ارزیابی تأثیر کاربرد گچ در تثبیت موقت خاک

علی‌اکبرزاده*[۱]، منوچهر گرجی[۲]، حسینقلی رفاهی[۳] و حسن روحی‌پور[٤]

[۱] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

[۲] استادیار پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

[۳] استاد پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

[۴] دانشیار پژوهشی بخش بیابان مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، ایران

(تاریخ دریافت: ۸۷/۷/۲۲، تاریخ تصویب: ۸۹/۳/۱۰)

چکیده

امروزه اثرگذاری‌های برون منطقه‌ای فرسایش، یعنی آسیب‌ها وزیان هایی که به وسیله رسوب وارد می‌شود یک مشکل زیست محیطی جدی است. یکی از راهکارهای تثبیت موقت خاک پیش از استقرار دایمی پوشش گیاهی به ویژه در اراضی شیب‌دار به منظور کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، بهره‌گیری از موادی است که ویژگی سیمان کنندگی ذرات پراکنده در سطح خاک را دارند. گچ ماده‌ای است که ذرات و خاکدانه‌های ناپایدار موجود در سطح خاک را به هم می‌چسباند و از تخریب آنها در اثر نیروهای فرساینده جلوگیری می‌کند. هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر مقادیر بهینه گچ در کاهش رواناب و رسوب، افزایش مقاومت برشی و پایداری خاکدانه‌های سطحی شیب‌های ناپادار تپه‌های مارنی استان زنجان با استفاده از ناودان (فلوم) و همانندساز باران، دستگاه الک تر و پره برش می‌باشد. این تپه‌ها که مشرف به یکی از بزرگترین مخازن آبی کشور (سد سفیدرود) هستند، به علت داشتن رس فراوان دشواری‌های پرشمار را برای منطقه ایجاد می‌کنند. نتایج نشان داد که مقادیر مختلف گچ به صورت مخلوط با پنج میلیمتر سطح خاک تولید رواناب و رسوب را به ترتیب نسبت به شاهد بین صفر تا ۱۳ درصد و ۱۱ تا ۹۲ درصد کاهش داد. همچنین در شیب ۳۰ درصد و باران ۷۵ میلیمتر بر ساعت تأثیر ۲۰ تن در هکتار گچ در کاهش غلظت رسوب پس از گذشت حدود ۳۵ دقیقه از آغاز رواناب از بین می‌رفت. در حالی که کاربرد ۳۰ تن در هکتار گچ در همین شیب و شدت باران حتی پس از گذشت ۶۰ دقیقه از آغاز رواناب تأثیر خود را در کاهش غلظت رسوب حفظ می‌کرد. همچنین مشخص شد که کاربرد گچ در اثر بهبود ویژگی های فیزیکی خاک و تشکیل خاکدانه‌های پایدار در آب، جداشدن ذرات خاک و فرسایش ناشی از آن را کاهش می‌دهد. بنابراین با توجه به قیمت به نسبت ارزان گچ می‌توان ذرات ناپایدار و پراکنده موجود در سطح خاک را با پرداخت هزینه کم تثبیت کرد و آلودگی‌های مختلف ناشی از پراکندگی آنها را به کمترین رساند.

واژه‌های کلیدی: گچ، همانند سازی باران، رواناب و رسوب، شیب تند تپه‌های مارنی، پایداری خاکدانه‌ها

* نویسنده مسئول: تلفن: ۰۹۱۱-۳۳۰٤٨٨ فاکس: ۰۲٦۱-۲۲۳۱۸۷۸ E-mail: aliakbarzadeh1236@yahoo.com

مقدمه

خاک‌های ناپایدار اراضی شیب‌دار به‌ویژه آنهایی که دارای بافت رسی می‌باشند، از مهم‌ترین مناطق تولید رسوب در کشور هستند. رسوب ناشی از فرآیند فرسایش در این نوع اراضی با تخریب مسیر آبراهه‌ها و پر کردن نهرها از رسوب، گل‌آلود نمودن آب مصرفی و در نهایت کاهش ظرفیت مخازن سدها آسیب های زیادی به منابع طبیعی کشور وارد می‌کند. مهم‌تر از همه این آسیبها و زیانها، مشکلات زیست‌محیطی است که ناشی از حمل مواد شیمیایی آلاینده به صورت محلول یا چسبیده به ذرات رسوب است. به طوری که در خیلی از موارد رسوبات خارج شده از حوزه‌های آبخیز غنی از مواد آلوده کننده هستند. سرعت نفوذ آب در خاک مهم‌ترین فاکتور در مرحله چرخه آبشناختی (هیدرولوژیکی) خاک است و از جمله عوامل مهم در فرسایش آبی و رسوب تولیدی خاک‌های ناپایدار اراضی شیب‌دار بشمار می آید. با افزایش سرعت نفوذ در این اراضی می‌توان سرعت و حجم رواناب را کاهش داد که نتیجه آن کاهش رسوب تولیدی و آلودگی‌های ناشی از آن است. در اراضی شیب‌دار مهم‌ترین عاملی که سرعت نفوذ را کنترل می‌کند تشکیل سله ساختمانی (Structural crust) در سطح می‌باشد که دلیل اصلی ایجاد آن تخریب ساختمان خاک در اثر برخورد قطرات باران است (Morin et al., 1981). این سله سطحی تا حدودی نازک است و به علت داشتن چگالی بیشتر، مقاومت بالاتر، خلل و فرج ریزتر و هدایت هیدرولیکی اشباع کمتر از خاک زیرین خود قابل تفکیک است (Borselli et al., 1996). Agassi et al. (۱۹۸۱)، Morin et al. (۱۹۸۱) و Lado et al. (۲۰۰۴) تشکیل سله سطحی را در نتیجه سه سازوکار که مکمل هم می‌باشند می‌دانند؛ (۱) خرد شدن (Break down) فیزیکی خاکدانه‌های سطحی در اثر انرژی برخورد قطرات باران (۲) فروپاشی (Slaking) خاکدانه‌ها در اثر خیس شدن سریع خاک (۳) پراکندگی (Dispersion) فیزیکی شیمیایی رس‌ها و مهاجرت آنها توسط آب در حال نفوذ به درون خاک و مسدود کردن خلل و فرج زیر سطحی که این سازوکار وابسته به قابلیت هدایت الکتریکی (EC) و درصد سدیم قابل تبادل (ESP) خاک است. با کاهش هدایت الکتریکی و افزایش درصد سدیم قابل تبادل پراکنده شدن رس‌ها تشدید شده و در نتیجه نفوذ آب در خاک کاهش می‌یابد. در این زمان است که تشکیل سله سطحی بیش از پیش محتمل شود (Agassi et al., 1981).

