

شناسایی پهنه‌های مستعد فرسایش در ارتباط با محدوده‌های بیشینه شتاب زمین با استفاده از مدل‌های منطق فازی و آنتروپی شانون در حوضه آبخیز تالار، استان مازندران

نقیسه اشتری - دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.
کاظم نصرتی* - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۷ تأیید نهایی: ۱۴۰۳/۰۹/۰۲

چکیده

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین پدیده‌های طبیعی در حوضه‌های آبخیز است. شاخص‌های بسیاری مانند شیب، بارش، زمین‌شناسی و سازندها بر تخریب ساختمان خاک و تولید فرسایش نقش دارند. هدف از این مطالعه پهنه‌بندی فرسایش و بررسی شاخص بیشینه شتاب زمین در کنار شاخص‌های معرف در فرسایش در حوضه آبخیز تالار است. بدین منظور شاخص‌های فرساینده‌گی، فرسایش‌پذیری، طول شیب، مدیریت پوشش گیاهی و شاخص بیشینه شتاب زمین برای حوضه آبخیز تالار محاسبه گردید. سپس لایه‌های تولید شده به عنوان لایه‌های پایه در مدل‌های پهنه‌بندی منطق فازی و آنتروپی شانون قرار گرفتند. نتایج مدل فازی با توجه به عامل مهم بیشینه شتاب زمین پهنه‌بندی دقیقی از فرسایش را ارائه نکرد اما در مدل آنتروپی به دلیل استفاده از نقاط نمونه از زمین و با بررسی شاخص‌ها مشخص گردید که بیشترین خطر وقوع فرسایش در مکان‌هایی است که منحنی‌های شتاب ضرایب بالاتری از شتاب زمین را به خود اختصاص داده‌اند. نتایج نشان داد محدوده خطر بسیار زیاد در مدل آنتروپی با ۱۳/۵ درصد از مساحت حوضه شامل رخساره‌های فرسایشی اعم از سطحی، شیبی، خندقی و کنار رودخانه ای است و به لحاظ بیشینه شتاب زمین نیز در محدوده منحنی‌های شتاب بالا در سطوح $(+0/6 - +0/5)$ قرار دارد. قرارگیری بیشینه شتاب زمین در سطوح بالای خطر $(+0/6 - +0/5)$ و وجود گسل‌های فعال و لرزه‌خیزی بیشتر در زیرحوضه ۱ سبب تخمین بیشتر پهنه‌های خطر در طبقات زیاد و خیلی زیاد شده است. علاوه بر این شاخص مهم بیشینه شتاب زمین نیز از طریق خردشدن و تضعیف سنگ‌ها در دامنه‌ها به صورت غیر مستقیم بر دیگر شاخص‌ها مانند فرسایش‌پذیری و طول شیب تاثیر می‌گذارد و سبب افزایش عوامل فرسایشی و فرسایش‌پذیری می‌گردد. این نتایج با ایجاد یک مبنای علمی برای هدف‌گیری سیاست‌های کاهش فرسایش و رسوب مهم است.

واژگان کلیدی: پهنه‌بندی، فرسایش، بیشینه شتاب زمین، حوضه آبخیز تالار.

مقدمه

فرسایش خاک یک فرآیند ژئومورفیک است که ذرات خاک، قطعات سنگ، دانه‌های خاک و مواد آلی را از محل اولیه خود جدا می‌کند و سپس با فرآیندهای مختلف به مکان دیگری منتقل می‌کند. (پوزن^۱ و همکاران، ۲۰۱۸: ۶۵). از جمله اثرات نامطلوب فرسایش خاک در محل و خارج از محل می‌توان به تخریب زمین، آلودگی غیرنقطه‌ای، رسوب‌گذاری در دریاچه‌ها و مخازن (لال، ۲۰۰۳: ۴۳۸؛ پیمنتل^۲ و همکاران، ۱۹۹۵: ۱۱۱۸؛ پوزن، ۲۰۱۸: ۶۵) اشاره کرد. بررسی‌های منطقه‌ای فرسایش خاک اولین گام برنامه‌ریزی حفاظت از خاک است. (دانگ^۳ و همکاران، ۲۰۲۳: ۶۶۰). تعداد روزافزون مطالعات نشان می‌دهد که تغییرات در میزان فرسایش و تولید رسوبات حوضه آبریز، اغلب با لرزه‌خیزی همبستگی قوی دارد (دادسون^۴ و همکاران ۲۰۰۴: ۷۳۳؛ وانمارک^۵ و همکاران، ۲۰۱۴: ۴). یکی از عواملی که باعث افزایش فرسایش و رسوب در مناطق مختلف می‌شود، فعالیت‌های لرزه‌خیزی و شاخص بیشینه شتاب زمین است (وانمارک و همکاران، ۲۰۱۴: ۱). بیشینه شتاب زمین برابر با حداکثر شتاب زمینی است که در هنگام لرزش زمین لرزه در یک مکان رخ داده و برابر است با دامنه بزرگترین شتاب مطلق ثبت شده در یک شتاب‌نگار در یک مکان در طول یک زلزله خاص (داگلاس^۶ ۲۰۰۳: ۵). از جمله نتایج فعالیت‌های لرزه‌خیزی در سنگ‌ها افزایش میزان هوازدگی و حساسیت به فرسایش است (کونز^۷ و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۶۸؛ پرتنگا و بیرمان، ۲۰۱۱: ۵). بنابراین، در نظر گرفتن تأثیر خطرات لرزه‌ای بر فرسایش خاک در حوضه‌های آبخیز مهم است. در این زمینه، کنترل و مدیریت فرسایش و رسوب اضافی برای کاهش ورودی‌ها به رودخانه‌ها دارای اهمیت ویژه‌است (مینلا^۸ و همکاران، ۲۰۰۸: ۳۱). در این راستا مدل‌هایی مانند معادله جهانی فرسایش خاک^۹، منطق فازی و آنتروپی شانون از جمله مدل‌هایی هستند که می‌توانند پهنه‌های فرسایشی را در حوضه‌های آبخیز بر اساس لایه‌های ورودی طبقه‌بندی کنند.

معادله جهانی فرسایش خاک RUSLE، یکی از پرکاربردترین مدل‌های تجربی در مطالعات فرسایش خاک در کاربری‌های مختلف است (لوکا و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۱). بنابراین، می‌توان از آن در تخمین هدررفت خاک و سپس برآورد نسبت تحویل رسوب در حوضه‌های کشور که اغلب دارای کاربری غیرکشاورزی هستند، استفاده نمود. با این حال پیش از استفاده از مدل‌های هیدرولوژی و فرسایش خاک، باید دقت آنها با داده‌های مشاهداتی مورد ارزیابی قرار گیرد تا بتوان به نتایج آنها در برآورد فرسایش خاک اعتماد کرد (نور و عرب‌خدری، ۲۰۰۲: ۱۴۵).

منطق فازی برای اولین بار توسط پروفیسور زاده^{۱۰} دانشمند ایرانی الاصل دانشگاه کالیفرنیا در سال ۱۹۶۵ مطرح شد (امینی فسخودی، ۱۳۸۴: ۴۱). تئوری فازی از توابع عضویت استفاده می‌کند. توابع عضویت این امکان را فراهم می‌کنند تا میزان درجه یک عنصر به مجموعه را بین اعداد یک تا صفر انتخاب کنیم (لین^{۱۱} و همکاران، ۱۹۹۶: ۱۵).

^۱ Poesen^۲ Pimentel^۳ Dong^۴ Dadson^۵ Vanmaercke^۶ Douglas^۷ Koons^۸ Minella^۹ RUSLE^{۱۰} L. A. Zadeh^{۱۱} Lin

آنتروپی مفهوم گسترده‌ای در علوم اجتماعی و فیزیک است که با بهره‌گیری از تئوری اطلاعات برای نخستین بار توسط کلود ال وود شانون (شانون^۱، ۱۹۴۸: ۳۷۹) ارائه شده‌است. آنتروپی مقدار عدم اطمینان در توزیع احتمال گسسته از محتوای اطلاعاتی یک پیام است (مقیم‌ی و نگهبان، ۱۳۹۱: ۲). مدل آنتروپی شانون عمدتاً به منظور رتبه‌بندی و ارزیابی در علوم مختلف به کار می‌رود (اصغر پور، ۱۳۸۹: ۱۰).

از جمله مطالعات انجام شده در زمینه فرسایش و ارتباط بیشینه شتاب زمین با عوامل کنترل‌کننده فرسایش می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد. فیض نیا و همکاران (۱۳۸۴) در استان گلستان فرسایش سطحی خاک‌های لسی را مطالعه کردند. بدین منظور تاثیر عوامل شیمیایی، فیزیکی و آب وهوایی را در تولید رسوب بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که خاک‌های لسی مناطق معتدل تا مرطوب نسبت به خاک‌های لسی مناطق خشک نرخ رسوب‌زایی کمتری دارند. یمانی و همکاران (۱۳۹۱) در حوضه آبریز سجادرود فرسایش‌پذیری سازندها را مطالعه کردند. بدین منظور مورفوسکوپی رسوبات معرف رودخانه‌ای را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که آهک و ماسه‌سنگ فرسایش‌پذیری بیشتری داشته‌اند و سنگ‌های سیلت و شیل به دلیل رخنمون و کمتر در حوضه از تولید رسوب کمتری برخوردار بوده‌اند. نگهبان و حیدری (۱۳۹۴) در حوضه آبخیز کرچمریز به بررسی ویژگی‌های نو زمین‌ساخت، فرسایش و رسوب پرداختند. بدین منظور از شاخص‌های کمی استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد فعالیت‌های نوزمین‌ساختی سبب فرسایش و رسوب دهی بالا در حوضه شده‌است. مددی و بلوایی (۱۳۹۷) به منظور ارزیابی خطر فرسایش خاک در حوضه آبریز سمیره چنار از مدل منطق فازی، فناوری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده کردند. جهت آماده‌سازی لایه‌های پایه از پارامترهای تاثیرگذار در فرسایش شامل شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، بارش، خاک و آبراهه استفاده کردند. نتایج حاکی از آن است که عملگر گامای فازی ۰/۹ با ضریب کاپای ۰/۸۳، در پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک در حوضه آبریز سمیره چنار دقت بسیار خوبی دارد. بر اساس پهنه‌بندی صورت گرفته با استفاده از عملگر گاما فازی ۰/۹، به ترتیب ۱۶/۵۹، ۳۱/۳۷، ۲۷/۷۲، ۱۷/۹۸ و ۶/۳۴ درصد از مساحت منطقه در کلاس‌های فرسایش خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌است. محمدخان و همکاران (۱۳۹۸) کارایی مدل آنتروپی را در پهنه‌بندی میزان فرسایش در حوضه آبخیز کند در بالادست سد لتیان مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور بر پایه رخساره‌های ژئومورفولوژیکی، ماتریس آنتروپی و در نهایت نقشه پهنه‌بندی فرسایش را استخراج کردند. یافته‌ها نشان داد که عامل شیب با ۸۱/۲۷ درصد بیشترین تاثیر را در میان عوامل دیگر دارد. ۵/۶۴ درصد از منطقه در محدوده فرسایش متوسط و شدید قرار گرفته‌است که در محدوده رخساره‌های آبراهه‌ای و شیاری قرار دارد. جوکار سرهنگی و دهقان چاچکامی (۱۴۰۱) به مطالعه پهنه‌بندی شدت فرسایش خاک حوضه بلده با استفاده از مدل‌های RUSLE و ICONA پرداختند. بدین منظور فاکتورهای مدل RUSLE و ICONA را محاسبه کردند. نتایج نشان داد تطابق طبقات فرسایش مدل ICONA با خروجی BLM به عنوان نقشه مرجع اندکی بیشتر است. اشتری و همکاران ۱۴۰۲ به تخمین سهم نسبی رسوبات سطحی و زیرسطحی در زیرحوضه ۱ و ۲ حوضه تالار پرداختند. بدین منظور از روش منشایی رسوبات استفاده کردند. نتایج نشان داد مدل غیرترکیبی بیسین در زیرحوضه ۱ در رویکرد اول بیشترین سهم در واحد ماسه سنگ و کنگلومرا و رویکرد دوم بیانگر بالا بودن مشارکت محدوده‌های بیشینه شتاب زمین در زیرحوضه ۱ در انتقال رسوبات است. عابدینی و پاسبان (۱۴۰۳) به منظور پهنه‌بندی میزان فرسایش خاک حوضه آبریز خیاوچای مشکین شهر و ارتباط آن با شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی از معادله جهانی فرسایش خاک استفاده کردند. وانمارک و همکاران (۲۰۱۴) اثر فعالیت لرزه‌ای بر کنترل رسوبات در ۱۴۶ حوضه در اروپا بررسی کردند. نتایج نشان داد که عامل بیشینه شتاب زمین همبستگی بیشتری نسبت به عوامل دیگر مانند توپوگرافی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی و اقلیم با تغییرات تولید رسوب دارد. همچنین عامل فعالیت لرزه‌ای می‌تواند میزان تولید رسوب را تخمین بزند. اهمیت فعالیت

