

اثر پوزولان‌های طبیعی و فشردگی خاک در کنترل فرسایش مارن‌ها با استفاده از شبیه‌ساز باران صحرایی (مطالعه موردی: منطقه اسلام‌قلعه، خراسان رضوی)

- ❖ مهدی بشیری*: استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربت حیدریه، خراسان رضوی، ایران
- ❖ سیده‌مائده کاوسی‌داودی: کارشناس ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربت حیدریه، خراسان رضوی، ایران

چکیده

فرسایش خاک بر سلامت آبخیزها اثر گذاشته و پیامدهای منفی متعددی به دنبال دارد. مارن از سنگ‌های حساس به فرسایش است که به دلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاص، استقرار پوشش در آن مشکل و لذا نیازمند مدیریت است. یکی از روش‌های بهسازی خاک، فشردگی دینامیکی است که با دستگاه‌هایی مانند غلتک‌ها اعمال می‌شود. افزودن پوزولان نیز جهت تغییر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک، از دیگر روش‌های اصلاحی است، چرا که پوزولان‌ها، در حضور آب به صورت مواد پایدار غیرحلال، از خود خاصیت گیرشی بروز می‌دهند. لذا در این پژوهش تلاش گردید تا نقش میزان فشردگی خاک (با غلتک استوانه‌ای صاف به وزن‌های ۰، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ کیلوگرم) و افزودن پوزولان‌های طبیعی (به میزان ۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ گرم در مترمربع) از نوع پومیس تفتان بر تثبیت مارن‌ها در منطقه اسلام‌قلعه خراسان رضوی ارزیابی شود. طرح آزمایشی در قالب فاکتوریل با سه تکرار و مجموعاً ۷۵ پلات صحرایی ۳۰ در ۳۰ سانتی‌متری تحت بارشی ۱۰ دقیقه‌ای با شدت ۰/۸ میلی‌متر در دقیقه و در شیب ۱۵/۵ درجه اجرا شد. نتایج تحلیل آماری در سطح اعتماد ۹۵ درصد نشان داد که با در نظر گرفتن توأم سه متغیر رواناب، تولید و غلظت رسوب، اثرات اصلی تیمارهای فشردگی خاک و پوزولان معنادار ($\text{sig.}=0/000$) و اثر ترکیبی آن‌ها غیرمعنادار ($\text{sig.}=0/780$) است. تیمار فشردگی خاک اثر معنی‌دار ($\text{sig.}=0/000$) و افزایش بر تولید رواناب و رسوب دارد، اما اثر تیمار پوزولان بر رسوب کاهشی و معنی‌دار ($\text{sig.}=0/000$) بوده و بر رواناب اثر معنی‌داری ندارد ($\text{sig.}=0/709$). همچنین اثر ترکیبی دو تیمار بر متغیرهای رواناب، تولید و غلظت رسوب، غیرمعنی‌دار به دست آمد. لذا فشردگی خاک به دلیل تخریب سله سطحی و ساختمان مارن‌ها مناسب نبوده اما با توجه به بهای پایین و در دسترس بودن پوزولان‌های طبیعی، برای عملیات تثبیت مارن‌ها به عنوان گزینه‌ای اقتصادی و مناسب پیشنهاد می‌گردد.

کلید واژگان: تثبیت مارن، رسوب‌زایی، شبیه‌ساز باران، فرسایش خاک، خراسان رضوی

۱. مقدمه

امروزه هدف پروژه‌های حفاظت خاک به حداقل رساندن فرسایش، جلوگیری از پر شدن سریع مخازن و ممانعت از آلودگی‌های محیطی است [۵]. تخریب خاک ناشی از فرسایش آبی یک مشکل اساسی در کاهش کیفیت خاک و منابع آبی محسوب شده که بشر جهت معاش بیش از هر چیزی به آن وابسته است [۴۰]. فرسایش خاک و تولید رسوب اثر نامطلوبی بر پایداری اکوسیستم می‌گذارد و باعث بروز مشکلات درون یا برون منطقه‌ای می‌شود [۱۶]. لذا مشکل رسوب‌زایی، انتقال رسوب، فرسایش و رسوب‌گذاری از بحث‌های مهم در برنامه‌ریزی راهبردهای خرد و کلان آبخیزداری و مدیریت حوزه‌های آبخیز هستند [۲۳].

سازندها^۱ به عنوان مجموعه‌ای از سنگ‌های تشکیل‌دهنده سطح زمین نقش مهمی در فرآیند فرسایش دارند؛ به طوری که سازندهای حساس به فرسایش در مقایسه با سازندهای سخت دارای پتانسیل رسوب‌دهی بیشتری هستند [۱۸]. مارن^۲ از کلسیت و رس تشکیل شده و به دلیل دارا بودن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاص، از پوشش گیاهی بسیار فقیری برخوردار است و استقرار پوشش گیاهی نیز در آن‌ها با محدودیت‌های متعددی روبه‌رو است. واحدهای مارنی بیشترین رسوبات را در بین واحدهای سنگ‌شناسی حوضه تولید می‌نمایند و در کاهش عمر مفید سدها، خسارات به تأسیسات برق آبی، سیل‌گیری، رسوب‌گذاری کانال‌های آبرسانی و مرگ و میر آبیان نقش بسزایی دارند [۲۲؛ ۱]. لذا روش‌هایی که بتواند میزان فرسایش و رسوب را در این واحدها کاهش دهد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

سال‌ها قبل، انسان دریافت که وقتی مواد سیلیسی بسیار ریز با آهک مخلوط شود، سیمانی دارای خواص استحکامی تولید می‌نماید. یک نوع از این مواد، خاکستر

آتشفشانی تحکیم یافته یا توف بود که در حوالی پوزولی^۳ ایتالیا پیدا شد. پس از آن، واژه پوزولان^۴ به هر نوع ماده‌ای با خاصیت مشابه، اطلاق گردید. پوزولان مواد ریزدانه سیلیسی یا سیلیسی و آلومینی است که به خودی خود، دارای ارزش سیمانی کم و یا هیچ است اما به صورت ریز و در حضور آب، در واکنش شیمیایی با هیدروکسید کلسیم در دمای معمولی به شکل ترکیبات دارای خواص سیمانی در می‌آید [۸]. پوزولان‌ها دو نوع طبیعی و مصنوعی هستند که نوع طبیعی آن به صورت موادی همچون خاکستر آتشفشانی، شیل شیشه‌ای، پومیس و توف در سطح زمین وجود دارند. پوزولان‌های مصنوعی محصول فرعی فرایندهای دمای بالا هستند. به‌عنوان نمونه خاکستر ناشی از سوزاندن زغال برای تولید برق یا خاکستر مواد ارگانیک غنی از سیلیس مانند پوست برنج از این دسته‌اند. لذا با توجه به خصوصیات پوزولان‌ها و دردسترس بودن، می‌توان آن‌را به‌عنوان گزینه‌ای اقتصادی برای اصلاح خاک‌ها ارزیابی نمود.

یکی دیگر از روش‌های بهسازی خاک، تراکم دینامیک است که به صورت مصنوعی و با سقوط آزاد وزنه‌های سنگین از ارتفاع مشخص انجام می‌شود [۱۱]. از فواید فشردگی می‌توان به افزایش باربری خاک و کاهش نشست‌های ناخواسته اشاره کرد. فشردگی با دستگاه‌های معمول مانند غلتک‌های استوانه‌ای صاف، پاچه بزی و چرخ لاستیکی انجام می‌شود که می‌تواند تا ۳۰ سانتی‌متر سطح خاک را متراکم کند. فشردگی نیز منجر به افزایش تراکم خاک می‌شود که در این پژوهش تلاش بر آن است تا اثر آن بر تثبیت مارن‌ها در راستای حذف پخشیدگی و سله سطحی آن، مورد بررسی قرار گیرد.

