

بررسی عوامل مؤثر بر رسوب‌زایی لس‌ها با کاربرد مدل فیزیکی شبیه‌ساز باران

- ❖ محمد نهنانی؛ دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران
- ❖ سادات فیض‌نیا*؛ استاد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران
- ❖ حسن احمدی؛ استاد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران
- ❖ حمیدرضا پیروان؛ استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور

چکیده

لس‌ها یکی از نهشته‌های مهم کواترنری در شمال شرق ایران‌اند و از میزان فرسایش بالایی برخوردارند. تحقیق حاضر با استفاده از یک دستگاه شبیه‌ساز باران قابل حمل با پلات یک متر مربع با هدف تعیین عوامل مهم مؤثر بر رسوب‌زایی لس‌ها در محدوده حوضه آبخیز گرگانرود انجام شد. برای تهیه نقشه واحدهای کاری، نقشه‌های کاربری اراضی، شیب، و اشکال فرسایش با استفاده از امکانات GIS تلفیق شد. سپس، در مجموع، طی ۶۹ آزمایش در ۲۳ واحد کاری با شبیه‌ساز باران میزان رواناب و رسوب به‌دست‌آمده اندازه‌گیری شد. برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و نوع کانی رسی و وزن مخصوص ظاهری در مجاورت هر پلات از مواد سطحی نمونه‌برداری شد. در محل استقرار شبیه‌ساز باران جدول اطلاعات توصیفی-شامل مختصات جغرافیایی، درصد شیب، ارتفاع، عمق افق A- و دیگر اطلاعات ضروری تکمیل شد. برای تعیین ارتباط منطقی میان متغیرهای مختلف از همبستگی و تحلیل رگرسیون استفاده شد. هرچند به‌نظر می‌رسد عوامل بسیاری در تولید رواناب و رسوب در لس‌ها مؤثرند، نتایج نشان داد شمار معدودی عامل کلیدی در این منطقه نقش تعیین‌کننده‌تری دارند؛ به طوری که شیب مهم‌ترین عامل کنترل میزان رسوب‌زایی در لس‌هاست و پس از آن میزان سیلت نمونه قرار دارد. نتایج رگرسیون چندگانه مدلی ایجاد کرد که ۸۰ درصد تغییرات رسوب را مشخص می‌کند. در مدل به‌دست‌آمده شیب، میزان سیلت، و ظرفیت تبادل کاتیونی ارتباطی مثبت و میزان کاتيون کلسیم ارتباطی منفی با میزان رسوب‌زایی دارد.

واژگان کلیدی: رسوب‌زایی، شبیه‌ساز باران، گرگانرود، لس، مدل رگرسیونی.

مقدمه

فرسایش یکی از مسائل زیست‌محیطی است که آثار نامطلوبی بر اکوسیستم‌های طبیعی و حیات انسان بر جای می‌گذارد. بنابراین، شناخت فرایند فرسایش جهت ارائه راهکارهای مناسب و کاهش آن اهمیت فراوانی دارد. برای تشخیص و کمی‌کردن اثر عوامل مؤثر بر فرسایش مطالعات زیادی انجام یافته است. برخی از این مطالعات با ترکیب این عوامل سعی کرده‌اند معادله‌هایی برای پیش‌بینی فرسایش ایجاد کنند. اما، هنوز بسیاری از فرایندها و عوامل اصلی فرسایش به‌خوبی شناخته نشده و پیش‌بینی‌ناپذیرند.

یکی از فرایندهای مؤثر‌تر در ایران فرایند مخلوط یخچال-بادی^۱ است که باعث ایجاد نهشته‌های لس^۲ در شمال شرق ایران (استان‌های گلستان و خراسان) شده است. وجود ذرات سیلت به مقدار زیاد، جورشدگی خوب، فقدان لایه‌بندی (ساختار توده‌ای)، و وجود مقدار زیادی کربنات کلسیم از مشخصه‌های لس هاست [۱]. به دلیل ماهیت ساختمانی و فراوانی ذرات تخریبی (سیلت) و املاح شیمیایی (کربنات کلسیم) میزان فرسایش در لس‌ها بالاست [۱۳]؛ به طوری که فرسایش سالانه در برخی زیرحوضه‌های گرگان‌رود به بیش از ۲۰ تن در هکتار در سال نیز می‌رسد که بخش عمده‌ای از آن به صورت فرسایش سطحی و خندقی است [۶]. لس‌های اولیه از مناطق حاشیه یخچالی عرض‌های بالاتر جغرافیایی منشأ گرفته‌اند و بادهایی از سمت شمال باعث انتقال این مواد شده‌اند؛ به طوری که پس از عبور از کویر ترکمنستان و برخورد با ارتفاعات کپه‌داغ و البرز مقدار زیادی از ذرات ریز سیلت در

کشور ایران نهشته شده‌اند [۴]. بررسی منطقه نشان می‌دهد فرسایش شیاری بر روی لس‌ها گسترش زیادی ندارد و عمدتاً در اراضی زراعی پُرشیب به دنبال شخم در جهت شیب ایجاد می‌شود که معمولاً با شخم سال زراعی بعد از بین می‌رود [۳].

در این پژوهش از یک دستگاه شبیه‌ساز باران قابل حمل با پلات یک متر مربعی استفاده شد. این دستگاه متناسب با شرایط اقلیمی ایران طراحی و ساخته شده و سرعت اولیه قطرات باران در آن صفر است. گرچه مطالعات پراکنده‌ای درباره فرسایش و رسوب‌زایی لس‌ها در ایران انجام شده، تاکنون مطالعه جامعی از نظر شناسایی عوامل مؤثر و اولویت‌بندی هر یک صورت نگرفته است. در پژوهش‌هایی مشابه، زانگ و همکاران [۲۰] فرسایش‌پذیری خاک‌های کشاورزی مناطق لسی را در کشور چین مطالعه کردند. نتایج نشان داد ارتباط معنی‌داری بین فرسایش‌پذیری و درصد رس در قالب یک معادله رگرسیونی وجود دارد. زو و شانگوان [۲۱] تأثیر ریشه و ساقه‌های گیاه چاودار را در مراحل مختلف رشد بر فرسایش لس‌ها به کمک شبیه‌ساز باران بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مقدار رواناب و فرسایش با رشد گیاه به میزان زیادی کاهش می‌یابد. وی و همکاران [۱۹] از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی، آثار کاربری اراضی و رژیم بارندگی را بر رواناب و فرسایش تپه‌های لسی مناطق نیمه‌خشک مطالعه کردند و دریافتند که در بوته‌زارها میزان فرسایش در مقایسه با جنگل‌ها و چمنزارها کمتر است. ویتهارانا و همکاران [۱۸] در بررسی مناطق لسی اروپا به این نتیجه رسیدند که شیب، درصد رس، ماسه، سیلت، هوموس، و کربنات کلسیم معیارهای مناسب و راهکارهای مناسبی برای کاهش