^۱ Shannon

لرزه‌خیزی از آن جهت بالاست که حتی در حوضه‌هایی که عامل لرزه‌خیزی نیز ضعیف هست هم می‌توان تغییرات تولید رسوب را به همراه عوامل دیگری که در تولید رسوب مشارکت دارند توضیح داد. هچت^۱ و اوپوچی^۲ (۲۰۱۷) به ارزیابی جهانی نرخ فرسایش در رابطه با تکتونیک پرداختند. به منظور درک مکانیسم‌ها و عوامل کنترل‌کننده نرخ فرسایش داده‌ها عوامل مرتبط با زمین‌ساخت، یعنی فاصله تا مرز صفحه تکتونیکی، بیشینه شتاب زمین و توزیع گسل را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که تکتونیک نقش عمده‌ای در تعیین نرخ فرسایش دارد، که تا حدی به شیب‌های تندتر تولید شده توسط جنبش‌های فعال پوسته قابل انتساب است. گروه‌های با نرخ فرسایش پایین نیز شامل بیشینه شتاب زمین کم هستند. گوسو^۳ و تیسپلینکو^۴ ۲۰۲۱ به بررسی تاثیر عامل‌های توپوگرافی، تکتونیک، اقلیم، الگوهای کاربری زمین، سنگ‌شناسی و بیشینه شتاب زمین در میزان تولید رسوب، و فرسایش در منطقه قفقاز پرداختند. برای آشکار کردن روابط بین رسوب معلق و متغیرهای ارائه شده از روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی استفاده کردند. تجزیه و تحلیل همبستگی جزئی نشان داد که توپوگرافی و شاخص شیب نرمال شده از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر رسوب هستند، که این عوامل از شاخص بیشینه شتاب زمین تاثیر می‌پذیرند. نتایج نشان داد بیشینه شتاب زمین به طور قابل توجهی بر رسوب معلق در منطقه قفقاز تاثیر می‌گذارد، زیرا این ناحیه به منطقه چین‌خوردگی آلپ تعلق دارد. با تداوم حرکات در پوسته زمین عامل بیشینه شتاب زمین سبب جابه‌جایی سنگ‌ها در شیب‌های متفاوت می‌شود. بنابراین، تاثیر زمین‌ساختی بر فرآیندهای فرسایشی بسیار مهمتر از تاثیر اقلیم است. یانگ^۵ و همکاران ۲۰۲۱ در مطالعه‌ای به بررسی اثرات لرزه‌ای بر ۱۱ مدل خاک طبقه‌بندی شده پرداختند. برای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای مدل‌های مختلف خاک را تحت چهار احتمال بیشینه شتاب زمین، بیشینه سرعت زمین^۶، بیشینه جابجایی زمین^۷ و شتاب طیفی^۸ قرار دادند. نتایج نشان داد وقتی خاک سیلتی رسی در زمین و لایه‌های پایین خاک قرار داشته باشد، اثرات بیشینه شتاب زمین بر شدت حرکت بالا ظاهر می‌شود. بنابراین تاسیسات مهندسی مهم باید از مکان‌هایی با خاک سیلتی رسی در بالای لایه خاک خودداری کنند. همچنین با افزایش تعداد لایه‌های خاک و شدت حرکت، اثر بیشینه شتاب زمین برای زلزله‌های بسیار نادر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، در مورد زلزله‌های بزرگ، هرچه تعداد لایه‌های میان خاک بیشتر باشد، اثر تقویتی حرکت زمین در دوره‌های طولانی‌تر مشخص می‌گردد. وو^۹ و همکاران ۲۰۲۲ به بررسی فرسایش زمین لغزش‌های لرزه‌ای ناشی از زلزله ونچوان در لانگمن شان پرداختند. به همین منظور روابط بین برآمدگی زمین‌ساختی، برش رودخانه، و بازده فرسایش زمین لغزش ناشی از زلزله و اثرات حرکت زمین بر الگوهای جفت شده را بررسی کردند. نتایج نشان داد حرکت قوی‌تر زمین تحت شرایط لرزش‌های مختلف (بیشینه شتاب زمین بالاتر از g ۰/۴ باعث افزایش راندمان فرسایش دامنه‌ها و کاهش همبستگی‌های غیرخطی در پاسخ به بالا آمدن زمین‌ساختی و برش رودخانه می‌شود. اشتري و همکاران ۲۰۲۳ به منشا یابی رسوبات در حوضه آبخیز تالار پرداختند. بدین منظور از روش تحلیل خطر احتمالاتی برای تخمین بیشینه شتاب زمین و رویکرد غیرترکیبی بیسین برای منشا یابی رسوبات استفاده کردند. نتایج

¹ Hecht

² Oguchi

³ Golosov

⁴ Tsyplenkov

⁵ Yang

⁶ Peak ground velocity (PGV)

⁷ Peak Ground Displacement (PGD)

⁸ Spectral acceleration (Sa)

⁹ Wu

نشان داد که زیرحوضه ۱ بیشترین سهم نسبی را در تولید رسوبات دارد. همچنین فعالیت‌های لرزه‌خیزی شامل بزرگا و فراوانی زلزله‌ها و عامل بیشینه شتاب زمین نقش بسیار مهمی در تولید رسوبات منطقه داشته است. داهال^۱ و همکاران ۲۰۲۳ به شبیه‌سازی حرکت زمین به منظور پیش‌بینی وقوع زمین لغزش‌ها در گورخا (نپال) پرداختند. بدین منظور از تداخل سنجی رادار دیافراگم مصنوعی و داده‌های حرکت قوی زمین استفاده شد. در نهایت مدلی بر اساس هشت پارامتر حرکت زمین ساخته شد. نتایج نشان داد زمانی که سرعت نوسان ذرات در اثر حرکات زمین به طور مداوم بالا باشد (زمان در مقایسه با تغییرات سرعت کوتاه مدت)، شیب بیشتر مستعد شکست خواهد بود. همچنین نتایج بیانگر آن بود که پارامترهای حرکت زمین نقش مرتبط‌تری در وقوع زمین لغزش دارند که این موضوع به کل جابجایی، محتوای فرکانس و مدت زمان لرزش مرتبط است. عناصری که اغلب در تجزیه و تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی نادیده گرفته می‌شوند. اکسی^۲ و همکاران ۲۰۲۴ به مطالعه فرآیند تضعیف شیب دامنه‌ها و حساسیت وقوع زمین لغزش پس از زلزله‌های شدید در ونچوان چین پرداختند. برای تعیین کمیت حداکثر کاهش مقاومت برشی دامنه‌ها، از داده‌های زلزله ۷/۹ ریشتری ونچوان چین و شاخص‌های توپوگرافی، پستی بلندی محلی و بیشینه شتاب زمین استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده این مطلب است که حداکثر کاهش مقاومت برشی دامنه‌ها بین ۶۰ تا ۷۵ درصد در محدوده بیشینه شتاب زمین g (۰/۹ - ۰/۵)، است. دی‌فیلیپو^۳ و همکاران ۲۰۲۴ به بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای در چینه‌شناسی نهشته‌های خاکی با سختی متوسط با استفاده از کد کامپیوتری پرداختند. بدین منظور مجموعه‌ای از ۳۰ پروفیل خاک با تغییر عمق سنگ بستر در محدوده ۲۰-۶۰ متر و با فرض یک سنگ بستر سازگار در نظر گرفته شد. مجموعه‌ای از تاریخچه‌های زمانی شتاب افقی، ثبت شده در سایت‌های رخنمون سنگ تقریباً مسطح، با دامنه، انرژی و محتوای فرکانس متغیر در فواصل وسیع به عنوان حرکات ورودی استفاده شد. نتایج تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که عامل تشدید چینه‌شناسی به طور قابل توجهی تحت تأثیر شتاب اوج رخنمون و عمق سنگ بستر است در حالی که تقریباً تحت تأثیر مرتب‌سازی داده‌ها با توجه به بزرگی زلزله قرار نمی‌گیرد.

با مرور پیشینه پژوهش مشخص می‌گردد که شناسایی مناطق بحرانی حوضه آبخیز در شاخص بیشینه شتاب زمین و نقش این مناطق در تولید رسوب و فرسایش خاک یکی از مباحثی است که کمتر مورد توجه محققان بوده است. بنابراین هدف از این مطالعه ۱- بررسی رابطه فرسایش خاک با فعالیت‌های لرزه‌خیزی و عوامل کنترل‌کننده فرسایش است که چگونه پهنه‌های با فرسایش بالا با محدوده‌های بیشینه شتاب زمین و سایر عوامل ارتباط دارند ۲- مقایسه کارایی دو مدل منطق فازی و آنتروپی در پهنه‌بندی فرسایش است.

منطقه مورد مطالعه

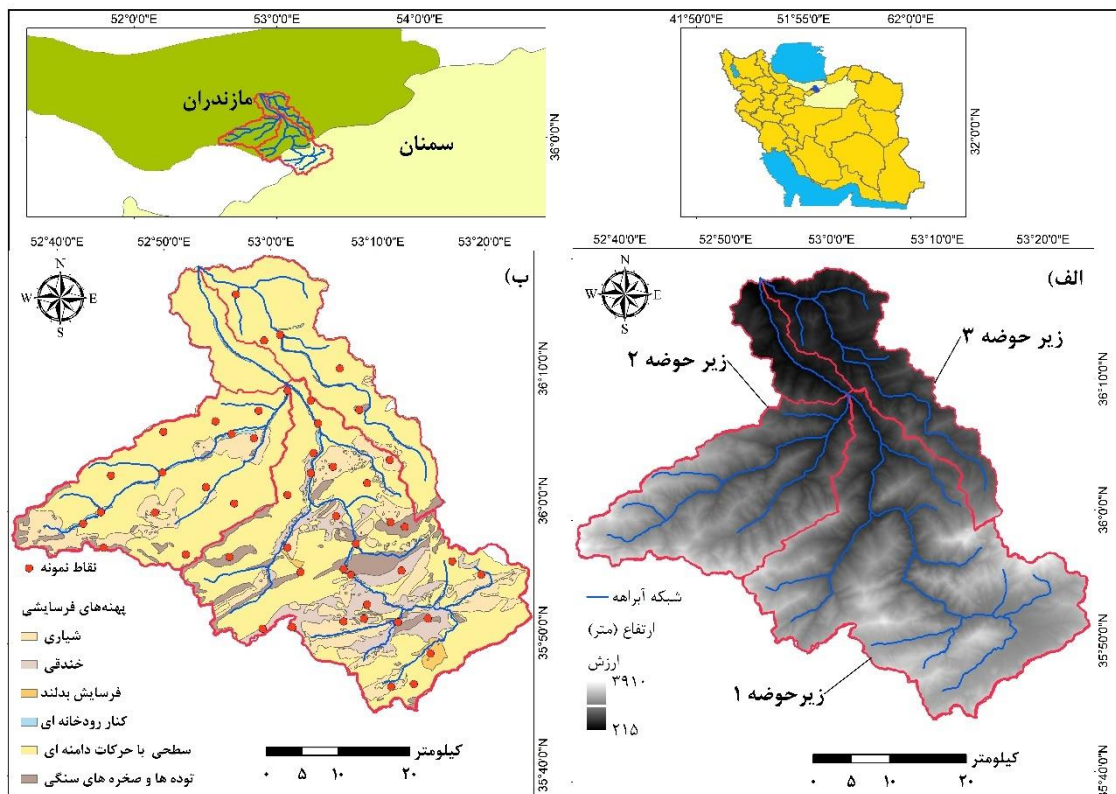
حوضه آبخیز تالار در دو طرف محور قائمشهر-تهران واقع گردیده است. از نظر مختصات جغرافیایی بین طول شرقی ۲۳° ۵۲' ۳۵" الی ۳۳° ۲۳' ۵۳" و عرض شمالی ۳۵° ۴۴' ۲۳" الی ۱° ۱۹' ۳۶" قرار دارد (شکل ۱ الف). خروجی حوضه در محل تقاطع رودخانه‌های تالار و کسلیان و خط راه‌آهن در داخل شهر شیرگاه مازندران می‌باشند. مساحت حوضه تالار ۲۱۰۵ کیلومتر مربع است. رودخانه اصلی این حوضه رودخانه تالار است که حدود ۱۰۰ کیلومتر طول دارد. بالاترین و پایین‌ترین ارتفاع در محدوده مطالعاتی ۲۱۵ متر و ۳۹۱۰ متر است. از سرشاخه‌ها و زیر حوضه‌های مهم حوضه می‌توان به زیر حوضه شماره ۱ که جریان رودخانه سرخ آباد، کبیر، شور آب زیر حوضه شماره ۲ که جریان رودخانه شش رودبار و رودخانه چرات زیرحوضه شماره ۳ جریان رودخانه کسلیان است اشاره نمود. مساحت کاربری‌های اصلی در حوضه تالار شامل زمین‌های

^۱ Dahal

^۲ Xi

^۳ Di Filippo

کشاورزی و باغات (۸۰/۸ کیلومتر مربع، ۳/۹٪)، مراتع (۷۳۰/۹ کیلومتر مربع، ۳۴/۷٪)، جنگل‌ها (۱۲۸۰/۵ کیلومتر مربع، ۶۰/۸٪) و مناطق مسکونی (۱۲/۸ کیلومتر مربع، ۰/۶٪) است (مطالعات جامع حوضه آبخیز تالار، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۸۰). از شهرها و روستاهای مهم درون حوضه می‌توان به پل سفید، آلاشت، دوآب، زیرآب، اشاره نمود.

