

ارزیابی کارایی مدل آنتروپی در پهنه‌بندی میزان فرسایش با رویکرد ژئومورفولوژیکی. مطالعه موردی: حوضه آبخیز کند در بالادست سد لتیان

شیرین محمدخان^{۱*}، پریسا پیرانی^۲، سمانه ریاهی^۳، فاطمه گراوند^۴

^۱ استادیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
^۲ دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
^۳ دانشجوی ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی
^۴ دانش‌آموخته ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۶/۳۱

چکیده

وقوع فرسایش در نواحی مختلف موجب از دست رفتن خاک‌های حاصلخیز و تخریب اکوسیستم‌های طبیعی می‌شود که لزوم شناسایی، اولویت‌بندی و تدوین برنامه‌های مدون جهت کاهش فرسایش در نواحی مستعد را می‌طلبد. با توجه به پتانسیل بالای حوضه کند از زیر حوضه‌های آبخیز لتیان در تولید رسوب (۲۰۴۱۳/۴۶ تن در سال) و قرارگیری این حوضه در بالادست سد لتیان، هدف این پژوهش مشخص نمودن مناطق در معرض خطر فرسایش و آزمون کارایی مدل آنتروپی در این زمینه می‌باشد. در روش مورد استفاده بر اساس رخساره‌های ژئومورفولوژیکی، عوامل مؤثر در فرسایش با استفاده از مدل آنتروپی بررسی و نسبت به تهیه ماتریس آنتروپی و در نهایت نقشه پهنه‌بندی فرسایش اقدام شد. یافته‌ها نشان می‌دهند که شیب ۲۷/۸۱ درصد، سنگ‌شناسی ۱۶/۵۱ درصد، درصد پوشش گیاهی ۱۵/۷۴ درصد، بارندگی متوسط سالیانه ۱۵/۵۲ درصد، نوع کاربری ۱۴/۴۱ درصد و بافت خاک ۱۰/۰۱ درصد در ایجاد رخساره‌های فرسایشی منطقه تأثیرگذار بوده‌اند. همچنین در نقشه پهنه‌بندی ۶۴/۵ درصد از منطقه در محدوده فرسایش متوسط و شدید قرار گرفته است. از آنجا که رخساره‌های آبراه‌های و تا حدودی شیاری در تمام پهنه‌های فرسایش کم، متوسط و شدید حضور دارند، بایستی با حفاظت از پوشش گیاهی و اعمال کاربری‌های مناسب در شیب‌های بالا از گسترش رخساره‌های شیاری و آبراه‌های و تبدیل آن‌ها به رخساره‌های با پتانسیل فرسایشی بالا، جلوگیری کرد.

واژه‌های کلیدی: آنتروپی، فرسایش، ژئومورفولوژی، پهنه‌بندی، حوضه کند

مقدمه

گیاهی همراه با افزایش رواناب موجب از بین رفتن بیش از ۲/۵ میلیارد تن خاک در سال می‌شود (احمدی، ۱۳۷۸: ۱۵). برآوردهای صحیح از خطر فرسایش و مشخص کردن مناطق حساس در بهبود توصیه‌های مدیریت اراضی و مقابله با فرسایش نقش مهمی دارد (ویکتورا و همکاران^۴، ۱۹۹۸: ۱۰). قبل از اجرای طرح‌های حفاظتی، لازم است که سیمای فرسایش در هر حوضه و عوامل کنترل آن مورد بررسی قرار گرفته و اولویت‌های حفاظتی و مدیریتی اعمال

یکی از ارزشمندترین سرمایه‌های ملی هر کشور، منابع طبیعی از جمله آب، خاک و گیاه بوده که به عنوان عناصر اصلی و بستر تولید و حیات به شمار می‌روند (کر^۲ و همکاران، ۲۰۰۶: ۶۵). امروزه پدیده فرسایش با کاهش حاصلخیزی خاک، باعث تخریب اکوسیستم‌های طبیعی می‌گردد (بایرامین^۳ و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۱۶). در کشور ایران نبود یا کمبود پوشش

*نویسنده مسئول: mohamadkh@ut.ac.ir

2. Kerr et al
3. Bayramin et al

4. Victora et al

بار رسوبی کاهش پیدا می‌کند. بارتز و همکاران^۸ (۲۰۰۰) عوامل متعددی مثل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، فیزیوگرافی، پوشش سطحی و بارندگی را بر مقدار فرسایش و هدر رفت خاک و در نهایت میزان فرسایش خاک مؤثر می‌دانند. گاناسری و رامش^۹ (۲۰۱۶) با استفاده از مدل RUSLE و GIS به تخمین فرسایش خاک در حوضه نسراواتی^{۱۰} در جنوب غرب هند پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بخش وسیعی از منطقه در قسمت فرسایش با احتمال کم و بخش کوچکی از منطقه در قسمت فرسایش با احتمال زیاد قرار گرفته است.

اولین گزارش کامل فرسایش در ایران را کارشناسان فائو در سال ۱۳۲۷ تهیه کردند (مقیمی و نگهبان، ۱۳۹۱: ۲). از جمله مطالعاتی که در زمینه پهنه‌بندی فرسایش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: محمودآبادی و همکاران (۱۳۸۴) با استفاده از مدل MPSIAC و GIS، در بررسی خطر فرسایش حوزه گل‌آباد اصفهان نتیجه گرفتند که این مدل برای حوضه‌های بدون آمار خشک و نیمه خشک ایران کارایی دارد. مقیمی و نگهبان (۱۳۹۱) با استفاده از ترکیب مدل‌های AHP و Entropy، فرسایش حوزه آبخیز رودخانه شور فدومی در استان فارس را بررسی کردند و نتایج نشان داد مناطقی با شیب بیش از ۱۵ درصد، دارای سازندهای سست کواترنری، بافت خاک سبک و کاربری مرتع دارای بیشترین فرسایش هستند. شکوهی و بهشتی (۱۳۹۳) با استفاده از مدل ژئومورفولوژیکی مبتنی بر ارتفاع و مقایسه آن با مدل MPSIAC به ارزیابی فرسایش حوزه آبخیز باراجین در استان قزوین پرداختند و به این نتیجه رسیدند که از مدل مزبور برای مناطقی که فرسایش غالب خندقی و رودخانه‌ای است، نمی‌توان استفاده کرد. صدوق و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از مدل‌های مختلف به پهنه‌بندی فرسایش در حوزه آبخیز کهمان در استان لرستان پرداختند و نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که مدل BLM بیشترین تطابق را با فرسایش منطقه دارد.