با توجه به این مقدمه می‌توان عنوان کرد که در هنگام خیس شدن خاک، حفظ پایداری ساختمان آن در افزایش نفوذپذیری (کاهش رواناب) و هدر رفت خاک بسیار مهم است. یکی از روشهای افزایش پایداری ساختمان خاک بهره‌گیری از مواد اصلاح کننده خاک (Soil conditioners) است. مواد چسباننده ذرات خاک (Soil binders) در بیشتر موارد تحت عنوان مواد اصلاح کننده خاک شناخته می‌شوند و انواع مختلفی از آنها (طبیعی، فیزیکی، شیمیایی و غیره) با کاربردهای متفاوت وجود دارد. گروهی از مواد اصلاح کننده خاک مواد چسباننده سیمانی هستند و گچ از جمله معروف ترین آنها است. یون‌های کلسیم در بهبود ساختمان خاک و افزایش نفوذ آب در خاک بسیار مؤثر هستند. از سویی کلسیم و سولفور از جمله عناصر کم مصرف مهم در تغذیه گیاهان می‌باشند. گچ یا ژیپسوم ($CaSO_4.2H_2O$) به عنوان یک ماده اصلاح کننده که قادر به تأمین کلسیم (یک منبع الکترولیت) و سولفور می‌باشد اهمیت ویژه‌ای دارد (Alcordo and Rechcigl, 1995). Norton and Mamedov (۲۰۰۶) نشان دادند که با استفاده از پخش سطحی گچ می‌توان میزان فرسایش و رواناب را به طور معنی‌داری کاهش داد. همچنین Norton (۲۰۰۷) تأثیر کاربرد یک تن در هکتار گچ با درجه خلوص ۷۰ درصد را در یک شیب ۵ درصد و تحت بارانی با شدت ۶۴ میلیمتر بر ساعت در یک خاک با بافت لومی بررسی کرد. او گزارش کرد که گچ به عنوان یک منبع الکترولیت (دارا بودن یون‌های کلسیم و منیزیم) نه تنها حجم رواناب و میزان

هدر رفت خاک را کم می‌کند بلکه غلظت فسفر محلول و آترازین را نیز در رواناب کاهش می‌دهد. Wallace et al. (2001) تأثیر کاربرد از گچ را در کنترل فرسایش یک خاک با بافت سیلتی لومی بررسی کردند. میزان ۲/۲ تن در هکتار گچ بر روی سطح خاک (درون کرتهایی) پخش شد و بارانی با شدت ثابت ۵۶ میلیمتر بر ساعت همانندسازی شد. آنان گزارش کردند که گچ با تأثیری که در افزایش غلظت الکترولیت آب سطح خاک دارد باعث افزایش هماوری رس‌ها و در نتیجه کاهش تشکیل سله سطحی می‌شد. رواناب و هدر رفت خاک نیز در کرتهای تیمار شده کاهش یافت. Borselli et al. (1996) نشان دادند که کاربرد گچ ویژگیهایهیدرولوژیکی، مکانیکی و تخلخلی یک خاک اسیدی که حساس به تشکیل سله سطحی بود (Kaolinitic crusting soil) را بهبود بخشید. Wallace-Cochrane et al. (2005) نیز پخش سطحی گچ را به عنوان گزینه بسیار مناسبی در کنترل فرسایش، افزایش سرعت نفوذ آب در خاک و کاهش تشکیل سله سطحی معرفی کردند. آنان مزیت عمده گچ را در کاهش فرسایش به علت قیمت به نسبت ارزان آن در مقایسه با دیگر راهکارهای کنترل فرسایش می‌دانند. به طور مشابه Tang et al. (2006) استفاده از گچ را برای بالا بردن کارایی مواد اصلاحی دیگر مانند پلی‌اکریل‌آمید در جلوگیری از فرسایش ضروری میدانند. آنان دلیل این امر را قیمت بسیار ارزان گچ و صرفه اقتصادی آن در مقایسه با دیگر مواد اصلاح کننده خاک می‌دانند. Brauer et al. (2005) نیز دلیل اصلی برتری گچ در کاهش رواناب و رسوب نسبت به مواد اصلاحی دیگر را صرفه اقتصادی آن عنوان کردند. Norton et al. (2002) تأثیر کاربرد مواد مختلف که شامل گچ معدنی (۵ تن در هکتار)، انیدریت (۵ تن در هکتار)، پلی‌اکریل‌آمید (۲۰ کیلوگرم در هکتار) و مواد زائد کاغذ بودند (۲۰ تن در هکتار) را در کاهش رواناب و رسوب در شیب‌های تند پیش از استقرار پوشش گیاهی بررسی کردند. در میان همه مواد کنترل فرسایش یادشده، کاربرد پلی‌اکریل‌آمید در ترکیب با گچ در روی شیب‌های ۲ به ۱ در کنترل فرسایش و همچنین استقرار پوشش گیاهی بیشترین تأثیر را داشت.

هدف از انجام این تحقیق مشخص کردن مقادیر بهینه کاربرد گچ در شیب‌های تند تا به نسبت تند در کاهش رواناب و رسوب با توجه به صرفه اقتصادی آن می‌باشد. همچنین ارزیابی پایداری کلاس‌های مختلف قطری خاکدانه‌ها پس از تیمار آنها با گچ از دیگر هدف های ما در این تحقیق است.

مواد و روش‌ها

از آنجا که هدف از انجام این پژوهش، تعیین نقش گچ در کاهش فرسایش ناشی از بسترهای ناپایدار واقع در شیب‌های تند تا به نسبت تند بعضی از حوزه‌های آبخیز کشور مشرف به مخازن بزرگ آبی است. از این رو مارن‌های حساس به فرسایش در اراضی بدخیم حوزه آبخیز سفیدرود برای انجام این تحقیق گزینش شدند. محل نمونه‌برداری روستای سرچم از توابع استان زنجان گزینش شد که در پایاب رودخانه زنجانرود قرار گرفته است. نمونه‌برداری بر روی یک تپه بلند مارنی که ارتفاع آن بالغ بر ۳۰ متر بود و شیب بسیار تندی داشت از ۱۵ سانتیمتر سطحی خاک انجام شد و پس از انتقال آنها به آزمایشگاه پس از هواخشک کردن از الک ۴/۷۵ میلیمتر گذرانده شد. بافت خاک با استفاده از روش آبسنجی (هیدرومتری) برآورد شد (Gee and Bauder, 1986). این خاک ۴۹ درصد رس، ۳۲ درصد سیلت و ۱۹ درصد شن داشت. کلاس بافتی این خاک رسی بود. اسیدیته گل اشباع این خاک با استفاده از دستگاه pH متر مدل (EYELA-2000) ۷/۸ بود. هدایت الکتریکی گل اشباع آن نیز با استفاده از دستگاه EC سنج مدل (PW-9527 Philips) ۱۷/۲ دسی زیمنس بر متر محاسبه شد. نسبت جذب سدیم (Sodium adsorption ratio) این خاک بر پایه روش Page (1992) برابر با ۹/۸ بود. ظرفیت تبادل کاتیونی