مشخص شده که با افزایش کرنات کلسیم، میزان حساسیت مارن‌ها در برابر آب کاهش یافته و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن بهبود می‌یابد [۲۸]. سازندهای

^۱ Formations

^۲ Marls

^۳ Pezzoli

^۴ Pozzolan

نمونه‌ها، اختلاف معناداری در بین انواع مختلف فرسایش دارد [۴۲] همچنین در پژوهش‌های خارج از کشور، درصد سدیم تبادلی عامل ژئوشیمیایی مؤثر در رفتار مارن‌ها به‌دست آمد [۱۷]. همچنین مطالعه توسعه خندق در خاک‌های مارنی نشان داد که درصد سدیم تبادلی و نسبت جذب سدیم بالا که عامل تورم و پخشیدگی خاک هستند، در توسعه خندق و تشکیل هزاردره مؤثرند [۲۴].

مطالعاتی که در خصوص رسوبدهی سازندها در حوزه‌های آبخیز صورت گرفته، نقش اساسی سازندهای مارنی را در تولید رسوب نشان داده است [۱۴؛ ۲۸]. اما با هدف کنترل مارن‌ها و بهبود خصوصیات خاک‌ها، مشخص گردید آهک آزاد به تنهایی اثر چندانی بر بهبود خصوصیات مکانیکی خاک ندارد، اما تأثیر استفاده هم‌زمان از آهک و پوزولان بر خصوصیات خاک بسیار قابل توجه بوده و موجب کاهش پلاستیسیته، حداکثر دانسیته خشک، تورم نسبی و درصد جذب آب و افزایش میزان رطوبت بهینه و اندازه دانه‌های خاک گردیده است [۳۸]. افزون بر آن، با افزودن ماده اصلاحی گچ به مارن‌های سدیمی از مقدار فرسایش به نحو چشمگیری جلوگیری به عمل آمد [۳۶]. پژوهش‌های دیگر در این راستا بهترین درصد آهک برای اصلاح خاک مارن تبریز را ۱/۵ درصد به دست آوردند [۳۴] و در بررسی تثبیت خاک مارن تبریز با پودر لاستیک به عنوان ماده تثبیت‌کننده، بهینه‌ترین درصد پودر لاستیک ۲/۲ درصد تعیین شد [۴۵].

در هر حال اشکال مختلف فرسایش به ویژه فرسایش هزاردره‌ای یکی از خصوصیات بارز در عرصه‌های مارنی است [۴۱] و در راستای مقابله با این معضل، پژوهش حاضر با این هدف اجرا گردید تا امکان تثبیت مارن با افزودن پوزولان‌های طبیعی و تراکم سطحی خاک را ارزیابی نماید. دو روش مذکور به ترتیب بر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک اثرگذارند و اعمال این تیمارها در عرصه‌های طبیعی به سادگی مقدور است. لذا دستیابی به نتایج مثبت می‌تواند برای مدیران آبخیز، راهکارهای

مارنی در حساسیت به فرسایش اختلاف عملکرد بالایی دارند به طوری که نتیجه شد بین سازندهای آجاجاری و میشان از نظر مقادیر هرزآب و رسوب اختلاف معنی‌داری وجود دارد اما شیب و اثر متقابل شیب و سازند بر روی این مقادیر، اثر معنی‌داری ندارد [۴]. همچنین مقادیر زیاد کانی‌های رسی مونتموریلونیت که عامل اساسی آماس‌پذیری و تضعیف خواص مکانیکی خاک است در میان لایه‌های مارنی خاک‌های نرم، باعث زمین لغزش و گسیختگی دامنه‌ای شده است [۱۲؛ ۱۳]. همچنین واحدهای مارنی تبخیری نئوژن نسبت به مارن‌های دریایی سازند قم و مارن‌های کرانه‌ای سازند کند، ۲۷ تا ۱۰۰ برابر توان تولید رسوب دارند [۲۲]. پژوهش دیگری نیز نشان داد که بیشترین رسوب مربوط به واحد مارنی Gy₁ و بیشترین رواناب مربوط به واحد مارنی Ngc است. همچنین اثرات متقابل شیب و لیتولوژی فقط بر روی غلظت و میزان رسوب معنی‌دار است [۴۴].

مارن‌ها به دلیل قابلیت تورم و شکستگی، مقاومت و دوام‌پذیری کم در اجرای سازه‌های خطی و متمرکز و نیز حین حفاری برای اکتشاف منابع، مشکل ایجاد می‌کنند [۴۶]. اما مشخص گردیده که فقط متغیرهای شیمیایی (Ca + Mg, EC, SAR, Na) هستند که در طبقه‌بندی مارن‌ها از نظر تولید رسوب کاربرد دارند و اقدامات کاهش رسوب، باید متناسب با ویژگی‌های شیمیایی مارن‌ها انجام گیرد [۳۷]. علاوه بر آن کاتیون‌های یک ظرفیتی به ویژه سدیم تأثیر بیشتری در آماس خاک‌های رسی و پخش شونده‌گی آنها دارد و با افزایش پخش شونده‌گی، حساسیت مارن‌ها به فرسایش بیشتر می‌شود [۳۹]. دیگر مطالعات نشان داد که اسیدیته تنها متغیر معنی‌دار در شناسایی نوع فرسایش مارن‌ها است و متغیرهای فیزیکی بهتر از متغیرهای شیمیایی و فیزیکوشیمیایی نوع فرسایش را تخمین می‌زنند [۲]. اختلاف رسوب‌زایی مارن‌ها به ویژگی‌های متعددی از آن نسبت داده شده است، به طوری که مشخص گردید از بین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مارن‌ها، اسیدیته، درصد گچ و درصد شن