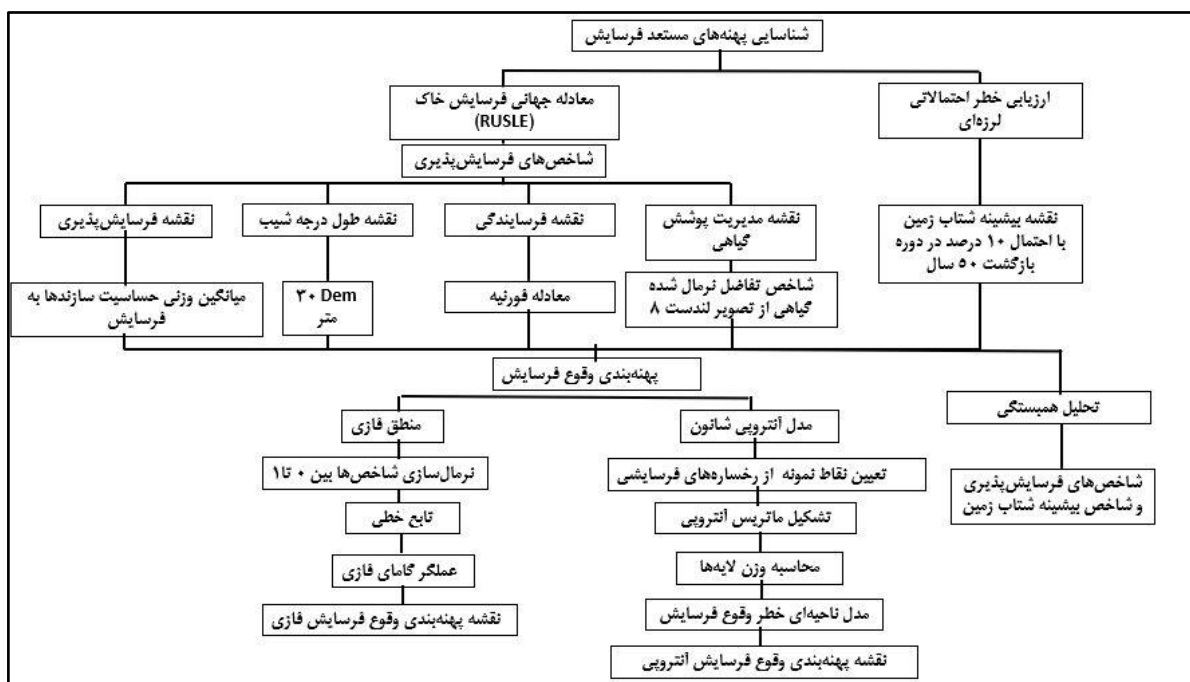


شکل ۱: محل‌های نقاط برداشت در پهنه‌های فرسایشی منبع نقشه: مطالعات جامع حوضه آبخیز تالار، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۸۰.

روش تحقیق

به منظور بررسی عوامل کنترل‌کننده فرسایش در ابتدا شاخص‌های مهم از جمله فرسایش‌پذیری، فرسایش‌پذیری، طول شیب، مدیریت پوشش گیاهی در معادله جهانی فرسایش خاک محاسبه شده است. پس از تهیه شاخص‌ها در محیط ARC-GIS هر ۴ لایه محاسبه شده به عنوان نقشه‌های پایه در مدل‌های پهنه‌بندی فازی و آنتروپی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب‌زمین به عنوان عامل کنترل‌کننده فرسایش نیز با استفاده از روش تحلیل خطر لرزه‌ای (کرزل^۱، ۱۹۶۸: ۱۵۸۸) که در مطالعه (اشتری و همکاران، ۲۰۲۳: ۷) بدست آمده است، در کنار ۴ لایه اطلاعاتی در مدل‌های پهنه‌بندی فازی و آنتروپی مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه نحوه محاسبه هر یک از لایه‌ها شرح داده شده است. همچنین تمام مراحل روش تحقیق در (شکل ۲) نمایش داده شده است.

^۱ Cornell



شکل ۲: نمودار روش تحقیق

فرسایش‌پذیری بارندگی

ضریب R از میانگین بارندگی سالانه در ۱۱ ایستگاه هیدرومتری (جدول ۱) که میزان بارش را در طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۰ ثبت کرده‌اند استفاده شد. لازم به ذکر است که برخی از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه به دلایلی چون عدم پوشش کامل اطلاعات بارش طی سال‌های ذکر شده استفاده نشد. ضریب R بر اساس معادله فورنی F روابط (۱-۲-۳) محاسبه شد (رنارد^۱ و همکاران، ۲۰۱۱؛ رنارد و فریموند^۲، ۱۹۹۴؛ رنیزون^۳ و همکاران، ۲۰۱۰).

$$F = \sum_{k=1}^{n12} \frac{p_i^2}{p} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{if: } F < 55\text{mm}; R = (0.07397 * F^{1.847}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\text{if: } F \geq 55\text{mm}; R = (95.77 - 6.081 * F + 0.477 * F^2) \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن: p_i بارندگی کل mm در ماه i است و p نشان‌دهنده کل بارش سالانه mm است.

^۱ Renard

^۲ Freimund

^۳ Renison

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱۵۰۱۷	۲۵ شهریور	۵۲°۲۲'۰۵"	۳۶°۱۶'۲۵"
۱۳۰۱۳	آبلو	۵۳°۱۵'۰۷"	۳۶°۳۸'۵۴"
۱۳۰۱۷	داریکلا	۵۲°۲۲'۰۵"	۳۶°۳۳'۳۲"
۱۳۲۰۶	پرویح آباد	۵۳°۱۹'۰۹"	۳۶°۱۴'۴۶"
۱۴۰۰۷	کیاکلا	۵۲°۴۸'۴۰"	۳۶°۳۳'۳۳"
۱۳۰۱۹	سلیمان تنگه	۵۳°۱۳'۱۱"	۳۶°۱۵'۱۲"
۱۳۰۲۵	ریگ چشمه	۵۳°۱۰'۳۱"	۳۶°۲۲'۳۱"
۱۴۰۰۱	شیرگاه تالار	۵۲°۵۳'۱۰"	۳۶°۱۷'۵۷"
۱۴۰۲۱	آلاشت	۵۲°۵۹'۰۰"	۳۶°۰۶'۰۰"
۱۴۰۲۸	پالند	۵۲°۵۴'۰۸"	۳۶°۰۱'۱۳"
۱۴۰۱۱	قران طالار	۵۲°۴۶'۲۳"	۳۶°۱۸'۱۸"

طول و درجه شیب

از روش‌های مبتنی بر GIS_SAGA برای محاسبه فاکتورهای L و S همراه با مدل رقومی ارتفاع DEM از رابطه (۴) برای منطقه مورد مطالعه استفاده شد.

$$Ls = \left[(Flow\ Accumulation\ grid) \times \frac{CellSize}{22.13} \right]^{0.4} \times \left[\frac{\sin(Slope\ grid \times 0.01745)}{0.0896} \right]^{1.3} \quad \text{رابطه (۴)}$$

مدیریت پوشش

عامل C از تصاویر لندست ۸ مسیر: ۱۶۳، ردیف: ۳۵، تاریخ (۱۴-۱۰-۲۰۲۰) بر اساس شاخص تفاوت نرمال شده گیاهی^۱ و از رابطه (۵) استخراج شد (پاناگوس^۲ و همکاران، ۲۰۱۵)

$$C = \left(\frac{1 - NDVI}{2} \right) \quad \text{رابطه (۵)}$$

فرسایش پذیری

برای تعیین فاکتور K بر اساس مدل فرسایش خاک کمیته بین سازمانی جنوب غربی اقیانوس آرام PSIAC استفاده شد. در این روش، مقاومت سنگ‌شناسی در برابر فرسایش بین ۰ تا ۱۰ بوده و زمین‌شناسی با سنگ‌شناسی نرم و فرسایش‌پذیری بیشتر امتیاز بالاتری نسبت به زمین‌شناسی سطحی و مقاوم‌تر دارد. در پایان، میانگین وزنی بر اساس مساحت زمین‌شناسی سطح برای هر زیرحوضه محاسبه شد (رفاهی، ۱۳۹۶). ضریب فرسایش‌پذیری واحدهای مختلف عبارت است از واحد ماسه‌سنگ و کنگلومرا (۷/۵)، واحد سنگ آهک و دولومیت (۱/۵)، واحد مارن و شیل (۹)، واحد رسوبات آبرفتی و پادگانه‌ها (۲/۵) است. اعداد بالاتر در ضرایب فرسایش‌پذیری نشان‌دهنده فرسایش‌پذیری بیشتر در آن واحد و بالعکس است. ضریب

^۱ NDVI^۲ Panagos

کم در طبقه رسوبات آبرفتی به جهت پایین بودن شیب در منطقه است که طی بازدیدهای میدانی صورت گرفته و نقشه‌های پایه تایید شده‌است.

بیشینه شتاب زمین

برای ارزیابی فراوانی زلزله از قانون گوتنبرگ-ریشتر رابطه (۶) استفاده شد.

$$\log \lambda_m = a - b \cdot m \quad \text{رابطه (۶)}$$

در این رابطه a و b پارامترهای لرزه‌خیزی هستند: a میانگین سالانه تعداد زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای بزرگتر یا مساوی صفر را نشان می‌دهد. b نشان دهنده تغییرات لرزه‌خیزی است. m بزرگای زمین‌لرزه و λ_m نرخ سالانه میانگین زمین‌لرزه با بزرگای M است (گوتنبرگ^۱ و ریشتر^۲، ۱۹۴۴).

با بهره‌گیری از قضیه بی‌زی در احتمالات کل، این رویکرد توزیع احتمال خطرات بالقوه را به دلیل همه منابع فعال موجود (در یک شعاع معین) برای یک منطقه مورد مطالعه محاسبه می‌کند (کرنل، ۱۹۶۸).