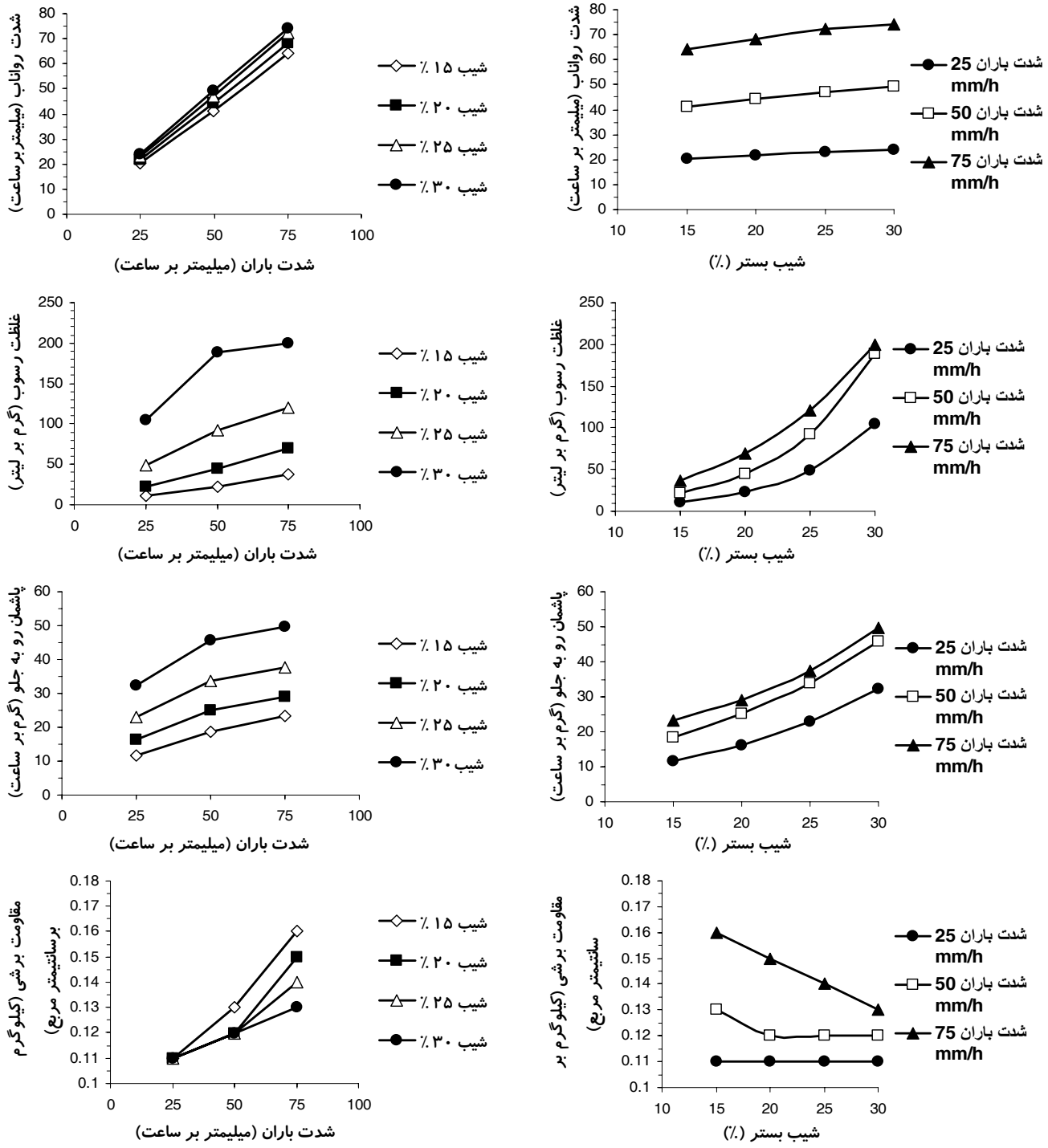
(Cation exchange capacity) این خاک نیز که بر پایه روش Chapman (1965) اندازه‌گیری شد، ۱۴/۲ میلی‌اکی‌والان بر صد گرم خاک بود. علاوه بر این آب مورد استفاده برای انجام آزمایشیش های همانندسازی باران نیز مورد تجزیه قرار گرفت. به طوری که اسیدیته آن برابر با ۸ ، هدایت الکتریکی آن ۱/۴ دسی زیمنس بر متر و نسبت جذب سدیم آن نیز ۲/۲ تعیین شد. تیمارهای آزمایشی به طور کلی شامل خاک بدون پوشش (شاهد) و پاشیدن گچ به صورت پودر جامد در سطح خاک گزینش شدند. گچ معدنی طبیعی که به شکل پودر خشک تهیه شده بود در سه میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تن در هکتار با پنج میلیمتر سطحی خاک درون ناودان (فلوم) مخلوط می‌شد. پس از صاف کردن سطح خاک ناودان (فلوم) و تیمار خاک با مواد یاد شده مرحله اشباع نمونه‌ها از زیر انجام می‌شد. ۲۴ ساعت پس از تیمار خاک به‌وسیله گچ و پس از خروج آب ثقلی نمونه‌ها از طریق سیستم زهکشی آزمایش مربوطه انجام می‌گرفت. برای انجام آزمایش‌ها، نمونه خاک درتشتکی شیب‌پذیر به ابعاد ۱×۱ متر (قابل تنظیم از صفر تا ۵۰ درصد) به ضخامت ۷ سانتیمتر قرار داده شد و با استفاده از یک همانندساز با نازل جارویی مورد بررسی قرار گرفت.

آزمایش یکنواختی بارش، اندازه قطر قطرات و تعیین شدت‌های مختلف آن با تغییرات لازم در چرخش زاویه نازل صورت گرفت. پس از صاف نمودن و تسطیح خاک با لبه تشتک ناودان (فلوم)، عمل همانندسازی باران در شدت‌های مورد نیاز توسط دستگاه کنترل الکترونیک با تغییر زاویه نازل اعمال گردید. همه تیمارهای گفته شده در بالا به منظور بررسی تأثیر آنها در میزان فرسایش و رسوب در سه شدت بارندگی (۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلیمتر بر ساعت) و نیز در چهار شیب به نسبت تند (۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد) مورد بررسی قرار گرفتند. رواناب خارج شده از ناودان (فلوم) برای هر تیمار به طور پیوسته در فواصل زمانی مختلف جمع‌آوری شده و پس از توزین برای تعیین جرم رسوب در دمای ۱۰۵ درجه سلسِوس در دستگاه خشک کن (Oven) به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. در این تحقیق برای اندازه گیری مقاومت برشی سطح خاک در همه تیمارهای آزمایشی از دستگاه پرهٔ برش (Torvane) استفاده شد. همچنین برای تعیین توزیع اندازه ذرات ثانویه خاک (خاک شاهد و خاک‌های تیمار شده با گچ) از دستگاه الک تر (Wet sieving apparatus) استفاده گردید. همه آزمایش‌ها به مدت ۶۰ دقیقه از زمان آغاز رواناب به طول انجامید و در نهایت میزان رواناب و رسوب نهایی (متوسط) نیز محاسبه گردید. همچنین میزان نفوذ آب در خاک نیز از زمان آغاز آزمایش همانندسازی باران تا انتهای آزمایش اندازه‌گیری شد. میزان پاشمان هوایی ذرات به سمت پائین شیب به صورت یکجا برای هر آزمایش جمع‌آوری و پس از خشک نمودن در آون، اندازه‌گیری شد. گرچه برای اطمینان از نتایج بدست آمده که احتمال خطای اندازه‌گیری وجود داشت بعضی از آزمایشها تکرار می‌شد ولی به علت نیاز به جابه‌جایی میزان زیادی خاک برای هر آزمایش (در حدود ۱۰۰ کیلوگرم)، امکان تکرار آزمایش‌ها در قالب رایج طرح‌های آماری وجود نداشت و این موضوع به طور معمول امری عادی در بررسیهای همانندسازی باران است (Javadi et al., 2005). بنابراین احتمال بروز بعضی از خطاهای ناشی از تکرار نشدن آماری آزمایش در نتایج ممکن است وجود داشته باشد. برای مثال اگر برخی از اندازه‌گیری‌های مربوط به حجم رواناب یا غلظت رسوب به دلایل زیر تفاوت اساسی با دیگر اندازه-گیری‌ها داشتند، آنها به‌طور کلی نادیده گرفته شده و در نتایج نهایی وارد نمی‌شدند. این دلایل شامل تسطیح نامناسب سطح خاک و تخلیه ناگهانی حجم زیادی از خاک به درون رواناب، هدر رفتن بخشی از رواناب در هنگام جابجایی ظروف جمع‌آوری کننده رواناب در حین آزمایش و در نتیجه از دست رفتن بخشی از رسوب نیز جزء خطاهای پیش‌بینی نشده دیگر بود. بنابراین در مطالعه حاضر از روشهای آماری متداول استفاده نشد و این تکرارها،

به دلیل وجود برخی از همین نتایج غیر منطقی تکرارهای آماری نبودند. از این رو تجزیه و تحلیل داده‌ها تنها با استفاده از یک داده برای هر مشخصه فرسایش خاک انجام شد. همچنین برای پیش‌بینی مشخصه‌های مختلف فرسایش خاک در خاک‌های تیمار شده با گچ از نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