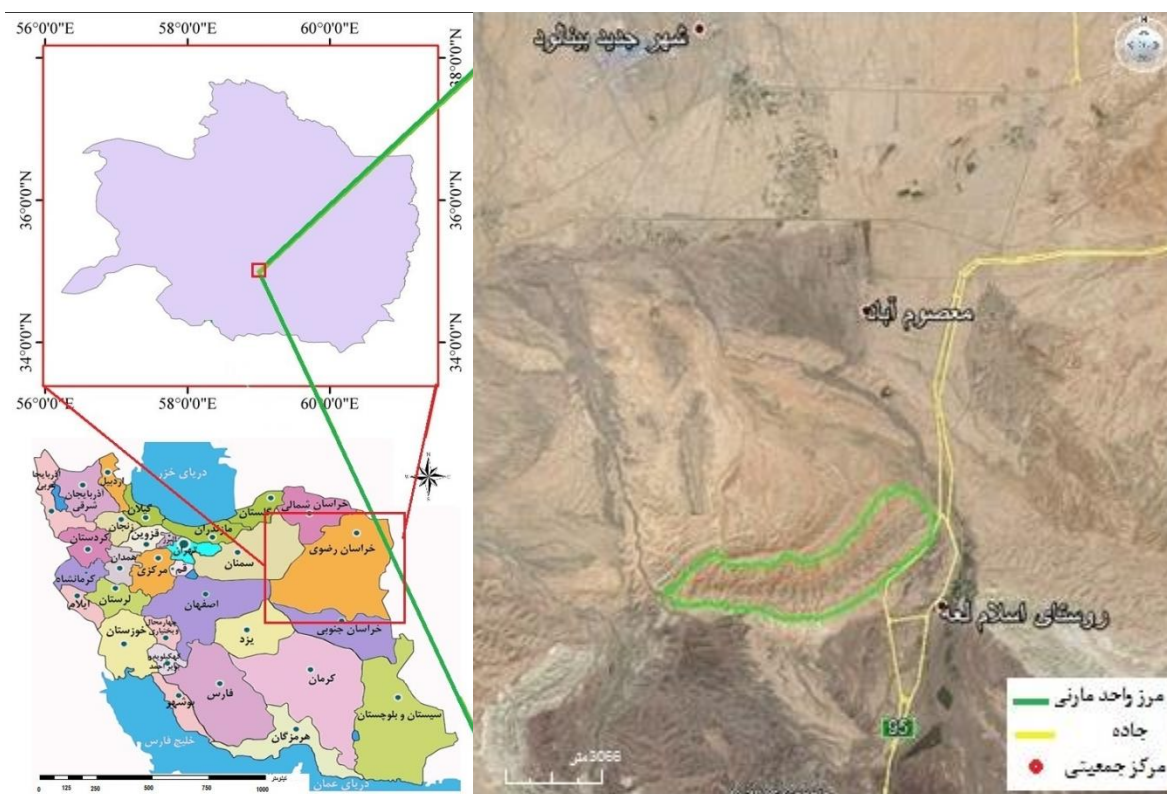
مشکلات فرسایشی ناشی از آن برای مردم، بررسی امکان کنترل آن می‌تواند بسیار مؤثر واقع گردد. این واحد مارنی بین مختصات $59^{\circ} 21' 5''$ تا $59^{\circ} 25' 10''$ طول شرقی و $35^{\circ} 52' 15''$ تا $35^{\circ} 53' 50''$ عرض شمالی قرار گرفته است. این واحد در محدوده ارتفاعی ۱۴۳۹ تا ۱۶۲۳ متر از سطح دریا و به طور متوسط ۱۵۱۳ متر واقع شده است. مساحت و محیط این واحد نیز به ترتیب برابر $6/27$ کیلومتر مربع و $14/09$ کیلومتر است. اقلیم این منطقه طبق اقلیم‌نمای آمبرژه در وضعیت نیمه‌خشک متوسط قرار دارد و تبخیر سالانه منطقه برابر با ۲۰۰۰ میلی‌متر برآورد گردیده است. همچنین مقدار بارش متوسط سالانه منطقه برابر ۲۹۰ میلی‌متر و دمای متوسط آن $11/5$ درجه است. نقشه عرصه مورد مطالعه، مراکز جمعیتی منطقه و لایه‌های توپوگرافی واحد مارنی در شکل ۱ ارائه شده است.

اجرای در کنترل فرسایش حوضه‌های مارنی ارائه نماید.

۲. روش شناسی

۱.۲. موقعیت منطقه مورد مطالعه

واحد مارنی مورد مطالعه جهت بررسی تیمارهای پوزولان طبیعی و فشردگی خاک بر کنترل آن، در محدوده روستای اسلام‌قلعه در استان خراسان رضوی و در حدود ۶۵ کیلومتری جنوب غربی شهر مشهد قرار دارد. این واحد از نظر سنگ‌شناسی شامل مارن همراه با سنگ‌آهک و ماسه‌سنگ است و از نظر سن، مربوط به دوران سنوزوئیک و دوره زمین‌شناسی آئوسن انتهایی (E_3m) است. مجاورت این منطقه با چندین مرکز جمعیتی به‌ویژه وجود شهر جدید بینالود در پایین دست آن، جاده ارتباطی مشهد- تربت حیدریه و اراضی کشاورزی، اهمیت عرصه را نشان می‌دهد. لذا با توجه به



شکل ۱. نمایشی از موقعیت عرصه مورد مطالعه در استان خراسان رضوی

۲.۲. روش پژوهش

ابتدا با مدل رقومی ارتفاع^۱ منطقه با دقت پیکسل ۱۰ متری، اقدام به استخراج نقشه‌های شیب، جهت شیب و طبقات ارتفاعی عرصه پژوهش گردید. در عملیات میدانی، مکان‌یابی پلات‌ها را در شیب‌های یکسان (به میزان ۱۵/۵ درجه یا ۲۷/۷ درصد برابر با شیب متوسط عرصه) به طور تصادفی اجرا شده و در هر پلات با استفاده از شبیه‌ساز باران، بارشی با شدت و مدت مورد نظر اجرا شد. با توجه به نزدیکی منطقه به شهر مشهد، با هدف انتخاب شدت بارش شبیه‌سازی شده، منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی مشهد تهیه گردید که از نتایج تحلیل نقطه‌ای آمار باران سنج‌های ثبات ایران توسط سازمان هواشناسی، استخراج شده است. همچنین اعمال بارش‌های طولانی مدت با توجه به حجم مخزن شبیه‌ساز باران مقدور نمی‌باشد. لذا شدت ۰/۸ میلی‌متر در دقیقه برابر با شدت بارش ۱۰ دقیقه‌ای با دوره بازگشت ۱۰ ساله در منطقه انتخاب شد. چرا که این دوره بازگشت در عمده پروژه‌های آبخیزداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس تیمارهای مختلف کوبیدگی خاک (با استفاده از غلتک‌زنی خاک) و افزودن پوزولان‌های طبیعی به سطح خاک (با درصد‌های مختلف)، بر روی هر پلات اعمال شد. تیمار غلتک‌زنی سطح خاک در پنج کلاس (بدون غلتک‌زنی و استفاده از غلتک با وزن‌های ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ کیلوگرم) انجام شد. جهت اعمال این تیمار از غلتک

سیلندری دستی با وزن پایه ۲۰ کیلوگرم استفاده شد که با تزریق آب به داخل مخزن آن، امکان اعمال سایر سطوح فشرده‌گی خاک میسر گردید. دلیل انتخاب تیمارهای مذکور این است که با توجه به شیب بالای عرصه‌های مارنی، امکان استفاده از غلتک‌های مکانیکی وجود ندارد و لذا نتایج به دست آمده نمی‌تواند کاربردی باشد. تیمار افزودن پوزولان به خاک سطحی نیز در پنج کلاس (بدون پوزولان و مقادیر ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ گرم بر متر مربع) اعمال گردید. این مقادیر نیز با توجه به پیشینه پژوهش [۸] و هزینه اعمال این مقادیر در سطوح بزرگ انتخاب گردید تا نتایج قابل عملیاتی شدن باشد. پوزولان مورد استفاده، پودر پوزولان تفتان است که به عنوان یک پوزولان طبیعی برای افزایش دوام، کاهش هزینه تولید سیمان و همچنین کاهش آلودگی محیط زیستی ناشی از تولید سیمان به بتن افزوده می‌شود [۳۱]. ماده پوزولانی به شکل پودر شده است، زیرا فقط در این صورت سیلیس می‌تواند در حضور آب با آهک، سیلیکات‌های کلسیم پایدار را که دارای خواص چسبندگی‌اند، تشکیل دهند. نتایج تجزیه شیمیایی پوزولان در جدول ۱ آمده است [۳۰]. نهایتاً با توجه به طرح آزمایشی فاکتوریل و استفاده از سه تکرار در آزمایش، جمعاً ۷۵ پلات صحرایی در واحد مارنی مستقر و تحت آزمون شبیه‌سازی بارش قرار گرفت. ویژگی‌های شیمیایی این واحد مارنی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی پوزولان تفتان

نوع اکسید	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl	K ₂ O	Na ₂ O
درصد	۶۰/۹	۱۸/۴۵	۵/۱	۶/۵۸	۲/۵۳	۰/۱۴	۰/۰۴	۱/۸۵	۱/۵۱

جدول ۲. ویژگی‌های شیمیایی سازند مارنی مورد مطالعه

پارامتر	Na	Ca	Mg	So ₄	PH	EC	SAR	CaSo ₄	ماده آلی	رس	سیلت	ماسه
واحد	میلی اکی والان گرم در لیتر	-	دسی‌زیمنس برمتر ^۲	درصد								
مقدار	۱۴۵/۲	۶۳/۲۴	۱۷/۸	۷۵/۲	۸/۵	۲۵/۲	۴۷/۲	۳/۱۴	۰/۳۵	۳۶/۴	۳۱/۵	۳۲/۱