ابتدا، تابع توزیع تجمعی وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگتر از بزرگای حداقل m_{min} با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$F_M(m) = P(M \leq m | m_{max} > M > m_{min}) = \frac{N_{m_{min}} - N_m}{N_{m_{min}} - N_{m_{max}}} = \frac{\lambda_{m_{min}} - \lambda_m}{\lambda_{m_{min}} - \lambda_{m_{max}}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$= C(1 - e^{-\beta(m-m_{min})})_{m_{max} > m > m_{min}}$$

که در آن $F_M(m)$ تابع توزیع تجمعی بزرگای زلزله‌است، m بزرگای زلزله، N_m تعداد زلزله در کاتالوگ، $N_{m_{min}}$ تعداد زلزله با حداقل بزرگای $N_{m_{max}}$ تعداد زلزله با حداکثر بزرگای λ_m نرخ سالانه میانگین رویدادهای زلزله M است، $\lambda_{m_{min}}$ نرخ زلزله با حداقل بزرگای $\lambda_{m_{max}}$ نرخ زلزله با حداکثر بزرگای، $\beta = b \ln 10$ برابر مقدار b ریشتر برای گسل (پارامتر b معمولاً به گونه‌ای است که β حدود ۱٫۵ تا ۲٫۳ است)، و ضریب C رابطه (۸) برای محدود کردن m با بزرگای حداکثر اعمال می‌شود. m_{max} بزرگای حداکثر از تابع توزیع تجمعی مشتق شده‌است.

$$C = \frac{1}{1 - e^{-\beta(m_{max}-m_{min})}} \quad \text{رابطه (۸)}$$

تابع چگالی احتمال $f_M(m)$ با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$f_M(m) = C\beta e^{-\beta(m-m_{min})} \quad m_{max} > m > m_{min} \quad \text{رابطه (۹)}$$

تابع چگالی احتمال فاصله تا محل $f_R(r)$ ، با تقسیم هر چه شمه لرزه‌ای به قطعات کوچکتر، اندازه‌گیری فاصله هر جزء از سایت و با استفاده از فرکانس مربوطه به دست می‌آید. با استفاده از تابع چگالی احتمال بزرگای هر چه شمه $f_M(m)$ ، تابع

^۱ Gutenberg

^۲ Richter

چگالی احتمال فاصله تا محل $f_R(r)$ ، و تابع چگالی احتمال وقوع سطوح مختلف شدت لرزه با بزرگای m که در فاصله r از سایت رخ می‌دهد، $P(IM > x) | m, r$ ، احتمال فراگذشت از پارامتر حرکت زمین را می‌توان با استفاده از رابطه (۱۰) به دست آورد.

$$P(IM > x) = \sum_{i=1}^{n_{sources}} \lambda(M_i > m_{min}) \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} P(IM > x) | m, r f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) dr dm \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در فرمول فوق، $\lambda(M_i > m_{min})$ نرخ وقوع زلزله‌های بزرگتر از m_{min} برای منبع i است. $P(IM > x)$ احتمال وقوع سالانه $IM > x$ است که در آن IM پارامتر حرکت زمین است. $n_{sources}$ تعداد چشمه‌است. عبارت $P(IM > x) | m, r$ از یک رابطه کاهندگی به دست می‌آید. M_i و R_i توزیع بزرگا و فاصله را برای منبع i نشان می‌دهند (کرنل، ۱۹۶۸). برای محاسبه نقشه‌های تحلیل خطر احتمالی، از پنج معادله تجربی برای پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین استفاده شد: (۱) روش پیشنهاد شده (NGA) توسط آکار^۱ و بومر^۲ (۲۰۱۰)، (۲) روش ارائه شده توسط آبراهامسون^۳ و همکاران (۲۰۰۸)، (۳) رابطه منطقه‌ای پیشنهاد شده توسط سقراط^۴ و همکاران (۲۰۱۲)، (۴) معادله سینائیان، قاسمی و همکاران، (۲۰۰۹b) و (۵) روش ارائه شده توسط قاسمی و همکاران (۲۰۰۹a). با استفاده از رویکرد درخت منطقی، به نتایج این پنج رابطه وزن‌های مساوی داده و رتبه‌بندی شدند. در نهایت نقشه تغییرات شتاب زمین برای حوضه آبخیز تالار با استفاده از یک دوره بازگشت ۵۰ ساله و احتمال وقوع ۱۰ درصد برآورد شده‌است (اشتری و همکاران، ۲۰۲۳: ۳).

تحلیل همبستگی

به منظور تحلیل آماری رابطه بین شاخص‌های فرسایش شامل (فرسایش‌پذیری، طول و درجه شیب و مدیریت پوشش گیاهی) با شاخص بیشینه شتاب زمین ضریب همبستگی پیرسون در برنامه SPSS انجام شد.

منطق فازی

نرمال‌سازی داده‌ها برای تمام شاخص‌های محاسبه شده به کمک توابع فازی انجام شد و تمام لایه‌ها در دامنه‌ای از ارزش‌های صفر تا یک قرار گرفتند. درجه عضویت معمولاً با یک تابع عضویت بیان می‌شود که شکل تابع می‌تواند به صورت خطی، غیرخطی، پیوسته و یا ناپیوسته باشد (بونهام-کارتز، ۱۹۹۴: ۲۹۱). توابع عضویتی که معمولاً بیشتر استفاده می‌شوند، عبارتند از S شکل، J شکل و خطی که در محیط GIS وجود دارند و علاوه بر این توابع، کاربر می‌تواند با توجه به نیاز خود، توابعی را تعریف نماید (متکان و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۲۶). مطابق با الگوهای توابع فازی با افزایش تمام پارامترها احتمال وقوع فرسایش و رسوب بیشتر خواهد شد. بنابراین از تابع خطی برای کمی‌سازی تمام لایه‌ها استفاده شد. در این مطالعه از

^۱ Akkar

^۲ Bommer

^۳ Abrahamson

^۴ Soghrat

عملگر گامای فازی که حاصل ضرب جبر فازی و حاصل جمع جبر فازی است، برای روی هم‌گذاری لایه‌ها و پهنه‌بندی وقوع فرسایش استفاده شده‌است.

مدل آنتروپی

مراحل روش آنتروپی به شرح زیر می‌باشد:

تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری با استفاده از رابطه (۱۱) مقدار وزن هر یک از لایه‌ها محاسبه می‌شود.

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

با استفاده از تابع E_j مقدار ارزش آنتروپی از طریق رابطه (۱۲) تعیین می‌شود مقدار k از رابطه (۱۳) بدست می‌آید m تعداد گزینه‌ها و محل‌های برداشت است.

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$K = (\ln m)^{-1} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

در مرحله بعد درجه انحراف هر یک از معیارها با استفاده از رابطه (۱۴) حاصل می‌شود.

$$d_j = 1 - E_j \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

در مرحله آخر وزن هر معیار با استفاده از رابطه (۱۵) تعیین می‌شود.

$$W_{ij} = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_j} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

مدل ناحیه‌ای خطر وقوع فرسایش با رابطه (۱۶) تعیین می‌شود. W_j وزن هر عامل x_{ij} هر یک از لایه‌هاست.

$$H_i = \sum_{i=1}^m W_{ij} X_{ij} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

رابطه (۱۷) مدل ناحیه‌ای خطر وقوع فرسایش در مدل آنتروپی است. در این رابطه PGA بیشینه شتاب زمین، R فرساینده‌گی، K فرسایش‌پذیری، LS طول و درجه شیب و C پوشش گیاهی است.

$$H = (K * 0.2062) + (PGA * 0.2020) + (C * 0.2000) + (R * 0.1960) + (LS * 0.1958) \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

با استفاده از نقشه سطوح فرسایشی که در مطالعات جامع حوضه تالار (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۸۰) تهیه شده‌است (شکل ۱) و بازدیدهای میدانی از منطقه، تعداد محل‌های برداشت بر اساس نقشه ذکر شده و اهمیت هر سطح فرسایشی و نقش آن در تولید رسوب و فرسایش مشخص گردید. متناسب با امتیاز کارشناسی هر سطح، تعداد محل‌های برداشت هر سطح فرسایشی برای مدل برآورد شد. بر این اساس تعداد محل‌های برداشت در هر یک از پهنه‌ها به شرح زیر است پهنه‌های فرسایش سطحی گاه‌ها با حرکات توده‌ای (۱۶)، فرسایش رودخانه‌ای (۱۰)، فرسایش شیبی (۹)، فرسایش خندقی (۸)، فرسایش صخره‌ای و توده‌های سنگی (۶) و فرسایش بدلند (۱) است (شکل ۱ ب). تعداد

محل‌های برداشت در مدل آنتروپی معادل تعداد گزینه‌ها است که در مجموع ۵۰ گزینه در طبقات مختلف آماده شد. امتیاز کارشناسی بر اساس اهمیت هر عامل در وقوع فرسایش در نظر گرفته شده است (جدول ۲).

جدول ۲: طبقات هر لایه و امتیاز اختصاص داده شده در هر طبقه

فرساینده‌گی	امتیاز	زمین‌شناسی	امتیاز	طول و درجه شیب	امتیاز	پوشش گیاهی	امتیاز	بیشینه شتاب زمین	امتیاز
۱۰۲-۱۴	۴	سنگ آهک و دولومیت	۲	<۶	۲	+۰/۳ +۰/۲	۱	+۰/۴ +۰/۳۱	۳
۱۹۱-۱۰۲	۵	رسوبات کوانرنری	۳	۱۰-۶	۳	+۰/۴ +۰/۳	۴	+۰/۵ +۰/۴۱	۷
۲۸۰-۱۹۱	۶	ماسه سنگ و کنگلومرا	۸	۱۴-۱۰	۶	+۰/۵ +۰/۴	۶	+۰/۶ +۰/۵۱	۹
۳۶۹-۲۸۰	۸	مارن و شیل	۹	۲۳-۱۴	۷	+۰/۶ +۰/۵	۹		
۴۵۷-۱۸۳۶۹	۹			>۲۳	۹				

برای تبدیل مقادیر کیفی به کمی از مقیاس فاصله دو قطبی استفاده شده است (جدول ۳). که یک روش عمومی در رتبه بندی شاخص‌های کمی و کیفی است. بر اساس یک مقیاس ده نقطه‌ای در این روش اندازه‌گیری صورت می‌گیرد به طوری که صفر کمترین ارزش ممکن و ده بیشترین ارزش از معیار مورد نظر است (اصغریور، ۱۳۸۹). به طور مثال در (جدول ۳) گزینه ۱ عامل پوشش گیاهی ارزش ۹ را دربردارد که مطابق با (جدول ۲) میزان این عامل ۰/۵-۰/۶ است که به دلیل ارزش بالا در ماتریس آنتروپی تاثیر بیشتری در فرسایش دارد.

جدول ۳: ماتریس آنتروپی کمی شده عوامل موثر در فرسایش (Xij)

رخساره‌های فرسایشی	گزینه	فرساینده‌گی باران	فرسایش پذیری	طول و درجه شیب	پوشش گیاهی	بیشینه شتاب زمین
سطحی گاه‌ها با حرکات توده ای	۱	۴	۸	۷	۹	۹
	۲	۶	۸	۹	۴	۹
	۳	۴	۸	۶	۹	۹
	۴	۵	۸	۶	۴	۹
	۵	۴	۸	۶	۴	۷
	۶	۵	۸	۷	۱	۹
	۷	۸	۹	۶	۱	۷
	۸	۴	۸	۶	۹	۷
	۹	۹	۹	۹	۱	۳

۷	۶	۳	۸	۶	۱۰		
۹	۱	۶	۸	۵	۱۱		
۷	۱	۷	۲	۵	۱۲		
۹	۱	۶	۸	۵	۱۳		
۹	۱	۶	۸	۶	۱۴		
۷	۹	۶	۲	۵	۱۵		
۹	۱	۶	۹	۶	۱۶		
۳	۶	۲	۸	۵	۱	رودخانه ای	
۷	۶	۳	۸	۵	۲		
۹	۶	۲	۸	۵	۳		
۷	۶	۲	۹	۶	۴		
۹	۹	۳	۲	۴	۵		
۹	۶	۳	۸	۵	۶		
۹	۹	۳	۸	۶	۷		
۷	۹	۲	۲	۴	۸		
۹	۶	۳	۸	۵	۹		
۹	۶	۲	۸	۵	۱۰		
۷	۹	۹	۸	۴	۱	شبیاری	
۷	۴	۹	۸	۴	۲		
۹	۴	۶	۸	۵	۳		
۹	۹	۷	۲	۴	۴		
۹	۹	۷	۲	۴	۵		
۷	۹	۳	۳	۴	۶		
۷	۴	۷	۸	۵	۷		
۹	۶	۷	۲	۵	۸		
۷	۱	۶	۸	۴	۹		
۷	۴	۶	۸	۴	۱		خندقی
۹	۶	۷	۸	۵	۲		
۹	۹	۶	۹	۴	۳		
۹	۹	۶	۹	۴	۴		
۹	۶	۶	۹	۴	۵		
۹	۹	۷	۲	۴	۶		
۹	۹	۶	۹	۴	۷		
۹	۶	۶	۲	۴	۸		
۷	۶	۶	۹	۵	۱	صخره ای و توده های سنگی	
۹	۹	۹	۹	۴	۲		
۷	۹	۶	۲	۴	۳		
۳	۹	۷	۲	۵	۴		

۹	۹	۷	۲	۴	۵	
۹	۱	۶	۸	۵	۶	
۷	۹	۷	۹	۴	۱	بند

بحث و یافته‌ها تحلیل عوامل کنترل کننده فرسایش

عامل فرساینده باران: با استفاده از رابطه‌های (۱، ۲ و ۳) در (جدول ۴) مقادیر فرساینده باران برای ایستگاه‌های منطقه محاسبه شد و سپس نقشه فرساینده باران (شکل ۳ الف) با استفاده از روش Kriging در نرم افزار GIS تهیه شد. بیشترین و کمترین میزان این عامل در (شکل ۳ الف) به ترتیب در سمت شمالی حوضه زیر حوضه ۳ با (۳۶۹- ۴۵۷/۸) و در سمت جنوب حوضه زیر حوضه ۱ با (۱۰۲/۷- ۱۳/۹) است.