شود (دی رو^۱، ۱۹۹۸: ۹۰۵)، لذا به منظور جمع‌آوری اطلاعات از میزان فرسایش و تخریب اراضی نیاز به برآورد حساسیت به فرسایش اراضی و به عبارت بهتر پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش اراضی است (عبدی، ۱۳۸۲: ۲۴). از آنجا که فرسایش حاصل تأثیر متقابل مجموعه عواملی است که در طول زمان و مکان تغییر می‌کنند، هیچ مدل ساده‌ای وجود ندارد که بتواند تمام این عوامل را مورد بررسی قرار دهد (لی بیسونس و همکاران^۲، ۲۰۰۲: ۲۰۷). به‌طور کلی عوامل ژئومورفولوژی، پستی و بلندی، خاک و پوشش گیاهی در هر آبخیزی بر رفتار هیدرولوژیک، مقدار و شدت فرسایش توسط آب و توان بالقوه تولید رسوب آن تأثیرگذار است. در این میان نقش رخساره‌های ژئومورفولوژی در تغییر میزان فرسایش خاک ظاهر می‌شود که تأثیر آن در میزان تولید رسوب و کیفیت رواناب‌های سطحی نمود پیدا می‌کند (سیکا و همکاران^۳، ۲۰۰۳: ۱۲). نخستین آزمایش کمی در مورد فرسایش، در سال ۱۹۲۵ در ایالت یوتای آمریکا انجام شد و پژوهش‌ها ادامه داشت تا این که ویشمایر^۴ با به کارگیری روش‌های پیشرفته توانست فرسایش را به طور کمی تعیین کند (رفاهی، ۱۳۷۹: ۵۰). فورنیه^۵ (۱۹۶۰) با استفاده از شاخص فرساینده‌گی باران روابطی را برای برآورد تولید رسوب ارائه کرد و نتایج حاکی از همبستگی بالای این شاخص با میزان رسوب معلق حوضه‌ها بود. ویشمایر و مانرینگ^۶ (۱۹۶۹) با مطالعه مواد آلی خاک به این نتیجه رسیدند که هم انرژی مورد نیاز برای شروع رواناب و هم شدت نفوذ نهایی، با افزایش ماده آلی خاک، افزایش می‌یابد، در حالی که مقدار رسوب موجود در رواناب نسبت معکوس با مقدار ماده آلی خاک دارد. راجرز و شیوم^۷ (۱۹۹۱) نشان دادند در یک دامنه با شیب ۱۰ درصد با افزایش تاج پوشش گیاهی از ۱۵ تا ۴۳ درصد، مقدار

1. De Roo
2. Le Bissonnais et al
3. Sikka et al
4. Wismeier
5. Fournier
6. Wismeier & Mannering
7. Rogers & Schumm

8. Barthes et al
9. Ganasri & Ramesh
10. Nethravathi

- ۳- فرسایش آبراهه‌ای: به تدریج فرسایش شیاری توسعه یافته و به آبراهه‌ای تبدیل می‌گردد و ابعاد آن بین ۵۰ الی ۱۰۰ سانتی‌متر تغییر می‌کند.
- ۴- مورفولوژی هزار دره شامل دره‌های کوتاه و بریده بریده با شیب‌های تند است؛ بنابراین مرحله تکاملی فرسایش سطحی، شیاری و آبراهه‌ای به فرسایش هزاردره خاتمه می‌یابد.
- ۵- حرکت‌های توده‌ای: حرکت توده‌ای از مواد در سطح یک دامنه حرکت توده‌ای نامیده می‌شود. در منطقه مورد مطالعه حرکت توده‌ای از نوع زمین‌لغزش وجود دارد که در اثر عمل آب و نیروی ثقل ایجاد می‌گردد.
- ۶- دامنه منظم به دامنه‌های فاقد فرسایش قابل مشاهده، که دارای پوشش گیاهی مناسب، خاک عمیق و تکامل یافته و شیب همگن و فاقد شکست شیب قابل ملاحظه باشند، گفته می‌شود.
- ۷- توده و بیرون زدگی سنگی: در مورد توده‌های سنگی حداکثر ۳۰ درصد و در مورد بیرون زدگی سنگی حداقل ۳۰ درصد مناطق بایستی از خاک پوشیده شده باشند (محمدخان، ۱۳۸۸: ۱۱ به نقل از احمدی ۱۳۷۸).

روش تحقیق

این پژوهش به لحاظ هدف کاربردی و به لحاظ روش تحلیلی است. در ابتدا با استفاده از دید سه‌بُعدی و همچنین ویژگی‌های مختلف رخساره‌های ژئومورفولوژی از طریق عکس‌های هوایی با مقیاس ۱,۲۰۰۰۰ منطقه مربوط به سال ۱۳۸۱، نقشه رخساره‌های ژئومورفولوژی تهیه شد. سپس بر اساس این نقشه و با توجه به تعداد، پراکندگی، وسعت هر رخساره در منطقه پژوهش و امتیاز کارشناسی آن‌ها، تعداد محل‌های برداشت ویژگی‌های هر رخساره برای مدل برآورد شد. سپس با توجه به شرایط منطقه و پیشینه مطالعات فرسایش و نظر کارشناسان عوامل مهم مؤثر بر فرسایش شناسایی شد که عبارت‌اند از: شیب، بافت خاک، کاربری اراضی، درصد پوشش گیاهی، متوسط بارندگی سالیانه، سنگ‌شناسی. با

موسوی (۱۳۹۶) با استفاده از روش SLEMSA فرسایش خاک حوضه آبخیز شاهرود- میامی را مورد مطالعه قرار داد و سه کمربند فرسایشی در قسمت شمالی، مرکزی و جنوبی حوضه با دامنه فرسایشی بین ۲ تا ۶۷ تن در هکتار را شناسایی نمود.

از جمله مدل‌هایی که برای پهنه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل آنتروپی^۱ است. مدل آنتروپی برای نخستین بار توسط ویلسون (۱۹۶۷ و ۱۹۷۰) ارائه شد (پائولو^۲، ۱۹۹۱: ۵۵۷). کار بر روی مدل آنتروپی از دهه ۶۰ آغاز و مقاله‌های متعددی در دهه ۹۰ و بعد از آن چاپ شده‌اند (ارکات و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۶). در این پژوهش سعی شده است با توجه به پتانسیل مدل آنتروپی جهت پهنه‌بندی از این مدل با تأکید بر رخساره‌های ژئومورفولوژی (فرسایشی) به منظور بررسی فرسایش حوضه آبخیز کند استفاده شود. حوضه کند در بالادست سد لتیان قرار دارد، با بررسی وضعیت فرسایش قسمت‌های حوضه می‌توان چشم‌اندازی از وضعیت فرسایش و تلفات خاک قسمت‌های مختلف آبخیز بالادست به دست آورد و با استفاده از راهکارهای مدیریتی مناسب از کاهش عمر مفید سدها جلوگیری کرد.

