



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی

تحلیل رابطه اجزای بودجه رسوب با سنج‌های پستی‌بلندی در مقیاس دامنه در زیر آبخیز شاهد معرف-زوجی خامسان

رضا زارعی^۱، عبدالواحد خالدی درویشان^{۲*}، محمدرضا زارع^۳، پائولو پورتو^۴

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۲- دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۳- استادیار گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۴- استاد گروه کشاورزی، دانشگاه مدیترانه رگیو کالابریا، ایتالیا

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

با توجه به اهمیت خاک و وابستگی جوامع بشری به خاک برای تولید غذا در سراسر جهان و به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، امروزه یکی از مشکلات مهم و اساسی، فرسایش و نابودی خاک است. میانگین فرسایش خاک در کشور حدود ۱۶/۵ تن در هکتار برآورد شده است و فرسایش خاک در ایران تقریباً معادل ۲ تا ۲/۵ برابر آسیا و ۵ تا ۶ برابر میانگین جهانی است که بیشتر در دامنه‌ها و مناطق شیب‌دار به دلیل پوشش گیاهی فقیر رخ می‌دهد. با توجه به پیشرفت و توسعه روش‌های اندازه‌گیری فرسایش و رسوب و از سوی دیگر، هزینه و نبود دقت در روش‌های قدیمی چون استفاده از کرت‌ها و پین‌های فرسایش، امروزه استفاده از رادیونکلئیدها به‌ویژه سزیم-۱۳۷ برای اندازه‌گیری اندازه فرسایش و رسوب‌گذاری و اجزای بودجه رسوب، بسیار حائز اهمیت است. یکی از مزیت‌های مهم این روش‌ها که به‌ویژه در دهه‌های گذشته پژوهشگران به آن توجه داشته‌اند، امکان اندازه‌گیری توزیع مجدد خاک در اثر فرسایش آبی در دامنه‌ها و آبخیزها و حتی در مقیاس کرت‌های آزمایشگاهی است. برآورد دقیق اجزای بودجه رسوب برای برآورد اندازه فرسایش و بازتوزیع خاک و امکان برنامه‌ریزی برای حفاظت خاک در هر منطقه ضروری است. از این‌رو، هدف این پژوهش برآورد اجزای بودجه رسوب در مقیاس دامنه با استفاده از سنج‌های پستی‌بلندی بود.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، نشانی الکترونیکی: a.khaleedi@modares.ac.ir

استناد: زارعی، ر.، خالدی درویشان، ع.، زارع، م.ر.، پورتو، پ. ۱۴۰۴. تحلیل رابطه اجزای بودجه رسوب با سنج‌های پستی‌بلندی در مقیاس دامنه در زیر آبخیز شاهد معرف-زوجی خامسان. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۸ (۲): ۱۳۸-۱۱۸.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2025.367713.1602

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴، دوره ۳۸، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۴۷، تابستان ۱۴۰۴، صفحه‌های ۱۱۸ تا ۱۳۸.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



مواد و روش‌ها

به دلیل امکان استفاده از نتایج پژوهش‌های پیشین و در دسترس بودن مدل رقومی ارتفاع با دقت مکانی یک متر، به وسیله پهباد فتوگرامتری، این پژوهش در زیرآبخیز شاهد آبخیز معرف-زوجی خامسان در استان کردستان انجام شد. برای بررسی دقیق اثر زاویه و انحنای شیب بر فرسایش و رسوب‌گذاری، نمونه‌برداری خاک در ۳۱ نقطه در یک شبکه ۲۰۰ متری با روش نظام‌مند-تصادفی و در ۴۸ نقطه روی شش نوار اندازه‌گیری انجام شد. بعد از انجام مراحل آماده‌سازی نمونه‌های خاک شامل هواخشک کردن، خشک‌کن انجمادی و عبور از الک ۶۳ میکرون، ۲۹۳ گرم خاک درون ظروف مخصوص برای اندازه‌گیری سزیم-۱۳۷ به آزمایشگاه ارسال شد. همچنین، نقشه‌های توزیعی سنجه‌های پستی‌بلندی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع در نرم‌افزار Arc GIS 10.8 استخراج شد. سپس، نقشه توزیعی فرسایش/بازتوزیع خاک با استفاده از نقاط اندازه‌گیری سزیم-۱۳۷ و رهیافت واحدکاری تهیه شد. همچنین، اجزای بودجه رسوب شامل فرسایش کل، رسوب‌گذاری کل، فرسایش خالص و نسبت تحویل رسوب برای تعداد ۱۴ دامنه در زیرآبخیز مطالعه‌شده، محاسبه شد. سپس، به منظور بررسی بهنجار بودن داده‌ها در تعداد ۱۴ دامنه بررسی‌شده، از آزمون شاپیرو ویلک استفاده شد و با توجه به بهنجار بودن داده‌ها، همبستگی میان سنجه‌های پستی‌بلندی و اجزای بودجه رسوب در مقیاس دامنه با استفاده از آزمون پیرسون بررسی شد. سرانجام، معادله‌های وایازی برای برآورد اجزای بودجه رسوب با استفاده از سنجه‌های پستی‌بلندی ارائه شد.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج این پژوهش در ۱۴ دامنه بررسی‌شده، فرسایش ویژه کل میان ۰/۹۳ تا ۷/۵۲ تن در هکتار در سال و رسوب‌گذاری ویژه کل میان ۰/۰۳ تا ۰/۵۱ تن در هکتار در سال به دست آمد. این یافته‌ها بیانگر آن بود که درصد قابل توجهی از فرسایش از دامنه‌ها خارج شده است. فرسایش ویژه خالص نیز میان ۰/۷۹ تا ۷/۴۵ تن در هکتار در سال محاسبه شد که بیانگر نسبت تحویل رسوب میان ۰/۸۴ تا ۱/۰۰ برای دامنه‌های بررسی‌شده بود. نتایج این پژوهش نشان داد که رابطه همبستگی میان فرسایش (کل و خالص) و نسبت تحویل رسوب با زاویه شیب، عامل پستی‌بلندی و شاخص توان آبراهه، معنی‌دار و منفی است. این یافته نشان‌دهنده اثر غالب کاربری زمین‌های زراعت دیم بر افزایش فرسایش در شیب‌های کمتر و در پایین‌دست دامنه‌ها است و در مناطق بالادست دامنه‌ها اگرچه شیب بیش‌تر بود، اما، به دلیل کمتر دست‌خورده شدن خاک و کاربری مرتع، فرسایش در کم‌ترین اندازه بود. از این‌رو، در این پژوهش، در تفسیر رابطه‌ها و معادله‌های وایازی از نتایج کاربری زمین‌ها و تغییرات آن در نیم‌رخ طولی دامنه‌ها، استفاده شد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

ناحیه داخلی آبخیز خامسان شامل یک دشت کم‌شیب با کاربری غالب زراعت دیم بود که تا بخش‌هایی از پیرامون دامنه‌های پرشیب، ادامه یافته و مشابه این شرایط در زیرآبخیزها و از جمله زیرآبخیز شاهد نیز مشاهده شد. شرایط تغییرات کاربری زمین‌ها از بالادست تا پائین‌دست دامنه‌های پیرامون زمین‌های دیم، نسبتاً مشابه بود. از این‌رو، معادله‌های وایازی ارائه‌شده در این پژوهش قابلیت استفاده در دامنه‌های آبخیز معرف-زوجی خامسان و نیز دیگر آبخیزهای مشابه را دارد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود سنجه‌های پستی‌بلندی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با دقت‌های مکانی گوناگون استخراج شود و در برآوردها استفاده شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود با توجه به نقش مهم کاربری زمین در تولید فرسایش و رسوب، طرح آمایش سرزمین در منطقه مطالعه‌شده انجام شود و بر اساس توان هر بخش، اصلاح و تغییر کاربری زمین انجام شود.

واژگان کلیدی

انحنای شیب، بازتوزیع خاک، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، فرسایش خالص، نسبت تحویل رسوب

مقدمه

یکی از مشکلات مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک در سراسر جهان و به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، نابودی و فرسایش خاک است (صادقی و همکاران ۲۰۱۸، زارعی و خالدی ۲۰۲۰) که در ۵۰ الی ۶۰ سال گذشته به‌شکل قابل توجهی افزایش یافته است (نصرتی و همکاران ۲۰۱۱). میانگین فرسایش خاک در کشور حدود ۱۶/۵ تن در هکتار برآورد شده که بیشتر در دامنه‌ها و مناطق شیب‌دار به‌دلیل پوشش گیاهی فقیر رخ می‌دهد. از این‌رو، مدیریت و حفاظت از خاک در این مناطق باید با دقت انجام شود (معاون آب و خاک وزارت جهاد کشاورزی ۲۰۲۴). از مهم‌ترین نتایج فرسایش خاک می‌توان به کاهش خاک و مواد مغذی در دامنه‌ها و انباشت رسوبات در پایین‌دست آبخیز اشاره کرد که با ضرر و زیان و هزینه‌های زیادی از قبیل لای‌روبی آبخیز سدها، تغییر در کیفیت آب و همچنین تغییر در پوشش گیاهی منطقه همراه است (رجائی و همکاران ۲۰۱۷). از این‌رو، حفاظت از خاک و مبارزه با فرسایش و نابودی آن از ضروری‌ترین اقدامات هر کشور در راستای تحقق توسعه پایدار به‌شمار می‌آید (تهوری و پروین ۲۰۱۶). این موضوع نیازمند شناخت عوامل مؤثر بر فرسایش و بازتوزیع خاک است. در این راستا، بررسی و اندازه‌گیری دقیق متغیرهای مؤثر بر اندازه فرسایش و رسوب ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای دستیابی به حفاظت از منابع خاک و آب است (رودریگو کامینو و همکاران ۲۰۱۶). با توجه به پیشرفت و توسعه روش‌های اندازه‌گیری فرسایش و رسوب و از سوی دیگر، هزینه‌بر بودن و نبود دقت کافی در روش‌های قدیمی چون استفاده از کرت و پین‌های فرسایشی، امروزه استفاده از هسته‌های پرتوزای ریزشی^۱ به‌ویژه سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ برای اندازه‌گیری فرسایش و رسوب و بودجه‌بندی رسوب استفاده می‌شود (اوارد و همکاران ۲۰۱۶، صدیقی و همکاران ۲۰۲۱، پورتو و همکاران ۲۰۲۲).