جدول ۴: برآورد R و MFI ایستگاه‌های بارندگی

شماره ایستگاه	R	MFI
۱۵۰۱۷	۲۳۱/۷	۹۶/۴
۱۳۰۱۳	۲۸۷/۸	۱۰۶/۹
۱۳۰۱۷	۳۳۳/۳	۱۱۴/۷
۱۳۲۰۶	۱۶۲/۱	۸۱/۴
۱۴۰۰۷	۲۲۸/۱	۹۵/۷
۱۳۰۱۹	۱۵۷/۵	۸۰/۳
۱۳۰۲۵	۲۷۰/۳	۱۰۳/۸
۱۴۰۰۱	۴۸۶/۷	۱۳۷/۵
۱۴۰۲۱	۱۷۲	۸۳/۷
۱۴۰۲۸	۱۲۵/۵	۷۲/۱
۱۴۰۱۱	۳۴۹/۱	۱۱۷/۳

عامل فرسایش پذیری: مطابق با میانگین ضریب حساسیت سازندها به فرسایش زیرحوضه ۱ (۶/۰۹)، زیرحوضه ۲ (۶/۳۹)، زیرحوضه ۳ (۷/۶) است (شکل ۳ ب). به دلیل گستردگی و تنوع سازندهای زمین‌شناسی در هر ۳ زیرحوضه پتانسیل بالای فرسایش وجود دارد. از آنجایی که بیشترین مساحت حوضه را سازند شمشک در بر گرفته است و واحدهای ماسه سنگ و کنگلومرا، مارن و شیل از اجزا اصلی این سازند هستند به نظر می‌رسد که بیشترین میزان فرسایش پذیری در مناطقی که در برگیرنده سازند شمشک است باشد.

عامل طول شیب: مطابق (شکل ۳ پ) کمترین میزان این عامل در نواحی که دره‌ها و جریان‌های رودخانه ای (< 6) است و بیشترین میزان آن منطبق بر دامنه‌ها و ارتفاعات (> 23) است.

عامل مدیریت پوشش گیاهی: مطابق با (شکل ۳ ت) بیشترین ضریب C (۰/۶- ۰/۵) در زیر حوضه ۱ است که نشان دهنده کمتر شدن پوشش گیاهی و بیشتر شدن پتانسیل وقوع فرسایش و کمترین میزان C (۰/۳- ۰/۲) در زیرحوضه ۳ که بیانگر غنی بودن کاربری‌ها از پوشش گیاهی جنگلی است.

عامل بیشینه شتاب زمین: مطابق با (شکل ۳ ث) بیشترین میزان شتاب زمین در نزدیکی گسل‌های فعال در منطقه است. به دلیل ساختار گسل‌ها که دارای روند شرقی-غربی هستند در هر ۳ زیرحوضه مناطق حداکثر شتاب زمین در طی هر رخداد وجود دارد. در (شکل ۳ ث) بیشترین پهنه‌های سطوح شتاب زمین (۰/۶-۰/۵) در زیر حوضه ۱ و کمترین آن در زیر حوضه ۳ قرار دارد که این موضوع به دلیل ساختار گسل‌های فعال چون گسل فیروزکوه، IRQ112^۱ IRQ357^۱ است. مطابق با رابطه کلی ولز کاپراسمیت رابطه (۱۸) هر چه طول یک گسل بیشتر باشد نقش بیشتری در لرزه‌خیزی خواهد داشت (ولز^۲ و کاپراسمیت^۳، ۱۹۹۴: ۹۷۸).

$$M_w = 5.08 + 1.16 \log L \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

در این رابطه L طول گسیختگی و M_w بزرگای گشتاوری است.

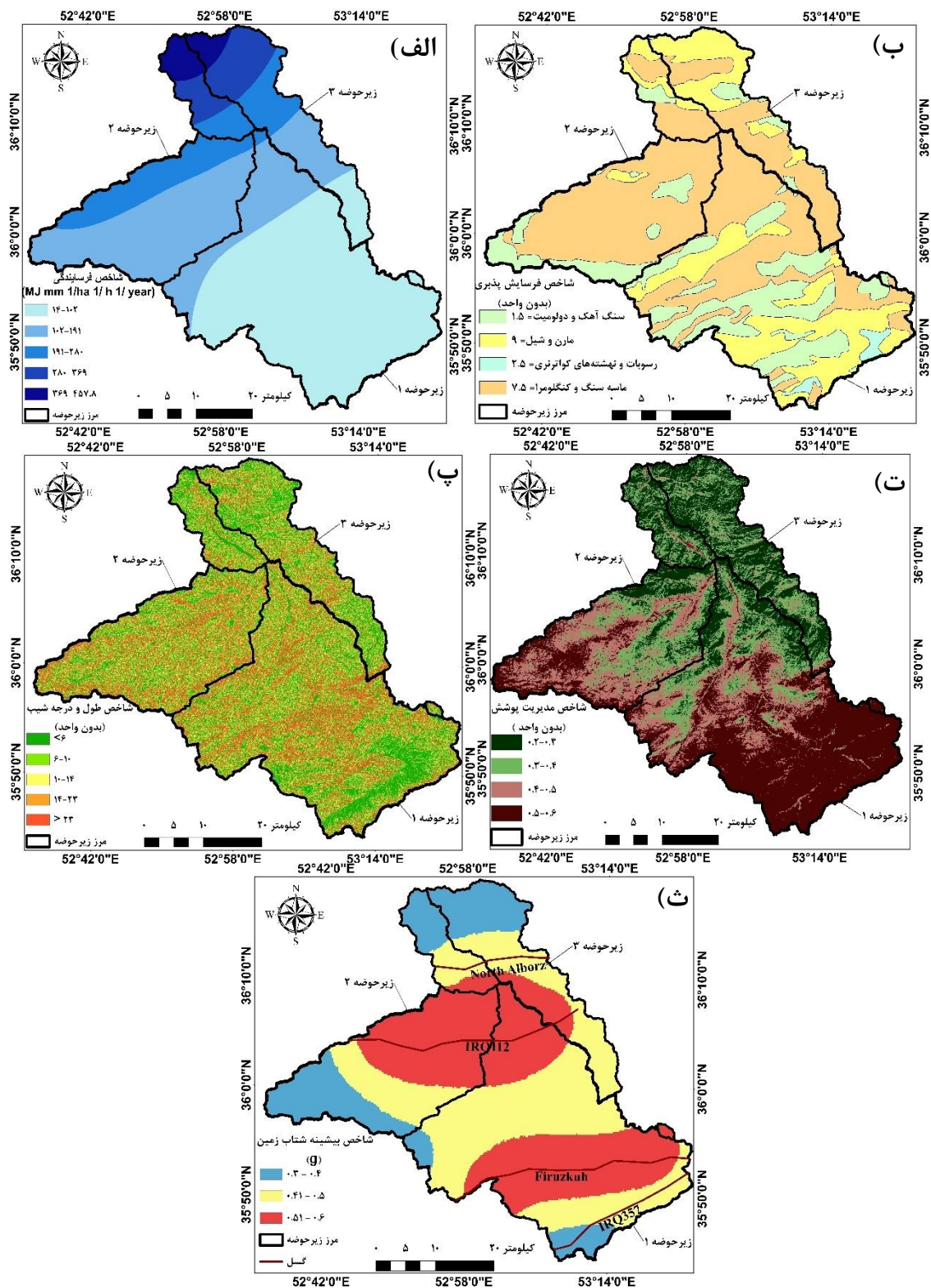
تحلیل همبستگی برای شاخص‌های فرسایش و بیشینه شتاب زمین

نتایج ضریب همبستگی شاخص‌های (فرسایش‌پذیری، فرساینده‌گی، طول شیب، مدیریت پوشش گیاهی با شاخص بیشینه شتاب زمین) به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۸۵، ۰/۹۱، ۰/۹۸ است. بدین ترتیب شاخص بیشینه شتاب زمین دارای همبستگی مثبت با شاخص طول شیب و مدیریت پوشش گیاهی است. این نتایج نشان می‌دهد که شتاب زمین به صورت غیر مستقیم عوامل کنترل‌کننده فرسایش به طور مثال طول شیب را از طریق تکان‌های وارد شده به دامنه‌ها و خرد شدن و تضعیف سنگ‌ها تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین با نزدیک شدن ارزش‌ها در نقشه مدیریت پوشش گیاهی به عدد ۱ و در نتیجه کاهش پوشش گیاهی تاثیر شتاب زمین بر روی فرسایش بیشتر می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهد که فعالیت لرزه‌ای می‌تواند به ساده‌سازی فرآیندهای هوازدگی و تولید مواد اولیه کمک کند و باعث افزایش فرسایش و رسوب‌دهی شود. در مطالعه (بوچان، ۱۹۷۳) اثر بخشی توپوگرافی بر حرکت لرزه‌ای زمین نیز تایید شده است. در مطالعه (وانمارک و همکاران، ۲۰۱۴) نیز همبستگی بالای بیشینه شتاب زمین با رسوب نسبت به سایر متغیرها تایید شده است که این نتایج با ضریب همبستگی ارائه شده برای متغیر طول شیب و مدیریت پوشش گیاهی همخوانی دارد.

^۱ مخفف کلمه IRAN Quaternary است گسل‌های ذکر شده در گروه گسل‌های فعال هستند اما به دلیل بی‌نام بودن با عناوین ذکر شده در اطلاعات گسل‌های فعال ایران شماره‌گذاری شده‌اند.