مبانی نظری

اساس این تحقیق بر اشکال گوناگون فرسایشی است که رخساره نامیده می‌شوند، رخساره‌های ژئومورفولوژی مورد استفاده در فرایند تحقیق (شکل ۳) عبارت‌اند از:

- ۱- فرسایش سطحی: با از بین رفتن پوشش گیاهی مرتعی و تبدیل اراضی با شیب زیاد به زمین‌های کشاورزی، خاک روی دامنه‌ها به تدریج از بین رفته و سنگ مادر نمایان می‌گردد.
- ۲- فرسایش شیاری: به تدریج در نتیجه گسترش هرزها روی دامنه، ابعاد آن توسعه یافته و به شیار تبدیل می‌گردند.

1. Entropy
2. Paulov

استفاده از داده‌های سازمان هواشناسی (آمار یک دوره ۲۵ ساله) لایه بارندگی متوسط سالانه و نیز با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی لایه‌های شیب و سنگ‌شناسی منطقه تهیه شد. برای تهیه نقشه بافت خاک تعدادی پروفیل حفر و نمونه‌برداری گردید و پس از اندازه‌گیری درصد رسوبات در آزمایشگاه، بافت خاک تعیین شد. برای تهیه نقشه کاربری اراضی از عکس‌های هوایی و بازدید میدانی و برای تهیه نقشه پوشش گیاهی از تصاویر ماهواره‌ای لندست ETM+ مربوط به سال ۲۰۰۲ میلادی به سبب همزمانی با عکس‌های هوایی کمک گرفته شد و سپس با تصاویر جدیدتر به روز گردید. پس از آن نقشه هر یک از عوامل به صورت لایه‌های اطلاعاتی مجزا در محیط نرم‌افزار ARC GIS 10 تحلیل شدند و ویژگی‌های هر رخساره از نظر پارامترهای فوق به دست آمد. پس از تهیه جدول ۲ که در آن به طبقات هر لایه امتیازی بیانگر میزان اهمیت آن در ایجاد فرسایش داده شد، لایه‌های اطلاعاتی رستری و امتیازدهی شدند و به عنوان داده‌های اصلی در تشکیل ماتریس آنتروپی مورد استفاده قرار گرفتند. در این پژوهش از مقیاس دوقطبی برای تبدیل مقادیر کیفی به کمی استفاده شد که اندازه‌گیری در آن بر اساس یک مقیاس ده نقطه‌ای است، به طوری که صفر مشخص‌کننده کمترین ارزش ممکن و ده نشان دهنده حداکثر ارزش ممکن از شاخص مورد نظر است. نقطه وسط نیز نقطه شکست مقیاس بین مساعدها و نامساعدهاست (اصغرپور، ۱۳۹۲: ۱۹۳). شکل (۲) حاوی فرایند روش پژوهش است.

مدل آنتروپی: آنتروپی مفهوم عمده‌ای در علوم فیزیک، علوم اجتماعی و تئوری اطلاعات است، به گونه‌ای که نشان دهنده مقدار عدم اطمینان (درجه توزیع نامتعادل پدیده‌ها) موجود از محتوای مورد

انتظار اطلاعاتی از یک پیام است (مقیمی و نگهبان، ۱۳۹۱: ۲). شاخص آنتروپی میزان بی‌نظمی را در محیط نشان می‌دهد. برای استفاده از این مدل ابتدا باید ماتریس تصمیم‌گیری ایجاد شود. ماتریس تصمیم‌گیری حاوی اطلاعاتی است که آنتروپی می‌تواند به عنوان معیاری برای ارزیابی آن به کار رود و با محاسبه ماتریس آنتروپی و وزن کل ۶ عامل (W_j) ، میزان H_i به عنوان ضریب وقوع (مقیمی و همکاران، ۱۳۹۱: ۸۱) فرسایش به دست می‌آید. محتوای اطلاعاتی موجود ماتریس تصمیم‌گیری ابتدا از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

X_{ij} وزن هر یک از لایه‌هاست، سپس E_j که ارزش آنتروپی است، از تابع زیر (رابطه ۲) تعیین می‌شود:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

K یک ضریب ثابت است که از رابطه (۳) به دست می‌آید (در این رابطه m تعداد محل برداشت ویژگی‌های رخساره‌ها یعنی ۱۸ است):

$$k = (\ln m)^{-1} \quad \text{رابطه (۳)}$$

عدم اطمینان یا درجه انحراف هر معیار (d_j) از کسر مقدار E_j از عدد ۱ حاصل و سرانجام وزن هر معیار با تابع زیر تعیین می‌شود.

$$W_{ij} = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_j} \quad \text{رابطه (۴)}$$

پس از محاسبه وزن عوامل (W_j) پهنه‌بندی با رابطه (۵) ارزیابی می‌شود:

$$H_i = \sum_{j=1}^m W_{ij} X_{ij} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در این رابطه H_i ، ضریب رخداد فرسایش، W_j ، وزن نهایی هر یک از عوامل و X_{ij} ، هر یک از عوامل (لایه‌ها) است (زونگجی و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۳۳۶). این رابطه در واقع مدل ناحیه‌ای میزان وقوع فرسایش در منطقه مطالعاتی است.

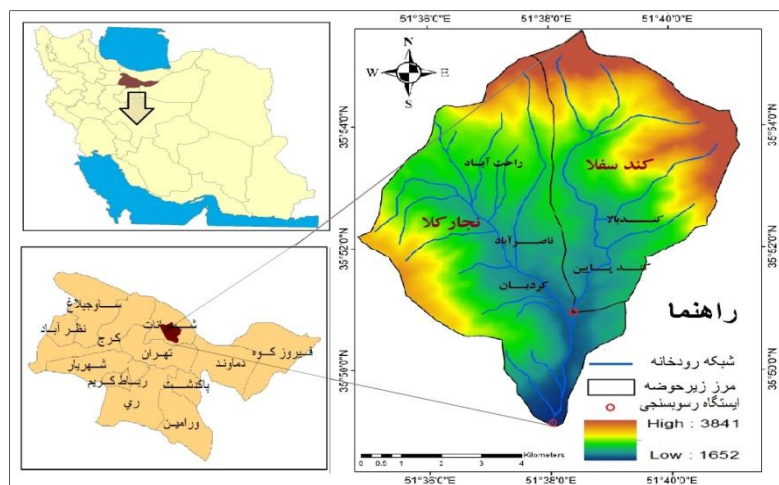


شکل ۲: فرایند روش تحقیق

محدوده و قلمرو پژوهش

منطقه مورد مطالعه با مساحت ۶۰/۲۸ کیلومترمربع و مختصات ۵۱ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۴۱ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۵۵ دقیقه عرض شمالی در شمال شرقی تهران قرار گرفته است (شکل ۱). حداکثر ارتفاع حوضه ۳۸۴۱ و حداقل ارتفاع آن ۱۶۵۲ متر که بیانگر یک حوضه کوهستانی پرشیب است. رودخانه اصلی حوضه کند رود است

(شکل ۱). حوضه کند بخشی از حوضه آبخیز لتیان و جزء منطقه کوهستانی البرز مرکزی (دامنه جنوبی آن) است که شامل دو زیر حوضه کند سفلا و نجارکلا است. از نظر ژئومورفولوژی عمدتاً به شکل توده سنگی-بیرون زدگی سنگی است. محدوده مورد مطالعه بیش از ۵۰۰ میلی‌متر در سال بارش دارد که بیش از نیمی از آن به شکل برف است (محمدخان، ۱۳۸۸: ۶۶).