^۱ Digital elevation model (DEM)

^۲ مربوط به عصاره گل اشباع

اثرات بین متغیرها^۳، آنالیز واریانس دوطرفه در قالب دستورالعمل مدل‌های عمومی خطی^۴ انجام پذیرفت [۱۹] و اثرات اصلی و ترکیبی^۵ تیمارهای تحقیق بر متغیرهای رواناب و رسوب بررسی شد. روش آنالیز با توجه به طرح آزمایشی فاکتوریل در تحقیق استفاده گردید. چرا که آزمون چندمتغیره^۶ در آزمون فرضیاتی استفاده می‌شود که در آن ترکیبی از چند متغیر بر روی یک متغیر هدف اثرگذار است و هدف شناسایی بهترین خروجی از همه ترکیبات ممکن باشد. در نتیجه نیاز به اجرای چندین آزمون متوالی را از بین می‌برد. آزمون یک متغیره^۷ نیز از ساده‌ترین روش‌های آماری است که به‌صورت یک‌طرفه اثر یک تیمار را بدون در نظر گرفتن سطح تیمار دوم، بر متغیر هدف بررسی می‌کند.

۳. نتایج

مقایسه کلی اثرات اصلی و ترکیبی تیمارهای فشردگی خاک و میزان پوزولان سطحی بر تولید رواناب و رسوب، توسط آزمون چندمتغیره انجام شد که در جدول ۳ ذکر شده است. سپس اثر تیمارهای تحقیق بر هر یک از متغیرهای رواناب، تولید رسوب و غلظت رسوب به صورت آزمون یک متغیره نیز بررسی گردید که نتایج تحلیل معناداری اثر اصلی و ترکیبی تیمارهای تحقیق همراه با مدل عمومی خطی برازش داده شده بر داده‌ها در جدول ۴ آمده است.

در ادامه برای مقایسات زوجی اختلافات سطوح مختلف فشردگی خاک و پوزولان در تولید رواناب و رسوب، با توجه به وجود تیمار شاهد (سطح صفر در هر تیمار) و نزدیکی مقادیر به دست آمده، از روش حداقل اختلاف معنی‌دار فیشر^۸ (LSD) استفاده شد [۹] که نتایج

دستگاه شبیه‌ساز باران مورد استفاده، شبیه‌ساز صحرایی مدل *Eijkelpamp* است که با پلات ۰/۰۹ متر مربعی (۳۰ سانتی‌متر در ۳۰ سانتی‌متر) به راحتی قابل حمل است. به‌طور کلی، مهم‌ترین مزایای استفاده از شبیه‌ساز باران، سرعت در عمل، کارایی، قابلیت کنترل و انعطاف‌پذیری بیشتر آن نسبت به باران‌های طبیعی است [۳۱]. این دستگاه برای تعیین ویژگی‌های فرسایشی خاک، میزان نفوذ آب و همچنین تحقیقات حفاظت خاک مناسب بوده و کاربرد آن به منظور تعیین فرسایش‌پذیری نهشته‌های سطحی در صحرا، روشی استاندارد به شمار می‌آید [۲۶].

پس از هر بار اجرای بارش، حجم رواناب تولیدی پس از هر بار بارش با اندازه‌گیری مستقیم توسط استوانه مدرج تعیین شد [۲۹؛ ۷]. رسوب تولیدی نیز پس از انتقال به آزمایشگاه، با عبور از کاغذ صافی واتمن ۴۲، به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه آون و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد، خشک و سپس توزین شد [۴۳؛ ۴۷]. همچنین، از تقسیم میزان هدررفت خاک بر حجم رواناب، غلظت رسوب بر حسب گرم در لیتر محاسبه شد.

پس از جمع‌آوری و ثبت داده‌ها و ایجاد بانک داده‌ها، برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با توجه به فرضیات تحقیق، از نرم‌افزار SPSS 23 استفاده شد. در نخستین مرحله، نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف^۱ در سطح اطمینان ۵ درصد بررسی شد [۲۰]. با توجه به عدم تبعیت توزیع داده‌ها از حالت نرمال، جهت نرمال‌سازی داده‌ها از آزمون تبدیل باکس-کاکس^۲ استفاده شد و داده‌ها نرمال گردید. سپس به منظور مقایسه نتایج به دست آمده در هر یک از تکرارهای مربوط به تیمارهای مورد بررسی و نیز برای ارزیابی اختلافات در رواناب، رسوب کل و میانگین غلظت مشاهده‌ای بین مقادیر مختلف پوزولان و فشردگی سطحی از آنالیز واریانس استفاده شد [۳]. برای آزمون

¹ Kolmogorov-Smirnov

² Box-Cox transformation

³ Between-Subjects

⁴ General linear model

⁵ Main and interaction effects

⁶ Multivariate Test

⁷ Univariate Test

⁸ Fisher's Least Significant Difference

آن به تفکیک تیمارها و متغیرهای مختلف در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج تحلیل چندمتغیره در بررسی اثر پوزولان و فشرده‌گی خاک بر تولید رواناب و رسوب

متغیر	آماره F	درجه آزادی	معنی‌داری
فشرده‌گی خاک	۸/۱۹۵	۱۲	۰/۰۰۰*
پوزولان	۳/۶۴۱	۱۲	۰/۰۰۰*
فشرده‌گی خاک × پوزولان	۰/۸۲۳	۴۸	۰/۷۸۰

*: میانگین اختلافات در سطح ۵ درصد معنی‌دار است.

جدول ۴. نتایج آزمون اثرات بین گروهی^۱ تیمارهای تحقیق و اثر ترکیبی آن‌ها در تولید رواناب و رسوب

متغیر مقایسه	متغیر وابسته	معنی‌داری	آماره F	درجه آزادی
مدل اصلاح شده ^۲	رواناب ^a	۰/۰۰۰*	۱۳/۷۲۳	۲۴
	تولید رسوب ^b	۰/۰۰۰*	۵/۴۵۷	
	غلظت رسوب ^c	۰/۰۰۰*	۹/۵۸۱	
فشرده‌گی خاک	رواناب	۰/۰۰۰*	۷۹/۹۶۳	۴
	تولید رسوب	۰/۰۰۰*	۱۴/۷۴۱	
	غلظت رسوب	۰/۰۰۰*	۴۷/۲۱۶	
پوزولان	رواناب	۰/۷۰۹	۰/۵۳۸	۴
	تولید رسوب	۰/۰۰۰*	۱۳/۰۷۰	
	غلظت رسوب	۰/۰۰۰*	۷/۸۶۲	
فشرده‌گی خاک × پوزولان	رواناب	۰/۹۵۵	۰/۴۵۹	۱۶
	تولید رسوب	۰/۲۷۸	۱/۲۳۲	
	غلظت رسوب	۰/۸۶۷	۰/۶۰۲	

*: میانگین اختلافات در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. a: ضریب تبیین برابر ۰/۸۶۸ و ضریب تبیین تعدیل شده برابر ۰/۸۰۵.

b: ضریب تبیین برابر ۰/۷۲۴ و ضریب تبیین تعدیل شده برابر ۰/۵۹۱. c: ضریب تبیین برابر ۰/۸۲۱ و ضریب تبیین تعدیل شده برابر ۰/۷۳۶.