شاریب و همکاران (۲۰۲۳). در این راستا، صدیقی و همکاران (۲۰۲۱) در آبخیز خامسان شدت فرسایش و بازتوزیع خاک را بررسی کردند و نمودار بودجه رسوب در مقیاس آبخیز با استفاده از سزیم-۱۳۷ را تهیه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد بیشترین اندازه فرسایش خالص^۲ مربوط به زیرآبخیزهایی با شیب متوسط (کم‌تر از ۲۰٪) بود که این یافته بیانگر نقش کاربری زمین و اثر متقابل آن با افزایش شیب بود. به این دلیل استفاده از فنون منشاء‌یابی یا ردیابی رسوبات برای تعیین اندازه فرسایش و بازتوزیع خاک به یک روش کلیدی برای تهیه نقشه توزیعی فرسایش و رسوب تبدیل شده است (کرین و همکاران ۲۰۰۳، صدیقی و همکاران ۲۰۲۱). یکی از مزیت‌های مهم این روش‌ها که به‌ویژه در دهه‌های گذشته پژوهشگران به آن توجه داشته‌اند، موضوع بازتوزیع خاک در اثر فرسایش آبی در دامنه‌ها و آبخیز (ریتچی و ریتچی ۲۰۰۷، افشار و همکاران ۲۰۱۰، زی و همکاران ۲۰۱۸، صدیقی و همکاران ۲۰۲۱) و حتی در مقیاس کرت‌های آزمایشگاهی است (خالدی درویشان و همکاران ۱۴۰۰). سنج‌های پستی‌بلندی از جمله عامل‌هایی هستند که تأثیر مستقیم بر اندازه فرسایش و رسوب‌گذاری و بازتوزیع خاک دارند (ژیانگ و تلی ۲۰۰۴، صدیقی و همکاران ۲۰۲۱). سنج‌های پستی‌بلندی شامل شدت و طول شیب، جهت شیب، انحنا^۳، نیم‌رخ^۴، انحنا^۴، مقطع^۴، انحنا^۵، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، تجمع جریان^۶، شاخص قدرت جریان^۷ و ناهمواری سطحی^۸ است که بیش‌تر آنها تأثیر مستقیم و غیرمستقیم بر بافت و تکامل خاک، نفوذ و زهکشی، مواد آلی، اندازه رطوبت و دیگر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارند (ژیانگ و تلی ۲۰۰۴، لی و همکاران ۲۰۱۸). در موضوع بودجه‌بندی رسوب نیز چهار جزء فرسایش کل^۹، رسوب‌گذاری کل^{۱۰}، فرسایش

6- Flow Accumulation

7- Stream Power Index (SPI)

8- Surface Roughness

9- Total (Gross) Erosion

10- Total Sedimentation

1- Fallout Radionuclides (FRNs)

2- Net Erosion

3- Profile Curvature

4- Plan Curvature

5- General Curvature

خالص و نسبت تحویل رسوب^{۱۱} مطرح است که به شکل زیر تعریف می‌شوند:

فرسایش کل: کل فرسایش رخ داده خاک در دامنه مد نظر برابر با مساحت بخش فرسایش یافته دامنه ضرب در میانگین فرسایش.

رسوب گذاری کل: کل رسوب گذاری رخ داده در دامنه مد نظر برابر با مساحت بخش رسوب گذاری شده دامنه ضرب در میانگین رسوب گذاری.

فرسایش خالص: بخشی از فرسایش کل که از دامنه خارج می‌شود برابر با فرسایش کل منهای رسوب گذاری کل. **نسبت تحویل رسوب:** نسبتی از فرسایش که از دامنه خارج می‌شود برابر با فرسایش خالص تقسیم بر فرسایش کل.

اندازه گیری فرسایش کل، رسوب گذاری کل، فرسایش خالص و نسبت تحویل رسوب اهمیت زیادی در فرسایش و رسوب دارد. از آنجایی که اندازه گیری مستقیم فرسایش و رسوب واقعی آبخیز در روی زمین بسیار هزینه بر و زمان بر بوده و در این شرایط تعمیم آن به مناطق بزرگتر همواره با مشکلات مواجه است، در این میان برآورد اندازه تلفات خاک برای آبخیزها با مدل سازی همواره مورد توجه کارشناسان بوده است. با توجه به اینکه بیشتر مدل های استفاده شده در فرسایش خاک، روش های تجربی از نوع جعبه خاکستری است (لیو و همکاران ۲۰۰۵)، پژوهشگران به این نتیجه رسیده اند که مدل های قدیمی کارایی چندانی ندارند. از این رو، به تدریج تحلیل های تجربی جای خود را به حل معادله های دیفرانسیل داد (صمدزاده و پورمحمد ۲۰۱۸). در این راستا، برای اولین بار مدل فرسایش مورگان و مورگان- فینن^{۱۲} در سال ۱۹۸۴ به وسیله مورگان و مورگان - فینن ارائه شد (مورگان و همکاران ۱۹۸۴). این مدل در مقایسه با مدل جهانی فرسایش خاک^{۱۳} پایه فیزیکی قوی تری دارد. شرستا (۲۰۱۰) در آبخیز جی خوخوا در نپال با استفاده از مدل مورگان و مورگان- فینن اندازه هدررفت خاک را در زمین های دیم، آبی و جنگل به ترتیب برابر ۳۲/۵، ۰/۹ و ۰/۴-۰/۱ تن در هکتار برآورد کرد.

صمدزاده و پورمحمد (۲۰۱۸) نیز در مدل سازی فرسایش خاک در آبخیز گرازچای خلخال با استفاده از مدل مورگان و مورگان- فینن اندازه میانگین فرسایش سالانه آبخیز نامبرده را بر حسب تن در هکتار برابر ۰/۸۲ به دست آوردند و در این میان بیشترین اندازه تلفات خاک در مقایسه با دیگر واحدها مربوط به کاربری زراعت دیم (۰/۸۲ تن در هکتار بر سال) بود. صدیقی و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که در آبخیز معرف- زوجی خامسان بیشترین و کمترین اندازه فرسایش خاک به ترتیب مربوط به کشاورزی دیم (۱۱/۴۶ تن در هکتار بر سال) و مرتع (۱/۲۷ تن در هکتار بر سال) در طبقه شیب به ترتیب ۳۰-۲۰٪ و بیش از ۶۰٪ بود. افزون بر این، بیشترین توزیع مجدد رسوب مربوط به کشاورزی دیم (۵/۷۸ تن در هکتار بر سال) و مرتع (۰/۸۹ تن در هکتار بر سال) به ترتیب در طبقه شیب ۶۰-۳۰٪ و بیش از ۶۰٪ بود. همچنین، نسبت تحویل رسوب که از اجزای بودجه رسوب است یکی از معیارهای مهم استفاده شده در تبدیل اندازه فرسایش خاک و تولید رسوب به یکدیگر بود که در بسیاری از شرایط زمینه ساز استفاده بهینه از منابع گوناگون است. آگاهی از روش مناسب محاسبه نسبت تحویل رسوب در آبخیزها اهمیت ویژه ای در موضوع حفاظت خاک و آبخیزداری به ویژه برآورد فرسایش و رسوب دارد (فرهودی و همکاران ۲۰۱۵). همچنین، نسبت تحویل رسوب برای بیان اندازه فرسایش و رسوب تولید شده و اندازه رسوب حمل شده به خروجی آبخیز، اهمیت فراوان دارد. نسبت تحویل رسوب تحت تأثیر عامل هایی چون توان تولید رسوب آبخیز، پستی بلندی آبخیز، مساحت آبخیز و بسیاری از عامل های دیگر است (پارک و همکاران ۲۰۱۰). همچنین، مدل سازی های پرشماری در زمینه نسبت تحویل رسوب که از اجزای بودجه رسوب است، به وسیله پژوهشگران در سال های گذشته انجام شده است. در این راستا، بیات و مرادی (۲۰۱۴) دو گروه از مدل های برآورد یا محاسبه نسبت تحویل رسوب در آبخیز کورسر نوشهر با اقلیم معتدل مرطوب را ارزیابی کردند و دریافتند که مدل هایی که در آنها

13- Universal Soil Loss Equation (USLE)

11- Sediment Delivery Ratio (SDR)

12- Morgan and Morgan-Finney Models

کرد. این یافته ضرورت دستیابی به نقشه های توزیعی فرسایش، رسوب و برآورد اجزای بودجه رسوب را با استفاده از متغیرهای مبتنی بر پستی بلندی نشان می دهد. از این رو، این پژوهش با هدف برآورد اجزای بودجه رسوب در مقیاس دامنه با استفاده از سنجه های پستی بلندی تهیه شده از مدل رقومی ارتفاع با دقت یک متر در آبخیز معرف خامسان انجام شد.

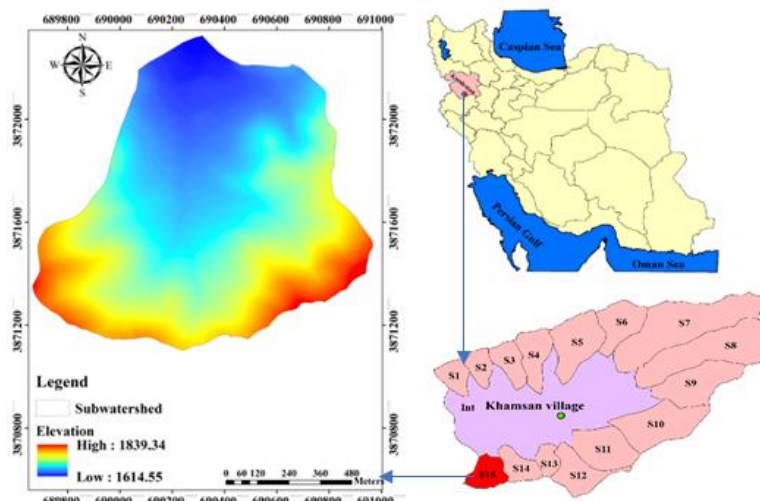
مواد و روش ها

معرفی منطقه مطالعه شده

در این پژوهش، زیرآبخیزی در بخش انتهایی جنوب غربی آبخیز معرف-زوجی خامسان به نام زیرآبخیز شاهد با مساحت ۱۰۲/۱۴ هکتار انتخاب شد. میانگین شیب این زیرآبخیز ۲۶/۴٪ و میانگین بلندی آن از سطح دریا ۱۷۰۷ متر است. در این زیرآبخیز هیچ گونه عملیات حفاظت خاک و آب انجام نشده است و چرای دام در آن به شکل آزاد انجام می شود. از این رو، به عنوان شاهد شرایط اصلی منطقه مد نظر است و برای مقایسه اقدامات آبخیزداری با زیرآبخیز نمونه، استفاده شد. موقعیت آبخیز معرف خامسان و زیرآبخیز مطالعه شده (شاهد) در شکل ۱ نشان داده شده است. چون این آبخیز یکی از آبخیزهای معرف-زوجی کشور است، از این رو، داده ها و نتایجی که از این پژوهش به دست آمد قابل تعمیم به آبخیزهایی است که از نظر شرایط پستی بلندی، آب و هواشناسی و کاربری زمین در بخش های وسیعی از غرب کشور به این آبخیز شباهت دارند.

به جای عامل های مساحت، طول آبراهه اصلی و میانگین بلندی آبخیز از سطح دریا لحاظ شده است، مدل های مناسب تری بودند.

دستیابی به نتایج دقیق از اندازه گیری حرکت و بازتوزیع خاک و بودجه بندی رسوب در امتداد دامنه با استفاده از مدل های تجربی و یا اندازه گیری های میدانی از قبیل کرت و بین فرسایشی به دلیل پستی بلندی و دیگر شرایط، دشوار و هزینه بر است. از سوی دیگر، بیشتر رویکردهای استفاده شده برای برآورد هدررفت خاک و فرسایش به دلیل پیچیدگی فرآیندهای حمل و رسوب و رابطه متقابل آنها با ویژگی های آبخیز (پستی بلندی)، الگوهای مکانی بازتوزیع خاک را ارائه نمی دهند (ساک و همکاران ۲۰۰۸). وجود رابطه های پیچیده میان پستی بلندی و فرسایش و بازتوزیع خاک و دوسویه بودن این رابطه ها، سبب پیچیدگی بیشتر موضوع شده است و به این دلیل پژوهشگران در شرایط گوناگون نتایج کم و بیش متناقضی در این رابطه ها ارائه کرده اند. انجام پژوهش های تکمیلی و دقیق تر در این رابطه ها نیازمند استفاده از نقشه های توزیعی با دقت مکانی زیاد برای عامل های گوناگون پستی بلندی است که با نقشه توزیعی فرسایش و بازتوزیع خاک در مقیاس متناسب مقایسه شوند. به این دلیل استخراج نقشه های توزیعی فرسایش و رسوب از مدل رقومی ارتفاع^{۱۴} (لی و همکاران ۲۰۱۸) با دقت زیاد (اندازه پیکسل یک متر) و هزینه کم سبب شده که بتوان در کمترین زمان ممکن با دقت زیادی اندازه فرسایش و رسوب منطقه را برآورد



شکل ۱- موقعیت زیر آبخیز مطالعه‌شده در آبخیز معرف خامسان، استان کردستان.

Figure 1- Location of the study sub-watershed in Khamsan representative watershed, Kurdistan.