شکل ۱: موقعیت حوضه آبخیز کند در شمال استان تهران

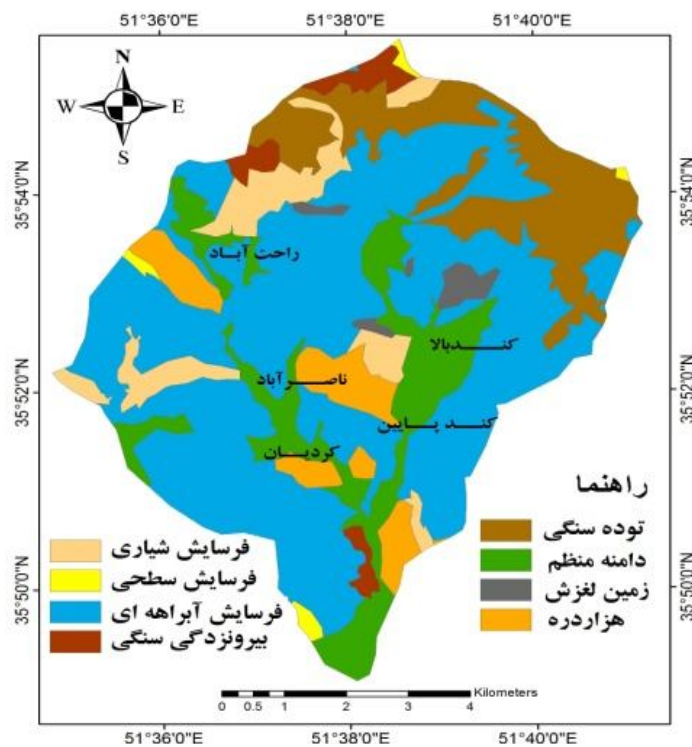
بحث اصلی

در برداشت ویژگی‌های رخساره‌ها، امتیاز هر رخساره و اهمیت آن در فرسایش و تولید رسوب و نیز تعداد پهنه در منطقه و وسعت پهنه‌ها لحاظ شد. به این صورت که از رخساره‌های غیر فرسایشی یک مورد انتخاب و با افزایش تأثیر در فرسایش، تعداد محل برداشت ویژگی‌های رخساره‌ها نیز افزایش داده شد (شکل ۴). برای مثال رخساره غیر فرسایشی توده و

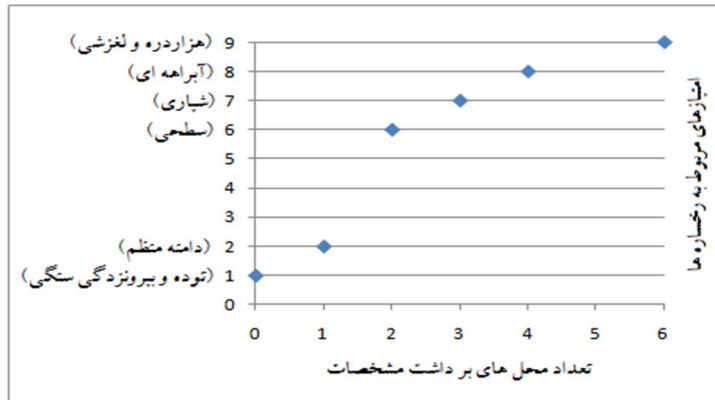
بیرون زدگی سنگی با کمترین امتیاز کارشناسی (۱)، هرچند در محل‌های مختلف برونزد داشته تنها در یک محل داده‌های آن مورد ارزیابی قرار گرفت، رخساره هزار دره و لغزشی که بیشترین نقش و امتیاز (۹) را (جدول ۱) به خود اختصاص داده‌اند، با توجه به کل محل‌های برونزدها در منطقه پژوهشی، روی هم شش محدوده (بالاترین تعداد) را در (جدول ۳) به خود اختصاص داده‌اند.

جدول ۱: مساحت و امتیاز کارشناسی رخساره

امتیاز	درصد مساحت	مساحت KM ₂	رخساره‌های ژئومورفوزی	فرسایشی
۹	۶/۱۴	۳/۷۰	هزار دره	فرسایشی
۹	۱/۴۳	۰/۸۶	حرکات توده‌ای	
۸	۵۴/۸۶	۳۳/۰۷	آبراهه‌ای	
۷	۶/۹۳	۴/۱۸	شیاری	
۷	۰/۷۲	۰/۴۳	سطحی	
۲	۱۳/۱۷	۷/۹۴	دامنه منظم	غیر فرسایشی
۱	۲/۴۱	۱/۴۵	بیرون زدگی سنگی	
۱	۱۴/۳۵	۸/۶۵	توده سنگی	
	۱۰۰	۶۰/۲۸	مجموع	مجموع