جدول ۵. آزمون مقایسات چندگانه^۳ مقادیر رواناب و رسوب در مقادیر مختلف پوزولان

تولید رسوب	غلظت رسوب	رواناب	پوزولان (J)	پوزولان (I)
۰/۰۰۰*	۰/۰۱۴*	۰/۴۴۹	۵۰	۰
۰/۰۰۰*	۰/۰۰۳*	۰/۴۴۵	۱۰۰	
۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۰/۸۴۳	۱۵۰	
۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۰/۷۷۶	۲۰۰	
۰/۴۵۰	۰/۵۸۰	۰/۹۹۵	۱۰۰	۵۰
۰/۱۴۷	۰/۰۵۲	۰/۳۴۱	۱۵۰	
۰/۰۴۳*	۰/۰۱۷*	۰/۲۹۹	۲۰۰	
۰/۴۸۰	۰/۱۵۹	۰/۳۳۸	۱۵۰	۱۰۰
۰/۱۹۴	۰/۰۶۱	۰/۲۹۶	۲۰۰	
۰/۵۴۷	۰/۶۲۷	۰/۹۳۱	۲۰۰	۱۵۰

*: میانگین اختلافات در سطح ۵ درصد معنی‌دار است.

¹ Tests of Between-Subjects Effects

² Corrected Model

³ Multiple Comparisons

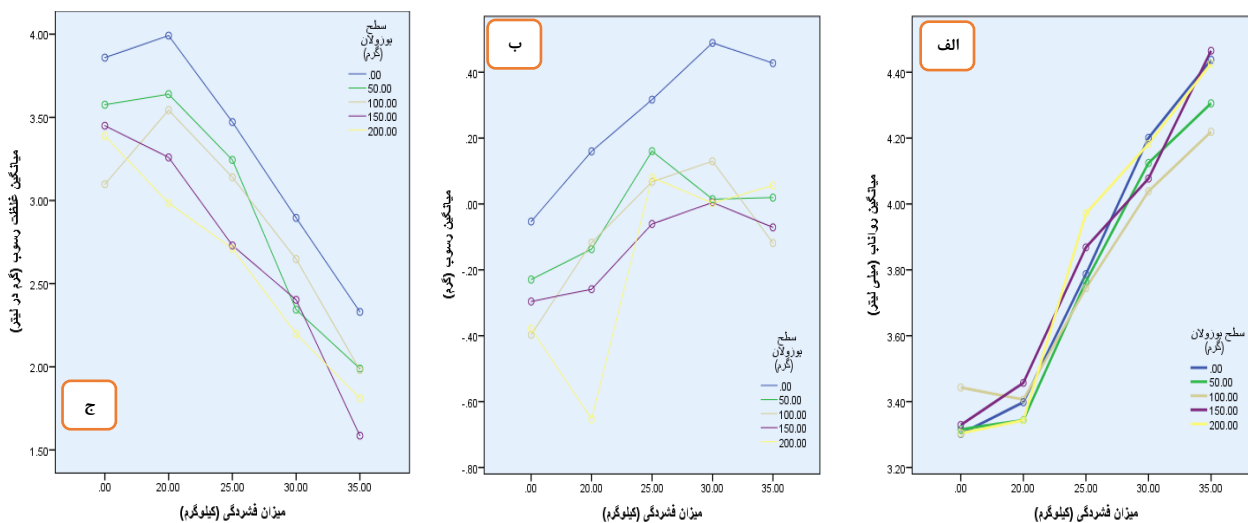
جدول ۶. آزمون مقایسات چندگانه مقادیر رواناب و رسوب در مقادیر مختلف فشردگی خاک

تولید رسوب	غلظت رسوب	رواناب	(J) فشردگی	(I) فشردگی
۰/۳۱۹	۰/۹۴۴	۰/۴۷۹	۲۰	۰
۰/۰۰۰*	۰/۰۰۴*	۰/۰۰۰*	۲۵	
۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۳۰	
۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۳۵	
۰/۰۰۰*	۰/۰۰۳*	۰/۰۰۰*	۲۵	۲۰
۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۳۰	
۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۳۵	
۰/۸۲۶	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۳۰	۲۵
۰/۴۷۲	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۳۵	
۰/۳۴۹	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۱*	۳۵	۳۰

* : میانگین اختلافات در سطح ۵ درصد معنی دار است.

تقریباً موازی تیمارها در سطوح مختلف نشان دهنده عدم وجود اثر ترکیبی است در حالی که تقاطع و نوسان زیاد خطوط در سطوح مختلف نشانه وجود اثر ترکیبی بین تیمارها در متغیر مورد نظر است.

نمودارهای اثر ترکیبی بین تیمارهای تحقیق در هر یک از متغیرهای رواناب، تولید رسوب و غلظت رسوب نیز ترسیم و استخراج گردید که این نمودارها در شکل ۲ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که خطوط



شکل ۲. نمودار اثر ترکیبی مقادیر نرمال شده رواناب (میلی لیتر) (الف)، تولید رسوب (گرم) (ب) و غلظت رسوب (گرم در لیتر) (ج) در سطوح مختلف پوزولان و فشردگی خاک

خاک ایجاد نکرده است، ولی با ایجاد چسبندگی در ذرات خاک، مقادیر رسوب تولیدی را به طور معنی‌داری ($\text{sig.} = 0/000$) نسبت به تیمارهای فاقد پوزولان کاهش داده است.

عوامل بی‌شماری به صورت ترکیبی بر فرسایش خاک اثرگذارند، لذا بررسی اثرات ترکیبی این عوامل هم‌زمان با اثرات انفرادی آن‌ها گامی مؤثر در بهبود مطالعات فرسایش خاک است. شکل منحنی‌های اثر ترکیبی تیمارهای پژوهش نشان داد که به‌طور کلی میانگین‌های تخمینی در سطوح مختلف تیمارها، در زمینه رواناب و تولید رسوب افزایشی و در مورد غلظت رسوب کاهش‌دهنده هستند. به این مفهوم که با افزایش درصد پوزولان سطحی و میزان تراکم خاک، مقادیر حجم رواناب تولیدی و تولید رسوب کل افزایش می‌یابد، اما افزایش هم‌زمان این دو تیمار، باعث کاهش غلظت رسوب گردیده است. با معناداری اثر ترکیبی، نمی‌توانیم سطوح تنها یک عامل را مدنظر قرار دهیم، اما نمودارهای اثر ترکیبی به دست آمده برای تیمارهای پوزولان و فشرده‌گی سطحی و متغیرهای سه‌گانه مورد بررسی تقاطع و نوسانات بالایی را نشان نمی‌دهد، لذا قابل نتیجه‌گیری است که در تیمار مطالعاتی، به صورت مستقل از یکدیگر در زمینه فرسایش خاک‌های مارنی عمل می‌کنند و وابسته به میزان تیمار مقابل نیستند. طبق نتایج تجزیه واریانس، اثر متقابل دو تیمار فشرده‌گی خاک و پوزولان بر رواناب و رسوب معنی‌دار به دست نیامد ($\text{sig.} = 0/780$). دلیل عدم معناداری اثر ترکیبی دو تیمار مورد بررسی را می‌توان بر نحوه اثر اصلی هر یک از تیمارهای مورد بررسی بر رواناب و رسوب دانست. به‌طوری‌که افزایش میزان فشرده‌گی سطحی، اثری افزایشی بر تولید رسوب و رواناب داشته است. در حالی‌که افزایش مقادیر پوزولان سطحی اثری کاهش‌دهنده را بر متغیرهای هدف نشان داده است. لذا در حالت ترکیبی، تیمارها اثر یکدیگر را بر متغیرهای هدف یعنی رواناب و رسوب خنثی نموده‌اند.