قبرستان قدیمی روستاهای موجش و قورق به‌عنوان نقاط مرجع تعیین و استفاده شد. بر پایه پژوهش‌های صدیقی و همکاران (۲۰۲۱) در ۱۲ نقطه در ژرفاهای گوناگون ۳-۰، ۶-۳، ۱۰-۶، ۱۵-۱۰، ۲۰-۱۵ و ۲۵-۲۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری خاک انجام شد و اندازه سزیم-۱۳۷ نقاط مرجع اندازه‌گیری شد. با توجه به ضریب تغییرات کمتر از ۲۰٪ میان نقاط مرجع، محاسبات و صحت مرجع بودن این نقاط تأیید شد. از این‌رو، این نقاط به‌عنوان نقاط مرجع انتخاب شدند و از آنجایی که فاصله زمانی میان پژوهش صدیقی و همکاران (۲۰۲۱) و این پژوهش کم بود، از نتایج منطقه مرجع این پژوهشگران در این پژوهش استفاده شد.

تعیین نقاط نمونه‌برداری خاک در زیر آبخیز

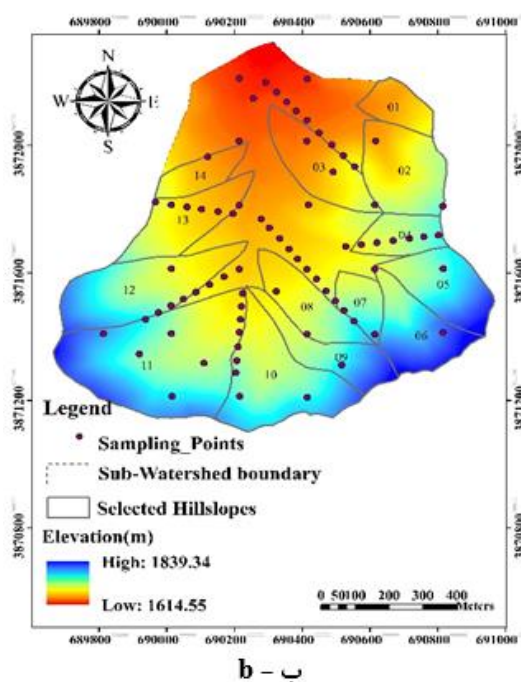
برای تعیین محل نقاط نمونه‌برداری خاک از نرم‌افزار گوگل‌ارت استفاده شد (لی و همکاران ۲۰۱۸، صدیقی و همکاران ۲۰۲۰). در این پژوهش، ۳۱ نقطه نمونه‌برداری در یک شبکه ۲۰۰ متری با روش نظام‌مند-تصادفی برداشت شد و دلیل این نوع نمونه‌برداری بررسی اثر شیب برای اندازه‌گیری دقیق فرسایش و رسوب‌گذاری در آبخیز بود (والینگ و همکاران ۲۰۱۴). همچنین، ۴۸ نقطه روی شش نوار اندازه‌گیری با فاصله ۵۰ متر برای امکان تحلیل اثر انحنای شیب برداشت شد (شکل ۲). نمونه‌های خاک با استفاده از روش نمونه‌برداری فله‌ای (مخلوط یا

انتخاب منطقه مرجع

نخستین گام برای اندازه‌گیری فرسایش خاک با استفاده از سزیم-۱۳۷ تعیین منطقه مرجع است و اندازه موجودیت سزیم-۱۳۷ در منطقه مرجع یک سنجۀ اساسی برای ارزیابی کیفی اندازه بازتوزیع خاک است (لوگران و همکاران ۲۰۰۲، صدیقی و همکاران ۲۰۲۰). مکان‌های مرجع از آغاز ورود رادیوایزوتوپ‌ها به خاک تا زمانی که نمونه‌برداری می‌شود کمتر تحت تأثیر فعالیت‌های نابودگر انسانی بوده، از فرآیندهای شدید فرسایش و رسوب نیز تأثیر نمی‌گیرند و به جز واپاشی طبیعی، تغییر اندازه سزیم-۱۳۷ در این مکان‌ها ناچیز است (زاپاتا ۲۰۰۲). از این‌رو، اندازه سزیم-۱۳۷ موجود در نقاط مرجع بیانگر کل سزیم-۱۳۷ ریزشی در منطقه از شروع انجام آزمایش‌های هسته‌ای تا زمان نمونه‌برداری است (زاپاتا ۲۰۰۲، آرتا و همکاران ۲۰۱۶). از آنجایی که باید به معرف بودن نمونه‌های خاک و تغییرپذیری نمونه‌برداری در منطقه مرجع، توجه کرد و تا حد امکان پیرامون و نزدیک منطقه نمونه‌برداری باشد و از نظر بلندی نیز مشابه منطقه پژوهش باشد، معمولاً مناطق حفاظت‌شده (پارک‌ها و گورستان‌ها) را به‌عنوان منطقه مرجع انتخاب می‌کنند. در این پژوهش نیز نقاط مرجع مبتنی بر نتایج پژوهش انجام‌شده به‌وسیله صدیقی و همکاران (۲۰۲۱) در آبخیز خامسان، انتخاب شدند و

آزمایشگاه برای اندازه‌گیری فعالیت سزیم-۱۳۷ ارسال شد (صدیقی و همکاران ۲۰۲۱).

یکپارچه^{۱۵} به وسیله یک مغزه‌گیر^{۱۶} با بلندی ۲۵ سانتی‌متر و قطر ۸/۵ سانتی‌متر برداشت شد و نمونه‌ها به



شکل ۲- نماهایی از کاربری‌های کشاورزی دیم و مرتع (الف) و موقعیت نقاط نمونه‌برداری خاک و دامنه‌های انتخاب‌شده (ب) در زیرآبخیز مطالعه‌شده.

Figure 2- Views of rainfed agriculture and rangeland (a) and location of soil sampling points and selected hillslopes (b) in the study sub-watershed.

$$CPI = \sum C_i.B_i.D_i.103 \quad (1)$$

CPI، اندازه موجودیت سزیم-۱۳۷ در خاک (بکرل بر مترمربع)، C_i : فعالیت سزیم-۱۳۷ در خاک (بکرل بر کیلوگرم)، D_i : ضخامت یا ژرفای لایه نمونه‌برداری (۰/۲۵ متر) و B_i : جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) است.

استفاده از مدل‌های تبدیل‌کننده برای تبدیل موجودی سزیم-۱۳۷ به فرسایش/رسوب‌گذاری

برای تبدیل اندازه موجودی سزیم-۱۳۷ به اندازه فرسایش و رسوب‌گذاری برای کاربری‌های زراعی و این دلیل که ارزیابی اولیه و شواهدی از شدت جابجایی خاک در منطقه مطالعه‌شده موجود نبود، از مدل تبدیل توازن

آماده‌سازی خاک و اندازه‌گیری موجودی سزیم-۱۳۷ بعد از انتقال به آزمایشگاه هر نمونه ابتدا هواخشک شد. سپس، در ظرف آلومینیومی به مدت ۲۴ ساعت در خشک کن انجمادی گذاشته شد. سپس، نمونه وزن شد و پس از آن در آسیاب صنعتی خرد شد. سرانجام از الک ۶۳ میلی‌متر عبور داده شد (چیو و همکاران ۲۰۱۱). اندازه ۲۹۳ گرم خاک درون ظرف مخصوص نگین ریخته شد و با اندازه‌گیری اندازه تشعشع گاما از عنصر سزیم-۱۳۷ در نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه گاما اسپکترومتر (کالینز و همکاران ۱۹۹۷) بدون استفاده از تیمار شیمیایی خاصی، فعالیت سزیم-۱۳۷ بر حسب بکرل بر کیلوگرم به دست آمد. سپس، با استفاده از جرم مخصوص ظاهری و رابطه ۱، فعالیت سزیم-۱۳۷ به موجودی سزیم-۱۳۷ تبدیل شد (والینگ ۲۰۰۳).

15- Bulk Sampling

16- Auger

استفاده شد. ابتدا نقشه شیب برحسب درجه و نقشه جهت شیب نیز به شکل زاویه آزمون از صفر تا ۳۶۰ درجه با استفاده از نسخه ۱۰/۸ نرم افزار ArcGIS تهیه شد. سپس، نقشه دیگر سنجه‌های پستی‌بلندی شامل انحنا، نیم‌رخ، انحنا، مقطع، انحنا، عمومی، تجمع جریان، طول شیب، عامل پستی‌بلندی، قدرت جریان آبراهه و شاخص رطوبت پستی‌بلندی نیز با استفاده از ابزارهای مربوط به هر یک در نسخه ۱۰/۸ محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد.

تهیه نقشه واحدهای کاری با تلفیق کاربری زمین و شدت شیب

برای تهیه نقشه واحدهای کاری از نقشه کاربری زمین و شدت شیب استفاده شد. در ابتدا نقشه کاربری زمین سال ۲۰۲۱ مربوط به منطقه مطالعه شده استخراج شد. سپس، نقشه طبقات شیب که از مدل رقومی ارتفاع استخراج شده بود با نقشه کاربری زمین روی هم‌گذاری شد و نقشه واحدهای کاری استخراج شد. نقشه توزیعی فرسایش و رسوب با استفاده از روش واحد کاری به دست آمده از تلفیق شیب و کاربری زمین (صدیقی و همکاران ۲۰۲۰؛ صدیقی و همکاران ۲۰۲۱) تهیه شد. واحدهای کاری از هم‌پوشانی دو نقشه کاربری زمین و نقشه طبقات شیب تهیه شد. سرانجام، میانگین ارزش عددی فرسایش/رسوب‌گذاری در نقاط نمونه‌برداری خاک به واحد کاری محاط بر نقاط تعمیم داده شد.

بودجه‌بندی رسوب در هر یک از دامنه‌های انتخابی

در این پژوهش، تعداد ۱۴ دامنه بر اساس تنوع ویژگی‌های شدت و جهت شیب در زیرآبخیز مطالعه شده، انتخاب شد (شکل ۳). سپس، اندازه‌های کمینه، بیشینه و میانگین، مساحت و انحراف معیار سنجه‌های پستی‌بلندی برای هر یک از دامنه‌ها با استفاده از ابزار زونال در نرم‌افزار Arc GIS 10.8 محاسبه شد. اندازه‌های کمینه، بیشینه و میانگین، مساحت و انحراف معیار فرسایش/رسوب‌گذاری برای هر یک از دامنه‌ها با استفاده از نقشه فرسایش/رسوب‌گذاری تهیه شد. با رهیافت واحدکاری برای کل زیرآبخیز شاهد و ابزار زونال در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 استخراج شد. سپس، با

جرمی ^{12}II که ورودی‌های این مدل، ژرفای شخم، جرم مخصوص ظاهری خاک و سال شروع عملیات زراعی بود، استفاده شد و برای زمین‌های مرتعی نیز از مدل پخش و انتقال 18 استفاده شد (والینگ و همکاران ۲۰۰۷). در این پژوهش، ژرفای واهلش، برابر ۸/۰ سانتی‌متر و ضریب انتشار (D) و مهاجرت (V) با استفاده از رابطه ۱ و ۲ به ترتیب برابر ۲۴/۲۷ و ۰/۴۵ محاسبه شد.

$$V = \frac{W_p}{t - 1963} \quad (2)$$

$$D = \frac{(N_p - W_p)^2}{2(t - 1963)} \quad (3)$$

T: سال نمونه‌برداری، W_p : ژرفای جرمی (کیلوگرم بر مترمربع) لایه‌ای با بیشترین غلظت سزیم-۱۳۷ و N_p : ژرفای جرمی (کیلوگرم بر مترمربع) لایه‌ای که در آن غلظت سزیم-۱۳۷ به $\frac{1}{e}$ اندازه بیشینه آن کاهش می‌یابد، است.

