

ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز رودخانه بالیخلو (سدیامچی) با استفاده از مدل فازی

موسی عابدینی* - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
نازیلا یعقوب نژاداصل - دانشجوی دکتری مخاطرات ژئومورفولوژیک، دانشگاه محقق اردبیلی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۲۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۶/۰۲/۱۹

چکیده

در اثر شدت فرسایش خاک در حوضه آبخیز رودخانه بالیخلو (سدیامچی) و افزایش رسوب‌گذاری در مخزن این سد باعث کاهش حجم مفید مخزن آن می‌شود. برای این منظور از مدل فازی و شاخص‌های تراکم شبکه زهکش، بیشترین میزان بارندگی روزانه، خاک، کاربری زمین، زمین‌شناختی، شیب، ارتفاع، انحنا پروفیل و انحنا پلانی متریک استفاده شد و نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک تهیه گردید. نتایج نشان داد که در حدود ۴۲/۱۶ درصد پهنه‌های با خطر فرسایش بسیار زیاد تا زیاد قرار گرفته است. این پهنه‌ها در واحدهای توپوگرافی دشت‌ها، کوه‌پایه‌ها، کوهستان‌های نسبتاً مرتفع و مرتفع واقع شده‌اند. حدود ۲۶/۹۳ درصد در پهنه با خطر فرسایش متوسط قرار دارد. در حدود ۳۰/۸۸ درصد در پهنه‌های با خطر فرسایش کم و بسیار کم قرار گرفته است. مورفولوژی پهنه‌های در معرض خطر فرسایش از مورفولوژی تراکم شبکه زهکش تبعیت کرده‌اند. این نشان‌دهنده نقش شبکه زهکش رودخانه بالیخلو در فرسایش خاک‌ها است. پیشنهاد می‌شود که عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک در این حوضه به وسیله مهندسين منابع طبیعی و آبخیزداری اعمال شود. این نقشه‌ها می‌توانند مورد استفاده مهندسين منابع طبیعی و آبخیزداری قرار گیرد.

واژگان کلیدی: پهنه‌بندی، فرسایش خاک، مدل فازی، حوضه آبخیز سدیامچی، رودخانه بالیخلو.

مقدمه

فرسایش خاک به‌عنوان یکی از مشکلات محیط زیستی شناخته‌شده است که بسیاری از کشورهای جهان با آن مواجه هستند (میترا و همکاران^۱، ۱۹۹۸، ۱۸۴). فرسایش خاک باعث از بین رفتن این منبع طبیعی بارزش می‌شود. این فرسایش بسیار آهسته رخ می‌دهد و اثرش در درازمدت به‌صورت کاهش حاصل خیزی خاک آشکار می‌شود. همچنین فرسایش خاک با اضافه کردن رسوبات معلق باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی و تخریب سطح زمین می‌شود (میترا و همکاران، ۱۹۹۸، ۱۸۴). بانک جهانی و دیگر مراکز تحقیقاتی دنیا نرخ فرسایش را در جهان بین ۱/۲ تا ۳۷ تن در هکتار تخمین زده‌اند (مال اوا و بو ندا^۲، ۱۹۹۹، ۲). به‌طور کلی بیشترین مساحت در معرض خطر فرسایش در جهان مربوط به قاره آسیا با سی‌وپنج میلیون هکتار و پس‌از آن مربوط به قاره‌های آفریقا، آمریکا و اروپا است (کارتاجنا^۳، ۲۰۰۴، ۲۱). فرسایش خاک یکی از مسائل و مشکلات جدی حوضه‌های آبخیز ایران محسوب می‌شود و می‌توان از آن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین موانع برای دستیابی به توسعه پایدار کشاورزی و منابع طبیعی نام برد (عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۳). بر اساس مطالعات انجام‌گرفته در ایران سالیانه به‌طور متوسط ۱۵۰۰ تن خاک از هر کیلومتر مربع سطح زمین در اثر فرسایش آبی شسته می‌شود و این بدان معناست که هر سال یک میلی‌متر از ضخامت خاک در کشور کاسته می‌شود (سپهر و هنرمند نژاد، ۱۳۹۱، ۵۸). از آنجایی که در کشورهای در حال توسعه روش‌های تجربی و مشاهدات میدانی زمان‌بر هستند و اغلب با هزینه‌های زیاد همراه هستند، بنابراین استفاده از روش‌های جایگزین و کم‌هزینه‌تر مانند انواع روش‌های پهنه‌بندی برای پیش‌بینی و ارزیابی فرسایش خاک مطلوب‌تر هستند. چون اطلاعات صحیح و قابل قبول از میزان کمی فرسایش در حوضه‌های آبخیز وجود ندارد، لذا قبل از تهیه نقشه کمی فرسایش، اغلب نیاز به برآورد حساسیت یا پتانسیل مناطق مختلف حوضه از نظر شدت فرسایش خاک و به‌عبارتی دیگر پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش خاک است (نادری و همکاران، ۱۳۸۹، ۴۵). نقشه‌های پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک، توزیع فضایی نواحی و مکان‌های در معرض این پدیده را شناسایی می‌کنند و می‌توان از آن‌ها در برنامه‌ریزی‌ها استفاده کرد.