1. glacial-aeolian

2. loess

روش‌های اصلاحی مناسب برای کاهش خسارات فرسایش در منطقه از آن‌ها استفاده شود.

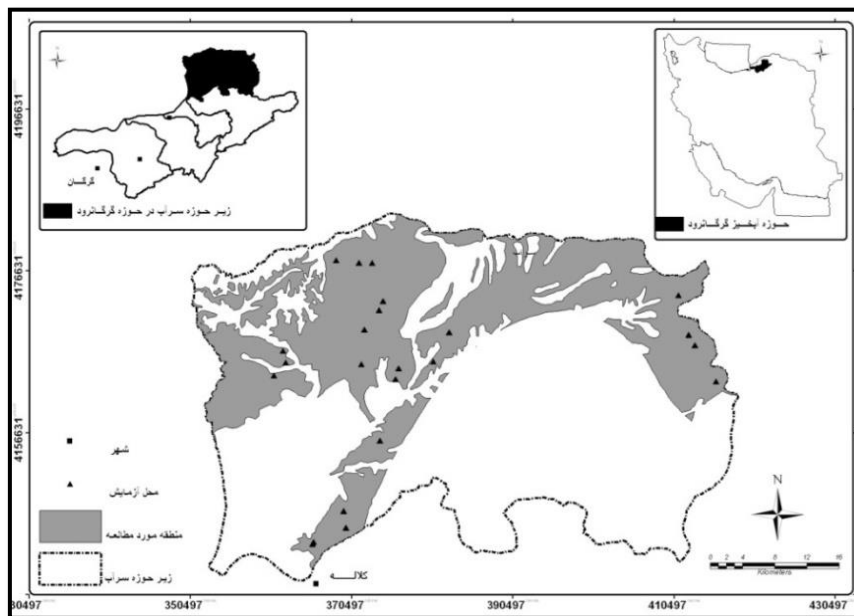
مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه

یکی از حوضه‌هایی که بخش بسیاری از آن با لس‌ها پوشیده شده حوضه آبخیز گرگانرود است. در این حوضه لس‌ها بیشتر در گستره اقلیم نیمه‌خشک و در شرق و شمال شرق استان گلستان گسترش دارد که شامل زیرحوضه سرآب است. این زیرحوضه در مجاورت شهرستان کلاله قرار دارد و با مختصات جغرافیایی $55^{\circ}17'54''$ تا $56^{\circ}04'32''$ طول شرقی و $37^{\circ}22'43''$ تا $37^{\circ}47'31''$ عرض شمالی و با مساحتی بالغ بر ۲۲۴۰۰۰ هکتار تمام لس‌های اقلیم نیمه‌خشک حوضه آبخیز گرگانرود را، که ۸۱۰۰۰ هکتار وسعت دارد، در بر می‌گیرد.

فرسایش در ارضی زراعی‌اند. خواجه [۱۰] در بررسی رسوب‌زایی نهشته‌های کواترنر، از نظر رسوب‌زایی، لس‌های استان گلستان را به سه دسته تقسیم کرد. فیض‌نیا و همکاران [۴] با بررسی تأثیر برخی عوامل محیطی در رسوب‌زایی لس‌ها و مقایسه میزان رسوب‌زایی در مناطق مختلف لسی نشان دادند که میزان رسوب دارای همبستگی بالایی با شاخص خشکی دومارتن و درصد مواد آلی است.

این پژوهش با هدف تعیین عوامل مهم مؤثر بر فرسایش و رسوب‌زایی لس‌ها و ارائه مدل رگرسیونی میان رسوب‌زایی لس‌ها و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها در محدوده اقلیم نیمه‌خشک حوضه آبخیز گرگانرود در گستره رخساره‌های فرسایش سطحی و شیاری انجام شده است. با توجه به شرایط حاکم بر منطقه، سعی شده متغیرهایی که اهمیت نسبی بیشتری در مقدار فرسایش دارند انتخاب و میزان تأثیر هر یک تعیین شود تا در انتخاب



شکل ۱. زیرحوضه سرآب در حوضه آبخیز گرگانرود و نقاط اجرای آزمایش

فرسایش شیاری، و SRE مربوط به فرسایش سطحی و شیاری)، و عدد آخر طبقه شیب را نشان می‌دهد؛ به طوری که عدد ۱ مربوط به شیب ۰ تا ۱۰ درصد، عدد ۲ شیب ۱۰ تا ۲۰ درصد، عدد ۳ شیب ۲۰ تا ۳۰ درصد، و عدد ۴ مربوط به شیب ۳۰ تا ۴۰ درصد است. شیب‌های بیشتر در بخش مورد مطالعه وجود ندارد. به علاوه، در شیب‌های بالاتر از ۳۵ درصد کشاورزی صورت نمی‌گیرد. در این مرحله واحدهای کاری واقع در محدوده شکل‌های فرسایش سطحی، فرسایش شیاری، و فرسایش سطحی و شیاری برای استفاده از شبیه‌ساز باران (در هر واحد کاری با سه تکرار) مشخص شد. در مجموع، طی ۶۹ مورد نصب و راه‌اندازی دستگاه در نقاط مختلف منطقه در غالب ۲۳ واحد کاری، میزان رواناب و رسوب به‌دست‌آمده اندازه‌گیری شد (شکل ۲).