تعیین محدوده‌های پایدار، فرسایش، رسوب‌گذاری

برای تعیین محدوده‌های فرسایش و رسوب‌گذاری از رابطه‌های ۴ و ۵ استفاده شد.

$$\text{مرز میان حالت پایدار و فرسایش} = \text{Mean} - 95\% \text{ confidence interval} \quad (4)$$

$$\text{مرز میان حالت پایدار و رسوب‌گذاری} = \text{Mean} + 95\% \text{ confidence interval} \quad (5)$$

Mean: اندازه میانگین موجودیت سزیم-۱۳۷ و 95% confidence interval: فاصله اعتماد در سطح ۹۵٪ با پذیرش خطای ۱۰٪ میان موجودیت سزیم-۱۳۷ در نقاط مرجع است.

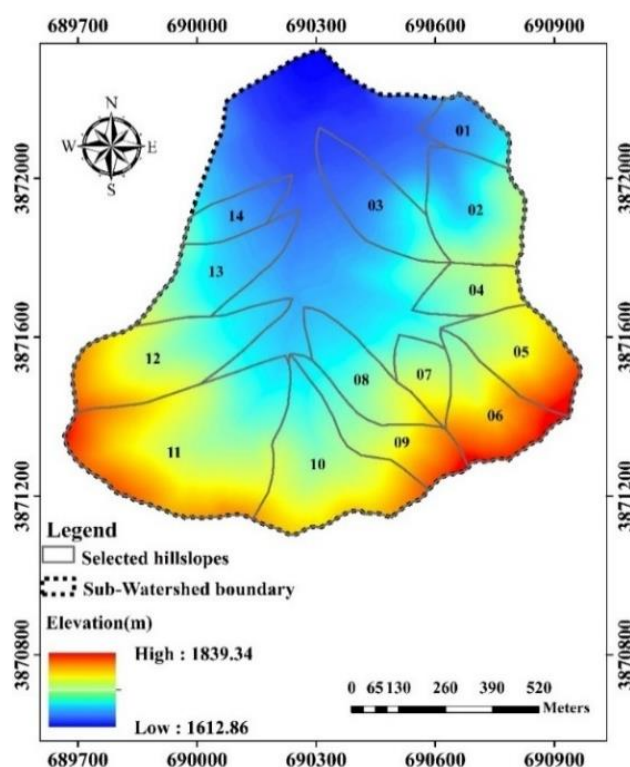
محدوده میان نقاط فرسایش و رسوب به عنوان محدوده پایدار در نظر گرفته شد (والینگ و همکاران ۲۰۱۴). ارزش عددی که در این محدوده بودند، صفر در نظر گرفته شد و اندازه میان ± 4 به عنوان محدوده پایدار در نظر گرفته شد.

استخراج نقشه‌های توزیعی سنجه‌های پستی‌بلندی در زیرآبخیز شاهد

برای استخراج سنجه‌های پستی‌بلندی در زیرآبخیز شاهد از مدل رقومی ارتفاع (گلن و همکاران ۲۰۰۶) که با دقت یک متر به وسیله پهپاد فتوگرامتری تهیه شده بود،

بودجه رسوب در هر یک از دامنه‌ها محاسبه شد.

استفاده از میانگین فرسایش/رسوب‌گذاری و مساحت محدوده‌های فرسایش، پایدار و رسوب‌گذاری اجزای



شکل ۳- دامنه‌های انتخاب‌شده در زیرآبخیز مطالعه‌شده برای تحلیل رابطه سنجه‌های پستی‌بلندی و اجزای بودجه رسوب.

Figure 3- Hillslopes selected in the study sub-watershed to investigate the relationship between topographic metrics and sediment budget components.

اینکه رابطه منطقی متغیرهای مستقل و وابسته و رابطه‌های معنی‌دار میان آنها شناسایی و تأمین شد، از وایازی دومتغیره برای ارائه معادله‌های برآورد شدت فرسایش و بازتوزیع خاک استفاده شد. همچنین، عامل‌های مؤثر بر هر یک از اجزای بودجه رسوب با استفاده از ضریب‌های همگون‌شده β در وایازی دومتغیره، اولویت‌بندی شدند. اما با توجه به اینکه فقط عامل طول شیب در معادله وایازی تأثیرگذار بر اجزای بودجه رسوب تشخیص داده شد، از این‌رو، ضریب همگون‌شده بتا (β) حذف شد.

تحلیل داده‌ها

بعد از مرتب‌سازی داده‌ها در نرم‌افزار اکسل، داده‌ها وارد نسخه ۲۲ نرم‌افزار SPSS شد و با توجه به اینکه تعداد دامنه‌های بررسی‌شده در این پژوهش کمتر از ۳۰ بود، بهنجار بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو ویلک^{۱۹} بررسی شد. سپس، بعد از بررسی و اثبات بهنجار بودن داده‌ها، رابطه میان سنجه‌های پستی‌بلندی با اجزای بودجه رسوب در مقیاس دامنه با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون (مسرور و همکاران ۲۰۲۱) بررسی شد و سنجه‌های پستی‌بلندی با همبستگی معنی‌دار با اجزای بودجه رسوب، مشخص شدند. سپس، با توجه به

نتایج و بحث

نتایج محاسبه میانگین سنجه‌های پستی‌بلندی به‌دست

آمده از نقشه توزیعی سنجه‌های پستی‌بلندی در جدول

جدول ۱- نتایج میانگین سنجه‌های پستی‌بلندی در ۱۴ دامنه انتخاب‌شده.

Table 1- The results of the average topographic metrics in the 14 selected hillslopes.

Slope Number	Area (ha)	Aspect (degree)	Slope angle (degree)	Slope length (L factor)	LS Factor	Flow Accumulation	Plan Curvature	Profile Curvature	SPI	TWI
1	2.2694	275.394	20.912	0.926	2.494	103.127	0.0015	-0.0010	0.098	3.979
2	6.0306	231.974	33.802	1.149	4.515	185.046	-0.0007	0.0001	0.347	4.011
3	4.8586	277.123	21.082	0.955	2.473	232.998	0.0012	-0.0004	0.111	3.845
4	2.8124	255.017	24.245	1.187	3.177	145.172	0.0002	0.0006	0.212	4.354
5	4.8102	296.564	38.959	1.087	5.460	219.164	-0.0003	-0.0001	0.342	3.580
6	4.9299	207.993	44.908	1.026	6.079	213.077	-0.0002	0.0015	0.405	3.373
7	2.1546	241.021	38.238	1.189	5.477	100.327	0.0025	-0.0021	0.413	3.963
8	4.1505	291.924	25.407	1.062	3.307	233.683	0.0013	-0.0011	0.194	3.863
9	3.9251	304.137	35.983	1.053	4.783	258.395	0.0013	0.0004	0.310	3.588
10	8.4369	198.452	33.582	1.035	4.484	302.189	-0.0005	0.0001	0.271	3.601
11	14.7385	114.458	34.490	1.155	4.684	327.724	0.0002	-0.0002	0.341	3.902
12	7.9542	67.641	32.658	1.121	4.329	326.320	0.0000	0.0000	0.302	3.826
13	4.8195	75.612	21.208	0.948	2.444	237.236	0.0007	-0.0007	0.110	3.752
14	2.3254	66.999	21.468	0.902	2.453	122.602	0.0018	-0.0002	0.123	3.777

Aspect: جهت شیب

Slope Angle (degree): درجه شیب

Slope Length (L factor): طول شیب

LS Factor: عامل پستی‌بلندی

Plan Curvature: انحناى مقطع

Profile Curvature: انحناى نیم‌رخ

Flow Accumulation: تجمع جریان

TWI: شاخص رطوبت پستی‌بلندی

SPI: شاخص قدرت جریان

هکرات و همکاران (۲۰۰۵)، دو و والینگ (۲۰۱۱) و یانگ و همکاران (۲۰۱۴) مبنی بر اینکه در زمین‌های کشاورزی، فرسایش آبی و خاک‌ورزی دو فرآیند اصلی توزیع مجدد خاک هستند، مطابقت دارد. یافته‌های این پژوهش با نتایج ژائو و همکاران (۲۰۲۲) مبنی بر اینکه درجه شیب و طول شیب بر اندازه هدررفت خاک و رواناب را در زمین‌های کشاورزی تأثیرگذارند، اما اثر معنی‌داری روی هدررفت خاک یا رواناب در قطعاتی با پوشش گیاهی دائمی ندارند، هم‌راستا است. اندازه‌های اجزای بودجه رسوب هر یک از دامنه‌ها با استفاده از نقشه توزیعی به‌دست آمده از رهیافت واحد کاری برای کل زیرآب‌خیز در جدول ۲ ارائه شده است. فرسایش ویژه کل از ۰/۹۳۴ (تن در هکتار در سال) در دامنه شش تا ۷/۵۲۰ (تن در هکتار در سال) در دامنه چهار متغیر بود و به تبع آن رسوب‌گذاری ویژه کل (بازتوزیع خاک) نیز از ۰/۰۳۰ در دامنه ۱۳ تا ۰/۵۱ در دامنه ۱۰ (تن در هکتار در سال) متغیر بود و درصد کم‌تری را کسب کرد و درصد بیش‌تری از فرسایش از دامنه‌ها خارج شده است. فرسایش ویژه خالص از ۰/۷۹ در دامنه شش تا ۷/۴۵ در دامنه یک (تن

بر اساس نتایج جدول ۱، در دامنه‌های انتخابی زاویه جهت شیب از ۶۶/۹۹ تا ۳۰۴/۱۳۷ درجه و اندازه شیب نیز از ۲۰/۹۱۲ تا ۴۴/۹۰۸ درجه محاسبه شد. عامل طول شیب و عامل پستی‌بلندی نیز به‌ترتیب از ۰/۹۰۲ تا ۱/۱۸۹ متر و از ۲/۴۴۴ تا ۶/۰۷۹ به‌دست آمد. همچنین، شاخص تجمع جریان از ۱۰۰/۳۲۷ تا ۳۲۷/۷۲۴ بود. انحناهای مقطع و نیم‌رخ به‌ترتیب از ۰/۰۰۰ تا ۰/۰۰۲ و از ۰/۰۰۰ تا ۰/۰۰۲ محاسبه شد. شاخص قدرت جریان آبراهه و شاخص رطوبت پستی‌بلندی به‌ترتیب از ۰/۰۹۸ تا ۰/۴۱۳ و از ۳/۳۷۳ تا ۴/۳۵۴ به‌دست آمد. مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر اندازه فرسایش و رسوب، درجه شیب بود. چون با کاهش درجه شیب و با توجه به مساعد شدن شرایط برای ایجاد شخم و تبدیل مرتع به دیم‌زار، تغییر کاربری انجام‌شده است و این عامل باعث شد خاک در معرض فرسایش تشدید قرار گیرد؛ از سوی دیگر با جدا شدن ذرات خاک از هم، عامل فرسایش به راحتی ذرات خاک را از هم جدا کرده و با توجه به ضعف پوشش گیاهی دیم‌زارها، تجمع رواناب باعث افزایش فرسایش شد. این نتایج با یافته‌های ونتریس و همکاران (۲۰۰۴)،

کاربری و شخم در مناطق پایین‌دست دامنه‌های انتخاب‌شده و کاهش زاویه شیب بود. این نتایج با یافته‌های صدیقی و همکاران (۲۰۲۲) مبنی بر اینکه در نقاط پایین‌دست به دلیل کشت دیم فرسایش بیشتر است و در مناطق بالادست به دلیل دست‌خوردگی کمتر خاک، اندازه فرسایش کمتر است، مطابقت دارد.

در هکتار در سال) بیانگر این یافته است. همچنین، با توجه به نسبت تحویل رسوب که از ۰/۸۴ در دامنه شش تا ۱ در دامنه ۱۳ به دست آمد، بیانگر این یافته است. بر اساس نتایج فرسایش ویژه خالص و نسبت تحویل رسوب، مشخص شد که اندازه رسوب خروجی از دامنه‌های مطالعه‌شده بیشتر است که این موضوع به دلیل تغییر

جدول ۲- نتایج مؤلفه‌های بودجه‌بندی رسوب در ۱۴ دامنه انتخاب‌شده.