سد یامچی تأمین‌کننده شصت‌وپنج میلیون مترمکعب آب در سال، در بخش کشاورزی و بیست میلیون مترمکعب آب در سال برای مصارف شهری اردبیل است. در اثر فرسایش خاک در حوضه آبخیز رودخانه بالیخلو (سدیامچی)، ورود آب به همراه رسوب به مخزن سد، باعث شده است که عمق جریان افزایش و از سرعت جریان کاسته شده و از انرژی جریان جهت حمل رسوب کاسته شود، این امر شدت رسوب‌گذاری را در این سد افزایش داده که در نهایت از یک طرف باعث کاهش حجم مفید مخزن سد گردیده است (قلمی و فتاحی نصرآبادی، ۱۳۹۰: ۱) و از طرف دیگر به علت این که زمین‌های این حوضه آبخیز به زیر کشت و زرع رفته‌اند، احتمال این که در آینده نزدیک به دلیل فرسایش خاک و به‌تبع آن تخریب زمین از میزان تولیدات کشاورزی این حوضه کم شود، زیاد است؛ بنابراین آگاهی از میزان خطر فرسایش در این حوضه آبخیز احساس می‌شود. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه فرسایش صورت گرفته است. اولین تحقیقات علمی در زمینه فرسایش خاک بین سال‌های ۹۵-۱۸۷۷ توسط دلفی، دانشمند آلمانی صورت گرفته است (یمانی و همکاران، ۱۳۸۴، ۱۸۸). باگذشت زمان، نتایج و بررسی‌های مشابه انجام‌شده است. اولین گزارش در مورد فرسایش خاک در ایران، در سال ۱۳۳۷ توسط دوان‌دوبین کارشناس فائو تهیه و منتشر شد (یمانی و همکاران، ۱۳۸۴: ۱۸۸).

مدل کردن فرآیندهای فیزیکی و پویا مانند فرسایش خاک با مشکلات و خطاهایی همراه است. در دسترس نبودن منابع داده‌ای صحیح، کیفیت داده‌های مورداستفاده، مسئله مقیاس در مدل‌سازی، خطاهای اندازه‌گیری و پیچیدگی خود مدل از جمله مشکلاتی است که در مطالعات فرسایش خاک توسط بسیاری از پژوهشگران گزارش شده است (عرفانیان و همکاران،

۴۳): روش برآورد نزدیک به واقعیت مقدار کمی فرسایش خاک در مقیاس حوضه آبخیز به‌عنوان یک موضوع مهم موردتوجه پژوهشگران بوده است (عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۳). در طی سال‌های متمادی، تلاش‌های زیادی صورت گرفته است تا تلفات خاک در اراضی شیب‌دار برآورد و پهنه‌های فرسایشی شناسایی شوند و درنهایت با تنظیم برنامه‌های مدیریت زمین، حاصلخیزی خاک حفظ شود که برای نیل بدین هدف، روش‌های متعددی ابداع گردید (روستایی و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۴۹). این روش‌ها در ابتدا کیفی و مبتنی بر یک شاخص منفرد بودند. با افزایش تعداد داده‌ها، معادلاتی مبتنی بر شاخص‌های متعدد به وجود آمدند.