شکل ۲. دستگاه شبیه‌ساز باران مورد استفاده در این پژوهش

درصد پوشش اعم از زنده و لاش‌برگ با استفاده از کوادرات یک متر مربعی، که در چنین مناطقی نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد [۱۲]، برآورد شد. ذکر این نکته لازم است که در منطقه مورد مطالعه به دلیل

شکل ۱ موقعیت زیرحوضه سرآب را در حوضه آبخیز گرگانرود و منطقه مورد مطالعه را، که شامل لس‌های اقلیم نیمه‌خشک است، نشان می‌دهد. شرایط اقلیمی این منطقه بر اساس روش‌های دومارتن و آمبرژه نیمه‌خشک تعیین شده است. میانگین سالانه بارندگی منطقه حدود ۴۹۰ میلی‌متر، میانگین سالانه درجه حرارت ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد، و پتانسیل تبخیر و تعرق منطقه بیش از ۱۵۰۰ میلی‌متر است [۶]. این حوضه از نظر تنوع لیتولوژی محدود است و بیش از ۵۰ درصد وسعت حوضه را نهشته‌های لسی پوشانده و بقیه حوضه شامل شیل، سنگ آهک، ماسه‌سنگ، مارن، و آبرفت‌های جدید و قدیم است. از نظر پوشش و کاربری اراضی، دیمزارها سطحی بالغ بر نیمی از مساحت حوضه را شامل می‌شوند و بقیه وسعت حوضه را مراتع به خود اختصاص داده‌اند.

روش تحقیق

نخست محدوده پراکنش لس‌ها در اقلیم نیمه‌خشک در حوضه آبخیز گرگانرود با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و طبقه‌بندی اقلیمی حوضه آبخیز گرگانرود به روش دومارتن [۸] مشخص شد. نقشه‌های کاربری اراضی و شکل‌های فرسایشی هم از طریق بازبینی تصاویر ماهواره‌ای جدید و کنترل‌های میدانی تهیه شد. برای تهیه نقشه واحدهای کاری، نقشه‌های کاربری اراضی، شیب، و محدوده اشکال فرسایش با استفاده از امکانات GIS تلفیق شد. هر واحد کاری با تعدادی حروف و عدد مشخص شده است: حرف اول مربوط به نوع کاربری (F برای زراعت دیم و R برای مرتع)، حروف بعدی مربوط به شکل فرسایش (SE فرسایش سطحی، RE

جدول اطلاعات توصیفی- شامل مختصات جغرافیایی محل، درصد شیب، ارتفاع، عمق افق A، زمان ظهور رواناب- و دیگر اطلاعات ضروری تکمیل شد. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی شامل تعیین وزن مخصوص ظاهری، رطوبت نمونه، غلظت رسوب نمونه‌های رواناب، درصد رس، سیلت و ماسه، اسیدیته با استفاده از pH متر در گل اشباع، هدایت الکتریکی توسط دستگاه الکتروکنداکتیومتری در عصاره اشباع، مواد آلی، گچ، آهک به روش کلسیمتری، کاتیون‌ها با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر و روش تیتراسیون با ADTA، آنیون‌ها به روش تیترومتری، ظرفیت تبادل کاتیونی از روش باور، و تعیین نوع و درصد کانی‌های رسی به طریقه XRD انجام شد. برای تجزیه و تحلیل‌های آماری شامل آزمون نرمالیتیه، مقایسه میانگین‌ها، تحلیل همبستگی، و جست‌وجوی روابط رگرسیونی از نرم‌افزارهای SPSS و EXCEL استفاده شد.

مشخصات شبیه‌ساز باران

در این تحقیق از دستگاه شبیه‌ساز باران قابل حملی با سطح پلاتی به ابعاد $84 \text{ cm} \times 120 \text{ cm}$ (شکل ۳)، با پایه‌هایی دارای قابلیت تنظیم از ۱۴۰ تا ۱۸۰ سانتی‌متر و نصب در شیب‌های مختلف استفاده شد. این دستگاه قطراتی را تولید می‌کند که بدون سرعت اولیه و تحت تأثیر نیروی ثقل بر روی سطح پلات ریزش می‌کند و مخزن و قسمت پاشنده باران ۸۰ لیتر ظرفیت دارد که یک موتور الکتریکی ۱۲ ولت آن را در سطح افق حرکت می‌دهد. پلات فلزی در زیر قسمت تولید بارش دستگاه در زمین کوبیده می‌شود و همه رواناب و رسوب به‌دست‌آمده در اثر بارش را به سمت یک خروجی هدایت می‌کند.

شرایط خاص ساختمانی و فیزیکی لس‌ها هیچ‌گونه سنگ و سنگریزه‌ای روی سطح یا داخل خاک وجود ندارد. به‌رغم مشخص بودن میانگین شیب واحدهای کاری، درصد شیب در محل قرارگیری پلات شبیه‌ساز باران به کمک شیب‌سنج دقیقاً اندازه‌گیری شد.

دستگاه شبیه‌ساز باران در هر پلات آزمایشی با استفاده از آب شهر کلالة بارشی با شدت ثابت ۳۲ میلی‌متر در ساعت به مدت ۳۰ دقیقه ایجاد کرد. چنین شدتی بارش ۳۰ دقیقه‌ای با دوره بازگشت ده‌ساله است که برای منطقه مورد مطالعه، با توجه به آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی درون منطقه، از جمله کریم ایشان و تمر، تعیین شده است. تحقیقات نشان داده به دلیل فراوانی وقوع بیشتر و آستانه تولید رواناب و ایجاد فرسایش و رسوب این نوع بارش در مطالعات فرسایش و رسوب حائز اهمیت است [۱۵].