در ادامه بین مقادیر رواناب به‌عنوان متغیر مستقل و مقادیر تولید و غلظت رسوب به‌عنوان متغیر وابسته، انواع مدل‌های رگرسیونی خطی و غیرخطی برآزش گردید. پارامترهای روابط رگرسیونی خطی همراه با برترین مدل غیرخطی از بین مدل‌های لگاریتمی^۱، معکوس^۲، درجه دوم^۳ و سوم^۴، توانی^۵، مرکب^۶، منحنی S^۷، رشد^۸ و نمایی^۹ در جدول ۷ ارائه شده است. در نهایت تحلیل رگرسیونی خطی چندمتغیره به صورت گام به گام^{۱۰} با هدف شناسایی مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مؤثر بر تولید رواناب و رسوب انجام گرفت که نتایج در جدول ۸ ارائه شده است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

طبق نتایج پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن توأم هر سه متغیر تولید رواناب (میلی‌لیتر)، تولید رسوب (گرم) و غلظت رسوب (گرم در لیتر)، تیمارهای فشرده‌گی خاک و میزان پوزولان اثر معنی‌داری ($\text{sig.} = 0/000$) را از خود نشان دادند. بررسی هر متغیر یک از سه متغیر اخیر به صورت مجزا توسط آنالیز واریانس نشان داد که تیمار فشرده‌گی خاک همچنان اثر معنی‌داری ($\text{sig.} = 0/000$) بر هر سه متغیر تحقیق دارد ولی اثر پوزولان بر تولید رواناب معنی‌دار به دست نیامد ($\text{sig.} = 0/709$). اثر ترکیبی دو تیمار بر رواناب، تولید و غلظت رسوب نیز غیرمعنی‌دار است. عدم معنی‌داری اثر تیمار پوزولان بر تولید رواناب را می‌توان در دانه‌بندی مشابه آن با خاک‌های مارنی مورد مطالعه دانست که تغییر محسوسی در میزان نفوذپذیری

¹ Logarithmic

² Inverse

³ Quadratic

⁴ Cubic

⁵ Power

⁶ Compound

⁷ S Curve

⁸ Growth

⁹ Exponential

¹⁰ Stepwise

جدول ۷. نتایج تحلیل رگرسیون بین رواناب با مقادیر تولید رسوب و غلظت رسوب

متغیر وابسته	نوع مدل	ثابت معادله	ضریب متغیر رواناب	ضریب تشخیص ^۱	سطح معنی داری
غلظت رسوب	خطی	۲۰/۷۷۰	-۰/۰۷۷	۰/۵۷۳	۰/۰۰۰
تولید رسوب	توانی	۳۱۲/۲۸۵	-۰/۷۴۴	۰/۷۶۶	۰/۰۰۰
	خطی	۰/۷۷۹	۰/۰۰۲	۰/۲۰۱	۰/۰۰۰
	توانی	۰/۳۱۲	۰/۲۵۶	۰/۲۷۸	۰/۰۰۰

جدول ۸. نتایج تحلیل رگرسیون بین مقادیر رواناب و رسوب با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

متغیر وابسته	شکل مدل	ضریب تشخیص	سطح معنی داری
رواناب	$R_u = -۴۷/۲۴۸ + ۰/۱۰۷ SAR - ۸/۱۸۶ EC$	۰/۸۸۵	۰/۰۰۰
غلظت رسوب	$S_c = ۱۱/۹۱۳ + ۰/۳۰۹ SAR + ۰/۰۳۲ Na$	۰/۷۱۳	۰/۰۰۰
تولید رسوب	$R_l = ۰/۳۶۸ + ۰/۰۰۷ SAR + ۰/۰۳۷ EC - ۰/۳۰۴ OM$	۰/۵۰۶	۰/۰۰۰

دست‌خورده^۲ ناشی شده است الگوی فرسایش را در کوتاه مدت تحت تأثیر قرار داده است. همچنین افزایش جزئی در محتوی رطوبت خاکدانه‌ها پایداری آن‌ها را افزایش می‌دهد [۱۰].

بررسی رابطه بین رواناب با متغیرهای غلظت و تولید رسوب به مدل‌های خطی و غیرخطی معناداری دست یافت که متغیر غلظت رسوب نسبت به تولید رسوب مدل‌های دقیق‌تری را ارائه کرد. از بین مدل‌های غیرخطی نیز مدل توانی برای هر دو متغیر اخیر، دقت بالاتری را از خود نشان داد. تبیین ارتباطات غیرخطی بین متغیرهای رواناب و رسوب با اظهارات Jalal و Hassan (۲۰۱۰) مبنی بر غالب بودن ارتباط غیرخطی بین متغیرهای هیدرولوژیکی تطابق دارد. در این راستا، مساعدی و همکاران (۱۳۸۵) معادلات توانی را در بررسی روابط دبی و رسوب کارآمد نمی‌دانند اما Owusu-Asante و Stephenson (۲۰۰۶) در بررسی مدل‌های خطی، توانی و نمایی نشان دادند که مدل توانی تخمین‌گر بهتری برای رواناب و رسوب است. ارزیابی متغیرهای فیزیکی و شیمیایی خاک در تولید رواناب و رسوب نشان داد که

مقایسات زوجی مقادیر رواناب تحت تیمارهای مختلف فشرده‌گی خاک نشان داد که مقادیر فشرده‌گی کم، اثری بر رواناب ندارد. ولی مقادیر بالاتر، باعث افزایش چشمگیر رواناب گردیده است که ناشی از کاهش نفوذپذیری خاک است. اما تیمار پوزولان در تغییر مقدار رواناب اثر معنی‌داری ندارد. چراکه به طور کلی در خاک‌های مارنی سرعت نفوذ آب کم و زمان شروع و ضریب آبدوی و در نتیجه میزان فرسایش بالا است. اما در زمینه تولید رسوب، مقادیر متوسط فشرده‌گی خاک، اثر معنی‌داری در افزایش رسوب تولیدی نشان داد ولی مقادیر کم و زیاد کوبیدگی، اثر معنی‌داری بر کاهش یا افزایش رسوب پلات‌ها نداشته است. لذا به نظر می‌رسد خاک‌های دست‌نخورده مارنی، مقاومت ساختمانی بهتری در برابر فرسایش دارند، چرا که برای خاک‌های با ساختار خوب تنها ذرات ریز حمل می‌یابند، در حالی که غلظت برای خاک‌های بدون خاکدانه تا حدودی در کلاس‌های مختلف اندازه ذرات همسان است [۶] که مشابه با نمونه‌های خاک مورد استفاده در تحقیق حاضر تحت تیمار کوبیدگی سطحی است. این اختلافات نشان می‌دهد که شرایط ناهمگون اولیه سطح خاک که از خاک‌های

^۱ Coefficient of Determination

^۲ Remolded Soils

افزودن پوزولان جهت تغییر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک می‌تواند یکی از روش‌های اصلاحی خاک‌های مارنی باشد [۳۸].

