In Persian).

Bashiri M, Moradi HR, Kheirkhah MM, Jafarikhaledi M. 2015. Trend and pattern analysis of runoff and sediment in different soil clay contents and surface rock fragments. Environmental Erosion Research Journal. 5(1): 28–43. (In Persian).

Bashiri M,Kavousi-Davoudi SM. 2017. The effects of natural pozzolans and soil compaction on marls erosion control using field rainfall simulator (Case study: Islam-Qaleh region, Razavi-Khorasan). Journal of Range and Watershed Management (Iranian Journal of Natural Resources). 70(3): 619–632. (In Persian).

Besharati H, Khosravi H, Khavazi K, Ziaeian A, Mirzashahi K, Ghaderi J, Zabihi H, Mostashari M, Sabah A, Rashidi N. 2017. Effects of biological oxidation of sulfur on soil properties and nutrient availability in some soils of Iran.Iranian Journal of Soil Research. 31(3): 393–403. (In Persian).

Bybordi M. 2009. Soil Physics. University of Tehran Press. (In Persian).

Bihamta MR, Zare-Chahooki MA. 2011. Principal of statistics for the natural resources science. Tehran University Publication. 4th ed. 302 p. (In Persian).

Das BM. 2013. Principles of geotechnical engineering. Tahooni Sh. Trans. Pars-Ayin Tehran Publishing House. (In Persian).

EL-Mossallamy YM, EL-Ashaal AA, EL-Mashad MM, Ahmed M. 2018. Experimental study of the geotechnical behavior of calcareous soil improved using kaolinite clay-a comparative study. Journal of Mechanical and Civil Engineering. 15(2): 5–15.

Farzi P,Azarakhshi M,Rasoulzadeh A,Bashiri M. 2016. The effects of geological units' characteristics and slope gradient on runoff and sediment yield using rainfall simulator (case study: Senobar watershed, torbat-e-heydarieh). Journal of Range and Watershed Management (Iranian Journal of Natural Resources). 69(2):437–447. (In Persian).

Ghaderi J,Malakouti MJ,Khvazi K,Davoodi MH. 2018a. Effect of elemental sulfur and Thiobacillus bacteria on some chemical

properties of soil and nutrients uptake by maize (Zea mays L.) crop. Applied Soil Research. 6(2): 131–142. (In Persian)

Ghaderi J,Malakouti MJ,Khavazi K,Davoodi MH. 2018b. Sulfur oxidation under different moisture conditions and its effect on some chemical soil characteristics. Journal of Soil Biology. 6(2):25–36. (In Persian).

Gunn R, Kinzer GD. 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. Journal of Meteorology. 6(4): 243–248.

Hasanpoor J. 2016. The effect of lime on modifying the swelling properties of sulphate bearing clay soil. 34th Assembly and 2nd International Congress of Earth Sciences. 22–24 February. Tehran, 8 p. (In Persian).

Hirmas DR. FurquimSAC. 2006.Simple modification of the clod method for determining bulk density of very gravelly soils.Communications in Soil Science and Plant Analysis.37(7–8):899–906.

Hongwang M, Qi M. 2019. Experimental studies on the mechanical properties of loess stabilized with sodium carboxymethyl cellulose. Hindawi Advances in Materials Science and Engineering. pp. 5: 1–8.

Huat BK, Moayedi H, Kazemian S, Daneshmand S. 2012. Stabilization of organic soil using sodium silicate system grout. International Journal of Physical Sciences. 7(9): 1395–1402.

Iran National Standards Organization. 2010. Drinking water - national standard No. 1953. Physical and chemical properties. Institute of Standards & Industrial Research of Iran. (In Persian).

Katebi H. 2007. The use of lime and sand in stabilization of calcareous soils. Journal of faculty of engineering. civil engineering (university of Tabriz). 33.3(45):65–70. (In Persian).

Kavusi A,Saebi J. 2017. Weak coastal subgrade soil stabilization using cement and palm date fibers. Journal of Transportation Infrastructure Engineering. 2(4):61–72. (In Persian).

Kellermeier M, Melero-Garcia E, Glaab F, Klein R, Drechsler M, Rachel R, Garci-Ruiz J, Kunz W. 2010. Stabilization of amorphous calcium carbonate in inorganic silica-rich environments. Journal of the American Chemical Society. 132(50): 17859–17866.