در مجاورت هر پلات از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری از مواد سطحی (اعم از نهشته لسی یا خاک روی آن) برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و نوع کانی‌های رسی در آزمایشگاه نمونه‌برداری شد. این عمق برای نمونه‌برداری با توجه به حداکثر عمق خیس‌شده، که ۱۲ سانتی‌متر بود، تعیین شد. همچنین، از کنار هر پلات با استوانه فولادی مخصوصی که ۳۶۰ سانتی‌متر مکعب حجم داشت برای تعیین وزن مخصوص ظاهری و رطوبت اولیه نیز نمونه‌برداری صورت گرفت. رواناب و رسوب به‌دست‌آمده از هر پلات در بطری‌های مخصوصی جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شد. مقدار دقیق رسوب تولیدشده در پایان هر بارش پس از جداسازی و خشک‌کردن نمونه‌ها در آن به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد برای هر پلات محاسبه شد. در محل استقرار شبیه‌ساز باران



شکل ۳. پلات دستگاه شبیه‌ساز باران

میزان رسوب‌زایی دارد؛ به طوری که در کاربری زراعت دیم میزان رسوب‌زایی ۵۰ درصد بیشتر از مرتع است و به دلیل کاهش پایداری ساختمان خاک در اثر عملیات زراعی سالانه است. البته، شخم عمیق حجم رواناب را کاهش می‌دهد، اما موجب تشدید میزان فرسایش و غلظت رسوب می‌شود. در مراتع نیز در بسیاری از بخش‌ها در اثر چرای مفرط دام و لگدکوبی و کاهش سرعت نفوذ حجم رواناب زیاد می‌شود. شکل ۴ تغییرات رسوب را در دو کاربری غالب در منطقه نشان می‌دهد.

به منظور بررسی تغییرات رسوب‌زایی لس‌ها در طبقات مختلف شیب از آزمون تجزیه واریانس یک طرفه^۲ استفاده شد. این آزمون اختلاف معنی‌داری را میان رسوب‌زایی طبقات مختلف شیب نشان داد. از روش گروبنندی میانگین‌ها به روش دانکن^۳ نیز استفاده شد تا مشخص شود کدام طبقات شیب با هم متفاوت‌اند [۲]. نتیجه بیانگر تأثیر درخور توجه شیب در میزان رسوب‌زایی لس‌هاست؛ به طوری که میانگین میزان رسوب در هر یک از طبقات شیب در یک گروه مجزا قرار می‌گیرند. افزایش شیب باعث

نتایج

جدول ۱ مقدار متوسط و ضریب تغییرات همه متغیرهای اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. جدول ۲ نیز میزان متوسط غلظت رسوب و مقدار رسوب‌زایی سه پلات هر یک از واحدهای کاری را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد ارتفاع رواناب حاصل از بارش تولیدی بر روی پلات‌ها از ۰/۴۱ تا ۲/۹۸ میلی‌متر متغیر است و ضریب رواناب نیز از ۲/۶ تا ۱۸/۶ درصد تغییر می‌کند. غلظت رسوب، که متأثر از تولید توأم رواناب و رسوب است، بین ۲/۲۵ تا ۵۰/۸ گرم در لیتر و تولید رسوب هم از ۳/۰۶ تا ۱۱۲/۵ گرم در متر مربع نوسان می‌کند.

برای بررسی توزیع نرمال داشتن داده‌های رسوب‌زایی از آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف^۱ استفاده شد [۹] که سطح معنی‌داری برای این متغیر در این آزمون نشان‌دهنده توزیع نرمال این داده‌هاست. به منظور بررسی تأثیر دو نوع کاربری غالب منطقه، که مرتع و زراعت از نوع دیم است، بر میزان رسوب‌زایی از آزمون t مستقل [۲] استفاده شد و مشخص شد که نوع کاربری تأثیر معنی‌داری در

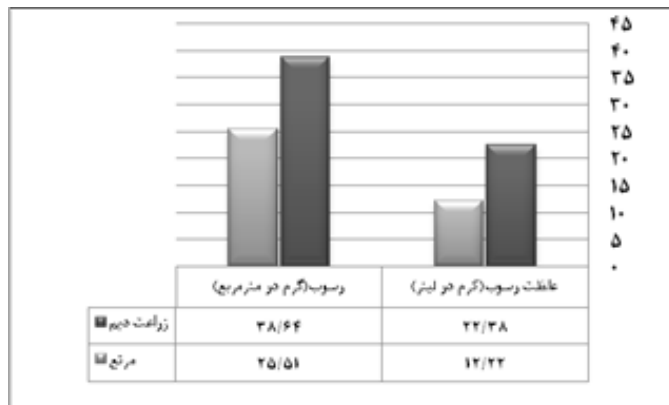
2. oneway ANOVA
3. duncan

1. kolmogorov-smirnov

تسریع سرعت جریان آب می‌شود و، در نتیجه، می‌شود. شکل ۵ میانگین تولید رسوب را در طبقات موجب افزایش میزان غلظت رسوب و فرسایش مختلف شیب نشان می‌دهد.

جدول ۱. میانگین و ضریب تغییرات متغیرهای اندازه‌گیری شده در عملیات میدانی و آزمایشگاهی