در ایران منابع قابل توجهی از این مواد در منطقه تفتان، سیلان و نیز منطقه دماوند در شمال تهران وجود دارند [۱۵]، لذا پوزولان‌های طبیعی زیادی را می‌توان در کشور یافت. پائین بودن بهای مواد پوزولانی و مزیت‌ها و خواص ویژه مخلوط‌های آن باعث گردیده تولید سیمان‌های پوزولانی با استقبال زیادی همراه شود. پوزولان به عنوان یک تثبیت کننده مارن، با توجه به قیمت ارزان و در دسترس بودن، می‌تواند بسیار مناسب باشد. اما طبق عملکرد تیمار فشرده‌گی خاک و اثر معنادار ($\text{sig.} = 0/000$) و افزایشی آن بر تولید رسوب، به نظر می‌رسد دست‌کاری خاک‌های مارنی، به دلیل ساختمان حساس این دسته خاک‌ها مناسب نباشد و وجود رس و سله سطحی در مارن می‌تواند آن را پایدار نماید. وجود کانی‌های رسی در مارن‌ها باعث انبساط‌پذیری و پخشیدگی شده و حساسیت مارن‌ها را به فرسایش افزایش می‌دهد و نتیجه آن انواع فرسایش شیاری، خندقی و لغزش است. اما سخت بودن خاک در زمان خشکی و تورم آن در مواقع بارندگی از ویژگی‌های خاک‌های مارنی است. لذا در زمینه امور اجرایی، با توجه به اختلافات عمده مشاهده‌ای در خاک‌های فاقد پوزولان از سایر تیمارها، می‌توان این تیمار را به عنوان نوعی پایدار کننده مارن در کنترل فرسایش به کار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق، موارد مختلفی را می‌توان پیشنهاد نمود که در راستای بهبود مطالعات تثبیت مارن‌ها مورد توجه قرار گیرند. نخست آزمون درصد‌های جزئی و بالای محتوی پوزولان خاک و انواع متفاوت موجود در پروفیل خاک در کمیت و کیفیت پدیده فرسایش که می‌تواند جهت دستیابی به جمع‌بندی نهایی مفید واقع شود. نهایتاً اینکه در صورت نداشتن محدودیت زمانی و ابزاری، استفاده از شدت‌های کم بارش با مدت زمان طولانی‌تر جهت امکان دادن به پوزولان جهت ایفای بهتر نقش خود در پیوند ذرات خاک نیز پیشنهاد می‌گردد.

متغیر نسبت جذب سدیم (SAR) مهمترین عامل شیمیایی است. با افزایش این متغیر، نسبت کاتیون یک ظرفیتی سدیم به کاتیون‌های دوظرفیتی کلسیم و منیزیم افزایش می‌یابد. مشخص گردیده است که کاتیون‌های یک‌ظرفیتی به‌ویژه سدیم تأثیر بالایی در پخشیدگی خاکدانه‌ها و آماس خاک دارند [۲۲] و اثر مشابهی را برای سدیم خاک نیز می‌توان تصور نمود. EC نیز عامل تشکیل بلور و سست و پراکنده شدن خاکدانه‌ها می‌باشد، لذا مشابه با دو متغیر SAR و EC، افزایش آن با افزایش میزان رسوب همراه است. اما افزایش ماده آلی با ایجاد چسبندگی در خاکدانه‌ها، مقادیر رسوب را کاهش می‌دهد. نتایج مشابهی توسط Hasanzade-Nafuti و همکاران (۲۰۰۹) گزارش گردیده است.

مشاهده شده که نوع خاک می‌تواند رواناب را تحت تأثیر قرار دهد [۴۸] و نتایج آزمون شبیه‌سازی باران، اختلافات معنی‌داری را در پاسخ‌های هیدرولوژیک خاک‌ها بین مقادیر مختلف پوزولان خاک نشان داد. افزودن پوزولان به سطح خاک، رسوب را به میزان معنی‌داری ($\text{sig.} = 0/000$) کاهش داده است، اما تغییر کم در کلاس پوزولان‌ها، اثر معنی‌داری بر کاهش رسوب تولیدی ندارد و فقط مقادیر با اختلاف زیاد بر رسوب‌زایی اثر معنی‌دار و متفاوتی از سایر مقادیر دارد. در نتیجه طبق نتایج مقایسه زوجی سطوح مختلف پوزولان سطحی، تنها تیمار شاهد (فاقد پوزولان) با تمامی سطوح پوزولان سطحی اختلاف معناداری دارد. ولی اختلاف مقادیر ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ گرم پوزولان با یکدیگر معنادار نیست. نتایج مشخص می‌کند که ذرات پوزولان همانند سیمان در خاکدانه‌ها عمل کرده و به دلیل داشتن ویژگی چسبندگی، موجب افزایش ثبات خاکدانه‌ها و در نتیجه کاهش فرسایش می‌شوند. همچنین جزء رس خاک نیز می‌تواند به خاکدانه‌سازی و افزایش پایداری ساختمان خاک و کاهش میزان هدررفت خاک کمک کند [۲۷]. این نتایج همسو با یافته‌های قابزلو (۱۳۸۰) است که نشان داد پوزولان‌ها اثر سازنده‌ای در خصوصیات خاک و خاکدانه‌ها دارند و اندازه دانه‌ها را افزایش می‌دهد. لذا

References

- [1]. Abbasi, N. (2005). The geologic-erosional Classification of marls in Qezel-ozan-Sofla watershed, Final report of research project, *soil conservation and watershed management research institute*, Tehran (in Persian).
- [2]. Amiri, M. and Peyrovan, H.R. (2010). The relation between erosion type and physicochemical characteristics of marls in Hamadan province, *Journal of science, kharazmi university*, 10(2), 729-746 (in Persian).
- [3]. Arnaez, J., Lasanta, T., Ruiz-Flano, P. and Ortigosa, L. (2007). Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards, *Soil and Tillage Research*, 93, 324-334.
- [4]. Arsham, A. (1996). *A comparison of runoff and sediment in different geological formations using rainfall simulator (case Study: Abolfars watershed, Ramhormoz-Khuzestan)*, M.Sc. Thesis in watershed management, Faculty of Natural Resources, University of Tehran (in Persian).
- [5]. Asadi, H. (2011). Multiparametric fingerprinting technique for sediment source ascription, Final report of research project, *Gilan regional water organization*, research committee (in Persian).
- [6]. Asadi, H., Ghadiri, H., Rouhipour, H. and Rose, C. (2006). Interaction between rain and runoff processes during rainstorm erosion events, *In Proceeding of 14th International Soil Conservation Organization Conference*, 14-19 May 2006, Morocco, Marrakech, 5 pp.
- [7]. Asgarian, R., Kavian, A. and jafarian, Z. (2013). The effect of slope on soil loss using rainfall simulator, *3rd student-national conference on range, watershed and desert*, 27 February 2013, Tehran, Iran, 6 pp (in Persian).
- [8]. ASTM C618-15 (2015). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/C0618-15.
- [9]. Bashari, M., Moradi, H.R., Kheirkhah, M.M. and Jafari-Khaledi, M. (2013). Temporal variations of runoff and sediment in different soil clay contents using simulated conditions. *Soil & Water Res.*, 8: 124-132.
- [10]. Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A.C., Soriano-Soto, M.D. and Tiemessen, I.R. (1998). Spatial and short-term temporal variations in runoff, soil aggregation and other soil properties along a mediterranean climatological gradient, *Catena*, 33, 123-138.
- [11]. Cheshmi, A. (1997). Land Improvement using Dynamic Compaction, M.Sc. Thesis, *Tarbiat Modares University* (in Persian).
- [12]. Emami, N. and Ghazavi, M. (2001). Landslide and slope failures due to saturated soft soil: A case study, In: *Soft Soil Engineering* (eds Lee et al), pp. 103-109. Swets & Zeitinger, Hong Kong.
- [13]. Esmaeelnezhad, L., Seyedmohammadi, J. and Shabanpour, M. (2012). Effects of chemical and mineralogical properties of marls on different erosion types in the south of Guilan province, *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)*, 98, 2-14 (in Persian).
- [14]. Esmaeilpoor, A. (1996). Study of marls in the littoral of urmia Lake and determination of their sensitivity to water erosion, *Imam-khomeini Higher education center*, Tehran (in Persian).
- [15]. Famili, H., Baqeri, A.R. and Irajian, M. (2001). Pozzolan and slag materials and their use in the cement and concrete industry, *1st international conference on Concrete and Development*, 30 April -2 May 2001, Tehran, Iran (in Persian).
- [16]. Faraahi, G., Khodashenas, S. and Alizadeh, A. (2011). Estimation of sediment in North Khorasan province watersheds by using fuzzy regression, *Iran-Watershed Management Science & Engineering Journal*, 5(15), 11-24 (in Persian).
- [17]. Faulkner, H. (2013). Badlands in marl lithologies: A field guide to soil dispersion, subsurface erosion and piping-origin gullies, *Catena*, 106, 42-53.
- [18]. Feiznia, S. (1995). Rocks resistant to erosion in different climates of Iran, *Iranian journal of natural resources*, 47, 95-116 (in Persian).
- [19]. Field, A. (2009). *Discovering Statistics Using Spss*, 3rd Edition, *Sage Publications Ltd*, London, 856 pp.