Khaledi-Darvishan A, Homayounfar V, Sadeghi SHR. 2016. The impact of standard preparation practice on the runoff and soil erosion rates under laboratory conditions. Solid Earth. 7(5): 1293–1302.

Loeppert RH, Suarez DL. 1996. Carbonate and Gypsum. Publications from USDA-ARS / UNL Faculty. Paper 504. 39 p.

Maaitah ON, Khaldoun S, Qtaishat NAR. 2010. Soil stabilization by mixing sodium silicate and lime. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 15(1): 1747–1758.

Mahmoudabadi M,Rouhipour H,Arab-khedri M,Refahi HGh. 2007. Calibration, spatial distribution and rain characteristics of rainfall simulation case study: Soil conservation & watershed management research institute -rainfall simulator. Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering. 1(1): 39–50. (In Persian).

Mahmoodian M, Ghaemi A, Shah-Hoseini Sh. 2015. Carbonate pollutant removal in the bayer process using chemical processes. Iranian Chemical Engineering Journal. 14(81): 57–69. (In Persian).

Malakouti MJ, Homaee M. 2004. Soil fertility of arid and semi - arid regions, difficulties and solutions. Tarbiat-Modares University Press. 2nd Ed. 518 p. (In Persian).

Management and Planning Organization of Khorasan-Razavi. 2007. Statistical yearbook of Torbat-Heydariyeh County. Natural Resources Department of Torbat Heydariyeh County. (In Persian).

Maroufpoor E, Faryabi A, Ghamarnia H, Moshrefi

GY. 2010. Evaluation of uniformity coefficients for sprinkler irrigation systems under different field conditions in Kurdistan Province (Northwest of Iran).Soil and Water Research. 5(4): 139–145.

Marto A, Latifi N, Eisazadeh A. 2014. Strength behavior and microstructural characteristics of tropical laterite soil treated with sodium silicate-based liquid stabilizer. Environmental Earth Science. 72(3): 91–98.

Moghimi NA, Karami K, Navvab-Zade M. 2018. Identification of soil types and soil Improvement. Textbook Printing and Publishing Company. 1st ed. 106 p. (In Persian).

Moradzadeh M, Boroomandnasab S, Moazed H, Khaledian M. 2016. Investigation of preferential water flow in soil using developed kinematic dispersive wave- van Genuchten Model: Study with global optimization analysis.Journal of Water and Soil Conservation. 23(3): 47–67. (In Persian).

Nooralivand F, Farrokhian-Firouzi A. 2020. Investigation of modified biochar, nano clay and polyvinyl acetate on soil stabilization and wind erosion control of sandy and loamy sand soils. Iranian Journal of Soil and Water Research. 51(4): 923–935. (In Persian).

Nowrouzi A, Ravanbakhsh M. 2017. Assessment of cadmium spatial distribution in surface soil in the vicinity of Shiraz refinery by geostatistical method.Journal of Environmental Science and Technology. 19(5): 203–214. (In Persian).

Ogundipe OM, Nnochiri ES. 2017. Effects of coconut shell ash on lime stabilized lateritic soil for road construction. ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara (International Journal of Engineering). 15(3): 55–59.

Pajoohesh M, lotfi M. 2016. Lime removal impacts on the soil particles and erodibility Case study:(Watershed Jooneghan, chaharmahal va bakhtiari province). Environmental Erosion Research. 6(2): 31–45. (In Persian).

Rabiee A, Gilani M, Jamshidi H. 2012. Preparation of Acrylamide-based anionic polyelectrolytes for soil establishment.Iranian Journal of Polymer Science and Technology. 24(4): 291–300. (In Persian).

Rimal BK, Lal R. 2009. Soil and carbon losses from five different land management areas under simulated rainfall. Soil & Tillage Research. 106(1): 62–70.

Sadeghi SHR, Hazbavi Z, Kiani-Harchegani M, Younesi HA, Sadeghi PS, Angulo-Jaramillo R, Lassabatere L. 2021. The hydrologic behavior of loess and marl soils in response to biochar and polyacrylamide mulching under laboratorial rainfall simulation conditions. Journal of Hydrology. 529, 125620, 9 p. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125620.

Sharifi F, Solaimani F, Hosseini S. 2018. Development and evaluation of new soil stabilization technologies to reduce runoff and erosion and stabilize drainage canal sidewall and steep lands in Khuzestan.Iranian Journal of Soil Research. 32(3): 343–359. (In Persian).