| متغیر | واحد | میانگین | ضریب تغییرات (%) |
|---------------------|--------------------|---------|------------------|
| شیب | % | ۱۹,۴۶ | ۴۹,۳ |
| پوشش | % | ۲۳,۱۹ | ۲۶,۴ |
| عمق افق A | Cm | ۱۹,۸۳ | ۴۶,۱ |
| رطوبت | % | ۶,۴۸ | ۲۳,۳ |
| وزن مخصوص ظاهری | gr/cm ³ | ۱,۳۴ | ۴,۸ |
| هدایت الکتریکی | ms/cm | ۲,۲۳ | ۱۹,۶ |
| اسیدیته | | ۷,۹۳ | ۱,۷ |
| ماده آلی | % | ۱,۵۴ | ۱۹,۶ |
| گچ | meq/100gr | ۰,۷۸ | ۱۲۱,۱ |
| ماسه | % | ۱۹,۳۶ | ۲۲,۶ |
| رس | % | ۲۸,۸۷ | ۱۳,۵ |
| سیلت | % | ۵۱,۷۵ | ۸,۹ |
| ظرفیت تبادل کاتیونی | cmol/kg | ۱۷,۱۶ | ۱۲,۲ |
| کربنات کلسیم | % | ۱۴,۴۸ | ۱۷,۷ |
| یون کلسیم | meq/lit | ۱۵,۲۸ | ۱۸,۴ |
| یون منیزیم | meq/lit | ۱۲,۷۹ | ۳۱,۴ |
| یون پتاسیم | meq/lit | ۰,۳۶ | ۵۲,۱ |
| یون سدیم | meq/lit | ۲۶,۱۱ | ۴۷,۰ |
| مجموع کاتیون‌ها | meq/lit | ۵۴,۵۶ | ۲۵,۴ |
| یون کربنات | meq/lit | ۰ | - |
| یون بی‌کربنات | meq/lit | ۳,۴۲ | ۱۹,۲ |
| یون سولفات | meq/lit | ۳۵,۶۷ | ۳۹,۳ |
| یون کلر | meq/lit | ۱۵,۳۹ | ۴۶,۱ |
| مجموع آنیون‌ها | meq/lit | ۵۴,۴۸ | ۲۸,۷ |
| نرخ جذب سدیم | | ۷,۰۱ | ۴۶,۱ |
| سدیم تبدیلی | | ۸,۱۴ | ۴۸,۶ |
| کانی ایلیت | % | ۳۱,۳۰ | ۱۳,۶ |
| کانی کلریت | % | ۲۵,۴۳ | ۱۶,۴ |
| کانی کائولینیت | % | ۱۹,۳۵ | ۱۹,۳ |
| کانی اسمکتیت | % | ۲۲,۱۷ | ۱۷,۵ |
| کانی‌های مختلط | % | ۲,۶۱ | ۱۵۹,۶ |



شکل ۴. میانگین غلظت رسوب و میزان رسوب‌زایی هر بلات در کاربری‌های مرتع و زراعت دیم در لس‌ها

جدول ۲. مقدار میانگین رسوب و غلظت رسوب در هر واحد کاری

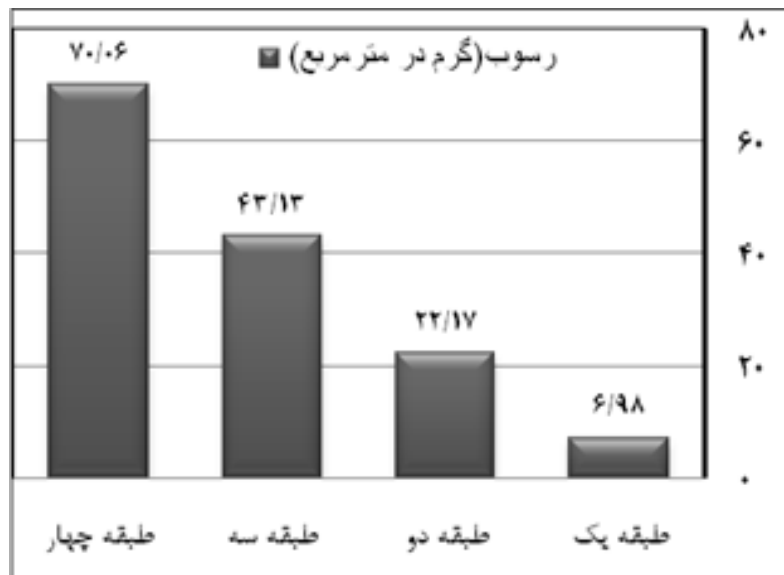
| واحد‌کاری | واحد زمین‌شناسی | کاربری | شکل فرسایش | شیب (%) | تعداد تکرار | میانگین غلظت رسوب (gr/lit) | میانگین رسوب پلات (gr) |
|-----------|-----------------|-----------|--------------|---------|-------------|----------------------------|------------------------|
| F-RE-1 | لس | زراعت دیم | شیاری | ۱۰ - ۰ | ۳ | ۱۰,۶۹ | ۷,۳۹ |
| F-RE-1SD | لس | زراعت دیم | شیاری | ۱۰ - ۰ | ۳ | ۱۰,۳۶ | ۵,۳۶ |
| F-RE-2 | لس | زراعت دیم | شیاری | ۲۰ - ۱۰ | ۳ | ۱۸,۱۲ | ۲۳,۸۲ |
| F-RE-3 | لس | زراعت دیم | شیاری | ۳۰ - ۲۰ | ۳ | ۲۹,۸۱ | ۵۹,۳۴ |
| F-RE-4 | لس | زراعت دیم | شیاری | ۴۰ - ۳۰ | ۳ | ۳۴,۲۸ | ۹۱,۳۷ |
| F-SE-1 | لس | زراعت دیم | سطحی | ۱۰ - ۰ | ۳ | ۱۱,۰۵ | ۱۱,۷۲ |
| F-SE-2 | لس | زراعت دیم | سطحی | ۲۰ - ۱۰ | ۳ | ۱۶,۰۷ | ۲۱,۷۸ |
| F-SRE-1 | لس | زراعت دیم | سطحی و شیاری | ۱۰ - ۰ | ۳ | ۱۱,۵۸ | ۸,۳۵ |
| F-SRE-2 | لس | زراعت دیم | سطحی و شیاری | ۲۰ - ۱۰ | ۳ | ۲۲,۸۷ | ۲۸,۹۹ |
| F-SRE-2SD | لس | زراعت دیم | سطحی و شیاری | ۲۰ - ۱۰ | ۳ | ۲۲,۸۴ | ۳۲,۱۷ |
| F-SRE-3 | لس | زراعت دیم | سطحی و شیاری | ۳۰ - ۲۰ | ۳ | ۳۲,۸۵ | ۵۸,۸۲ |
| F-SRE-4 | لس | زراعت دیم | سطحی و شیاری | ۴۰ - ۳۰ | ۳ | ۴۷,۹۷ | ۱۱۱,۲۶ |
| R-RE-2 | لس | مرتع | شیاری | ۲۰ - ۱۰ | ۳ | ۸,۷۰ | ۱۱,۲۳ |
| R-RE-3 | لس | مرتع | شیاری | ۳۰ - ۲۰ | ۳ | ۱۵,۰۱ | ۲۴,۷۹ |
| R-RE-4 | لس | مرتع | شیاری | ۴۰ - ۳۰ | ۳ | ۲۰,۰۷ | ۴۵,۵۶ |
| R-SE-1 | لس | مرتع | سطحی | ۰ - ۱۰ | ۳ | ۲,۹۵ | ۳,۱۳ |
| R-SE-2 | لس | مرتع | سطحی | ۲۰ - ۱۰ | ۳ | ۶,۸۱ | ۱۲,۶۴ |
| R-SE-3 | لس | مرتع | سطحی | ۳۰ - ۲۰ | ۳ | ۱۱,۵۸ | ۲۵,۰۸ |
| R-SRE-1 | لس | مرتع | سطحی و شیاری | ۱۰ - ۰ | ۳ | ۴,۰۸ | ۳,۶۷ |
| R-SRE-2 | لس | مرتع | سطحی و شیاری | ۲۰ - ۱۰ | ۳ | ۱۱,۳۷ | ۲۳,۷۹ |
| R-SRE-3 | لس | مرتع | سطحی و شیاری | ۳۰ - ۲۰ | ۳ | ۱۷,۱۰ | ۳۶,۸۲ |
| R-SRE-4 | لس | مرتع | سطحی و شیاری | ۴۰ - ۳۰ | ۳ | ۱۶,۸۶ | ۴۵,۲۶ |
| R-SRE-4SD | لس | مرتع | سطحی و شیاری | ۴۰ - ۳۰ | ۳ | ۲۰,۱۹ | ۴۸,۶۱ |