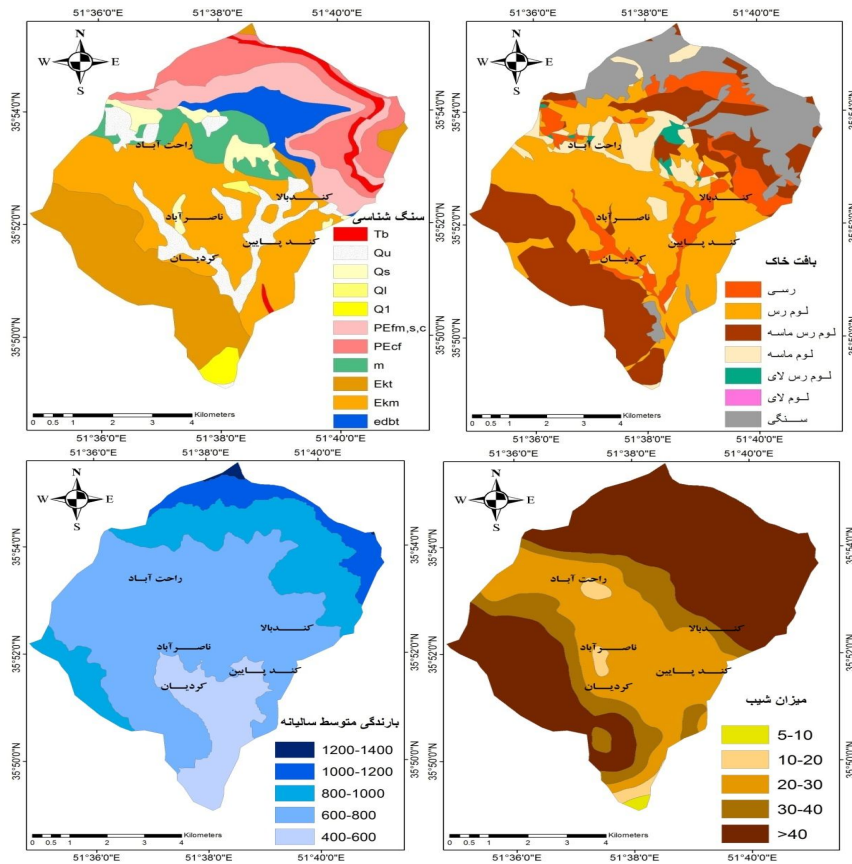
شکل ۳: نقشه رخساره‌های ژئومورفولوژیکی

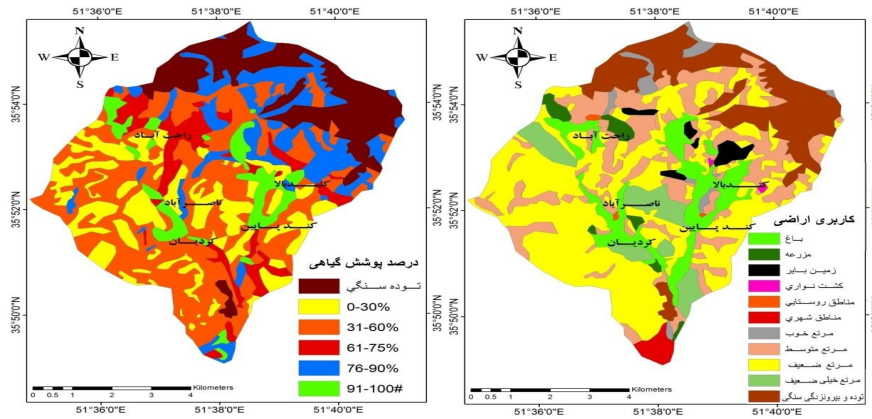


شکل ۴: تعداد محل‌های نمونه برای برداشت ویژگی‌های رخساره‌ها (با توجه به جدول ۱)

کارشناسان در انتخاب مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرسایش و تهیه لایه‌های اطلاعاتی متعاقب آن دخیل بوده‌اند. جدول ۲ امتیازهای اختصاص داده شده به هر عامل را بر اساس نظر کارشناس و با استفاده از مقیاس دوقطبی نشان می‌دهد،

شکل ۵ لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در فرایند پژوهش از جمله: بافت خاک، کاربری اراضی، درصد پوشش گیاهی، متوسط بارندگی سالانه، سنگ‌شناسی، شیب را نشان می‌دهد. عواملی مانند پیشینه پژوهش‌های انجام شده در زمینه فرسایش، شرایط طبیعی منطقه مورد مطالعه و نیز نظر





شکل ۵: لایه‌های مورد استفاده در فرایند تحقیق

را از نظر هر یک از پارامترهای جدول فوق و نیز تعداد هر رخساره نشان می‌دهد.

به تبع هر چه نقش طبقه‌های هر لایه در بروز فرسایش بیشتر بوده امتیاز داده شده نیز افزایش داشته است. جدول ۳ ویژگی‌های رخساره‌های مختلف منطقه

جدول ۲: امتیاز اختصاص یافته به عوامل مؤثر در لغزش

امتیاز	بارندگی	امتیاز	شیب	ارتفاع	درصد پوشش گیاهی	امتیاز	بافت خاک	امتیاز	کاربری اراضی	امتیاز	سنگ‌شناسی
۹	-۶۰۰ ۴۰۰	۴	۵-۱۰	۹	۰-۳۰٪	۶	رسی	۹	مزرعه	۴	سیل با ترکیب بازی و متوسط
۷	-۸۰۰ ۶۰۰	۵	-۲۰ ۱۰	۹	۳۱-۶۰٪	۹	لوم رسی	۶	باغ	۴	مخروط افکنه و آبرفت رودخانه
۵	-۱۰۰۰ ۸۰۰	۹	-۳۰ ۲۰	۵	۶۱-۷۵٪	۱	سنگی	۲	مرتع خوب	۵	دامنه واریزه‌ای جوان و قدیمی
۴	-۱۲۰۰ ۱۰۰۰	۸	-۴۰ ۳۰	۴	۷۶-۹۰٪	۷	لوم رس ماسه‌ای	۶	مرتع متوسط	۲	مخروط افکنه و پادگانه آبرفتی
۳	-۱۴۰۰ ۱۲۰۰	۵	>۴۰	۱	۹۱-۱۰۰٪	۸	لوم ماسه‌ای	۹	مرتع ضعیف	۷	توده لغزشی و ریزشی
				۱	توده سنگی	۸	لوم رس لای	۹	مرتع خیلی ضعیف	۶	مارن- ماسه- کنگلومرا- گچ
						۹	لوم لای	۳	توده و بیرون زدگی سنگی	۳	کنگلومرا- ماسه سنگ- آهک،
								۴	کشت نواری	۷	لای- شیل- ماسه- تبخیری
								۹	زمین بایر	۶	توف- شیل- آذرآواری- گدازه
								۱	مناطق شهری	۸	لای- شیل- توف- گچ
								۶	مناطق روستایی	۵	دولومیت توده‌ای با درون لایه شیل