مطالعه بر روی پارامترهای مختلف و تعمیم آن به حوضه‌های مختلف، منجر به ابداع مدل‌ها و روش‌های تجربی متعددی همچون مدل‌های یو اس لی^۱، فائو^۲، پسیاک^۳ و ای پی ام^۴ شد (فتحی، ۱۳۸۵: ۶۶). پژوهش‌ها و مدل‌های ذکرشده که بیشتر از منطق‌های دو ارزشی تبعیت می‌کردند، به دلیل مطلق‌گرایی و عدم انعطاف‌پذیری، با واقع‌گرایی لازم همراه نبودند (روستایی و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۵۰). در اکثر حوضه‌های آبخیز ایران، عدم وجود آمار دقیق از میزان کمی فرسایش، استفاده از مدل‌های برآورد فرسایش خاک را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. مدل‌های فیزیکی فرسایش خاک موجود، هم از نظر تعداد و هم از جنبه دقت زمانی و مکانی متغیرها دارای نیاز داده‌ای بالا می‌باشند؛ بنابراین فقدان و یا کمبود داده‌های ورودی مواعی را در کاربرد موفقیت‌آمیز مدل‌های فیزیکی فرسایش به وجود می‌آورد. از طرف دیگر، مدل‌های تجربی با نیاز داده‌ای کم، برای مناطق ویژه‌ای که کرت‌های فرسایشی در آن‌ها قرار داده‌شده، طراحی شده‌اند و کاربرد آن‌ها تنها به این مناطق محدود می‌شود (مریت و همکاران^۵، ۲۰۰۳، ۷۶۱، نی گل^۶، ۲۰۱۰: ۱۹۱). سایر جنبه‌های مهم که در بسیاری از مطالعات مربوط به ارزیابی خطر فرسایش خاک از آن چشم‌پوشی شده است، طبیعت خود عامل‌های ورودی کنترل‌کننده محیطی مدل است. این عامل‌ها در واقع فازی هستند. مدل‌های فیزیکی و تجربی موجود، هر عارضه و واحدهای مکانی در طبیعت که دارای مرزهای مشخص است را موردتوجه قرار می‌دهند (اوینم^۷، ۲۰۱۱: ۸).

جهت دستیابی به انعطاف‌پذیری بیشتر و تحلیل‌های واقع‌بینانه‌تر در دهه‌های اخیر، محققان اقدام به تعریف روش‌های مبتنی بر منطق‌های چند ارزشی کرده‌اند که تئوری فازی از جمله آن‌هاست (روستایی و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۰). از جمله کاربردهای تئوری فازی و مدل‌های مختلف در زمینه مطالعات ژئومورفولوژی و فرسایش می‌توان به تحقیقات کشاورز بخشایش (۱۳۷۷) اشاره کرد که اولویت‌بندی زیر حوضه‌های حوضه آبخیز اوجان چای را با استفاده از روش منطق فازی انجام داد و نتیجه گرفت استفاده از این روش برای اولویت زیر حوضه‌ها، از نظر تولید فرسایش و سیل‌خیزی مناسب است. میترا و همکاران (۱۹۹۸) نشان دادند در صورت تلفیق معادله جهانی فرسایش با روش منطق فازی دقت مدل تا ۹۰ درصد افزایش می‌یابد، در صورتی که تخمین فرسایش با معادله جهانی فرسایش به‌تنهایی حداکثر ۷۲ درصد دقت دارد. مورات و کاندان^۸ (۲۰۰۰) اعلام کردند، به دلیل پیچیدگی ماهیت پدیده‌های طبیعی، از جمله زمین‌لغزش، استفاده از روش‌های فازی در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی دقت نتایج را به میزان زیادی افزایش می‌دهد. آ تندا^۹ (۲۰۰۲) کیفیت خطر فرسایش آبی در