میزان رسوب‌زایی دارند. بررسی ماتریس همبستگی بین پارامترهای مختلف نشان می‌دهد که هیچ یک از متغیرها به‌تنهایی قادر به شرح همه تغییرات مشاهده‌شده در میزان رسوب نیستند.

به منظور پیش‌بینی تغییرات میزان رسوب‌زایی از روی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و تعیین سهم هر یک در تبیین میزان رسوب‌زایی از رگرسیون چندگانه^۲ استفاده شد. بدین منظور، عواملی که دارای ضریب همبستگی معنی‌داری با میزان رسوب هستند به عنوان متغیرهای مستقل و میزان رسوب هر پلات بر حسب گرم در متر مربع به عنوان متغیر وابسته به روش گام به گام^۳ مدلی را تشکیل دادند که ۸۰ درصد تغییرات رسوب را مشخص می‌کند. جدول ۴ ضرایب تشخیص و بررسی معنی‌داری روابط به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد.

سپس، برای تعیین ارتباط منطقی میان متغیرهای مختلف از تحلیل رگرسیون و همبستگی استفاده شد. با توجه به ماهیت داده‌ها، که همگی دارای مقیاس فاصله‌ای‌اند، از ضریب همبستگی پیرسون^۱ برای تعیین همبستگی بین متغیرها با رسوب‌زایی استفاده شد [۲]. جدول ۳ همبستگی خطی میان عوامل اندازه‌گیری‌شده با رسوب‌زایی و غلظت رسوب را نشان می‌دهد.

در بررسی آماری مشخص شد که شیب زمین با ضریب همبستگی ۸۰ درصد بیشترین ارتباط مستقیم را با میزان رسوب‌زایی دارد و پس از آن میزان سیلت نمونه با ضریب همبستگی ۵۳ درصد قرار دارد. به علاوه، درصد پوشش زمین و مقدار رس نمونه به‌ترتیب با ضریب همبستگی منفی ۳۶ درصد و منفی ۳۴ درصد دارای بیشترین ارتباط معکوس با مقدار رسوب‌زایی‌اند. سایر متغیرها ارتباط ضعیف‌تری با



شکل ۵. میانگین رسوب‌زایی در هر یک از طبقات شیب

1. pearson correlation
2. multiple regression
3. stepwise

جدول ۳. نتایج همبستگی خطی میان عوامل اندازه‌گیری شده با رسوب‌زایی و غلظت رسوب

| غلظت رسوب | رسوب کل پلات | متغیر | |
|-----------|--------------|-----------|---------------------|
| gr/lit | gr/m2 | | |
| ۰٫۶۶(**) | ۰٫۸۰(**) | % | شیب |
| -۰٫۲۷(*) | -۰٫۳۶(**) | % | پوشش |
| -۰٫۱۰ | -۰٫۲۵(*) | Cm | عمق افق A |
| ۰٫۲۴(*) | ۰٫۲۱ | % | رطوبت |
| -۰٫۰۲ | -۰٫۱۷ | gr,cm3 | وزن مخصوص ظاهری |
| ۰٫۰۶ | ۰٫۱۴ | ms,cm | هدایت الکتریکی |
| ۰٫۲۱ | ۰٫۳۱(**) | | اسیدیت |
| -۰٫۱۶ | -۰٫۲۸(*) | % | ماده آلی |
| -۰٫۱۹ | -۰٫۱۷ | meq/100gr | گچ |
| -۰٫۱۷ | -۰٫۲۶(*) | % | ماسه |
| -۰٫۲۷(*) | -۰٫۳۴(**) | % | رس |
| ۰٫۳۹(**) | ۰٫۵۳(**) | % | سیلت |
| ۰٫۴۶(**) | ۰٫۲۷(*) | cmol/kg | ظرفیت تبادل کاتیونی |
| ۰٫۲۶(*) | ۰٫۳۳(**) | % | کربنات کلسیم |
| -۰٫۴۲(**) | -۰٫۲۹(*) | meq/lit | یون کلسیم |
| -۰٫۲۲ | -۰٫۲۳ | meq/lit | یون منیزیم |
| ۰٫۱۰ | ۰٫۱۶ | meq/lit | یون پتاسیم |
| ۰٫۱۸ | ۰٫۳۰(*) | meq/lit | یون سدیم |
| ۰٫۰۱ | ۰٫۱۴ | meq/lit | مجموع کاتیون‌ها |
| -۰٫۰۱ | ۰٫۰۵ | meq/lit | یون بی‌کربنات |
| ۰٫۰۲ | ۰٫۱۱ | meq/lit | یون سولفات |
| ۰٫۲۰ | ۰٫۲۵(*) | meq/lit | یون کلر |
| ۰٫۱۱ | ۰٫۲۲ | meq/lit | مجموع آنیون‌ها |
| ۰٫۲۷(*) | ۰٫۳۸(**) | | نرخ جذب سدیم |
| ۰٫۲۸(*) | ۰٫۳۸(**) | | سدیم تبادلی |
| ۰٫۱۰ | ۰٫۱۳ | % | کانی ایلیت |
| ۰٫۱۳ | ۰٫۲۰ | % | کانی کلریت |
| -۰٫۲۰ | -۰٫۳۳(**) | % | کانی کائولینیت |
| ۰٫۲۶(*) | ۰٫۲۹(*) | % | کانی اسمکتیت |
| -۰٫۱۵ | -۰٫۱۲ | % | کانی‌های مختلط |