Table 2- The results of sediment budget components in the 14 selected hillslopes.

Slope Number	Area (ha)	Total Erosion ($t\ y^{-1}$)	Specific Total Erosion ($t\ ha^{-1}\ y^{-1}$)	Total Deposition ($t\ y^{-1}$)	Specific Total Deposition ($t\ ha^{-1}\ y^{-1}$)	Net Erosion ($t\ y^{-1}$)	Specific Net Erosion ($t\ ha^{-1}\ y^{-1}$)	SDR
1	2.2694	-17.038	-7.508	0.134	0.059	-16.903	-7.448	0.992
2	6.0306	-10.843	-1.798	0.253	0.042	-10.590	-1.756	0.977
3	4.8586	-35.368	-7.279	1.017	0.209	-34.351	-7.070	0.971
4	2.8124	-21.150	-7.520	1.188	0.422	-19.962	-7.098	0.944
5	4.8102	-10.075	-2.095	1.354	0.281	-8.721	-1.813	0.866
6	4.9299	-4.605	-0.934	0.733	0.149	-3.872	-0.785	0.841
7	2.1546	-2.732	-1.268	0.212	0.099	-2.520	-1.170	0.922
8	4.1505	-24.457	-5.892	0.478	0.115	-23.979	-5.777	0.980
9	3.9251	-14.255	-3.632	0.477	0.122	-13.778	-3.510	0.967
10	8.4369	-28.281	-3.352	4.271	0.506	-24.010	-2.846	0.849
11	14.7385	-43.721	-2.966	4.156	0.282	-39.565	-2.684	0.905
12	7.9542	-24.373	-3.064	1.416	0.178	-22.957	-2.886	0.942
13	4.8195	-30.531	-6.335	0.145	0.030	-30.386	-6.305	0.995
14	2.3254	-14.400	-6.192	0.309	0.133	-14.091	-6.059	0.979

زیاد، با توجه به وجود گیاهان دایمی، روناب به‌شکل ناحیه‌ای تشکیل شود و قبل از تجمع با هم به زمین نفوذ کند. این یافته‌ها با نتایج گاورز و همکاران (۲۰۰۶) و وان دن پوته و همکاران (۲۰۱۰) کبنی بر اینکه تغییر کاربری و دست‌خوردگی خاک نه تنها پوشش گیاهی را کاهش می‌دهد، بلکه با افزایش روناب، خاک را نیز مستعد جدا شدن می‌کند و فرسایش را افزایش می‌دهد، هم‌راستا است. اثر طول شیب در مراتع بالادست چندان مشاهده نشد. همچنین، نبود رابطه میان طول شیب و هدررفت خاک در مرتع ممکن است به دلیل ماهیت ناپیوسته روناب در سطح زمین با پوشش گیاهی دائمی باشد که از تجمع جریان جلوگیری می‌کند (سردان و همکاران ۲۰۱۰). از سوی دیگر، به جای تجمع پیوسته روناب در جهت پایین شیب، روناب در سطح خاک با پوشش گیاهی دائمی اغلب روناب سطحی ناپیوسته است و قدرت فرسایشی روناب، افزایش نمی‌یابد (کامرات ۲۰۰۲، سردان و همکاران ۲۰۰۴). سرانجام، می‌توان

بر اساس نتایج جدول ۲ و نتایج بودجه‌بندی رسوب، دامنه شش، کمترین اندازه فرسایش ویژه (۰/۷۸۵) تن در هکتار بر سال) و دامنه یک، بیشترین اندازه فرسایش ویژه (۷/۴۴۸) تن در هکتار بر سال) را کسب کرد. جهت شیب در دامنه شش جنوب‌غربی و در دامنه یک شمال‌غربی بود. این یافته‌ها با نتایج لی و همکاران (۲۰۱۹) مبنی بر اینکه در دامنه‌های شمالی اندازه فرسایش ۲۴ تا ۸۱٪ بیشتر از دامنه‌های جنوبی بود، هم‌راستا است. یکی از مهم‌ترین علت‌های این رویداد، تغییر کاربری به دلیل درجه شیب کمتر در دامنه یک (۲۰/۹۱۲ درجه) بود که سبب شده مرتع بیشتری به کشاورزی تبدیل شود و باعث دست‌خوردگی خاک سطحی و افزایش اندازه فرسایش خاک شود. در دامنه شش با توجه به شیب زیاد (۴۴/۹۰۸ درجه) امکان شخم و تغییر کاربری مرتع کمتر بود. همچنین، با توجه به وجود سنگریزه و گیاهان طبیعی چند ساله در مراتع، زبری سطحی بیشتر بود و حجم و سرعت روناب کمتر بود که سبب می‌شود به‌رغم شیب

بررسی بهنجار بودن داده‌ها در تعداد ۱۴ دامنه بررسی شده، بیانگر آن بود که سنج‌های پستی‌بلندی و اجزای بودجه در این دامنه‌ها در سطح پنج درصد بهنجار بودند. از این‌رو، برای بررسی همبستگی میان سنج‌های پستی‌بلندی با اجزای بودجه رسوب در مقیاس دامنه از آزمون پیرسون استفاده شد و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

گفت اثر کاربری زمین به شکل آشکاری بر دیگر عامل‌ها غالب شده، تا جایی که در برخی شرایط رابطه‌های غیرمعمول میان اجزای بودجه رسوب و به‌ویژه ویژگی‌های پستی‌بلندی مشاهده شد. دلیل اصلی تأثیر بسیار شدید کاربری زمین‌های کشاورزی و به شکل ویژه عملیات خاک‌ورزی بر فرسایش خاک این است که هم بر پوشش گیاهی در طول سال و هم بر اندازه دست‌خوردگی خاک تأثیرگذار است (ژائو و همکاران ۲۰۲۲). نتایج

جدول ۳- ضریب همبستگی پیرسون میان سنج‌های پستی‌بلندی و اجزای بودجه رسوب در مقیاس دامنه.

Table 3- The Pearson correlation coefficient between topographic metrics and sediment budget components at the hillslope scale.

Budget components Topographic metrics	Total Erosion (t ha ⁻¹ y ⁻¹)	Total Deposition (t ha ⁻¹ y ⁻¹)	Net Erosion (t ha ⁻¹ y ⁻¹)	SDR
Aspect	.021	.072	.017	-.055
Slope angle	-.945**	.132	-.952**	-.765**
Slope length (L factor)	-.521	.296	-.538*	-.321
LS factor	-.940**	.156	-.949**	-.762**
Flow accumulation	-.254	.347	-.274	-.318
Plan curvature	.355	-.500	.383	.485
Profile curvature	-.146	.393	-.168	-.470
Stream power index (SPI)	-.943**	.116	-.949**	-.664**
Topographic wetness index (TWI)	.469	.046	.465	.514

* و **: به ترتیب نشان‌دهنده همبستگی معنی‌دار در سطح اعتماد ۹۵ و ۹۹٪.

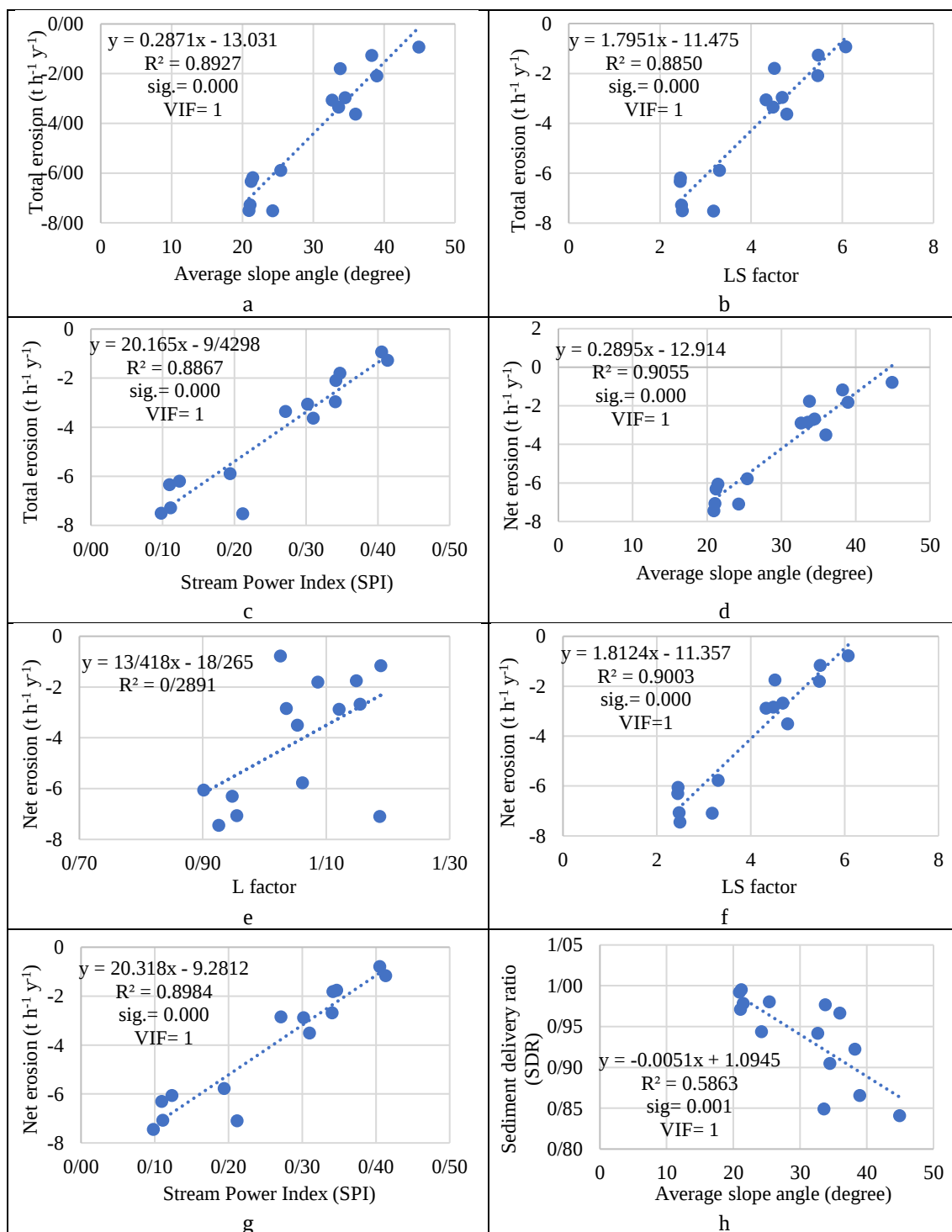
* and ** indicate significant correlation at 95% and 99% confidence levels, respectively.