^۲Wells

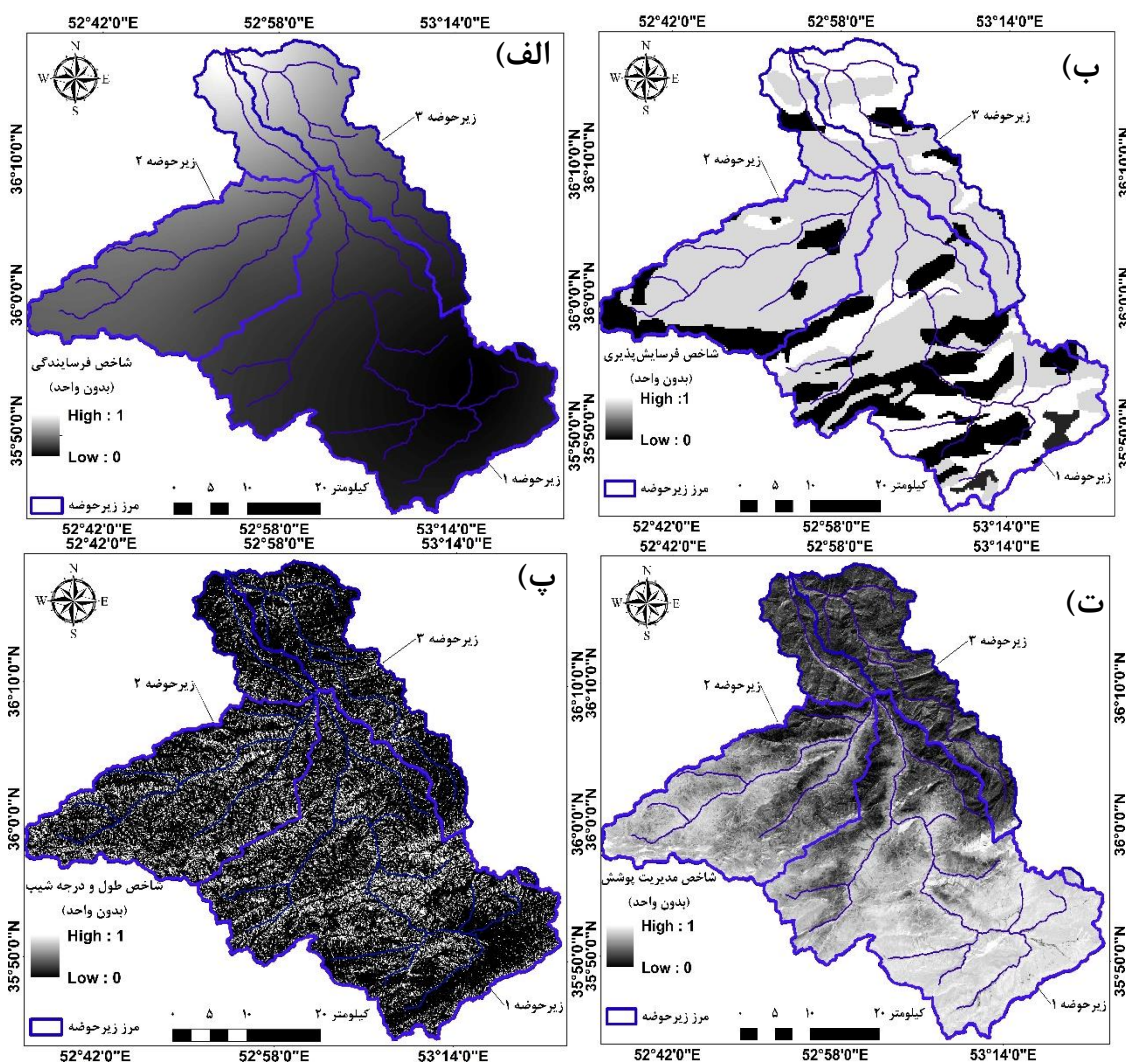
^۳ Coppersmit

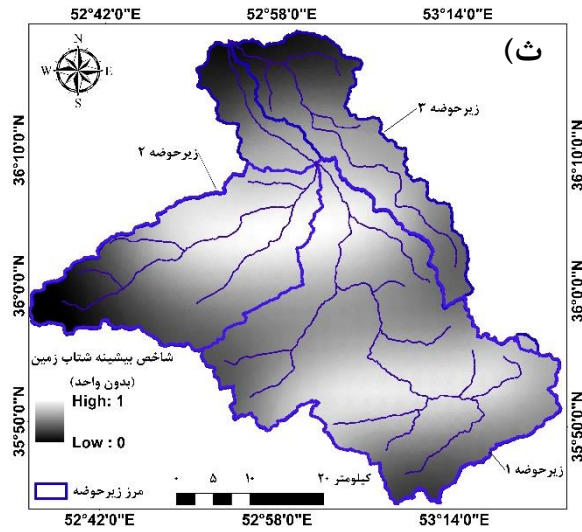


شکل ۳: شاخص‌های فرسایش در معادله RUSLE (الف) فرسایندگی (ب) فرسایش پذیری (پ) طول و درجه شیب، (ت) مدیریت پوشش (ث) بیشینه شتاب زمین

پهنه بندی وقوع فرسایش به روش منطق فازی

مطابق با (شکل ۵) با افزایش تمام ارزش‌ها در لایه‌های مختلف وقوع فرسایش بیشتر خواهد شد. بر اساس (شکل ۵) و (جدول ۵) مساحت محاسبه شده در هر یک از طبقات پهنه وقوع فرسایش مشخص شد که بیشترین مساحت در طبقه خیلی کم (۸۳۹ کیلومتر مربع و ۳۹/۹ درصد) و کمترین مساحت در طبقه کم (۱۶۲/۹ کیلومتر مربع و ۷/۷ درصد) است. بیشترین گسترش پهنه‌های ذکر شده مطابق (شکل ۵) در زیرحوضه ۱ قرار دارد. پراکنش پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد به خصوص در زیرحوضه ۲ و پوشش کم این مناطق در زیرحوضه ۱ با سهم نسبی تولید رسوب بالا در زیرحوضه ۱ بر اساس روش منشایی رسوب مطابق با مطالعه (اشتری و همکاران، ۲۰۲۳) مطابقت ندارد. بیشترین پراکنش طبقه خیلی زیاد مطابق با (جدول ۵) در زیرحوضه ۲ با مساحت (۱۰۲ کیلومتر مربع) و کمترین پهنه‌ها در زیرحوضه ۳ با مساحت (۲۳/۹ کیلومتر مربع) است.

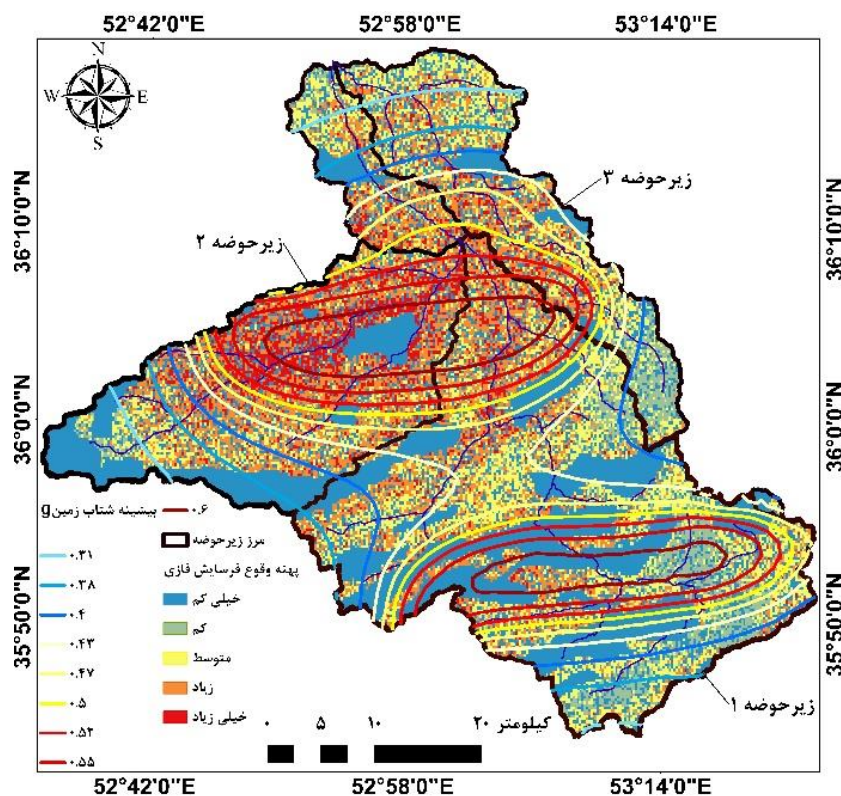




شکل ۴: لایه‌های فازی شده دارای ارزش‌های + تا ۱. الف) فرساینده‌گی (ب) فرسایش‌پذیری (پ) طول و درجه شیب، ت) مدیریت پوشش (ث) بیشینه شتاب زمین.

جدول ۵: مساحت هر یک طبقات وقوع فرسایش به روش فازی

خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	
۴۷	۱۸۱/۴	۲۴۹/۴	۹۳/۷	۵۰۲/۷	زیرحوضه ۱
۱۰۲	۱۶۸/۱	۷۲/۵	۷/۳	۲۱۰	زیرحوضه ۲
۲۳/۹	۷۸/۴	۹۹/۵	۳۵	۹۹/۴	زیرحوضه ۳
۲۰۰	۴۵۴/۸	۴۴۸/۳	۱۶۲/۹	۸۳۹	حوضه تالار
%۹/۵	%۲۱/۶	%۲۱/۳	%۷/۷	%۳۹/۹	درصد مساحت در کل حوضه



نقشه پهنه‌بندی وقوع فرسایش به روش آنتروپی

مطابق با (جدول ۶) عامل فرسایش‌پذیری ۲۰/۶۲ درصد و عامل طول و درجه شیب ۱۹/۵۸ درصد در وقوع فرسایش در منطقه نقش داشته‌اند. به دلیل نزدیکی میزان تاثیر عوامل مختلف می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب کلی همه عامل‌ها نقش تاثیرگذاری در وقوع فرسایش دارند، که این میزان مشارکت با عامل‌های بسیار مهم زمین‌شناسی و بیشینه شتاب زمین شروع می‌شود و سایر عوامل به جهت اختلاف کمی که با یکدیگر دارند به صورت تکمیلی خطر وقوع فرسایش را در منطقه در کنار عوامل ذکر شده بیشتر می‌کنند. با توجه به شاخص‌های تاثیرگذار در روند فرسایش و تولید رسوب تاثیر هر یک از شاخص‌ها بسیار متفاوت است بیشترین وزن تخصیص شده در مدل آنتروپی مربوط به عامل فرسایش‌پذیری با ۰/۲۰۶۲ و پس از آن بیشینه شتاب زمین با ۰/۲۰۲۰ و کمترین میزان این وزن مربوط به طول و درجه شیب با ۰/۱۹۵۸ است. (شکل ۶) نقشه پهنه‌بندی وقوع فرسایش به روش آنتروپی است که طبقات فرسایش را در ۵ گروه فرسایش خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد نشان می‌دهد. مساحت و درصد طبقات فرسایشی مطابق با (جدول ۷) به ترتیب عبارتند از طبقه فرسایش خیلی کم (۴۶۳/۹ کیلومتر مربع؛ ۲۲ درصد)، کم (۳۱۳/۴ کیلومتر مربع؛ ۱۴/۹ درصد)، متوسط (۵۹۵/۷ کیلومتر مربع؛ ۲۸/۳ درصد)، زیاد (۴۴۸/۲ کیلومتر مربع؛ ۲۱/۳ درصد)، خیلی زیاد (۲۸۳/۸ کیلومتر مربع؛ ۱۳/۵ درصد) است. نقشه پهنه‌بندی به روش آنتروپی نشان‌دهنده پتانسیل بالای فرسایش در حوضه تالار است. به طوریکه ۳۴/۸ درصد از مساحت حوضه در طبقات فرسایش زیاد و خیلی زیاد قرار دارد. از هم پوشانی نقشه ذکر شده با نقشه بیشینه شتاب زمین مشخص شد که هر یک از طبقات فرسایشی در کدام یک از سطوح شتاب زمین قرار گرفته‌اند. محدوده خطر بسیار زیاد در (شکل ۶) و مطابق با (جدول ۷) با ۱۳/۵ درصد از مساحت حوضه شامل رخساره‌های فرسایشی اعم از سطحی، شیاری، خندقی و کنار رودخانه‌ای است که این محدوده‌ها در (شکل ۱ ب) نمایش داده شده‌است. از نظر فرسایش‌پذیری این طبقه در گروه واحدهای سنگ‌شناسی

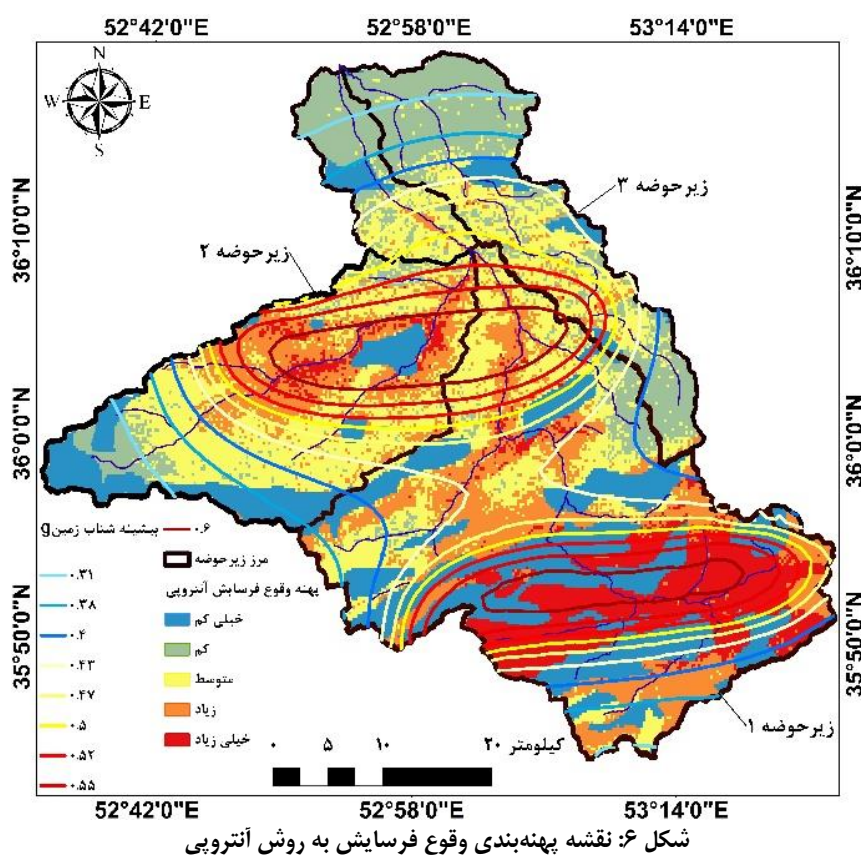
ماسه‌سنگ، مارن و شیل، سنگ آهک و دولومیت، از نظر طول و درجه شیب در مناطق با (۱۴-۱۰)، (۲۳-۱۴) و (>23)، به لحاظ فرساینده‌گی باران در محدوده (۱۳/۹ - ۱۰۲/۷)، (۱۹۱/۵ - ۱۰۲/۷)، از نظر مدیریت پوشش گیاهی در محدوده‌های (۰/۵ - ۰/۴)، (۰/۶ - ۰/۵) و به لحاظ حداکثر شتاب زمین این محدوده منطبق بر منحنی‌های شتاب در سطوح $g(0.6-0.5)$ است. بیشترین و کمترین میزان مساحت طبقه فرسایش خیلی زیاد به ترتیب در زیرحوضه ۱ با (۲۴۹/۹ کیلومتر مربع) و زیرحوضه ۳ با (۰/۴ کیلومتر مربع) است. با نگاهی به (شکل ۶) می‌توان گفت که بیشترین پهنه‌های خطر فرسایش مربوط به بیشترین وزن دهی لایه‌ها نمی‌باشد بلکه قرارگیری مجموعه‌ای از عوامل تاثیرگذار در امر وقوع فرسایش است که بیشترین میزان فرسایش را نشان می‌دهد.