Taherkhani H. 2016. Investigation of compressive strength of clay soils stabilized by cement, lime and CBR PLUS nano- polymer. Modares Civil Engineering Journal. 16(4):161–173. (In Persian).

Tajbakhsh M, Fathi-Moghadam M, Ebrahimi N. 2017. Mixture of lime and rice husk ash influence on saturated hydraulic conductivity of soil with SM classification. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research. 18(69): 45–60. (In Persian).

Tajudlin SAA, Pakir F, Marto A, Zurairahetty N, Yunus M, Tan CS. 2015. Effect of sodium silicate as liquid-based stabilization on shear strength of marine clay. Journal of Technology Sciences & Engineering. 76(2): 45–50.

Tomás R, Pastor JL, Cano M, Riquelme A, Gutiérrez E. 2019. Evaluation of the improvement effect of limestone powder waste in the stabili-

zation of swelling clayey soil. Sustainability. 11(3): 1–14. doi:10.3390/su11030679.

Torabi-kaveh M, Heidari A. 2020. Assessing effectiveness of thermal treatment and mixing with coarse-grained particles in stabilization of marly soils. Journal of Innovative Infrastructure Solutions. 5(13): 1–10.

Velayati S. 2009. Hydrogeology of soft and hard formations. Jahad-Daneshgahi Publication. Ferdowsi University of Mashhad. 1st Ed. 396 p. (In Persian).

Wischmeier WH, Smith DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook. No. 537. US Department of Agriculture. Agriculture Handbook Number 537. 60 p. Washingtone DC.

Zabihi HR, Nourihoseini M. 2017. Application of sulfur in calcareous and saline-sodic soils of Khorasan-Razavi Province to enhance plant yield.Land Management Journal. 5(1): 43–50. (In Persian).

Watershed Management Research

VOL. 34, No.4, Ser. No: 133, Winter 2022, pp. 88 -103
DOI: 10.22092/WMRJ.2021.353673.1393

Research Paper

Lime-Covered Soil Stabilization on the Surronding Area of a Lime-kiln (Torbat-Heydarieh) Using Sulfur and Sodium Silicate

Masoume Nematollahi
M.Sc. in Watershed Management, Department of Nature Engineering and Medicinal Plants, Faculty of Agriculture, University of Torbat-Heydarieh, Khorasan-Razavi, Iran
Mehdi Bashiri
(Corresponding Author)* Assistant Professor, Department of Nature Engineering and Medicinal Plants, Faculty of Agriculture, University of Torbat-Heydarieh, Khorasan-Razavi, Iran
Maryam Azarakhshi
Assistant Professor, Department of Nature Engineering and Medicinal Plants, Faculty of Agriculture, University of Torbat-Heydarieh, Khorasan-Razavi, Iran
Mohammad Rostami-Khalaj
Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Khorasan-Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Khorasan-Razavi, Iran

*Corresponding Author's Email: m.bashiri@torbath.ac.ir
Received: 21 February 2021 Accepted: 12 May 2021

Abstract

Carbonates contaminate soil and water resources. The use of stabilizers is an effective method to improve soil characteristics. The single and interaction effects of two treatments consisting of sodium-silicate and sulfur at 0, 5, 10, and 15 g/m^2 were studied on the lime-covered Soil stabilization and water erosion control in a factorial design, on the 9% slope standard plots uses a rainfall simulator with an intensity and duration of 1.4 mm/min and 20 min, respectively. The results indicated that between the two the sodium-silicate and sulfur factors, only the main effect of sodium-silicate had a significant effect on the runoff volume, sediment weight, and concentration as well as the runoff coefficient variables; however, it had no significant effect on the total infiltration rate and the lime percentage variables. Moreover, the sulfur and sodium-silicate factors had significant interaction effects on the sediment weight (Sig.=0.011), sediment concentration (Sig.=0.019), and lime percentage (Sig.=0.000) variables. The interactive effect of the two studied treatments significantly reduced the lime in the soil samples. Therefore, the combination of the two treatments had the highest effect on lime stabilization. Moreover, sodium-silicate had an effective role in soil stabilization. Therefore, a single application of 7.5 g/m^2 of sodium-silicate and with its combination with 5 g/m^2 sulfur is recommended for erosion control and lime stabilization, respectively.

Keywords: Erosion plot, rainfall simulator, runoff, sediment, stabilizer