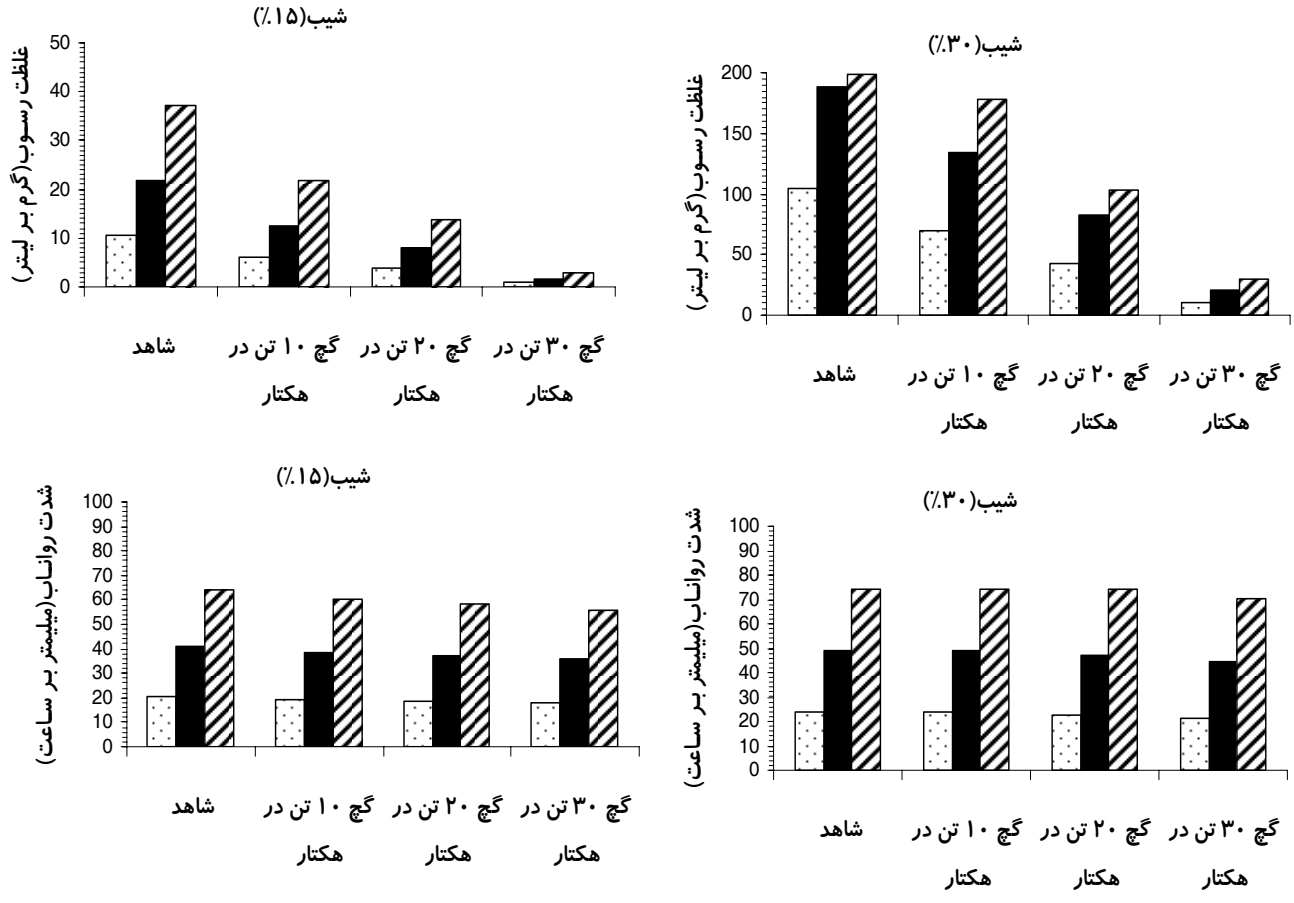
نتایج

غلظت رسوب، شدت رواناب، پاشمان رو به جلو و مقاومت برشی (پس از پایان بارش) خاک مورد آزمایش در شیب‌های مختلف (۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ درصد) با شدت بارش‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلیمتر در ساعت در آزمایش‌های همانندسازی شده جمع‌آوری و اندازه‌گیری شد. با توجه به شکل ۱ با افزایش شدت باران، شدت رواناب به میزان زیادی افزایش یافت. این در حالی بود که افزایش شیب تأثیر زیادی در افزایش رواناب نداشت. به عبارت دیگر عامل اصلی تولید رواناب در خاک یاد شده افزایش شدت باران بود. بدین صورت که در شیب‌های به نسبت تند به دلیل وجود مقادیر زیاد رس در سطح خاک، در اثر برخورد قطرات باران و تشکیل سله سطحی نفوذ آب به درون خاک محدود شد و با افزایش شدت باران میزان رواناب به سرعت افزایش یافت. بنابراین افزایش شیب از ۱۵ به ۳۰ درصد به علت وجود همین سله سطحی، تأثیر زیادی در افزایش رواناب نداشت. توضیح بیشتر اینکه در شیب‌های کم تغییر جزئی در میزان شیب تأثیر محسوسی در افزایش رواناب داشت، به عنوان مثال افزایش شیب از صفر به ۳ درصد تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش رواناب داشت، در حالی که در شیب‌های تند تغییر زیاد در میزان شیب چنین تأثیری نداشت. همچنین با توجه به این شکل با افزایش شیب و شدت باران غلظت رسوب افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر افزایش شدت باران و شیب هر دو تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در افزایش غلظت رسوب دارند. افزایش غلظت رسوب با افزایش میزان باران و شیب تاحدودی همسان افزایش پاشمان رو به جلوی ذرات خاک با افزایش شدت باران و شیب می‌باشد (شکل ۱). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پاشمان رو به جلوی ذرات خاک تأثیر زیادی در تولید رسوب دارد، هر چند که نقش رواناب نیز در تولید رسوب قابل ملاحظه است. این شکل همچنین رابطه بین مقاومت برشی سطح خاک لخت را پس از انجام آزمایش با شدت باران و شیب نشان می‌دهد. با توجه به این شکل با افزایش شیب مقاومت برشی سطح خاک کاهش می‌یابد که دلیل آن به احتمال کاهش سطح دریافت کننده باران با افزایش شیب است. یعنی احتمال دارد با افزایش شیب، باران کمتری به سطح خاک برخورد کرده که نتیجه آن تشکیل سله سطحی کمتر و کاهش مقاومت برشی سطح خاک است. همچنین با توجه به این شکل افزایش شدت باران تأثیر مستقیمی در افزایش سله سطحی و مقاومت برشی سطح خاک دارد.