جدول ۶: مقادیر شاخص‌های محاسبه شده برای عوامل موثر بر فرسایش در مدل آنتروپی

شاخص‌های محاسبه شده	فرساینده‌گی باران	فرسایش پذیری	طول شیب	پوشش گیاهی	بیشینه شتاب زمین
Ej	۰/۸۱۸۳	۰/۸۰۸۹	۰/۸۱۸۵	۰/۸۱۴۶	۰/۸۱۲۷
Dj	۰/۱۸۱۷	۰/۱۹۱۱	۰/۱۸۱۵	۰/۱۸۵۴	۰/۱۸۷۳
Wj	۰/۱۹۶۰	۰/۲۰۶۲	۰/۱۹۵۸	۰/۲۰۰۰	۰/۲۰۲۰
درصد تاثیر	۱۹/۶۰	۲۰/۶۲	۱۹/۵۸	۲۰	۲۰/۲۰
ترتیب اهمیت	۴	۱	۵	۳	۲

جدول ۷: مساحت هر یک از طبقات وقوع فرسایش به روش آنتروپی

خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	
۳۰۴/۹	۳۸/۳	۲۱۴/۱	۲۶۷	۲۴۹/۹	زیرحوضه ۱
۹۹/۲	۴۱/۹	۲۳۸/۳	۱۴۷	۳۳/۵	زیرحوضه ۲
۳۳/۷	۱۸۳/۳	۱۰۴/۱	۱۴/۷	۰/۴	زیرحوضه ۳
۴۶۳/۹	۳۱۳/۴	۵۹۵/۷	۴۴۸/۲	۲۸۳/۸	حوضه تالار
%۲۲	%۱۴/۹	%۲۸/۳	%۲۱/۳	%۱۳/۵	درصد مساحت در کل حوضه



مقایسه برآورد پهنه‌های وقوع فرسایش در مدل فازی و آنتروپی

ملاک صحت و ارزیابی پهنه‌های فرسایشی در مدل‌های فازی و آنتروپی، نتایج جدیدترین مطالعات (اشتری و همکاران ۲۰۲۳ و ۱۴۰۲) در زمینه منشایابی رسوب (زیرحوضه‌ها) و منشایابی منابع رسوب سطحی و زیرسطحی در حوضه تالار و همچنین مشاهدات میدانی که برای برداشت نقاط نمونه در مدل آنتروپی بوده است.

بر اساس مطالعات انجام شده (اشتری و همکاران، ۲۰۲۳: ۱۰) در زمینه منشایابی رسوب در حوضه تالار، زیرحوضه ۱ دارای بیشترین سهم نسبی در تولید رسوب بوده است از دلایل این امر می‌توان به شرایط طبیعی چون ۱- وجود سازند شمشک که وسعت آن در زیرحوضه ۱، زیرحوضه ۲ و زیرحوضه ۳ به ترتیب (۴۲۶/۱ کیلومتر مربع، ۴۴۵ کیلومتر مربع و ۱۸۰/۵ کیلومتر مربع) است که دارای واحدهای سنگی (ماسه‌سنگ، کنگلومرا و شیل) است و همچنین لایه‌های شیلی که فرسایش‌پذیری متوسطی دارند (احمدی و فیض‌نیا، ۲۰۰۶؛ مومنی و همکاران، ۲۰۱۴). اشاره کرد. ۲- زیرحوضه ۱ تحت پوشش مراتع با مساحت ۶۹۲/۵ کیلومتر مربع است. این اراضی مستعد چرای بیش از حد و مسائل فرسایش هستند (سیلبرن و همکاران، ۲۰۱۱). این سطح گسترده از اراضی مرتع، به توضیح سهم بیشتر فرسایش در مقابل زیرحوضه‌های ۲ و ۳، که اراضی جنگل با مساحت‌های مربوطه ۴۱۳/۸ کیلومتر مربع و ۳۱۴/۳ کیلومتر مربع غالب است کمک می‌کند (مطالعات تخصصی حوضه آبخیز تالار سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری ایران، ۱۳۸۰). ۳- فعالیت لرزه‌ای بزرگترین زلزله این حوضه در سال ۱۹۹۰ با بزرگای ۶ Mw در این بخش رخ داده است که مطابق با گزارش (اشتری و همکاران، ۲۰۲۳: ۸) سبب ۲۱۷۳۴ تن رسوب معلق شده است. از دیگر دلایل می‌توان به فراوانی زلزله‌های زیرحوضه ۱ از سال ۲۰۰۶ اشاره کرد که تاثیر به‌سزایی در روند افزایش تولید رسوب داشته‌اند (اشتری و همکاران، ۲۰۲۳: ۹).

مطابق با مطالعه دیگر (اشتری و همکاران، ۱۴۰۲) که در زمینه بررسی سهم منابع رسوب سطحی و زیرسطحی در منحنی‌های شتاب در زیرحوضه‌های ۱ و ۲ حوضه تالار پرداختند مشخص گردید که سازندهای فرسایش پذیر (مارن و شیل) در محدوده‌های بالای بیشینه شتاب زمین $g(0/6 - 0/5)$ منابع سطحی بیشترین سهم نسبی را در تولید رسوب در زیرحوضه ۱ دارند. (اشتری و همکاران، ۱۴۰۲: ۱۳۷) در مجموع ترکیب فعالیت لرزه‌ای بالاتر و حداکثر شتاب زمین $(0/6)$ ، حضور گسترده سازند شمشک، مراتع تخریب شده به توضیح سهم بیشتر فرسایش در زیر حوضه ۱ نسبت به زیرحوضه‌های فرعی ۲ و ۳ کمک می‌کند.

نکته دیگری که حائز اهمیت است این است که با مقایسه خروجی مدل فازی (شکل ۵) و آنتروپی (شکل ۶) مشخص می‌شود در نقشه فازی پهنه‌های فرسایشی بالا حتی در زیر حوضه ۳ هم وجود دارند در صورتی که شرایط طبیعی و پوشش گیاهی بالا در زیرحوضه ۳ (اشتری و همکاران، ۲۰۲۳: ۱۰) و هم چنین منشایابی رسوبات در زیرحوضه ۳ مطابق مطالعه (اشتری و همکاران، ۲۰۲۳: ۱) بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است. بنابراین توزیع پهنه‌های فرسایش در خروجی مدل آنتروپی (شکل ۶) که بیشتر پهنه‌های بالای فرسایش در زیرحوضه ۱ و مطابق با محدوده‌های بالای بیشینه شتاب زمین است و پهنه‌های کم خطر فرسایش در زیرحوضه ۳ تخمین شده است منطقی‌تر و با نتایج مطالعات (اشتری و همکاران، ۲۰۲۳ و ۱۴۰۲) همخوانی دارد. در خروجی فازی (شکل ۵) بر خلاف خروجی آنتروپی، پهنه‌های خطر بالا در فرسایش در نواحی خاصی از حوضه تمرکز نیافته است بنابراین می‌توان گفت که خروجی مدل آنتروپی برای مناطقی که لازم است پهنه‌بندی خطر انجام شود نتایج بهتری را ارائه می‌دهد.

نتیجه‌گیری

محدوده‌های بیشینه شتاب زمین بر کنترل فرایندهای تولید رسوب و فرسایش تاثیر مستقیمی دارند. قرارگیری بخش کمی از گسل IRQ112 سبب شده است تا وسعت سطوح شتاب زمین $(0/6 - 0/5)$ در زیرحوضه ۳ کمتر و در زیر حوضه ۱ به دلیل قرارگیری ۳ گسل فیرزوکوه، IRQ112 و IRQ357 بیشتر باشد. قرارگیری سازندهای فرسایش‌پذیر در محدوده‌های بالای بیشینه شتاب زمین سبب تسریع در روند تولید رسوب و فرسایش می‌شود. بر اساس نتایج مدل آنتروپی مشخص شد که در نواحی که شتاب زمین افزایش می‌یابد طبقات فرسایش نیز افزایش یافته است به طوری‌که طبقه خیلی زیاد در پهنه‌های وقوع فرسایش در محدوده شتاب بالا قرار دارد. هماهنگی پهنه‌های وقوع فرسایش با سطوح شتاب زمین به دلیل ناحیه‌ای بودن مدل آنتروپی در مقابل مدل فازی است. کارایی بهتر مدل آنتروپی در پهنه‌بندی وقوع فرسایش در مطالعات (محمدخان و همکاران، ۱۳۹۸؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۷) نیز تایید شده است. در زمینه تاثیر بیشینه شتاب زمین و لرزه‌خیزی و سایر عوامل کنترل‌کننده فرسایش مشخص گردید ترکیب همه عوامل در تسریع روند فرسایش نقش بسیار مهمی داشته‌اند که این نتایج با مطالعه (وانمارک و همکاران، ۲۰۱۴) مطابقت دارد.

نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند در جهت برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها برای کاهش فرسایش در حوضه‌های آبخیز فعال سودمند باشد. صرف‌نظر از این، نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه برای برنامه‌ریزان محیطی به منظور مدیریت هدفمند برای کاهش فرسایش و حفظ زیستگاه‌های رودخانه‌ای بسیار مفید خواهد بود. به عبارت دیگر برنامه‌ریزان محیطی از خروجی تحقیق که پهنه‌های مستعد فرسایش است می‌توانند در جهت هدایت عملیات آبخیزداری و حفاظت آب و خاک استفاده کنند. این مناطق هم به لحاظ فرسایش و هم از نظر خطر لرزه‌ای شناسایی شده‌اند. بنابراین جهت‌گیری سیاست‌های مدیران در حفظ حوضه‌های آبخیز باید به گونه‌ای باشد که مناطق پر خطر بالا در پهنه‌بندی فرسایش را پوشش دهد. تحلیل خطر احتمالاتی زلزله (نقشه بیشینه شتاب زمین) و نتایج پهنه‌بندی فرسایش در حوضه تالار نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی‌های آینده باید به سمت مناطقی پیش رود که علاوه بر وجود آثار فرسایش، منحنی‌های شتاب بالا $(0/6 - 0/5)$ را نیز که در جهت تشدید پدیده فرسایش موثر هستند را مد نظر قرار دهند. بنابراین به طور مثال در زیرحوضه شماره ۱

توصیه می‌شود در برنامه‌های مدیریت و حفاظت خاک توجه بیشتری به دامنه‌های حساس به فرسایش در وقوع زلزله‌ها داشته باشند. با حفظ دامنه‌های حساس در قالب طرح‌های آبخیزداری از جابه‌جایی و انتقال خاک در وقوع فرسایش و شتاب‌های وارد شده در هنگام زلزله جلوگیری شده و رسوبات کمتری به سمت شبکه‌های رودخانه‌ای انتقال می‌یابند. همچنین در مناطقی که محدوده‌های بیشینه شتاب بر روی شبکه‌های رودخانه‌ای قرار دارند می‌توان با حفظ دیواره کانال رودخانه از طریق طرح‌های حفاظت کانال رودخانه از فروپاشی آن جلوگیری کرد.

بدین منظور اولویت‌های اجرایی برای حفاظت خاک در مقابل پدیده فرسایش و و شتاب‌های وارد شده در اثر فرآیند لرزه‌خیزی به شرح ذیل می‌باشند.

۱- ایجاد مقررات منطقه‌بندی که توسعه در مناطق پرخطر را محدود می‌کند و برنامه‌ریزی مناسب کاربری زمین را تضمین می‌کند، استفاده کرد.

۲- با استفاده از طرح‌های بیولوژیک (عملیات کشت گیاهی بیولوژیکی) بروی دامنه‌هایی که حساس به شتاب بالای زمین هستند، می‌توان اثرات شتاب را بر روی رسوبات با توجه به ریشه سخت گیاهان تا حدودی کم کرد.