1- USLE

2- Fao

3- PSIAC

1- EPM

2- Merritt and et. al

3- Nigel

4- Oinam

5- Murat and Candan

6- Attanda

7- SLEMSA

8- Tangestani

دشت مرطوب بنین را با استفاده از دو مدل یو اس لی و اس لمسا^۱ مورد ارزیابی قرار داده و نتیجه گرفته است که مدل اس لمسا به دلیل تشابه نتایج آن با نتایج طرح‌های صورت گرفته، انطباق بهتری با شرایط گرمسیری دارد یا تنگستانی^۲ (۲۰۰۶) نتایج نقشه‌های تولیدی از روش‌های ای پی ام و ام پسیاک^۳ را مقایسه کرد و نتیجه گرفت مدل ام پسیاک دقیق‌تر است. یانگ و همکاران^۴ (۲۰۱۳)، با استفاده از مدل فازی و روش تحلیل سلسله مراتبی به ارزیابی خطر فرسایش خاک در نواحی کارستی جنوب غربی کشور چین پرداختند. ایشان از شاخص‌هایی مانند کاربری زمین، شیب، ارتفاع، جهت دامنه و جاده‌ها استفاده کردند. ایشان نتیجه گرفتند که حدود ۵۲/۳۵ درصد و ۲۴/۸۶ درصد از مساحت محدوده مورد مطالعه در معرض خطر فرسایش خاک به ترتیب با شدت زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته است. بیسواس و همکاران^۵ (۲۰۱۵)، با استفاده از روش‌های جی‌آی‌اسی نواحی آسیب‌پذیر از لحاظ خطر فرسایش خاک در استان تلانگانا کشور هند شناسایی کردند. ایشان نشان دادند که در حدود ۶۹ درصد از محدوده حوضه مورد مطالعه در معرض فرسایش خاک قرار گرفته است. احمدی و همکاران (۱۳۸۷) برای کمی کردن ژئومورفولوژیک فرسایش، تعداد ۸۱ شاخص در قالب ۹ معیار مناسب در فرسایش خاک و تولید رسوب، شاخص‌های رخساره‌های ژئومورفولوژی، سنگ‌شناسی، توپوگرافی، اقلیم، هیدرولوژی، خاک، چگونگی بهره‌برداری از زمین، پوشش گیاهی و اقتصادی- اجتماعی سد لتیان را بررسی کردند. ایشان برای کمی نمودن مدل مفهومی، از نظریه مجموعه‌های فازی بهره‌گیری و با به‌کارگیری هفت عملگر فازی، نقشه‌های شدت فرسایش را تهیه کردند و نشان دادند که بیشترین دقت مربوط به نقشه تهیه‌شده با بهره‌گیری از عملگر گامای فازی ۰/۸ با ضریب دقت کلی ۹۱ درصد است. یمانی و همکاران (۱۳۸۴)، پدیده فرسایش را در حوضه آبخیز داور زن شهرستان سبزوار با استفاده از مدل فازی در قالب نرم‌افزار الویس و جی‌آی‌اس بررسی کردند. ایشان از عملگرهای جمع جبری فازی، ضرب جبری فازی و گاما استفاده کردند. ایشان با توجه به شرایط منطقه عملگر گامای فازی ۰/۵ را بهترین عملگر برای پهنه‌بندی در حوضه آبخیز داور زن دانستند. عابدینی (۱۳۹۳) برای میزان فرسایش خاک و کنترل و مدیریت بهینه حوضه آبریز دریاچه نئور در استان اردبیل از روش‌های کمی مختلفی استفاده کرده است.

روستایی و همکاران (۱۳۸۸) فرسایش‌پذیری حوضه آبخیز بگو شن چای با استفاده از مدل فازی و جی‌آی‌اس بررسی کردند. ایشان در تحقیق خود از متغیرهایی مانند لیتولوژی، کاربری فعلی اراضی، پوشش گیاهی، شیب و تراکم زهکشی آبراهه‌ها استفاده کردند و به دلیل انطباق نقشه‌های خروجی از عملگرهای فازی با واقعیت‌های فرسایشی به‌دست‌آمده از مطالعات میدانی، عملگر جمع جبری فازی را به دلیل بارز نمودن پهنه‌های با حساسیت فرسایش بالا نسبت به عملگر ضرب فازی، مناسب دانستند. خدابخش و همکاران (۱۳۸۸)، از دو روش تجربی ام پسیاک و ای پی ام برای برآورد فرسایش و رسوب زایی در زیر حوضه سزار (حوضه سد دز استان لرستان) در سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده کردند و نشان دادند که در حدود ۸۰ درصد از محدوده مورد مطالعه در رده فرسایش زیاد تا خیلی زیاد قرار گرفته‌اند. سپس با استفاده از مجموعه‌های فازی به پهنه‌بندی و پیش‌بینی میزان رسوب زایی و فرسایش پرداختند. آن‌ها به نتیجه رسیدند که در بین این سه روش، روش ام پسیاک نتایج بهتری دارد. سپهر و هنرمند نژاد (۱۳۹۱) از مدل کرین اصلاح‌شده، نقشه خطر فرسایش واقعی خاک در حوضه آبخیز جهرم تهیه کردند. ایشان در تحقیقات خود شاخص فرسایش فورنی و فرسایش‌پذیری خاک را به همراه نقشه