شکل ۱- تأثیر شیب بستر و شدت بارندگی بر روی شدت رواناب، غلظت رسوب، پاشمان رو به جلوی ذرات خاک و مقاومت برشی سطح خاک

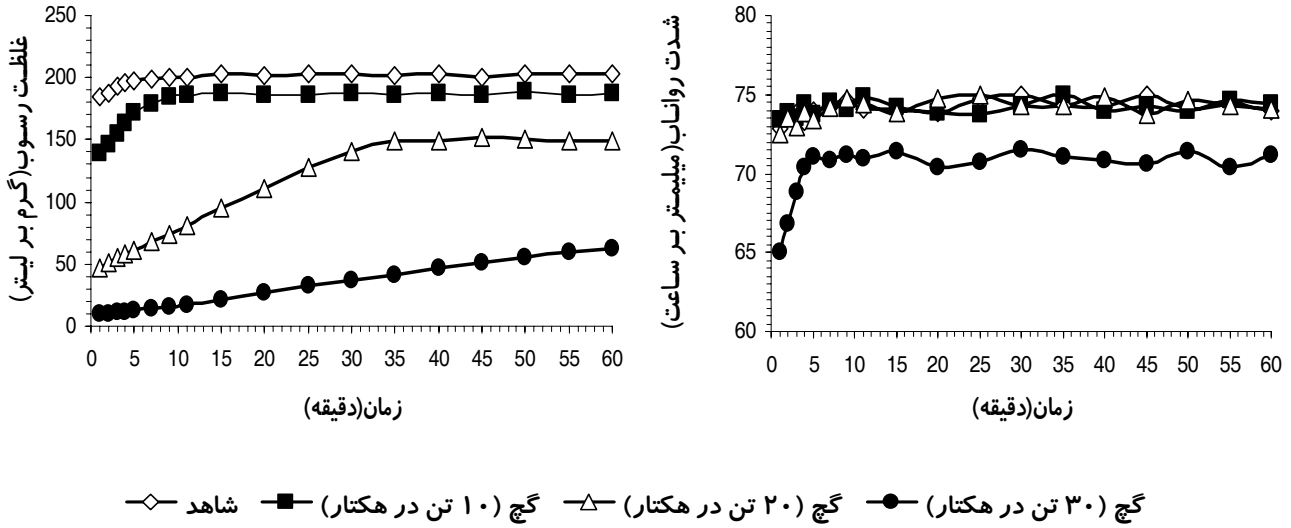
غلظت رسوب، شدت رواناب، پاشمان رو به جلو و مقاومت برشی (پس از پایان بارش) خاک یاد شده، ۲۴ ساعت پس از مخلوط کردن گچ با پنج میلیمتر سطحی خاک ناودان (فلوم) در شیب‌ها و شدت‌های مختلف باران در آزمایش‌های همانندسازی شده جمع‌آوری و اندازه‌گیری شد. تأثیر مخلوط کردن گچ با پنج میلیمتر سطحی خاک ناودان (فلوم) با مقادیر یاد شده در کاهش رسوب (غلظت متوسط رسوب) و نیز در کاهش رواناب (متوسط رواناب) در شیب‌های ۱۵ و ۳۰ درصد و شدت‌های مختلف بارانهای همانندسازی شده (۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلیمتر بر ساعت) در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به یاد آوری است که روند تغییرات در مورد شیب‌های ۲۰ و ۲۵ درصد همانند شیب‌های ۱۵ و ۳۰ درصد بوده است.



شکل ۲- تأثیر کاربرد مقادیر مختلف گچ در کاهش غلظت رسوب و شدت رواناب در شیب‌های ۱۵ و ۳۰ درصد و شدت‌های مختلف (۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلیمتر بر ساعت) باران در مقایسه با شاهد

با توجه به این شکل و محاسبه های انجام گرفته کاربرد ۳۰ تن در هکتار گچ با تشکیل یک پوسته حفاظتی نازک بر روی سطح خاک و همچنین بهبود ساختمان خاک در شیب‌های تند و شدت‌های بالای بارندگی، غلظت رسوب را به میزان زیادی نسبت به شاهد کاهش داد. به طوری که افزودن این میزان گچ توانست در شیب ۳۰ درصد و شدت

باران ۷۵ میلیمتر بر ساعت غلظت رسوب را نسبت به شاهد حدود ۸۵ درصد کاهش دهد که قابل توجه می باشد. بنابراین می‌توان با کاربرد مقادیر بالای گچ در شیب‌های تند و باران‌های شدید غلظت رسوب را به میزان ناچیزی رساند. این موضوع هنگامی اهمیت می‌یابد که کاربرد مقادیر بالای گچ از نظر جنبه‌های اقتصادی آن مقرون به صرفه باشد. همچنین تأثیر کاربرد غلظت‌های مختلف گچ در کاهش غلظت رسوب در زمان‌های مختلف نسبت به تیمار شاهد در طی یک ساعت پس از آغاز رواناب در شیب ۳۰ درصد و شدت باران ۷۵ میلیمتر بر ساعت، در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل نیز کارایی بالای کاربرد ۳۰ تن در هکتار گچ در کاهش غلظت رسوب به خوبی مشخص است. به طوری که حتی پس از گذشت ۶۰ دقیقه پس از آغاز رواناب تأثیر این میزان گچ در کاهش رسوب از بین نمی‌رود (تغییرات غلظت رسوب با زمان ثابت نمی‌شود).

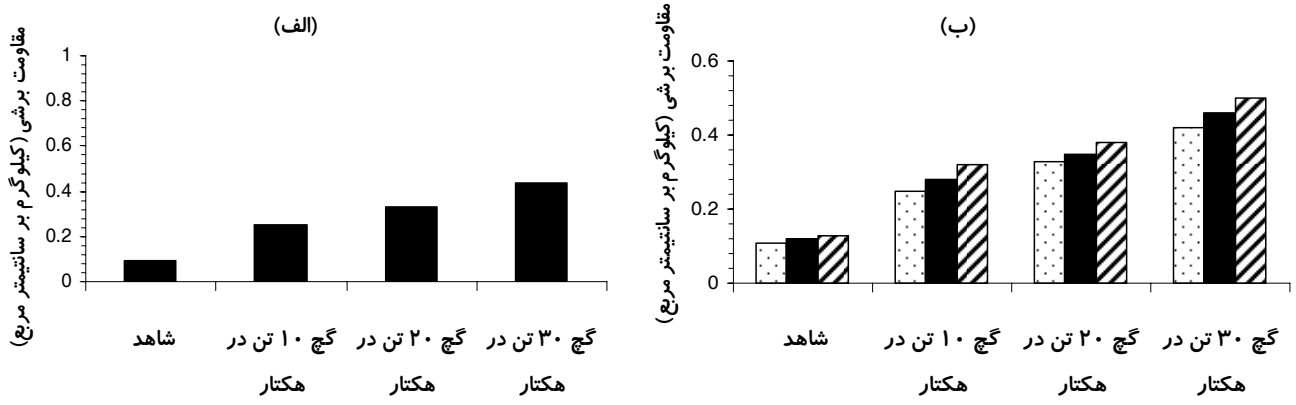


شکل ۳- تأثیر کاربرد مقادیر مختلف گچ در کاهش رسوب و رواناب نسبت به تیمار شاهد در زمان‌های مختلف پس از آغاز رواناب در شیب ۳۰ درصد و شدت بارندگی ۷۵ میلیمتر بر ساعت

بنابراین با توجه به شکل ۲ کاربرد مقادیر مختلف گچ تأثیر چندانی در کاهش رواناب نداشت. همچنین تأثیر کاربرد غلظت‌های مختلف گچ در کاهش رواناب در زمان‌های مختلف نسبت به تیمار شاهد در طی یک ساعت پس از آغاز رواناب در شیب ۳۰ درصد و شدت باران ۷۵ میلیمتر بر ساعت، در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این شکل تأثیر مقادیر مختلف گچ در کاهش رواناب در شیب‌های تند به سرعت در دقایق نخستین تشکیل رواناب از بین می‌رود. گچ با تشکیل یک لایه پوششی و بهبود ویژگیهای فیزیکی خاک، تشکیل سله سطحی را کاهش می‌دهد و باعث افزایش نفوذ آب در خاک می‌شود. بنابراین همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود احتمال دارد به علت کوتاه بودن مدت زمان اضافه نمودن گچ به خاک (۲۴ ساعت) و کامل نبودن مدت فعل و انفعالات شیمیایی بهبود کامل ویژگیهایفیزیکی خاک در این مدت کوتاه به خوبی میسر نباشد. به همین علت مصرف مقادیر کمتر گچ نمی‌تواند در ایجاد رواناب بر روی شیب‌های تند تأخیر زیادی ایجاد کند و به سرعت اثر خود را از دست می‌دهد.