۳- احیای جنگل و مدیریت پوشش گیاهی

۴- مدیریت رسوب از طریق رویکرد منشایی رسوب و شناسایی مناطقی که در فرآیند تولید رسوب سهم بالایی دارند.

۵- حفظ دیواره کانال رودخانه از طریق طرح‌های حفاظت کانال رودخانه در مناطقی که محدوده‌های بالای بیشینه شتاب زمین تخمین شده است.

همچنین تحقیقات آبی می‌توانند اثرات لندفرم‌های ژئومورفیک را بر تولید فرسایش را هدف قرار دهند.

منابع

- اشتری، ن. نصرتی، ک. امی، س.، ۱۴۰۲. تعیین سهم واحدهای سنگ‌شناسی و محدوده‌های بیشینه شتاب زمین در تولید رسوب با استفاده از روش منشایی رسوب (حوضه آبخیز تالار استان مازندران)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۲، شماره ۳، صص ۱۴۱-۱۲۰.
- اصغر پور، م. ج.، ۱۳۸۹. تصمیم‌گیری چند معیاره. انتشارات دانشگاه تهران، تهران. صص. ۴۰۰-۱.
- امینی فسخودی، ع.، ۱۳۸۴. کاربرد استنتاج منطق فازی در مطالعات برنامه‌ریزی و توسعه منطقه‌ای. مجله دانش و توسعه، شماره ۱۷، صص. ۶۱-۳۹.
- جوکار سرهنگی، ع و دهقان چاچکامی، م. ر.، ۱۴۰۱. ارزیابی کارایی مدل‌های *RUSLE* و *ICONA* در پهنه‌بندی فرسایش خاک حوضه بلده، استان مازندران، دوره ۱۱، شماره ۳۴، صص. ۱۷۸-۱۵۹.
- خاجی، ن.، ۱۳۹۸. مبانی زلزله‌شناسی و تحلیل خطر زلزله، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، صص. ۲۹۵-۱.
- رفاهی، ح. ق. فرسایش آبی و کنترل آن، ۱۳۹۶، انتشارات دانشگاه تهران.
- سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۸۰. مطالعات جامع حوضه آبخیز تالار، دفتر مطالعات و ارزیابی آبخیزها، وزات جهاد کشاورزی، شرکت خدمات مهندسی جهاد کشاورزی.
- عابدینی، م و پاسبان، ا. ح.، ۱۴۰۳. تجزیه و تحلیل و پهنه‌بندی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی، مطالعه موردی: حوزه آبریز خیاوچای، مشکین شهر، نشریه هیدروژئومورفولوژی، دوره ۱۱، شماره ۳۸، صص. ۵۹-۴۰.
- فیض نیا، س. خواجه، م.، غیومیان، ج.، ۱۳۸۴. بررسی اثر عوامل فیزیکی، شیمیایی و آب و هوایی در تولید رسوب ناشی از فرسایش سطحی خاک‌های لسی (مطالعه موردی در ساتان گلستان)، فصلنامه پژوهش و سازندگی، دوره ۱۷، شماره ۶۶، صص. ۲۳-۱۴.

- متکان، ع.ع، شکیب، ع.ر، پور علی، س.ح و نظم فر، ح.، ۱۳۸۷. مکان‌یابی مناطق مناسب جهت دفن پسماند با استفاده از GIS (ناحیه مورد مطالعه: شهر تبریز)، فصلنامه علوم محیطی، دوره ۶، شماره ۲، صص ۱۳۳-۱۲۱.
- محمدخان، ش. پیرانی، پ. ریاهی، س. گراوند، ف.، ۱۳۹۸. ارزیابی کارایی مدل آنتروپی در پهنه‌بندی میزان فرسایش با رویکرد ژئومورفولوژیکی. مطالعه موردی: حوضه آبخیز کند در بالادست سد لتیان، مجله آمایش جغرافیایی فضا، سال نهم، شماره ۳۴، صص. ۸۵-۹۸.
- مقصودی، م. محمدخان، ش. پیرانی، پ. ریاهی، س. گراوند، ف.، ۱۳۹۷. بررسی عوامل موثر بر مخاطره زمین‌لغزش‌های بالادست سد لتیان با استفاده از روش‌های ارزیابی آنتروپی و فازی، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۲۸، صص. ۱۷-۱.
- مقیمی، ا. و نگهبان، س.، ۱۳۹۱. بررسی فرسایش در حوضه‌ی آبخیز رودخانه‌ی شورفدای (استان فارس) با استفاده از مدل آنتروپی، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ۴۴، شماره‌ی ۳ (پیاپی ۸۱)، صص. ۱۶-۱.
- نگهبان، س. و حیدری، ا.، ۱۳۹۴. بررسی ویژگی‌های نو زمین‌ساخت، فرسایش و رسوب در حوضه آبخیز کرچمریز - با استفاده از شاخص‌های کمی، فصلنامه جغرافیای طبیعی، دوره ۸، شماره ۲۹، صص. ۱۰۶-۹۱.
- نور، ح و عرب‌خدری، م.، ۱۴۰۲. برآورد فرسایش خاک و نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل RUSLE در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه، نشریه مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، دوره ۳، شماره ۱، صص. ۵۳-۴۲.
- یمانی، م. و اسکندری نژاد، ف.، ۱۳۸۹. تاثیر عوامل ژئومورفولوژیک بر رسوب‌زایی حوضه قزقنچای (زیر حوضه حبله رود در بالا دست سد نم رود)، مجله پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۱، صص. ۱۷-۱.
- یمانی، م. و طاهری، م. ر.، ۱۳۸۷. ارتباط ویژگی لندفرم‌ها و تولید رسوب در حوضه آبریز کهاب زنجانرود. فصلنامه زمین شناسی ایران، دوره ۲، شماره ۷، صص. ۱۱-۳.
- یمانی، م. عمونیا، ح و خیری زاده اروق، م.، ۱۳۹۱. ارزیابی فرسایش‌پذیری سازندها از طریق مورفوسکوپی رسوبات معرف رودخانه ای (مطالعه موردی: حوزه آبریز سجادرود)، فصلنامه پژوهش‌های فرسایش محیطی، سال دوم، شماره ۳، صص. ۱۸-۲۹.

- Abrahamson, N., Atkinson, G., Boore, D., Bozorgnia, Y., Campbell, K., Chiou, B., Idriss, I.M., Silva, W., Youngs, R., 2008. Comparisons of the NGA Ground-Motion Relations. *Earthquake Spectra* 24(1), 45-66.
- Akkar, S., Bommer, J.J., 2010. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East. *Seismological Research Letters* 81(2), 195-206.
- Ashtari, N., Nosrati, K., Ommi, Salma. and Collins, Adrian L., 2023. Investigating the effect of seismicity on spatial sediment sources and loads using the fingerprinting approach. *Catena*, 227(2), 107091, 1-14.
- Bonham-Carter, G. F. 1991. *Geographic Information System for Geoscientists: Modeling with GIS*, Pergamon, Ontario, PP. 291-300.
- Bouchon, M. 1973. EFFECT OF TOPOGRAPHY ON SURFACE MOTION. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 615-632.
- Cornell, C.A., 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 58(5), 1583-1606.
- Dadson, S.J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W.B., Lin, J.C., Hsu, M.L., Lin, C.W., Horng, M.J., Chen, T.C., Milliman, J. and Stark, C.P., 2004. Earthquake-triggered increase in sediment delivery from an active mountain belt. *Geology*, 32(8), pp.733-736.
- Dahal, A., Castro-Cruz, D.A., Tanyaş, H., Fadel, I., Mai, P.M., van der Meijde, M., van Westen, C., Huser, R. and Lombardo, L., 2023. From ground motion simulations to landslide occurrence prediction. *Geomorphology*, 441, p.108898.

- Di Filippo, G., Biondi, G., Casablanca, O., & Cascone, E. 2024. *Seismic site response analyses of ideal medium-stiff soil deposits. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 10(58), 2175-2180.*
- Dong, L., Fu, S., Liu, B. and Yin, B., 2023. *Comparison and quantitative assessment of two regional soil erosion survey approaches. International Soil and Water Conservation Research, 11(4), pp.660-668.*
- Douglas, J., 2003. *Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. Earth-Science Reviews, 61(1-2), 43-104.*
- Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y., Koketsu, K., 2009a. *An empirical spectral ground-motion model for Iran. Journal of Seismology 13(4), 499-515.*
- Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y., Sinaeian, F., 2009b. *Applying empirical methods in site classification, using response spectral ratio (H/V): A case study on Iranian strong motion network (ISMN). Soil Dynamics and Earthquake Engineering 29(1), 121-132.*
- Golosov, V., & Tsyplenkov, A. 2021. *Factors controlling contemporary suspended sediment yield in the Caucasus region. Water, 13(22), 3173.*
- Hecht, H. and Oguchi, T., 2017. *Global evaluation of erosion rates in relation to tectonics. Progress in Earth and Planetary Science, 4, pp.1-9.*
- Koons, P.O., Upton, P., Barker, A.D., 2012. *The influence of mechanical properties on the link between tectonic and topographic evolution. Geomorphology 137(1), 168-180.*
- Lal, R., 2003. *Soil erosion and the global carbon budget. Environment international, 29(4), 437-450.*
- Lin, H.Y., Kao, J.J., Li, K.C. and Hwang, H.Y., 1996, December. *Fuzzy GIS assisted landfill siting analysis. In Proceedings of the International Conference on Solid Waste Technology and Management. pp.14-17.*
- Lucà, F., Buttafuoco, G., & Terranova, O. 2018. *GIS and Soil. In Comprehensive geographic information systems (Vol. 3, pp. 37-50). Elsevier Inc..*
- Minella, J.P., Clarke, R.T., Merten, G.H., Walling, D.E., 2008. *Sediment source fingerprinting: testing hypotheses about contributions from potential sediment sources, Sediment Dynamics in Changing Environments-2008 Symposium of the International Commission on Continental Erosion, ICCE, pp. 31-37.*
- Bonham-Carter, G. F. 1991. *Geographic Information System for Geoscientists: Modeling with GIS, Pergamon, Ontario, PP. 291-300*
- Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret-Picot, M., Deckers, J., ... & Govers, G., 2002. *Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the northern Ethiopian highlands. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 27(12), 1267-1283.*
- Panagos, P. et al., 2015. *Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. Land use policy, 48, 38-50.*
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., ... & Blair, R., 1995. *Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. Science, 267(5201), 1117-1123.*
- Poesen, J., 2018. *Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. Earth surface processes and landforms, 43(1), 64-84.*
- Portenga, E.W., Bierman, P.R., 2011. *Understanding Earth's eroding surface with 10 Be.*
- Renard, K.G., Yoder, D.C., Lightle, D.T. and Dabney, S.M., 2011. *Universal soil loss equation and revised universal soil loss equation. Handbook of erosion modelling, pp.137-167.*
- Renard, K.G., Freimund, J.R., 1994. *Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. Journal of hydrology, 157, 287-306.*

- Renison, D., Hensen, I., Suarez, R., Cingolani, A.M., Marcora, P. and Giorgis, M.A., 2010. Soil conservation in Polylepis mountain forests of Central Argentina: is livestock reducing our natural capital?. *Austral Ecology*, 35(4), pp.435-443.
- Shannon, C. E., 1948. *A Mathematical Theory of Communication*, Bell System Technical Journal, 27 (3): 379–423.
- Soghrat, M.R., Khaji, N., Zafarani, H., 2012. Simulation of strong ground motion in northern Iran using the specific barrier model. *Geophysical Journal International* 188(2), 645-679.
- Vanmaercke, M., Kettner, A.J., Eeckhaut, M.V.D., Poesen, J., Mamaliga, A., Verstraeten, G., Rădoane, M., Obreja, F., Upton, P., Syvitski, J.P.M., Govers, G., 2014. Moderate seismic activity affects contemporary sediment yields. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 38(2), 145-172.
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width and surface displacements, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 84, 974-1002.
- Wu, H., Cui, S., Pei, X., Huang, R., He, L., & Guo, J. 2022. Earthquake-induced landslide erosion coupled to tectonics and river incision, and effects of ground motion on coupled patterns. *Catena*, 216, 106334.
- Xi, C., Tanyas, H., Lombardo, L., He, K., Hu, X., & Jibson, R. W. 2024. Estimating weakening on hillslopes caused by strong earthquakes. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 81.
- Yang, S., Han, X., Lei, Q., Yu, S., & Liu, C. 2021. Study on the seismic effect of the interbedded soil layer in the yinchuan alluvial plain. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 1519750.