* معنی‌داری در سطح ۵ درصد است؛ ** معنی‌داری در سطح ۱ درصد است.

جدول ۴. ضرایب تشخیص و بررسی معنی‌داری روابط

| مدل | ضریب تشخیص | ضریب تشخیص تعدیل‌شده | معنی‌داری | متغیر اضافه‌شده به مدل |
|-----|------------|----------------------|-----------|------------------------|
| ۱ | ۰٫۶۴۹ | ۰٫۶۴۳ | ۰٫۰۰ | شیب |
| ۲ | ۰٫۷۶۷ | ۰٫۷۵۹ | ۰٫۰۰ | ظرفیت تبادل کاتیونی |
| ۳ | ۰٫۸۰۴ | ۰٫۷۹۵ | ۰٫۰۰ | کاتیون کلسیم |
| ۴ | ۰٫۸۲۰ | ۰٫۸۰۹ | ۰٫۰۰ | سیلت |

بحث و نتیجه‌گیری

هرچند به‌نظر می‌رسد عوامل بسیاری در رسوب‌زایی لس‌ها مؤثرند، این پژوهش نشان داد شمار معدودی عامل کلیدی در این منطقه نقش تعیین‌کننده‌تری دارند و بقیه اثر غیرمستقیمی بر این فرایند دارند؛ به طوری که شیب مهم‌ترین عامل کنترل میزان رسوب‌زایی در لس‌هاست. همچنین، افزایش میزان سیلت نمونه موجب افزایش رسوب‌زایی می‌شود. میر و هارمون [۱۱] و وانزلند و همکارانش [۱۷] نیز به چنین نتیجه‌ای رسیدند. در میان ویژگی‌های شیمیایی، که در این پژوهش بدان توجه شد، ظرفیت تبادل کاتیونی، میزان کربنات کلسیم، و نرخ جذب سدیم رابطه مستقیم و کاتیون کلسیم و مقدار ماده آلی رابطه معکوسی با میزان رسوب‌زایی دارند؛ این نتیجه با بخشی از نتایج حسن‌زاده و همکاران [۷] و ویتهارنا و همکاران [۱۸] همخوانی دارد. از میان کانی‌های رسی کانی اسمکتیت به دلیل پیوند ضعیف میان لایه‌ها و قابلیت انبساط زیاد [۵] ارتباط مثبتی با میزان تولید رسوب لس‌ها دارد؛ در حالی که میان میزان رسوب‌زایی با درصد کانی کائولینیت ارتباط منفی دیده می‌شود. زانگ و همکاران [۲۰] با مطالعه بر روی لس‌ها در چین دریافتند که ارتباط مشابهی میان فرسایش لس‌ها با نوع و میزان کانی‌های رسی وجود

مدل شماره چهار (رابطه ۱) که شیب زمین، ظرفیت تبادل کاتیونی، کاتیون کلسیم، و مقدار سیلت را در بر می‌گیرد بیشترین مقدار تغییرات (۸۰ درصد) میزان رسوب خروجی از هر پلات را تعیین می‌کند. ضرایب رابطه رگرسیونی آزمون معنی‌داری هر یک و همچنین هم‌خطی یا اثر متقابل میان عوامل مستقل به‌دست‌آمده از طریق فاکتور تورم واریانس (VIF) بررسی شد. در مدل به‌دست‌آمده برای همه متغیرها مقدار فاکتور تورم واریانس کمتر از حد بحرانی [۱۰] است که نشان‌دهنده فقدان هم‌خطی میان متغیرهای مستقل دخیل در مدل است [۲]. این مدل به شکل رابطه ۱ است:

$$Y = 2,144S + 3,792 \text{ CEC} - 2,071 \text{ Ca} + 0,968 \text{ Si} - 92,90 \quad (1)$$

ضریب تشخیص تعدیل‌شده در این رابطه برابر ۰٫۸۰۹ است که در سطح ۰٫۰۱ معنی‌دار است. در این رابطه Y میزان رسوب‌زایی لس‌ها بر حسب گرم در متر مربع، S شیب زمین به درصد، CEC ظرفیت تبادل کاتیونی بر حسب سانتی‌مول بر کیلوگرم، Ca مقدار کاتیون کلسیم بر حسب میلی‌اکی والان در لیتر، و Si مقدار سیلت نمونه به درصد است. در میان این متغیرها شیب، ظرفیت تبادل کاتیونی، و سیلت اثری مثبت و میزان کاتیون کلسیم رابطه‌ای منفی با میزان رسوب‌زایی لس دارند.

مقدار زیادی سیلت دارند در شرایط مساوی از فرسایش پذیری زیادی برخوردارند [۱۴]. ظرفیت تبادل کاتیونی نیز در اندازه و ثبات خاک‌دانه‌ها و، در نتیجه، میزان فرسایش و رسوب‌زایی مؤثر است. کاتیون کلسیم سبب پیوندهای شیمیایی در بین خاک‌دانه‌ها می‌شود و ذرات را فولکوله می‌کند که به مقاومت بیشتر در مقابل عامل فرسایش منجر می‌شود؛ به همین دلیل، این متغیر ارتباط معکوسی با میزان رسوب‌زایی دارد [۱۴].