جدول ۳: ماتریس آنالیز عوامل مؤثر در فرسایش

بارندگی	شیب	درصد پوشش گیاهی	بافت	کاربری اراضی	سنگ‌شناسی	رخساره‌های فرسایشی
۶۰۰-۸۰۰	۲۰-۳۰	۰-۳۰٪	لوم رسی	مرتع خیلی ضعیف	لای- شیل- توف- گچ	۱ ۲ ۳ ۴
۶۰۰-۸۰۰	۲۰-۳۰	۰-۳۰٪	لوم رسی	مرتع خیلی ضعیف	لای- شیل- توف- گچ	
۴۰۰-۶۰۰	۳۰-۴۰	۳۱-۶۰٪	لوم رسی	مرتع خیلی ضعیف	لای- شیل- توف- گچ	
۴۰۰-۶۰۰	۲۰-۳۰	۳۱-۶۰٪	لوم رسی	مرتع خیلی ضعیف	لای- شیل- توف- گچ	
۶۰۰-۸۰۰ ۸۰۰-۱۰۰۰	>۴۰	۳۱-۶۰٪	لوم رسی لوم رس ماسه‌ای	زمین بایر	لای + توف + دولومیت + مارن و تبخیری	۱ ۲
۶۰۰-۸۰۰	۳۰-۴۰ >۴۰	۳۱-۶۰٪ ۶۱-۷۵٪	رسی	زمین بایر	+ لای، شیل، ماسه تبخیری آبرفت + واریزه	
۸۰۰-۱۰۰۰	>۴۰	۷۶-۹۰٪ ۳۱-۶۰٪	رسی لوم رس ماسه‌ای	مرتع متوسط مرتع ضعیف	مارن، ماسه، +کنگلو، آهکی، گچ	۱ ۲ ۳ ۴
۶۰۰-۸۰۰	>۴۰	۳۱-۶۰٪	لوم ماسه‌ای	مرتع متوسط مرتع ضعیف	لای- شیل- ماسه- تبخیری	
۶۰۰-۸۰۰	۲۰-۳۰ ۳۰-۴۰	۳۱-۶۰٪ ۰-۳۰٪	لوم رسی	مرتع ضعیف	لای- شیل- توف- گچ	
۶۰۰-۸۰۰ ۸۰۰-۱۰۰۰	>۴۰	۳۱-۶۰٪ ۰-۳۰٪	لوم رس ماسه‌ای	مرتع ضعیف	توف- شیل- آذرآواری- گدازه	
۸۰۰-۱۰۰۰ ۶۰۰-۸۰۰	۲۰-۳۰	۳۱-۶۰٪	لوم رسی	مرتع متوسط مناطق روستایی	مارن و ماسه + لای، شیل و تبخیری + واریزه + شیل و گچ	۱ ۲ ۳
۸۰۰-۱۰۰۰ ۶۰۰-۸۰۰	>۴۰	۳۱-۶۰٪	لوم رس ماسه‌ای	مرتع متوسط مرتع ضعیف	توف- شیل- آذرآواری- گدازه	
۴۰۰-۶۰۰	۲۰-۳۰	۳۱-۶۰٪ ۶۱-۷۵٪	لوم رس	مرتع متوسط	لای- شیل- توف- گچ و سیل بازی	
۶۰۰-۸۰۰	۲۰-۳۰	۳۱-۶۰٪	لوم ماسه‌ای	مرتع متوسط	لای- شیل- توف- گچ	۱ ۲
۴۰۰-۶۰۰	۳۰-۴۰	۳۱-۶۰٪	لوم رس ماسه‌ای	مرتع متوسط	توف- شیل- آذرآواری- گدازه	
۴۰۰-۶۰۰	۲۰-۳۰	۷۶-۹۰٪	رسی	باغ	مخروط‌افکنه و آبرفت جوان	۱

احتمال P_i بر اساس سازوکار آماری محاسبه شده و مقدار آن در صورت تساوی P_i با یکدیگر بیشترین مقدار ممکن خواهد بود (اصغرپور، ۱۳۹۲). سپس عدم اطمینان یا درجه انحراف هر معیار (d_j) از کسر مقدار E_j از عدد ۱ حاصل شد و با استفاده از رابطه ۴ وزن معیارهای استفاده شده در ماتریس آنالیز عوامل (W_j) حاصل شد. جدول ۵ مقادیر پارامترهای ذکر شده را نشان می‌دهد.

در مجموع ۱۶ محل برای رخساره‌های فرسایشی در نظر گرفته شد. جدول ۴ مقادیر کمی شده جدول ۳ را ارائه می‌کند که به عنوان داده‌های اصلی در تشکیل ماتریس آنالیز عوامل و محاسبه‌های مربوطه به کار رفته است. پس از تبدیل معیارها به عدد صحیح و تشکیل ماتریس اولیه (جدول ۴)، مقدار (P_{ij}) با استفاده از رابطه ۱، مقدار (K) با رابطه ۳ به دست آمد و برای محاسبه مقدار (E_j) از رابطه ۲ استفاده شد که مقادیر آن در جدول ۵ آمده است. در این رابطه E از توزیع

جدول ۴: ماتریس آنتروپی کمی شده عوامل مؤثر در فرسایش (Xij)

بارندگی	شیب	درصد پوشش گیاهی	بافت	کاربری اراضی	سنگ شناسی	رخساره‌های فرسایشی	
۷	۹	۹	۹	۹	۸	۱	تراز
۷	۹	۹	۹	۹	۸	۲	
۹	۸	۹	۹	۹	۸	۴	
۹	۹	۹	۹	۹	۸	۵	
۶	۵	۹	۸	۹	۶	۱	لغزشی
۷	۶,۵	۷	۶	۹	۵/۳۳	۲	
۵	۵	۶/۵	۶/۵	۷/۵	۵/۵	۱	آبراه‌های
۷	۵	۹	۸	۷/۵	۷	۲	
۷	۸/۵	۹	۹	۹	۸	۳	
۶	۵	۹	۷	۹	۶	۴	
۶	۷	۹	۹	۶	۶/۵	۱	شیاری
۶	۵	۹	۷	۷/۵	۶	۲	
۹	۹	۷	۹	۶	۶	۳	
۷	۹	۹	۸	۶	۸	۱	سطحی
۹	۸	۹	۷	۶	۶	۲	
۹	۹	۴	۶	۶	۴	۱	غیر فرسایشی

جدول ۵: مقادیر شاخص‌های محاسبه شده برای عوامل مؤثر در فرسایش

بارندگی	شیب	درصد پوشش گیاهی	بافت	کاربری اراضی	سنگ شناسی	شاخص‌های محاسبه شده
۰/۹۹۴۲۲۷	۰/۹۸۹۶۶	۰/۹۹۴۱۴۶	۰/۹۹۶۲۷۸	۰/۹۹۴۶۴۲	۰/۹۹۳۸۶۲	E _j
۰/۰۰۵۷۷۳	۰/۰۱۰۳۴	۰/۰۰۵۸۵۴	۰/۰۰۳۷۲۲	۰/۰۰۵۳۵۸	۰/۰۰۶۱۳۸	d _j
۰/۱۵۵۲۳۶	۰/۲۷۸۰۷	۰/۱۵۷۴۳۴	۰/۱۰۰۰۹۸	۰/۱۴۴۰۸۶	۰/۱۶۵۰۷۶	W _j
۱۵/۵۲	۲۷/۸۱	۱۵/۷۴	۱۰/۰۱	۱۴/۴۱	۱۶/۵۱	درصد تأثیر
۴	۱	۳	۶	۵	۲	ترتیب اهمیت

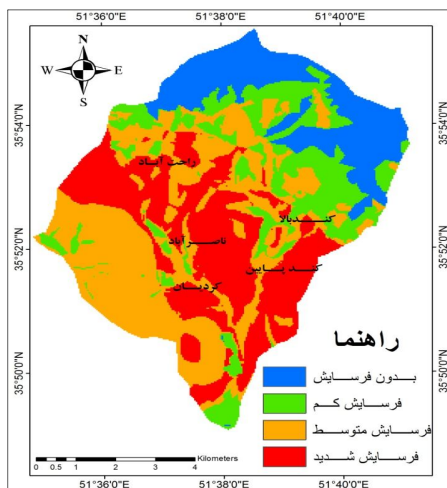
$$H = (R \times 0/1552) + (S \times 0/2780) + (V \times 0/1574) \\ + (T \times 0/1000) + (LU \\ \times 0/1440) + (L \times 0/1650)$$

در این رابطه R: بارندگی، S: شیب، V: پوشش گیاهی، T: بافت خاک، LU: کاربری زمین و L: سنگ شناسی است. در ادامه با استفاده از وزن‌های به دست آمده نقشه پهنه‌بندی فرسایش (شکل ۴) تهیه شد.