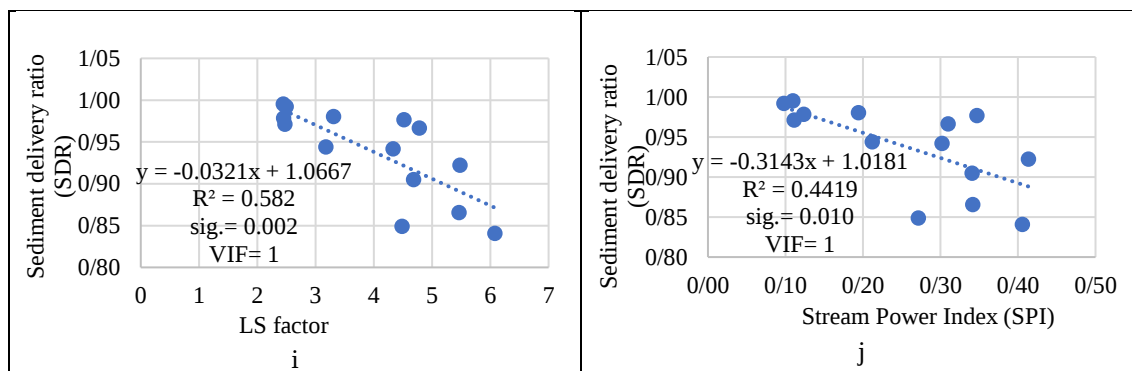
پایین‌دست دامنه‌ها تسهیل می‌شود، اما در این پژوهش، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش درجه شیب، فرسایش ویژه کل و خالص (تن در هکتار بر سال) کاهش یافت. این یافته به دلیل تأثیرگذار بودن کاربری زمین بر زاویه شیب است. در نتیجه کاهش شیب، مراتع به زمین‌های کشاورزی تبدیل شده‌اند. به بیان دیگر، اگر چه زاویه شیب در دامنه‌ها کم‌تر بود، اما به دلیل نابودی خاک و شخم زدن در جهت شیب، در زمین‌های کشاورزی و دیم پایین‌دست فرسایش بیش‌تر بود. با افزایش شیوه‌های خاک‌ورزی، سرعت نابودی خاک افزایش و زبری سطح خاک کاهش یافت. در نتیجه، ذرات زیادی از خاک جدا شده و به وسیله رواناب سطحی، انتقال یافته‌اند. این موضوع سبب افزایش اندازه رسوب انتقال‌یافته به پایین‌دست دامنه‌ها شد. این نتایج با یافته‌های برخی از پژوهش‌های پیشین (ژائو و همکاران ۲۰۲۲، صدیقی و همکاران ۲۰۲۱، گوورز و همکاران ۱۹۹۶) مبنی بر اینکه

با استفاده از وایازی دومتغیره، میان متغیرهای مستقل (سنج‌های پستی‌بلندی) و وابسته (اجزای بودجه رسوب)، رابطه‌های معنی‌دار شناسایی و ارائه شد. بر اساس رابطه‌های به‌دست آمده اجزای بودجه رسوب به‌وسیله داده‌های سنج‌های پستی‌بلندی برآورد شد. نتایج وایازی دومتغیره در شکل ۴ ارائه شده است. در مقیاس دامنه، نتایج آزمون همبستگی پیرسون نشان داد که رابطه میان درجه شیب با فرسایش کل (۰/۹۵-) و فرسایش خالص (۰/۹۵-) (تن در هکتار بر سال) در سطح خطای یک درصد منفی و معنی‌دار بود (جدول ۳). همچنین، بر اساس نمودارهای a (فرسایش کل) و d (فرسایش خالص) (تن در هکتار بر سال) مشخص شد که با افزایش شدت شیب، فرسایش کل و فرسایش خالص کاهش یافتند و اندازه ضریب تبیین در این شکل‌ها به ترتیب برابر ۰/۸۹ و ۰/۹۱ به‌دست آمد (شکل ۴). با توجه به اینکه در بیش‌تر دامنه‌ها، حرکت ذرات خاک فرسایش‌یافته بر اثر شیب به

مبنی بر اینکه بیشترین شدت فرسایش خالص مربوط به زیرآبخیزهای با شیب متوسط کم‌تر از ۲۰٪ بود و فقط با نقش کاربری زمین و اثر متقابل آن با شدت شیب قابل تفسیر است، مطابقت دارد.

عامل کاربری زمین بر عامل شیب دامنه غالب شده و اثرات منطقی شیب را تغییر داد، هم‌راستا است. همچنین، یافته‌های این پژوهش با نتایج پژوهش صدیقی و همکاران (۲۰۲۱) در مقیاس کل آبخیز معرف-زوجی خامسان





شکل ۴- مدل‌های وایازی برآورد اجزای بودجه رسوب با استفاده از سنج‌های پستی‌بلندی.

Figure 4- Regression models for estimating the sediment budget components using topographic metrics.

دامنه‌های بررسی‌شده انجام شده است. در حالی که در بخش‌های شیب‌دار بالادست دامنه‌ها، امکان تغییر کاربری مرتع به دیم امکان وجود نداشته است. از این رو، شدت فرسایش خاک و انتقال و تحویل رسوب در این بخش‌ها کمتر بود. این نتایج با یافته‌های صدیقی و همکاران (۲۰۲۱) در مقیاس کل آبخیز معرف-زوجی خامسان، هم‌راستا است. نتایج این پژوهش با یافته‌های پارک و همکاران (۲۰۱۰) مبنی بر اینکه نسبت تحویل رسوب تحت تأثیر عامل‌هایی چون توان تولید رسوب، پستی‌بلندی (که با اندازه شیب رابطه مستقیم دارد)، مساحت آبخیز و بسیاری از عامل‌های دیگر است، هماهنگی دارد. با توجه به معادله وایازی ارائه شده، اندازه نسبت تحویل رسوب بر اساس شیب محاسبه شد (شکل ۴-h). فرسایش کل و خالص خاک (تن در هکتار بر سال) و نسبت تحویل رسوب با افزایش عامل پستی‌بلندی، کاهش یافت و ضریب همبستگی پیرسون نشان داد که رابطه میان ضریب عامل پستی‌بلندی و اندازه فرسایش کل و خالص (تن در هکتار بر سال) و نسبت تحویل رسوب منفی (به ترتیب -0.94 ، -0.95 و -0.76) و معنادار در سطح خطای یک درصد بود (جدول ۳). همچنین ضریب تبیین فرسایش کل و خالص (تن در هکتار بر سال) و نسبت تحویل رسوب با عامل پستی‌بلندی به ترتیب 0.86 ، 0.90 و 0.58 به دست آمد (شکل ۴). این نتایج بر اساس قوانین حاکم بر فرآیند فرسایش و انتقال رسوب قابل قبول نبود. از آنجایی که در این پژوهش در مناطق

از سوی دیگر، نتایج این پژوهش با یافته‌های ژائو و همکاران (۲۰۲۲)، کیکوچی و همکاران (۲۰۲۰)، و ولاسکو و همکاران (۲۰۱۸) مبنی بر اینکه اندازه فرسایش در بخش‌های شیب‌دار بالادست دامنه‌ها در مقایسه با شیب‌های پایین‌دست، بیشتر است، متناقض است. دلیل این یافته تغییر کاربری و مدیریت (تبدیل مرتع به کشاورزی دیم با شخم در جهت شیب اصلی) بود. با توجه به نابودی خاک و از میان رفتن پوشش گیاهی سطح خاک، تأثیر عامل‌های دیگر مانند شدت شیب، کاهش یافت. این یافته با نتایج عباسی و همکاران (۲۰۱۷) مبنی بر اینکه وجود لاش‌برگ و پوشش گیاهی در کاربری جنگل و مرتع در طبقات شیب زیاد تغییر معناداری در اندازه فرسایش و رسوب ایجاد نکرد، مطابقت دارد. سرانجام، بر پایه مدل‌های وایازی به دست آمده، اندازه فرسایش کل و خالص در مقیاس دامنه‌های زیر آبخیز مطالعه شده، برآورد شد (شکل ۴). همچنین، بر اساس نتایج جدول ۳، مشخص شد که رابطه میان نسبت تحویل رسوب با درجه شیب منفی (-0.77) و معنادار بود. ضریب تبیین نیز 0.58 به دست آمد. از سوی دیگر، نسبت تحویل رسوب در دامنه‌های با شیب کم، بیشتر از دامنه‌های با شیب زیاد بود (شکل ۴-h). بر پایه قوانین حاکم بر فرسایش، رابطه منفی میان نسبت تحویل رسوب و شدت شیب نشان داد که عامل مهم و مؤثر بر این نتایج، کاربری زمین‌های دامنه‌های مطالعه شده بود. کشاورزی دیم به دلیل زاویه شیب کمتر در بخش‌های پایین‌دست

پایین دست انحناى دامنه‌ها مقعر بود و از سوى دیگر می‌بایست بیشترین رسوب‌گذاری در این دامنه‌ها مشاهده شود، ولی به دلیل دست‌خوردگی خاک در مناطق نامبرده اندازه فرسایش بیشتر بود. این موضوع به دلیل تأثیر غالب کشاورزی دیم در بخش‌های پایین دست دامنه‌ها بود که سبب ایجاد رابطه‌های منفی میان زاویه شیب و حتی عامل پستی‌بلندی با فرسایش خاک شد. با توجه به مدل‌های وایازی ارائه شده، اندازه فرسایش کل و خالص (تن در هکتار بر سال) و نسبت تحویل رسوب بر اساس عامل پستی‌بلندی، برآورد شد. فرسایش خالص (تن در هکتار بر سال) با افزایش طول شیب کاهش یافت (شکل e-۴). بر اساس نتایج جدول ۳، رابطه همبستگی میان طول شیب و فرسایش خالص (تن در هکتار بر سال) منفی (-0.54) و معنادار در سطح خطای پنج درصد بود. همچنین، اندازه ضریب تبیین 0.28 به دست آمد. با افزایش طول شیب، به رغم امکان افزایش ژرفا و سرعت رواناب سطحی، امکان توزیع مجدد خاک‌های فرسایش یافته نیز افزایش یافت و در نتیجه رابطه منفی میان طول شیب و فرسایش خالص در شرایط خاص دامنه‌های مطالعه شده دور از انتظار نبود. افزون بر این، انحناى مقطع و نیم‌رخ دامنه‌ها که عموماً مرکب (در بخش‌های بالایی محدب و در بخش‌های پایینی مقعر) بودند، عامل مؤثری در این نتایج به شمار می‌آید. افزایش طول شیب سبب رسیدن رواناب به بخش‌های پایین دست دامنه‌ها (با زاویه شیب کمتر) و کاهش ظرفیت انتقال رسوب و افزایش رسوب و در نتیجه کاهش فرسایش خالص (تن در هکتار بر سال) شد. همچنین، می‌توان گفت که ناهمواری و پوشش گیاهی در خاک‌های مرتعی دست‌نخورده بالادست بیشتر بود. از این رو، تله‌گذاری و توزیع مجدد رسوب بیشتر مربوط به زمین‌های کشاورزی دیم بود. به بیان دیگر، ریشه‌های گیاهی باعث کاهش فرسایش‌پذیری خاک شده و خاک را از جدا شدن به وسیله قطرات باران و انتقال رولاب محافظت می‌کنند (گیسلز و همکاران، ۲۰۰۵؛ وانوپن و همکاران، ۲۰۱۵؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۹). در بخش‌های پایین دست دامنه‌ها، ناهمواری‌ها