نتایج همچنین نشان داد که همه مقادیر به کاربرده شده گچ در کاهش پاشمان هوایی ذرات به سمت پایین شیب تأثیر کمی داشتند و یا اینکه بدون تأثیر بودند. به طوری که حتی کاربرد ۳۰ تن در هکتار گچ در شیب ۳۰ درصد و شدت باران ۷۵ میلیمتر بر ساعت پاشمان هوایی ذرات را

به سمت پایین شیب نسبت به شاهد کاهش نداد. بنابراین گچ بیشتر از راه پایداری خاکدانه‌ها و جلوگیری از تخریب آنها تشکیل سله سطحی را کاهش می‌دهد و نقش چندان زیادی در کاهش پاشمان هوایی ذرات به سمت پایین شیب ندارد. با توجه به شکل ۴ (الف) اندازه‌گیری مقاومت برشی سطح خاک پیش از انجام آزمایش نشان داد که با افزایش میزان گچ در اثر بهبود ویژگیهایفیزیکی خاک و افزایش پایداری خاکدانه‌ها میزان آن افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل ۴ (ب) افزایش مقاومت برشی سطح خاک پس از پایان همانندسازی باران در تیمارهای گچ به علت تشکیل سله سحطی نیست. بدین صورت که اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها و افزایش شاخص پایداری آنها خود دلیل قاطعی بر درستی ادعای ماست.



شکل ۴- تأثیر کاربرد مقادیر مختلف گچ در مقاومت برشی سطح خاک (الف) پیش از انجام آزمایش‌های شبیه‌سازی باران در شیب ۳۰ درصد و (ب) پس از انجام آزمایش‌های همانند سازی باران در شیب ۳۰ درصد و شدت‌های مختلف (۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلیمتر بر ساعت) باران در مقایسه با شاهد

مقایسه مقاومت برشی اندازه‌گیری شده برای تیمارهای گچ و شاهد پس از انجام آزمایش های همانندسازی باران امکان پذیر نمی‌باشد زیرا افزودن گچ به خاک مقاومت برشی آن را به علت بالا بردن پایداری خاکدانه‌ها افزایش می‌دهد (ویژگیهای فیزیکی خاک دستخوش تغییر می‌شود). بنابراین تأثیری که افزودن گچ در کاهش مقاومت برشی خاک پس از اعمال باران دارد (با جلوگیری از تشکیل سله سطحی) با چنین مقایسه‌ای مشخص نمی‌شود. برای مشخص کردن تأثیر گچ در افزایش پایداری خاکدانه‌ها، مقادیر شاخص پایداری خاکدانه‌ها در معیار (WSA) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) برای تیمارهای مختلف محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. مقایسه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و شاخص پایداری آنها نشان می‌دهد که با افزایش کاربرد گچ به خاک، خاکدانه‌های بزرگتر و پایدارتر نسبت به شاهد بدست می آیند. به طوری که در همه مقادیر WSA شاخص پایداری خاکدانه‌ها نسبت به شاهد افزایش یافت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مقاومت برشی خاک پس از کاربرد گچ به آن در نتیجه افزایش پایداری خاکدانه‌ها و بهبود ویژگیهایفیزیکی خاک است. همچنین با توجه به افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌توان انتظار داشت که تشکیل سله سطحی با اضافه کردن گچ به خاک کاهش یابد.

جدول ۱- نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری پایداری خاکدانه و شاخص پایداری برای مقادیر مختلف گچ

تیمار	% WSA > 2 mm	% WSA > 1 mm	% WSA > 0.5 mm	% WSA > 0.25 mm	% WSA > 0.125 mm	% WSA > 0.075 mm	MWD (mm)
شاهد	۱/۰۹	۳/۸۴	۶/۷۴	۱۵/۲۶	۳۵/۸۲	۴۹/۷۷	۰/۲۰۳
۱۰ تن در هکتار گچ	۱/۴۴	۴/۹۹	۸/۶۴	۱۹/۲۲	۴۴/۰۹	۶۰/۵۳	۰/۲۴۷
۲۰ تن در هکتار گچ	۱/۵۶	۵/۳۷	۹/۳۳	۲۰/۷۵	۴۷/۸۹	۶۵/۹۰	۰/۲۶۶
۳۰ تن در هکتار گچ	۱/۶۸	۵/۸۷	۱۰/۲۰	۲۲/۷۱	۵۲/۵۴	۷۲/۳۶	۰/۲۸۵

تجزیه و تحلیل متغیرهای مختلف با استفاده از رگرسیون خطی و با روش گام به گام انجام گرفت. بدین صورت که سه متغیر مستقل شامل (۱) شیب ناودان (فلوم)(۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد)، (۲) شدت باران‌های همانندسازی شده (۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلیمتر بر ساعت) و (۳) میزان کاربرد گچ (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تن در هکتار) گزینش شد. در این مدل متغیرهای وابسته عبارت بودند از همه مقادیر اندازه‌گیری شده: (۱) شدت رواناب (میلیمتر بر ساعت)، (۲) غلظت رسوب (گرم بر لیتر)، (۳) پاشمان رو به جلو (گرم بر ساعت) و (۴) مقاومت برشی (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع). معادله کلی به صورت $Y = aR + bS + cA + d$ نشان داده می‌شود. در این معادله Y نشان دهنده هر یک از متغیرهای وابسته و R، S و A نیز به ترتیب سه متغیر مستقل شدت باران، شیب ناودان (فلوم) و میزان کاربرد گچ به همراه ضرایب آنها (a,b,c) است. همچنین d نیز ضریب ثابت معادله می‌باشد. جدول ۲ نتایج رگرسیون چند متغیره خطی را به روش گام به گام در آزمایش‌های مربوط به مخلوط کردن گچ با پنج میلیمتر سطحی خاک نشان می‌دهد. در این جدول معادله های خطی مربوط به شدت رواناب، غلظت رسوب، پاشمان رو به جلو و مقاومت برشی خاک یاد شده به ترتیب با علامت اختصاری Run، Sed، Spl و She نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج رگرسیون چند متغیره خطی در آزمایش‌های مربوط به مخلوط کردن گچ با سطح خاک

No	Linear Regression	R^2	F (sig)
1	Run = 0.911 R + 0.598 S – 0.162 A – 13.128	0.992	1752.180 **
2	Sed = 0.748 R + 5.567 S – 2.362 A – 82.507	0.760	46.561 **
3	Spl = 0.280 R + 1.668 S – 0.124 A – 22.482	0.951	285.666 **
4	She = 0.001 R – 0.003 S + 0.012 A + 0.141	0.971	491.244 **

* معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق نشان داده شد که گچ توانایی افزایش هدایت آبی (هیدرولیکی) سطح خاک را با جلوگیری از پراکنده شدن ذرات هم اندازه رس دارا است. بنابراین نتیجه هماوری ذرات رس، کند شدن فرآیندهای تخریب خاکدانه‌ها و تشکیل سله سطحی است. سرعت نفوذ آب در