شکل ۶ نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش را در قالب چهار طبقه فرسایشی از فاقد فرسایش تا فرسایش شدید و جدول ۶ مساحت هر یک را نشان می‌دهد. با همپوشانی نقشه نهایی و نقشه رخساره‌های ژئومورفولوژی، مشخص شد که هر یک از رخساره‌ها در کدام پهنه از نظر شدت فرسایش قرار گرفته‌اند.

با توجه به ویژگی‌های طبیعی و جغرافیایی منطقه و روش آنتروپی که برای وزن‌دهی مورد استفاده قرار گرفته است، میزان تأثیر عوامل شش‌گانه مؤثر در فرسایش متفاوت است. شیب با ۲۷/۸۱ درصد، بالاترین عدد و بیشترین تأثیر را در ایجاد فرسایش داشته، پس از آن سنگ‌شناسی قرار می‌گیرد که ۱۶/۵۱ درصد در ایجاد فرسایش در منطقه مؤثر بوده است، سپس پوشش گیاهی با ۱۵/۷۴ درصد و بارندگی با ۱۵/۵۲ درصد نسبتاً مشابه تأثیرگذار بوده‌اند و کاربری اراضی با ۱۴/۴۱ درصد تأثیر پس از آن‌ها قرار می‌گیرد. در نهایت مدل ناحیه‌ای وقوع فرسایش در آبخیز کند با رابطه ۵ به صورت زیر به دست آمد:

شیاری را در برمی‌گیرد و ۳۵/۵۴ درصد تحت سیطره فرسایش کم و بسیار کم قرار دارد و دربردارندهٔ رخساره‌های سنگی و دامنهٔ منظم است.



شکل ۶: پهنه‌بندی شدت فرسایش در حوضهٔ آبخیز کند

تشکیل شده است. درصد پوشش گیاهی این محدوده عمدتاً ۳۰ تا ۶۰ درصد است. بارش این پهنه بیشتر ۶۰۰-۴۰۰ در سال است. از نظر کاربری اراضی دربرگیرندهٔ مراتع ضعیف و نیز مزارع است. بافت خاک این پهنه نیز عمدتاً خاک‌های لومی-رسی است. بنابراین بالاترین خطر فرسایش الزاماً مربوط به بیشترین بارش، تندترین شیب، زمین‌عریان، سست‌ترین سنگ‌شناسی و ... نیست بلکه برآیندی از تأثیر مجموعه‌ای از عوامل مؤثر است که سبب بروز فرسایش شدید در برخی مناطق شده است. با این حال می‌توان با حفاظت از پوشش گیاهی و پرهیز از کاربری‌های نامناسب در شیب‌های زیاد از گسترش رخساره‌های شیاری و آبراه‌های که در اکثر پهنه‌ها حضور دارند و تبدیل آن‌ها به رخساره هزاردره و یا لغزشی که پتانسیل فرسایشی بالایی دارند، جلوگیری کرد.

پیشنهادها

- استفاده از لایه‌های با دقت بالا در تهیه نقشه خطر فرسایش و تعریف واحدهای کاری برای بررسی

محدودهٔ خطر شدید ۲۸/۸۶ درصد حوضه را در برمی‌گیرد و عمدتاً شامل رخساره‌های فرسایشی از نوع هزاردره و آبراه‌های است. محدوده فرسایش متوسط با مساحت ۳۵/۵۹ درصد عمدتاً رخساره‌های لغزشی و

جدول ۶: مساحت پهنه‌های فرسایشی حوضه کند

پهنه‌ها	مساحت (Km ²)	درصد مساحت	رخساره عمده
فاقد فرسایش	۱۰/۴۱	۱۷/۲۶	توده و بیرون‌زدگی سنگی و فرسایش سطحی
فرسایش کم	۱۱/۰۲	۱۸/۲۸	دامنه منظم، آبراه‌های، شیاری
فرسایش متوسط	۲۱/۴۵	۳۵/۵۹	دامنهٔ منظم، لغزشی، فرسایش شیاری و آبراه‌های
فرسایش شدید	۱۷/۴۰	۲۸/۸۶	هزاردره، آبراه‌های و اندکی سطحی
مجموع	۶۰/۲۸	۱۰۰	

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج مدل نشان دادند که مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در فرسایش حوضه در درجهٔ اول شیب با ۲۷/۸۱ درصد تأثیر است و سپس سنگ‌شناسی، پوشش گیاهی، بارندگی، کاربری اراضی قرار دارند، عامل بافت خاک با ۱۰/۰۱ کمترین درصد تأثیر را در فرسایش حوضه کسب کرده است (جدول ۵). نتیجهٔ مدل به صورت یک نقشه پهنه‌بندی خطر یا شدت فرسایش ارائه شد (شکل ۶) که از طریق مقایسه و همپوشانی مناطق پرخطر این نقشه با لایه‌های تحقیق می‌توان سازندها، نوع کاربری، نوع پوشش و ... در معرض خطر که پتانسیل بالاتری در زمینه فرسایش و تولید رسوب دارند را شناسایی نمود. نقشهٔ پهنه‌بندی، نشان دهندهٔ پتانسیل بالای فرسایش حوضه است، به طوری که ۶۴/۵ درصد از منطقهٔ در محدودهٔ فرسایش متوسط و شدید قرار گرفته است. منطقهٔ فرسایش شدید با جهتی شمال غربی-جنوب شرقی در قسمت مرکزی حوضه قرار دارد. رخساره‌های این محدوده عمدتاً هزار دره، آبراه‌های هستند و بیشتر از شیب‌های ۲۰ تا ۳۰ درجه و ۳۰ تا ۴۰ و نیز سنگ‌شناسی گل‌سنگ، شیل، توف و تبخیری (E^m_k)

جلوگیری از فعالیت‌های تشدید کننده فرسایش و همچنین تقویت پوشش گیاهی ضروری است همچنین انجام اقدامات آبخیزداری با توجه به شرایط منطقه جهت کنترل فرسایش و تولید رسوب مفید خواهد بود.