در اثر فعالیت‌های کشاورزی کاهش یافته و انتقال رسوب به ویژه در شیارهای ناشی از شخم زدن تسهیل شده است. نقش مهم زبری سطح بر ویژگی‌های رواناب و یا انتقال رسوب در پژوهش‌های مشکلات و همکاران (۲۰۱۹) و مومبینی و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش شده است. این پژوهشگران دریافتند که با افزایش زبری سطح، تأثیر انحناى نیم‌رخ بر اثرات شکل شیب تپه، غالب بود. فرسایش کل و خالص (تن در هکتار بر سال) و نسبت تحویل رسوب با افزایش شاخص قدرت جریان کاهش یافتند، و ضریب تبیین فرسایش کل، فرسایش خاص و نسبت تحویل رسوب به ترتیب 0.87 ، 0.90 و 0.44 به دست آمد (شکل c, j-g-۴). ضریب همبستگی میان شاخص قدرت جریان با فرسایش کل و فرسایش خالص (تن در هکتار بر سال) و نسبت تحویل رسوب به ترتیب -0.94 ، -0.95 و -0.66 در سطح خطای یک درصد به دست آمد (جدول ۳). بر اساس قوانین فرسایش کل، فرسایش خالص و نسبت تحویل رسوب، افزایش قدرت جریان باعث جدا شدن بیشتر ذرات خاک و انتقال بیشتر رسوب شد. از آنجایی که با افزایش زاویه شیب، شاخص قدرت جریان نیز افزایش یافت، نتایج این بخش دقیقاً با رابطه میان زاویه شیب و فرسایش یکسان بود. به رغم پذیرش اثربخشی شاخص قدرت جریان بر فرسایش خاک (کنفورتی و همکاران ۲۰۱۱)، نتایج این پژوهش نشان داد که کاربری زمین عامل مؤثر و غالبی بر فرآیندهای فرسایش خاک و تحویل رسوب در دامنه‌ها است. این یافته‌ها با نتایج ژائو و همکاران (۲۰۲۲) مبنی بر تأثیر کاربری زمین به دلیل ایجاد تغییر پویا در پوشش گیاهی در طول سال و تغییر در اندازه دست‌خوردگی خاک، هم‌راستا است. از سوى دیگر، پوشش گیاهی بوته‌ای و گیاهان چندسلله و زبری سطحی طبیعی در سطح خاک در مراتع باعث می‌شود که رواناب‌های ایجاد شده تا حد امکان به شکل سطحی باقی‌مانده و تجمع و متمرکز نشوند. از این رو، قدرت جریان نیز افزایش نخواهد یافت (می تنزو همکاران ۲۰۱۲).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش بیانگر آن است که اندازه‌گیری دقیق فرسایش و رسوب و بودجه‌بندی اجزای رسوب در آبخیزها با استفاده از روش‌های قدیمی که هزینه‌بر و وقت‌گیر هستند، مقرون به صرفه نیست. از این رو، امروزه استفاده از مدل رقومی ارتفاع با دقت زیاد برای تهیه متغیرهای زودیافت (سنج‌های پستی‌بلندی) و همچنین اندازه‌گیری فرسایش و رسوب با استفاده از سزیم-۱۳۷ سبب شده تا در کمترین زمان لازم نتایج دقیقی از اندازه فرسایش و رسوب و اجزای بودجه رسوب منطقه مطالعه شده به دست آید. از این رو، در این پژوهش مدل‌سازی اجزای بودجه رسوب با استفاده از سنج‌های پستی‌بلندی در زیرآبخیز شاهد معرف آبخیز خامسان انجام شد. رابطه‌های وایزی برای برآورد اجزای بودجه رسوب با استفاده از سنج‌های پستی‌بلندی ارائه شد. ناحیه داخلی آبخیز خامسان شامل یک دشت کم‌شیب با کاربری زراعت دیم، غالب بود که تا بخش‌هایی از دامنه‌های پرشیب پیرامون ادامه یافته و مشابه این شرایط در زیرآبخیزها و از جمله زیرآبخیز شاهد نیز مشاهده شد. شرایط تغییرات کاربری زمین از بالادست تا پائین‌دست دامنه‌های پیرامون زمین‌های دیم نسبتاً مشابه بود. از این رو، معادله‌های وایزی ارائه شده در این پژوهش قابلیت استفاده در دامنه‌های آبخیز معرف-زوجی خامسان و نیز دیگر آبخیزهای مشابه را دارد. با توجه به نقش مهم کاربری زمین در تولید فرسایش و رسوب، پیشنهاد می‌شود هرگونه اصلاح و تغییر کاربری زمین در منطقه مطالعه شده بر مبنای استعداد زمین و

نتایج بررسی‌های آمایش سرزمین انجام شود. همچنین، با توجه به اثرات بیشتر کاربری زمین در مقایسه با دیگر عامل‌های فیزیکی آبخیز، تثبیت بقایای گیاهان در سطح خاک و استفاده از کشاورزی بدون خاک‌ورزی، می‌تواند نقش مهمی در مهار فرسایش داشته باشد. از این رو، پیشنهاد می‌شود تحلیل رابطه سنج‌های پستی‌بلندی با اجزای بودجه رسوب در مقیاس کل آبخیز و در شرایط کاربری‌های غیرزراعی نیز انجام شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

رضا زارعی: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، منابع، نگارش نسخه اولیه مقاله.

عبدالواحد خالدی‌درویشان: مفهوم‌سازی، راهنمایی، روش‌شناسی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، ویرایش و بازبینی مقاله.

محمدرضا زارع: راهنمایی، روش‌شناسی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري.

پائولو پورتو: راهنمایی، روش‌شناسی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري.

فهرست منابع

- Abbasi M, najafi nejad A, berdi sheikh V, azim mohseni M. 2017. Investigating land use and slope effects on soil properties, runoff and sediment using rainfall simulator case study of kechik Watershed in Golestan Province. *Environmental Erosion Research*. 6: 104-24. (In persian).
- Afshar FA, Ayoubi S, Jalalian A. 2010. Soil redistribution rate and its relationship with soil organic carbon and total nitrogen using ¹³⁷Cs technique in a cultivated complex hillslope in western Iran. *Journal of Environmental Radioactivity*. 101(8):606-614. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.03.008>
- Arata L, Meusbarger K, Frenkel E, A'Campo-Neuen A, Iurian AR, Ketterer ME, Mabit L, Alewell C. 2016. Modelling deposition and erosion rates with radionuclides (MODERN) e Part 1: A new conversion model to derive soil redistribution rates from inventories of fallout radionuclides. *Journal of Environmental Radioactivity*. 162-163:45-55. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.05.008>
- Bayat R, Moradi S. 2014. Review of research conducted on the sediment delivery ratio. *Extension and Development of Watershed Management*. 2(5): 27-36. (In persian).
- Cammeraat LH. 2002. A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. *Earth Surface Processes and Landforms*. 27(11): 1201-1222. <https://doi.org/10.1002/esp.421>
- Cerdan O, Govers G, Le Bissonnais Y, Van Oost K, Poesen J, Saby N, Dostal T. 2010. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. *Geomorphology*. 122(1-2): 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.06.011>
- Cerdan O, Le Bissonnais Y, Govers G, Lecomte V, Van Oost K, Couturier A, Dubreuil N. 2004. Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy. *Journal of Hydrology*. 299(1-2):4-14. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.02.017>
- Chiu YJ, Chang KT, Chen YC, Chao JH, Lee HY. 2011. Estimation of soil erosion rates in a subtropical mountain watershed using ¹³⁷Cs radionuclide. *Natural Hazards*. 59(1): 271-284. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9749-0>
- Collins AL, Walling DE, Leeks GJL. 1997. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique. *Catena*. 29:1-27. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(96\)00064-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00064-1)
- Conforti M, Aucelli PP, Robustelli G, Scarciglia F. 2011. Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy). *Natural Hazards*. 56(3): 881-898. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9598-2>
- Du P, Walling DE. 2011. Using ¹³⁷Cs measurements to investigate the influence of erosion and soil redistribution on soil properties. *Applied Radiation and Isotopes*. 69(5): 717-726. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.01.022>
- Evrard O, Lacey PJ, Huon S, Lefevre I, Sengtaeuanghoung O, Ribolz O. 2016. Combining multiple fallout radionuclides (¹³⁷Cs., ⁷Be., ²¹⁰Pbex) to investigate temporal sediment source dynamics in tropical ephemeral river systems. *Journal of Soils Sediments*. 16: 1130-1144. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1316-y>
- farhoodi M, mirzaei H, kavayan A, safari A. 2015. Comparison and evaluation of different methods to estimate sediment delivery ratio in three different climates of Iran. *Geography and Environmental Planning*. 26(3): 255-274. (In Persian).
- Glenn NF, Streutker DR, Chadwick DJ, Thackray GD, Dorsch SJ. 2006. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*. 73: 131-148. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.006>
- Govers G, Quine TA, Desmet PJ, Walling DE. 1996. The relative contribution of soil tillage and overland flow erosion to soil redistribution on agricultural land. *Earth Surface Processes and Landforms*. 21(10): 929-946. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199610\)21:10<929::AID-ESP631>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199610)21:10<929::AID-ESP631>3.0.CO;2-C)
- Govers G, Van Oost K, Poesen J. 2006. Responses of a semi-arid landscape to human disturbance: A simulation study of the interaction between rock fragment cover, soil erosion and land use change. *Geoderma*. 133: 19-31. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.03.034>
- Heckrath G, Djurhuus J, Quine TA, Van Oost K, Govers G, Zhang Y. 2005. Tillage erosion and its effect on soil properties and crop yield in Denmark. *Journal of Environmental Quality*. 34(1):312-324. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0312a>
- Jiang P, Thelen KD. 2004. Effect of soil and topographic properties on crop yield in a north-central corn-soybean cropping system. *Agronomy Journal*. 96(1):252-258. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0252>
- Khaledi Darvishan A, Sadeghi SHR, Homae M, Arabkhedri M. 2021. Sediment Budgeting in Laboratory Plots under Rainfall Simulation.

- Watershed Management Research. 34(2): 15-31. (In Persian).
<https://doi.org/10.22092/wmej.2020.123819.1164>
- Kikuchi T, Kohzu A, Ouchi T, Fukushima T. 2020. Quantifying the sources and removal of nitrate in riparian and lotic environments based on land use and topographic metrics of the watershed. *Ecological Indicators*. 116: 106535. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106535>
- Krein A, Petticrew E, Udelhoven T. 2003. The use of fine sediment fractal dimensions and colour to determine sediment sources in a small watershed. *Catena*. 53(2): 165-179. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00021-3)
- Li M, Shi, X Shen Z, Yang E, Bao H, Ni Y. 2019. Effect of hillslope aspect on landform characteristics and erosion rates. *Environmental Monitoring and Assessment*. 191: 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7760-1>
- Li X, McCarty GW, Karlen DL, Cambardella CA. 2018. Topographic metric predictions of soil redistribution and organic carbon in Iowa cropland fields. *Catena*. 160: 222-232. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.026>
- Liu QQ, Singh VP, Xiang H. 2005. Plot erosion model using gray relational analysis method. *Journal of Hydrologic Engineering*. 10(4):288-294. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2005\)10:4\(288\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:4(288))
- Maetens W, Vanmaercke M, Poesen J, Jankauskas B, Jankauskiene G, Ionita. I. 2012. Effects of land use on annual runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean: A meta-analysis of plot data. *Progress in Physical Geography*. 36(5):599-653. <https://doi.org/10.1177/0309133312451303>
- Masroor M, Sajjad H, Rehman S, Singh R, Rahaman MH, Sahana M, Avtar R. 2021. Analysing the relationship between drought and soil erosion using vegetation health index and RUSLE models in Godavari Middle Sub-basin, India. *Geoscience Frontiers*. 13(2): 101312. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101312>
- Meshkat M, Amanian N, Talebi A, Kiani-Harchegani M, Rodrigo-Comino J. 2019. Effects of roughness coefficients and complex hillslope morphology on runoff variables under laboratory conditions. *Water*. 11(12): 2550. <https://doi.org/10.3390/w11122550>
- Mombini A, Amanian N, Talebi A, Kiani-Harchegani M, Rodrigo-Comino J. 2021. Surface roughness effects on soil loss rate in complex hillslopes under laboratory conditions. *Catena*. 206: 105503. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105503>
- Morgan RPC, Morgan DDV, Finney HJ. 1984. A predictive model for the assessment of soil erosion risk. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 30: 245-253. [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(84\)80025-6](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80025-6)
- Nosrati K, Govers G, Ahmadi H, Sharifi F, Amoozegar M, Merckx R, Vanmaercke M. 2011. An exploratory study on the use of enzyme activities as sediment tracers: biochemical fingerprints? *International Journal of Sediment Research*. 26: 136-151. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(11\)60082-6](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(11)60082-6)
- Park YS, Kim J, Kim NW, Kim SJ, Jeon JH, Engel BA, Lim KJ. 2010. Development of new R, C and SDR modules for the SATEEC GIS system. *Computers and Geosciences*. 36(6): 726-734. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.11.005>
- Porto P, Callegari G. 2022. Comparing long-term observations of sediment yield with estimates of soil erosion rate based on recent ¹³⁷Cs metrics. Results from an experimental catchment in Southern Italy. *Hydrological Processes*. 36(9): e14663. <https://doi.org/10.1002/hyp.14663>
- Rajaei H, khodashenas S, Esmaili K. 2017. Laboratory Analysis of Energy Losses in Gabion Steeped Spillways with and without Sedimentation at Upstream. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 11(5):900-910. (In Persian).
- Ritchie JC, Ritchie CA. 2007. Bibliography of publications of ¹³⁷-cesium studies related to erosion and sediment deposition. Available from: <https://www.ars.usda.gov/Main/docs.htm?docid %415237>
- Rodrigo Comino J, Iserloh T, Lassu T, Cerdà A, Keestra SD, Prosdocimi M, Brings C, Marzen M, Ramos MC, Senciales JM, Sinoga JR. 2016. Quantitative comparison of initial soil erosion processes and runoff generation in spanish and german vineyards. *Science of the Total Environment*. 565:1165-1174. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.163>
- Sac MM, Ugur A, Yener G, Ozden B. 2008. Estimates of soil erosion using cesium-137 tracer models. *Environmental Monitoring Assessment*. 136: 461e467. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9700-8>
- Sadeghi SHR, Raeisi MB, Hazbavi Z. 2018. Influence of freeze-only and freezing-thawing cycles on splash erosion. *International Soil and Water Conservation Research*. 6(4): 275-279. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.07.004>
- Samadzadeh R, Pourmohammad S. 2018. Modeling soil erosion and sediment production using morgan-morgan finney (mmf) method in the Gazaz-Chay Khalkhal Watershed. *Quantitative Geomorphological Research*. 4(2): 75-89.