1- MPSIAC

2- Yang and et. al

3- Biswas and et.al

پوشش گیاهی و شیب باهم تلفیق کردند و به این نتیجه رسیدند که بیش از ۸۰ درصد از حوضه آبخیز جهرم، دارای خطر متوسط و بالا برای فرسایش بالقوه خاک است درحالی‌که فرسایش واقعی خاک در حوضه مذکور ۲۰ درصد آن هم در کلاس بالا قرار دارد. عابدینی و همکاران (۱۳۹۱ و ۱۳۹۴) به بررسی پتانسیل رسوب‌دهی و شدت فرسایش حوضه آبخیز سولا- چای اردبیل با استفاده از مدل هیدرو فیزیکی پرداختند و شدت فرسایش را برای هر یک از زیر حوضه‌ها محاسبه کردند. نتایج کار ایشان نشان داد که زیر حوضه‌های B و D به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار پتانسیل رسوب‌دهی در واحد سطح می‌باشند. عابدینی (۱۳۹۲) اقدام به بررسی و تجزیه و تحلیل کمی فرسایش خندقی و فرسایش خاک در حوضه آبخیز کلکان چای نموده و مناطق مختلف آن را به لحاظ شدت فرسایش خاک پهنه‌بندی نموده‌اند. نتایج حاصل از کار ایشان نشان داد که لیتولوژی سست و تغییرات کاربری زمین در تشدید فرسایش و اتلاف خاک‌های حوضه مؤثرند. دهقانی و همکاران (۱۳۹۲) به اولویت‌بندی اجرای عملیات آبخیزداری برای کاهش سیل و کنترل فرسایش با استفاده از مدل فازی برای حوضه آبخیز فورگ در استان خراسان جنوبی پرداختند. ایشان در تحقیق خود نشان دادند که تلفیق ابزارهای جی‌آی‌اس و روش‌های منطق فازی با مدل‌های سنتی دقت محاسبات را به نحو چشمگیری افزایش می‌دهد. عرفانیان و همکاران (۱۳۹۲) به تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خاک در حوضه آبخیز قرناوه گلستان با استفاده از مدل فازی در سیستم اطلاعات جغرافیایی و نرم‌افزار متلب^۱ پرداختند. ایشان در تحقیقشان از عوامل اصلی مؤثر در فرسایش آبی خاک استفاده کردند. نتایج کار ایشان نشان داد که بین نقشه خطر مدل فازی و نقشه خطر مدل راسل^۲ تطابق بالایی وجود دارد. عابدینی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از جی‌آی‌اس به برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه آبخیز دهکده سفید پرداختند. ایشان نشان دادند که حوضه آبخیز دهکده سفید از نظر فرسایش و تولید رسوب در حد بالایی قرار دارد. حوضه آبخیز رودخانه بالیخو با مساحت ۱۰۹۳ کیلومتر مربع یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبخیز استان اردبیل است که به دلیل دخالت روز افزون انسان‌ها، میزان ناپایداری دامنه‌ها زیاده‌تر شده و وقوع زمین‌لغزش زیاد در فرسایش خاک نیز مؤثر است (عابدینی و همکاران، ۴۴:۱۳۹۴)

سد مخزنی چند منظور یامچی در مجاورت شهر اردبیل بر روی رودخانه بالیخو احداث شده که فرسایش خاک و تولید رسوب در عفر مفید سد بسیار مؤثر است. لذا با توجه به اهمیت موضوع، هدف از پژوهش حاضر پهنه‌بندی و ارزیابی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز رودخانه بالیخو سد یامچی با استفاده از مدل فازی است تا به تبع این پهنه‌بندی راهکارهای مناسب برای کنترل اثرات منفی فرسایش خاک در این حوضه آبخیز اعمال شود.