- [20]. Geissen, V., Sanchez-Hernandez, R., Kampichler, C., Ramos-Reyes, R., Sepulveda-Lozada, A., Ochoa-Goana, S., de Jong, B.H.J., Huerta-Lwanga, E. and Hernandez-Daumas, S. (2009). Effects of land-use change on some properties of tropical soils-An example from Southeast Mexico, *Geoderma*, 151, 87-97.
- [21]. Ghossain, E.F. and Foster, M.J. (1978). Erosion and Analytical Characteristics of Superficial Forms Exemplified by Alaska Vineyards, *Geographique*, WP Pub, Strasbourg.
- [22]. Hasanzade-Nafuti, M., Feiznia, S., Ahmadi, H., Pierovan, H.R. and Ghayumian, J. (2009). Investigation of effects of marl physical and chemical characteristics on sediment yield using rain simulator physical model, *Scientific Research Journal of Engineering Geology of Iran*, 1, 35-48 (in Persian).
- [23]. Hemmati, M. (2000). Study of The relation between watersheds sedimentation and lithology and effective precipitation factors(case study: Qom,Qareh-Chaay, Urmia and Central-Mazandaran watersheds), M.Sc. Thesis, *Faculty of natural resources, Tehran University* (in Persian).
- [24]. Imeson, A.C. (1982). The relationship of soil physical and chemical properties to the development of badlands in morocco, In: *Badland geomorphology and piping* (Eds: Bryan, R.B. and Yair, A.), pp: 44-70. GeoBooks, Norwich, 408 pp.
- [25]. Jalal, J. and Hassan, Sh. (2010). Monthly runoff estimation using artificial neural network, *ICTT Conference 2010*, College of Engineering, Trivandrum , Kerala State, India: 7pp.
- [26]. Kamphorst, A. (1987). A small rainfall simulator for the determination of soil erodibility, Netherland, *Journal of agricultural Sciences*, 35, 407-415.
- [27]. Kaviani, A., Azmodeh, A., Soleimani, K. and Vahabzadeh, Gh. (2010). Effect of Soil Properties on Runoff and Soil Erosion in Forest Lands Journal of Range and Watershed Management, *Iranian Journal of Natural Resources*, 63(1), 89-104 (in Persian).
- [28]. Khamechian, M. (1990). Evaluation of physical and mechanical properties of marl-clay stones, M.Sc. Thesis, *Tarbiat Modares University, Faculty of earth Science* (in Persian).
- [29]. Marques, M.J., Bienes, R., Jimenez, L. and Perez-Rodriguez, R. (2007). Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events. Rainfall simulation over USLE plots, *Science of The Total Environment*, 378, 161-165.
- [30]. Mehravaran, M., Sohrabi, M.R. (2010). Improvement the concrete properties containing Taftan pozzolan using nanosilica, *5th National Congress on Civil Engineering*, 4-6 May 2010, Mashhad, Iran, 7pp (in Persian).
- [31]. Mesbah-Irandoost, F. (2007), Concrete technology and laboratory, *Shahrashoob Publishing*, Tehran, 584 pp.
- [32]. Meyer, L.D. (1994). Rainfall simulators for soil conservation research, In: *Soil Erosion Research Methods* (Eds Lal, R. and Soil and Water Conservation Society (U.S.)), pp: 83-103. Iowa, Ankeny, 340 pp.
- [33]. Mosaedi, A., Mohammadi, A., Najafinejad, A., and Yaghmaiee, F. (2006). Optimization of the relation between flow discharge and suspended sediment discharge in selected hydrometric stations of Gorgan river. *Iranian Journal of Natural Resources*, 59(2): 331-343. (in Persian).
- [34]. Noori-label, A., Bannaye-Zirakkar., S. and Alizadeh-Rafie, B. (2007). Determination of the best percentage for lime to improve the Tabriz Marl soil, *3rd National Congress on Civil Engineering*, 1-3 May 2007, Tabriz, Iran, 7pp (in Persian).
- [35]. Owusu-Asante, Y. and Stephenson, D. (2006). Estimation of storm runoff loads based on rainfall-related variables and power law models- Case study in Alexandra, *Water SA*, 32 (2): 7pp.
- [36]. Peyrovan, H.R., Jafari-Ardakani, H., Qayoomian, J. Shariat-jafari, M. (2006). Improvement of Marl stabilization in order to control erosion and runoff, *4th Iranian Conference of Engineering Geology and the Environment*, 23-25 February 2006, Tehran, Iran, 10pp (in Persian).
- [37]. Poormatin, V. and Qadimi-Aroos Mahale, F. (1999). Identification and classification of Marls in the Tafresh region, Research project, *Natural Resources Research Center of jahad-Sazandegi* (in Persian).
- [38]. Qabzlou, S. (2001). Improvement the mechanical properties of marl soil using pozzolan, M.Sc. Thesis, *Tarbiat Modarres University* (in Persian).

- [39]. Qadimi-Aroos mahale, F., Poormatin, A. and Qoddousi, J. (1999). The Effect of physical and chemical properties of Marl on types of erosion, *1st Iranian Conference of Engineering Geology and the Environment*, 11-14 October 1999, Tehran, Iran, 11pp (in Persian).
- [40]. Refahi, H. (2003). *Soil erosion and control*, University of Tehran Press, Tehran, 551pp (in Persian).
- [41]. Roswell, C.J. (2002). *Potential sources of sediments and nutrients: Sheet and rill erosion and phosphorus sources*, state of the environmental, technical paper series, Australia.
- [42]. Salmasi R. and Ahmadi, H. (2012). A relationship between some properties of marls and different types of erosions in talkheh-rood watershed, *Geography and Environmental Sustainability*, 2(3), 11-23 (in Persian).
- [43]. Seeger, M. (2007). Uncertainty of factors determining runoff & erosion processes as quantified by rainfall simulations, *Catena*, 71, 56-67.
- [44]. Shaban, M., Feiznia, S., Ahmadi, H., Peyrovan, H.R. and Haaj-Hashemi, M.R. (2011). Study of the erosion rate and sedimentation in marl units around the Taleghan Dam's Lake, *7th Iranian Conference of Engineering Geology and the Environment*, 6-8 September 2011, Shahrood, Iran, 10pp (in Persian).
- [45]. Shahvaqar-Asl, H. (2014). Study of the Tabriz Marl soil stabilization using tire powder as a recycled stabilizer of old tire, M.Sc. Thesis. *University of Tabriz*, College of Civil Engineering (in Persian).
- [46]. Shaw H. F. (1981). Mineralogy and petrology of argillaceous sedimentary of U.K., *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 14, 277-290.
- [47]. Zare-Khormizi, M., Najafinejad, A., Noura, N. and Kavian, A. (2012). Effects of slope and soil properties on runoff and soil loss using rainfall simulator, (Chehel-chai watershed, Golestan province), *Journal of Water and Soil Conservation*, 19(2), 165-178 (in Persian).
- [48]. Zhang, M.k., Wang, L.P. and HE, Zh.l. (2007). Spatial and temporal variation of nitrogen exported by runoff from sandy agricultural soils, *Journal of Environmental Sciences*, 19, 1086-1092.