خاک با دو سازوکار کنترل می‌گردد که عبارت اند از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی (Agassi et al., 1981). در رابطه با جنبه فیزیکی باید خاطر نشان کرد که سرعت نفوذ آب در خاک در اثر تخریب خاکدانه‌ها و تبدیل آنها به خاکدانه‌های ریزتر در هنگام بارندگی به رخ می دهد. این فرآیند مکانیکی را می‌توان با استفاده پوشش‌های سطحی (هر نوع پوششی) تا حد زیادی کنترل کرد (Reichert and Norton, 1996). بنابراین می‌توان با کاربرد مقادیر زیاد گچ بر روی سطح خاک یک لایه پوششی به وجود آورد. زیرا کاربرد مقادیر زیاد گچ تشکیل یک پوسته حفاظتی نازک را بر روی سطح خاک می‌دهد. در رابطه با فرآیندهای شیمیایی که سرعت نفوذ آب در خاک را کنترل می‌کنند می توان به غلظت الکترولیت های (EC) موجود در آب سطح خاک و ترکیب یونی کمپلکس تبادلی (Ionic composition of the exchange complex) اشاره کرد. هدایت الکتریکی بالا درسطح خاک باعث هماوری رس‌ها شده و از تشکیل سله سطحی جلوگیری می‌کند. نظریه (تئوری) لایه دوگانه پخشیده (Van Olphen, 1977) واکنشهای پدید آمده در هنگامی که گچ با آب موجود در سطح خاک واکنش می‌دهد را شرح می‌دهد. بیشتر خاک‌ها دارای بار منفی می‌باشند، بنابراین برای نگهداری تعادل این خاک‌ها وجود کاتیون‌های با بار مثبت لازم است. حل شدن گچ در این سامانه با افزایش غلظت الکترولیت ها شعاع لایه پخشیده پیرامون رس‌ها را کاهش داده و هماوری رس‌ها را افزایش می‌دهد که نتیجه آن بهبود ویژگیهایفیزیکی خاک (پایداری خاکدانه‌ها) است. در این تحقیق نشان داده شد که کاربرد گچ بر روی سطح خاک ایجاد سله و پوسته سطحی را کاهش می‌دهد. افزایش پایداری ذرات ثانویه خاک (خاکدانه‌ها) پس از کاربرد گچ مشخص کرد که با بهبود ویژگیهایفیزیکی خاک می‌توان تشکیل سله در سطح خاک را کاهش داد و بدین وسیله خلل و فرج خاک سطحی و نفوذ آب در خاک را افزایش داد که نتیجه همه اینها کاهش رواناب (کاهش ضریب رواناب) هر چند به میزان اندک است (Peterson et al., 2002).

کاربرد ۳۰ تن در هکتار گچ رواناب را به میزان ناچیزی کاهش داد، با این حال در مقایسه با بقیه تیمارها بیشترین تأثیر را در کاهش رواناب داشت. بدین صورت که تغییرات درصد کاهش رواناب در شیبها و شدت های مختلف بارندگی نسبت به تیمار شاهد بدین قرار بود که کاربرد ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تن در هکتار گچ به صورت مخلوط با پنج میلیمتر سطح خاک تولید رواناب را نسبت به شاهد به ترتیب بین صفر تا ۷ درصد، صفر تا ۹ درصد و ۵ تا ۱۳ درصد کاهش داد. همان طور که دیده می‌شود در شیب ۳۰ درصد و شدت باران همانندسازی شده ۷۵ میلیمتر در ساعت مخلوط کردن ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار گچ با سطح خاک تأثیری در کاهش رواناب ندارند. بنابراین در شیب‌های تندتر از ۲۵ درصد و شدت های بارش بالای باران کاربرد مقادیر بیشتری گچ برای بهبود ویژگیهایفیزیکی خاک در افزایش نفوذ آب در خاک مورد نیاز است تا بتوان رواناب را کاهش داد. با توجه به این نکته که استفاده از مقادیر زیاد گچ از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است می‌توان با مصرف مقادیر زیاد این ماده رواناب را در اراضی شیب‌دار کاهش داد. نتایج همچنین نشان داد که توانایی گچ نیز در کاهش رواناب در دقایقی پس از آغاز آن کاهش می‌یافت. به طوری که در کاربرد ۳۰ تن در هکتار گچ در شیب ۳۰ درصد و باران ۷۵ میلیمتر بر ساعت شدت رواناب حدود به مدت ۵ دقیقه پس از آغاز آن به حالت نزدیک به ثابت می‌رسید. Tishmack et al. (2001) نشان دادند که کاربرد ۵ تن در هکتار گچ طبیعی در یک خاک سیلتی رسی در شیب ۹/۵ درصد میزان رواناب را نسبت به شاهد در باران شبیه-سازی شده با شدت ۷۰ میلیمتر بر ساعت به میزان ۱۲ درصد کاهش داد. آنها اظهار داشتند که گچ تا حدود ۴۵ دقیقه پس از آغاز بارندگی (حدود ۳۵ دقیقه پس از آغاز رواناب) تأثیر خود را در کاهش رواناب حفظ می‌کند و سپس به یک میزان ثابت (Steady state) می‌رسد (یعنی با گذشت زمان میزان رواناب تغییر نمی‌کند). دلیل آن احتمال دارد تخریب خاکدانه‌ها و افزایش سله سطحی ناشی از آن بود که باعث می‌شده تا نفوذ آب در خاک کاهش یابد. تفاوتی که بین نتایج آنان و این تحقیق وجود دارد احتمال

دارد به علت تفاوت رفتار خاک‌های مختلف در حضور گچ نسبت به تولید رواناب باشد. Peterson et al. (۲۰۰۲) نیز در آزمایش‌های همانندی گزارش کردند که کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار پلی‌اکریل‌آمید با ۵۰۰۰ کیلوگرم گچ در یک خاک سیلتی رسی لومی که در جعبه‌های فرسایشی قرار داده شده بود در کاهش رواناب بسیار مؤثر بود، اما پس از گذشت ۳۰ دقیقه از آغاز بارندگی میزان رواناب به طور تصاعدی افزایش می‌یافت. آنان پیشنهاد کردند که میزان رواناب در تیمار پلی‌اکریل‌آمید به همراه گچ در بارانهای شدید به سرعت به میزان رواناب در تیمار شاهد نزدیک خواهد شد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که در شیبهای تند و شدتهای شدید باران کاربرد مقادیر بیشتری گچ برای بهبود ویژگیهایفیزیکی خاک در افزایش نفوذ آب در خاک موردنیاز است تا بتوان رواناب را کاهش داد.

کاربرد ۳۰ تن در هکتار گچ بیشترین تأثیر را در کاهش رسوب داشت. بدین صورت که تغییرات درصد کاهش رسوب در شیبها و شدت های مختلف بارندگی نسبت به تیمار شاهد بدین قرار بود که کاربرد ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تن در هکتار گچ به صورت مخلوط با پنج میلیمتر سطح خاک غلظت رسوب را نسبت به شاهد به ترتیب بین ۱۱ تا ۴۴ درصد، ۴۸ تا ۶۴ درصد و ۸۵ تا ۹۲ درصد کاهش داد. کارایی بالای کاربرد گچ به میزان ۳۰ تن در هکتار در کاهش رسوب به دلیل تأثیری است که این ماده در پایداری ساختمان خاک دارد. همچنین نتایج ما نشان داد که در شیب ۳۰ درصد و باران ۷۵ میلیمتر بر ساعت تأثیر کاربرد ۲۰ تن در هکتار گچ در کاهش غلظت رسوب پس از گذشت حدود ۳۵ دقیقه از آغاز رواناب از بین می‌رفت. علاوه بر این کاربرد ۳۰ تن در هکتار گچ در همین شیب و شدت باران حتی پس از گذشت ۶۰ دقیقه از آغاز رواناب تأثیر خود را در کاهش غلظت رسوب حفظ می‌کرد. در تحقیقات همانندی Tishmack et al. (۲۰۰۱) نشان دادند که کاربرد ۵ تن در هکتار گچ طبیعی در یک خاک سیلتی رسی در شیب ۹/۵ درصد غلظت رسوب را نسبت به شاهد در باران همانندسازی شده با شدت ۷۰ میلیمتر بر ساعت به میزان ۲۸ درصد کاهش داد. آنان اظهار داشتند که گچ تا حدود ۴۵ دقیقه پس از آغاز بارندگی (حدود ۳۵ دقیقه پس از آغاز رواناب) تأثیر خود را در کاهش غلظت رسوب حفظ می‌کند و سپس به یک میزان ثابت می‌رسد.