- Sedighi F, Darvishan AK, Zare MR. 2021. Effect of watershed geomorphological characteristics on sediment redistribution. *Geomorphology*. 375: 107559. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107559>
- Sedighi F, Khaledi Darvishan A, Golosov V, Zare MR, Spalevic V. 2022. Influence of land use on changes of sediment budget components: western Iran case study. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 46(6): 838-851. <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3046>
- Sedighi F, Khaledi Darvishan A, Zare MR. 2020. Assessment of the Slope Gradient on the Estimated Erosion and Sediment Delivery Ratio by Using ^{137}Cs in the Khamsan Representative Watershed. *Watershed Management Research*. 33(3): 2-19. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/wmej.2019.127505.1252>
- Sharib J, Tugi DFA, Ishak MT, Anthonius C, Adziz MIA, Jaffary NAM. 2023. A study of soil erosion and sedimentation between two different seasons in sembrong catchment using cesium-137. *Jurnal Sains Nuklear Malaysia*. 35(2): 58-68.
- Sherestha M.k. 2010. Soil erosion modeling using remote sensing and GIS, Case of study of Jhikhu Khola Watershed, Nepal. *Journal of Nepal Geological Society*. 41: 7-15.
- Tahoori P, Parvin MR. 2016. conservation and sustainable use of soil and its stand in international environmental law. *Journal of Environmental Science and Technology*. 18(2): 145-161. <https://sid.ir/paper/356203/en>
- Van den Putte A, Govers G, Diels J, Gillijns K, Demuzere M. 2010. Assessing the effect of soil tillage on crop growth: A meta-regression analysis on european crop yields under conservation agriculture. *European Journal of Agronomy*. 33: 231-241.
- Vannoppen W, Vanmaercke M, De Baets S, Poesen J. 2015. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates. *Earth-Science Reviews*. 150: 666-678. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.08.011>
- Velasco H, Astorga RT, Joseph D, Antoine JS, Mabit L, Toloza A, Walling DE. 2018. Adapting the Caesium-137 technique to document soil redistribution rates associated with traditional cultivation practices in Haiti. *Journal of Environmental Radioactivity*. 183: 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.12.008>
- Venteris ER, McCarty GW, Ritchie JC, Gish T. 2004. Influence of management history and landscape variables on soil organic carbon and soil redistribution. *Soil Science*. 169(11): 787-795. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000148742.75369.55>
- Walling DE, He Q, Whelan PA. 2003. Using ^{137}Cs metrics to validate the application of the AGNPS and ANSWERS erosion and sediment yield models in two small devon catchments. *Soil and Tillage Research*. 69:27-43. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00126-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00126-5)
- Walling DE, He Q, Zhang Y. 2014. Conversion models and related software. In: *Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies*. Iaea-Tecdoc-1741: 125-148.
- Walling DE, Zhang Y, He Q. 2007. Models for converting metrics of environmental radionuclide inventories (^{137}Cs , Excess ^{210}Pb , and ^7Be) to estimates of soil erosion and deposition rates (Including Software for Model Implementation), Department of Geography, University of Exeter, UK. 87 p.
- Wang H, Zhang GH, Li NN, Zhang BJ, Yang HY. 2019. Soil erodibility as impacted by vegetation restoration strategies on the Loess Plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*. 44(3):796-807. <https://doi.org/10.1002/esp.4531>
- Xie Y, Yuan F, Zhan T, Kang C, Chi Y. 2018. Geochemical and isotopic characteristics of sediments for the Hulun Buir Sandy Land, northeast China: implication for weathering, recycling and dust provenance. *Catena*. 160: 170-184. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.008>
- Young CJ, Liu S, Schumacher JA, Schumacher TE, Kaspar TC, McCarty GW, Jaynes DB. 2014. Evaluation of a model framework to estimate soil and soil organic carbon redistribution by water and tillage using ^{137}Cs in two US Midwest agricultural fields. *Geoderma*. 232: 437-448. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.05.019>
- Zapata F. (Ed.). 2002. Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environment radionuclides. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. <https://doi.org/10.1007/0-306-48054-9>
- Zarei R, Khaledi Darvishan A. 2020. The role of surface sealing caused by subsequent rainfall in the runoff components at the Kojour Watershed Mazandaran. *Watershed Management Research*. 33(4): 77-93. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/wmej.2020.123725.1161>
- Zhao J, Wang, Z, Dong Y, Yang Z, Govers G. 2022. How soil erosion and runoff are related to land use, topography and annual precipitation: Insights from a meta-analysis of erosion plots in China. *Science of the Total Environment*. 802: 149665. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149665>



Analysis of the Relationship between Sediment Budget Components and Topographic Metrics at the Hillslope Scale in Control Sub-watershed of the Khamsan Representative-paired Watershed

Reza Zarei¹, **Abdulvahed Khaledi Darvishan^{2*}**, **Mohamad Reza Zare³**, **Paolo Porto⁴**

1- Former Ph.D. Student, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Iran

2- Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

3- Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

4- Professor, Department of Agraria, University Mediterranea of Reggio Calabria, Italy

Extended Abstract

Introduction and Goal

Given the critical importance of soil and humanity's reliance on it for food production worldwide, especially in developing countries, one of the most important and fundamental problems today is soil erosion and degradation. The average soil erosion in the country is estimated to be around 16.5 tons per hectare, and soil erosion in Iran is approximately 2 to 2.5 times higher than the average in Asia and 5 to 6 times higher than the global average, predominantly occurring in slopes and hilly areas due to poor vegetation cover. Considering the advancements and development of erosion and sediment methods, along with the costs and lack of accuracy in traditional methods such as the use of erosion pins and plots, the use of radionuclides, especially ¹³⁷Cs, for measuring the amount of erosion and deposition and sediment budget components is of great importance today. One of the important advantages of these methods, which has attracted the attention of researchers especially in recent decades, is the possibility of measuring soil redistribution due to water erosion in slopes and watersheds and even on the scale of laboratory plots. Accurately estimation of sediment budget components is essential for estimating erosion rates and planning effective soil conservation measures in any region. Therefore, this research aims to estimate the sediment budget components at the hillslope scale using topographic metrics.

Materials and Methods

Due to the possibility of using the results of previous researches and the availability of a digital elevation model with a spatial accuracy of one meter obtained from a drone photogrammetry, the present study was conducted in the control sub-watershed of the Khamsan representative paired watershed in Kurdistan province.

Article Type: Research Article

***Corresponding Author's E-mail:** a.khaledi@modares.ac.ir

Citation: Zarei, R., Khaledi Darvishan, A., Zare, M.R., Porto, P. 2025. Analysis of the Relationship Between Sediment Budget Components and Topographic Metrics at the Hillslope Scale in Control Sub-watershed of the Khamsan Representative-paired Watershed. Watershed Management Research. 38(2):118-138.

DOI: 10.22092/WMRJ.2025.367713.1602

Received: 16 November 2024, **Received in revised form:** 07 January 2025, **Accepted:** 18 March 2025

Published online: 22 June 2025

Watershed Management Research, Vol. 38, No. 2, Ser. No:147, Summer 2025, pp. 118-138.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



To investigate the effect of the slope angle and curvature on erosion and sedimentation, soil sampling was done at 31 points in a 200-m grid with a systematic-random method and also at 48 points on six transects. After preparation of the soil samples including air and freeze drying and passing through a 63-micron sieve, 293 grams of soil were sent to the laboratory in special containers for the measurement of ^{137}Cs . Also, distribution maps of topographic metrics were extracted using the digital elevation model in ArcGIS 10.8 software. Then, a distribution map of soil erosion/redistribution was prepared using the ^{137}Cs inventory points and work unit approach. Additionally, the components of the sediment budget including total erosion, total sedimentation, net erosion and sediment delivery ratio were calculated for 14 hillslopes in the studied sub-watershed. Then, in order to check the normality of the data in the 14 studied hillslopes, the Kolmogorov Smirnov test was used, and according to the normality of the data, the correlation between the topographic metrics and the sediment budget components at the hillslope scale was checked using the Pearson correlation test. Finally, regression equations were presented to estimate the sediment budget components using topographic metrics.

Results and Discussion

According to the results of this study on the 14 studied hillslopes, specific total erosion ranged from 0.93 to 7.52 $\text{t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, while the specific total deposition ranged from 0.03 to 0.51 $\text{t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$. These findings indicated that a significant percentage of erosion had been exported from the hillslopes. Specific net erosion was also calculated between 0.79 and 7.45 $\text{t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, which indicates the sediment delivery ratio between 0.84 and 1.00 for the investigated hillslopes. The results indicate that the correlation between erosion (total and net) and sediment delivery ratio with slope angle, topographic factor, and stream power index is significant and negative. These findings indicate the dominant effect of dryland farming on increased erosion in gentler slopes and downstream areas, in the upstream regions of the slopes, although the slope was steeper, erosion was minimal due to less soil disturbance and rangeland usage. Consequently, in this study, the interpretation of relationships and regression equations utilized the results of land use and its changes along the slope profile.

Conclusion and Suggestions

The inner area of the Khamsan watershed includes a low-slope plain with the predominant land use of rainfed agriculture, which continues to parts of the surrounding steep slopes, and similar conditions can be seen in the sub-watersheds, including the control sub-watershed. The conditions of land use changes from the upstream to the downstream of the hillslopes around the rainfed lands have relatively similar. Therefore, the regression equations presented in this study are applicable in the hillslopes of the Khamsan representative paired watershed and other similar watersheds. Finally, it is suggested to extract topographical metrics using digital height models with different spatial accuracies and use them in estimations. It is also recommended that a land management plan be developed for the studied area, taking into account the significant role of land use in erosion and sediment production, with adjustments and land use changes implemented based on the potential of each section.

Key words: Net erosion, sediment delivery ratio, slope curvature, soil redistribution, topographic wetness index

Article Type: Research Article

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Author's Contribution

Reza Zarei: Formal analysis and investigation, Resources, Writing - original draft preparation.

Abdulvahed Khaledi Darvishan: Conceptualization, Supervision, Methodology, Formal analysis and investigation, Writing - manuscript editing.

Mohamad Reza Zare: Supervision, Methodology, Formal analysis and investigation.

Paolo Porto: Supervision, Methodology, Formal analysis and investigation.