متغیرهای مستقلی که در این پژوهش بدان‌ها توجه شده است فقط بخشی از تغییرات میزان رسوب‌زایی لس‌ها را کنترل می‌کنند. بنابراین، ضرورت دارد در پژوهش‌های آتی به سایر عوامل از جمله نقش میکروارگانیسم‌ها، حدود آتربرگ، و پایداری خاک‌دانه‌ها نیز توجه شود. با توجه به خصوصیات شیمیایی لس‌ها و ماهیت فرسایش‌پذیری‌شان، جست‌وجوی راهکارهای مناسب برای کاهش میزان فرسایش و رواناب از طریق انتخاب کودهای شیمیایی مناسب برای اراضی زراعی منطقه، که سبب اصلاح ویژگی‌های شیمیایی مؤثر بر فرسایش می‌شود، حائز اهمیت است.

دارد. نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه تحلیل‌های رگرسیونی نشان می‌دهد میان رسوب‌زایی لس‌ها با متغیرهای مستقلی که تأثیر معنی‌داری دارند رابطه معنی‌داری در سطح ۱ درصد وجود دارد. از بین متغیرهای مستقل فقط چهار عامل - درصد شیب، ظرفیت تبادل کاتیونی، میزان کاتیون کلسیم محلول، و میزان سیلت نمونه - نقش تعیین‌کننده‌ای در رسوب‌زایی لس‌ها دارند؛ به طوری که این عوامل ۸۰ درصد تغییرات رسوب‌زایی را کنترل می‌کنند و بقیه مربوط به عواملی است که در این پژوهش بدان‌ها توجه نشده است. در میان متغیرهایی که وارد مدل شده‌اند عامل شیب از اهمیت بیشتری برخوردار است؛ به طوری که یک واحد تغییر در انحراف معیار این عامل ۰٫۷۴ واحد در انحراف معیار رسوب‌زایی تغییر ایجاد می‌کند که به سبب تأثیر آن در افزایش سرعت و تا حدودی هم به سبب تشدید اثر برخورد قطرات باران [۱۶] است. علت اینکه سیلت ارتباط مستقیمی با میزان رسوب‌زایی و تولید رواناب دارد و در رابطه فوق‌الذکر وارد شده این است که مقاومت بخش سیلت در برابر فرسایش هم از نظر اندازه و هم از نظر پیوستگی میان ذرات کم است و خاک‌هایی که

References

- [1] Ahmadi, H. and Feizna, S. (2006). *Quaternary Formations (Theoretical and applied principles in natural resources)*, University of Tehran Press, 627p.
- [2] Bihamta, M.R. and Zare Chahouki, M.A. (2008). *Principles of statistics for the natural resources science*, University of Tehran Press, 300p.
- [3] Esaae, H., Charkhabi, A.H. and Ehteraf, H. (2005). *Investigation on relationships between physical and chemical characteristics with erosion forms of loessic soils in Atrak and Gorganrood Drainage Basins in Golestan Province*, 3rd Erosion and Sediment National conference, 28-30 August, Soil Conservation and Watershed Management Research Center, Iran.
- [4] Feiznia, S., Ghayumian, J. and Khaje, M. (2006). The study of the effect of physical, chemical, and climate factors on surface erosion sediment yield of loessic soils (Case study in Golestan Province), *Paghuesh va Sazandegi Journal*, 66, 14-24.
- [5] Feiznia, S. (2008). *Applied sedimentology with emphasis on soil erosion and sediment production*, Agriculture and Natural Resources University of Gorgan Press, 356p.
- [6] Golestan Province Watershed Management (2003). *Report for technical helps to soil conservation in loess regions*, 75p.
- [7] 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.
- [8] Jamab (Engineering Counsultant Co.) (1991). *Integrated water project for Iran*, Goganrood Drainage Basin Report, Ministry of Energy, Iran.
- [9] Kantari, K. (2006). *Data Processing and analysis in socio-economic research*, Sharif Publication, 388p.
- [10] Khaje, M. (2003). Study of Gorganrood Drainage Basin sedimentology, sedimentary environment and sediment production (Il Chashmeh and GHurchay), Ph.D. Thesis, Azad Islamic University, Science and Research Branch.
- [11] Meyer, L.D. and Harmon, W. (1984). Susceptibility of agricultural soils to inter-rill erosion, *Soil Science Society of America, Journal*, 48, 1152-1157.
- [12] Mogaddam, M. (2007). *Range and range management*, University of Tehran Press, 350p.
- [13] Pashae, A. (1998). Investigation of physical and chemical characteristics and source of loess deposits in Gorgan and Rasht Areas, *Journal of Geological Science*, 23 & 24, 67-78.
- [14] Refahi, H. (2003). *Soil erosion and control*, University of Tehran Press, 551p.
- [15] Sagafian, B. (2003). *Investigation and determination of criteria for rain simulator construction based on climatic conditions of Iran*, Soil conservation and Watershed Management Research Center Press.
- [16] Toy, T., Foster, G. and Renard, K. (2002). *Soil erosion: Processes, prediction, measurement and control*, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- [17] Vanelsland A., Lal, R. and Gabreiels, D. (1987). The erodibility of some Nigerian soils: A comparison of rainfall simulator result with estimates obtained from the Wismeier Nomograph, *Hydrological Processes*, 3(1), 255-265.

- [18] Vitharana V., Mervenne, M. and Simpson, D. (2008). Key soil and topographic properties to delineate potential management class for precision agriculture in the European loess area, *Geoderma*, 143, 206-215.
- [19] Wei, W., Chen, L. and Fu, B. (2007). The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China, *Journal of Hydrology*, 335, 247-258.
- [20] Zhang, k., Li., S., Peng, W. and Yu, B. (2004). Erodibility of agricultural soils on Loess Plateau of China, *Soil and Tillage Research*, 76, 157-165.
- [21] Zhou, Z.C. and Shangguan, Z.P. (2007). The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall, *Catena*, 70, 350-355.