با توجه به این یافته‌ها به نظر می‌رسد که پایداری گچ در کنترل فرسایش تقریباً زیاد باشد و حتی در باران‌های شدید نیز این ماده استمرار خود را در کاهش فرسایش حفظ می‌کند. به هرحال Martinez-Mena et al. (2002) نشان دادند که به علت تشکیل سریع سله سطحی در خاک‌های مارنی و در شدت‌های مختلف باران، تفاوت زیادی در تشکیل شکل‌های مختلف فرسایش در این نوع خاک‌ها دیده نمی‌شد و همه این خاک‌ها قابلیتهای تولید انواع فرسایش را دارا هستند. به عبارت دیگر شکل‌های مختلفی از فرسایش مانند فرسایش خندقی (Gully erosion) و تونلی (Piping) در خاک‌های مارنی به فراوانی دیده می‌شود (Faulkner et al., 2000). بنابراین رفتار خاک‌های مارنی در برابر اضافه کردن گچ بسیار پیچیده است و با قاطعیت نمی‌توان عنوان کرد که کدام نوع از شکل‌های مختلف فرسایش در تیمار این خاک‌ها با گچ کاهش می‌یابد. با این حال با توجه به نتایج این تحقیق بهره‌گیری از این ماده برای جلوگیری از فرسایش‌های خندقی و تونلی به هیچ وجه توصیه نمی‌شود. زیرا به باور Esteves et al. (2005) رواناب یکی از مهم‌ترین عوامل گسترش خندق‌های اراضی مارنی است و بر پایه نتایج این تحقیق نیز تیمار خاک‌های مارنی با گچ در کاهش رواناب تأثیر زیادی نداشت.

سپاسگزاری

این تحقیق با همکاری گروه مهندسی علوم خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران و مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور انجام شده که لازم می‌دانیم از همکاری‌های ارزشمند کارکنان محترم آنها که ما در انجام این تحقیق صمیمانه یاری نمودند تقدیر و تشکر کنیم.

منابع

- Agassi, M., I. Shainberg & J. Morin, 1981. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on the infiltration rates and crust formation. Soil Science Society of America Journal, 45: 848-851.
- Alcordo, I.S. & J.E. Rechcigl, 1995. Phosphogypsum and other by-product gypsums. in: Soil Amendments and Environmental Quality. J.E. Rechcigl, Ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Borselli, L., R. Biancalani, C. Giordani, S. Carnicelli & G.A. Ferrari, 1996. Effect of gypsum on seedling emergence in a kaolinitic crusting soil. Soil Technology, 9(1-2): 71-81.
- Brauer D., G.E. Aiken, D.H. Pote, S.J. Livingston, L.D. Norton, T.R. Way & J.H. Edwards, 2005. Amendment effects of soil test P. Journal of Environmental Quality, 34: 1682-1686.
- Chapman, H.D., 1965. Cation exchange capacity. In: Black, C.A. (Ed.), Methods of Soil analysis. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 891-900.
- Esteves, M., L. Descroix, N. Mathys & J.M. Lapetite, 2005. Soil hydraulic properties in a marly gully catchment (Draix, France). Catena, 63: 282–298.
- Farres, P.J., 1987. The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. Catena, 14: 119-130.
- Faulkner, H., D. Spivey & R. Alexander, 2000. The role of some site geochemical processes in the development and stabilisation of three badland sites in Almeria, Southern Spain. Geomorphology, 35: 87–99.
- Gee, G.W. & J.W. Bauder, 1986. Particle-size analysis, In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods, 2nd ed., Agronomy, vol. 9. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 383–411.
- Javadi, P., H. Rouhipour & A.A. Mahbubi, 2005. Effect of rock fragments cover on erosion and overland flow using flume and rainfall simulator. Iranian Journal of Range and Desert Research, 12(3): 287-310. (In Persian)
- Lado, M., A. Paz & M. Ben-Hur, 2004. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation and soil loss. Soil Science Society of America Journal, 68: 935-942.
- Martinez-Mena, M., V. Castillo & J. Albaladejo, 2002. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain. Geomorphology, 45: 261–275.
- Morin, J., Y. Benyamini & A. Michaeli, 1981. The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile. Journal of Hydrology, 52: 321-335.
- Norton L.D. & A.I. Mamedov, 2006. Reducing runoff phosphorous loss using byproduct gypsum and waste paper. In Agricultural Constraints in the Soil-Plant-Atmosphere Continuum. Proceeding of the International Symposium 2-7 Sept. 2006, Ghent, Belgium (D. Gabriels., S. De Neve, J. Van der Steene, eds.). Royal Univ. Ghent, pp. 163-169.
- Norton, L.D., 1995. Mineralogy of high calcium/sulfur containing coal combustion by-products and their effect on soil surface sealing. Agron. Monogr. 58. Am. Soc. Agronomy. Madison, W.I. pp 87-105.
- Norton, L.D., 2007. Reducing runoff volume and concentrations of phosphorous and atrazine with gypsum amendment. National Soil Erosion Research Laboratory, USDA-ARS, Purdue University.

- Norton, L.D., K. Chaudhari & D. Flanagan, 2002. Erosion control using soil amendments and other low cost methods prior to establishment of vegetation. 12th ISCO Conference, Beijing.
- Page, A.L., 1992. Methods of soil Analysis. ASA and SSSA Publisher, Madison, WI. 321 p.
- Peterson, J.R., D.C. Flanagan & J.K. Tishmack, 2002. PAM application method and electrolyte source effects on plot-scale runoff and erosion. Transactions of the ASAE, 45: 1859-1867.
- Reichert, J.M. & L.D. Norton, 1996. Fluidized bed combustion bottom-ash effects on infiltration and erosion of variable-charge soils. Soil Science Society of America Journal, 60: 275-282.
- Tang, Z., T. Lei, J. Yu, I. Shainberg, A.I. Mamedov, M. Ben-Hur & G.J. Levy, 2006. Runoff and interrill erosion in sodic soils treated with dry PAM and phosphogypsum. Soil Science Society of America Journal, 70: 679-690.
- Tishmack. J.K., J.R. Peterson & D.C. Flanagan, 2001. Use of coal combustion by-products to reduce soil erosion. 2001 International ash utilization symposium, Center for applied energy research, University of Kentucky, Paper 63.
- Van Olphen. H., 1977. An introduction to clay colloid chemistry. 2nd edn (Interscience Publishing: New York).
- Wallace, B.H., L.D. Norton & R. Woodward, 2001. Erosion control by amending soil with synthetic gypsum. In: D.E. Stott, R.H. Mohtar and G.C. Steinhardt (eds). Sustaining the Global Farm. 10th International Soil Conservation Organization, Purdue University, pp. 1158-1162.
- Wallace-Cochrane, B., F. Eltz, M. Reichert & L.D. Norton, 2005. Controlling soil erosion and runoff with polyacrylamide and phosphogypsum on subtropical soil. Transactions of the ASAE, 48(1): 149-154.