آبخیز لتیان). رساله دکتری. استاد راهنما: دکتر حسن احمدی و محمد جعفری. دانشگاه تهران، دانشکده منابع طبیعی، گروه احیاء منطق خشک و کوهستانی.

۱۱. محمودآبادی، مجید. امیر حسین چرخایی و حسینقلی رفاهی و منوچهر گرجی. ۱۳۸۴. پهنه‌بندی خطر فرسایش در حوزه آبخیز گل‌آباد اصفهان با استفاده از مدل MPSIAC و GIS. مجله علوم کشاورزی ایران، جلد ۳۶، شماره ۲، صص ۵۲۰-۵۱۱.

۱۲. مقیمی، ابراهیم. سجاد باقری‌سیدشکری و طاهر صفرآباد. ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل آنتروپی (مطالعه موردی: تقادیس نثار زاگرس شمال غربی). مجله پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، شماره ۷۹، صص ۷۹-۹۰، تهران.

۱۳. مقیمی، ابراهیم. سعید نگهبان. ۱۳۹۱. بررسی فرسایش در حوزه آبخیز رودخانه شور فدामी (استان فارس) با استفاده از مدل آنتروپی. مجله پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، سال ۴۴، شماره ۳، صص ۱۶-۱، تهران.

۱۴. موسوی، سید حجت. ۱۳۹۶. برآورد میزان فرسایش خاک در حوزه آبخیز شاهرود - میامی با استفاده از مدل SLEMSA و تکنیک GIS. مجله آمایش جغرافیایی فضا، سال هفتم، شماره ۲۴، دانشگاه گلستان، گرگان.

15. Barthes, B., Anastase Azontond, B.Z. Boil, Christian Part, and Eric Rosse, 2000. Field-scale runoff and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). *Europ. Journal of Soil Science*, 51: 3, United Kingdom.
16. Bayramin, Ilhami, Orhan Dengiz, Oguz Baskan and Mehmet Parlak, 2003. Soil erosion assessment with ICONA model: Case study Bepazari area. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27(2), Turkish.

منطقه و در نهایت مقایسه کارایی نتایج مدل‌های مختلف - قسمت‌هایی از حوضه آبخیز که بیشتر مناطق جنوبی را در بر می‌گیرد، مورد استفاده شدید جمعیت انسانی قرار گرفته است و در نتیجه فرسایش شدیدتر می‌باشد. در این مناطق

منابع

۱. احمدی، حسن. ۱۳۷۸. ژئومورفولوژی کاربردی. جلد ۱، فرسایش آبی، چاپ دوم، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
۲. ارکات، جمال. مسعود باباخانی و سید بابک ابراهیمی. ۱۳۸۸. به کارگیری باز پخت شبیه‌سازی شده در مدل آنتروپی توزیع سفر. نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، جلد ۲۰، شماره اول، صص ۲۱-۱۶، دانشگاه علم و صنعت.
۳. اصغرپور، محمدجواد. ۱۳۹۲. تصمیم‌گیری‌های چند معیاره. چاپ ۱۱، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
۴. رفاهی، حسینقلی. ۱۳۷۹. فرسایش آبی و کنترل آن. چاپ سوم، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
۵. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، برگه شرق تهران.
۶. سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، برگه لشکرک.
۷. شکوهی، علیرضا، سحر بهشتی. ۱۳۹۳. استفاده از یک مدل ژئومورفولوژیکی مبتنی بر توان جریان برای پهنه‌بندی فرسایش و رسوب خیزی حوضه‌های آبریز. تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۵، شماره ۴، صص ۵۱۸-۵۰۹.
۸. صدوق، حسن، محمد مهدی حسین‌زاده و فهیمه آزادی. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی فرسایش در حوضه آبخیز کهمان با استفاده از سه مدل Fargas, BLM, EPM. فصلنامه هیدروژئومورفولوژی، سال اول، شماره ۲، صص ۱۵۴-۱۳۷.
۹. عبدی، پرویز. ۱۳۸۲. پهنه‌بندی اولویت و پتانسیل شدت فرسایش در اراضی حوضه آبخیز زنجان رود با استفاده از GIS. مجموعه مقالات همایش ملی ژئوماتیک، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران.
۱۰. محمدخان، شیرین. ۱۳۸۸. برآورد کمی فرسایش و رسوب به روش ژئومورفولوژی (مطالعه موردی حوضه

- vegetative cover on erosion and sediment yield. *Journal of Hydrology*, 123 (1-2), Netherlands
24. Sikka, Alok Kumar, Sarma, J.S., Sharda, V.N., Samraj, P., and Lakshmanam, V. 2003. Low flow and high flow responses to converting natural grassland into bluegum (*Eucalyptus globulus*) in Nilgiris watersheds of South India, *Journal of Hydrology*, 32(2), Netherlands.
 25. Victora, Carlos, Aaron Kacevas, and Hector Fiori, 1998. soil erodibility assessments with simulated rainfall and with the USLE nomograph in soil from Uruguay. *Proceeding of 16th World Congress of Soil Science, Symposium n 31*, Montpellier, France.
 26. Wischmeier, W.H., and Mannering, J.V. 1969. Soil and Water Management and Conservation. Relation of Soil Properties to Its Erodibility, *Soil Science Society of America, Proceedings*, 33, United States.
 27. Zongji, Yang, Jianping Qiao and Xiaogang Zhang, 2010. Regional Landslide Zonation Based on Entropy Method in Three Gorges Area, China, *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 10-12 August, China.
 17. De Roo, A.P.J. 1998. Modelling runoff and sediment transport in catchment using Gis, *Hydrological Processes*, John Wiley and sons, Ltd, Vol 12, No 905-922, New Jersey.
 18. Fournier, Frederic, 1960. *Climat et erosion: la relation entre la erosion du sol par la eau et les precipitations atmospheriques*. presses Universities de France, Paris.
 19. Ganasri, B.P., Ramesh, Honnasiddaiah, 2016. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS: A case study of Nethravathi Basin, *Geoscience Frontiers*. 7(6), China.
 20. Kerr, John. Kwanghun Chung, 2006. *Environment and Production Technology Division International Food Policy*, Research Institute Washington, D.C., Washington.
 21. Le Bissonnais, Yves. Cécile Montier, Marcel Jamagne, Joël Daroussin, Dominique King, 2002. Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena*, 46 (2-3), Germany.
 22. Paulov, Jan, 1991. The Zone-Size-Dependent Entropy Formula and Spatial Interaction Modeling: A Note on Some Implications. *Environment and Planning*, Vol 23, No 4, London.
 23. Rogers Robert D., and Stanley A. Schumm, 1991. The effect of sparse