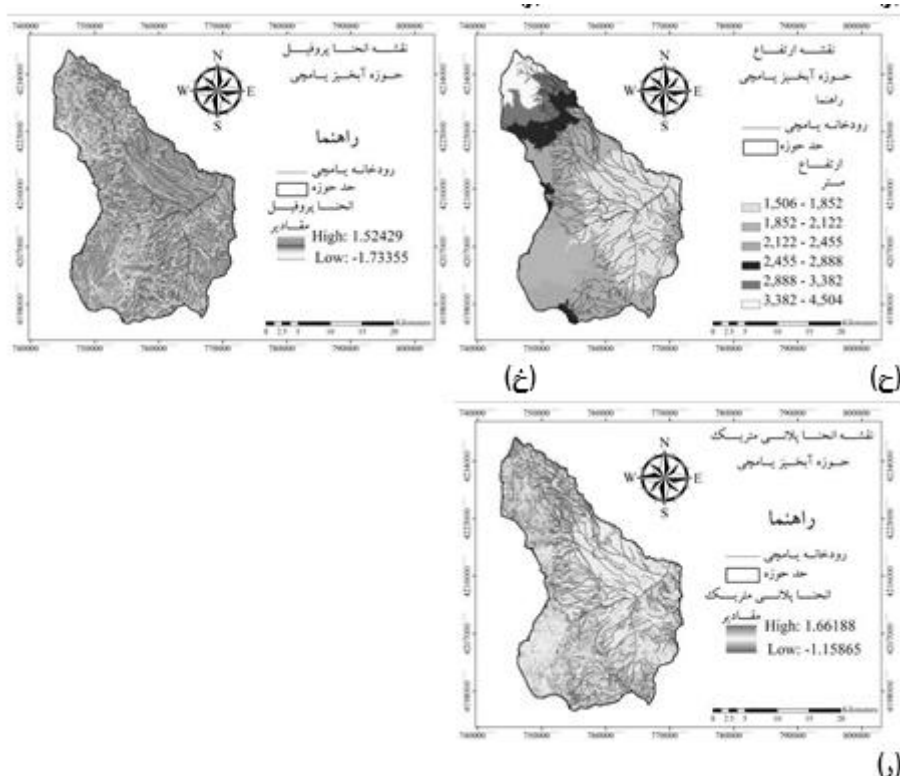
روش تحقیق

الف- داده‌ها

در این پژوهش از اسناد کتابخانه‌ای برای مطالعه پیشینه تحقیق استفاده شده است. از نقشه‌های توپوگرافی ۵:۰۰۰۰:۱، ۲۵:۰۰۰۰:۱ برای شناسایی واحدهای توپوگرافی در محدوده مورد مطالعه استفاده شده است. داده‌های اولیه این پژوهش عبارت‌اند از نقشه‌های ارتفاع، شیب، جهت دامنه، که از مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۸۵ متر، (اخذ شده از سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۹۱)، استخراج شدند. نقشه رقومی زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه نیز از سازمان زمین‌شناسی تهران، ۱۳۹۱ اخذ شده است. نقشه رقومی کاربری زمین، خاک از سازمان جنگل‌ها و مراتع، (۱۳۹۲) به دست آمده است. با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک (اخذ شده از سازمان هواشناسی کشور (۱۳۹۳)، نقشه میانگین بیشترین بارندگی روزانه تهیه شده است. از نرم‌افزار اکسل و نرم‌افزار جی‌آی‌اس برای تهیه نقشه مذکور استفاده شده است. در مرحله بعد، با توجه به گزارش‌های موجود و بررسی‌های میدانی، ۹ معیار بحران‌زا در فرسایش خاک محدوده مورد مطالعه شناسایی شدند. این معیارها عبارت‌اند از: تراکم شبکه زهکش، بیشترین میزان بارندگی روزانه، خاک،

1- MATLAB

2- RUSLE



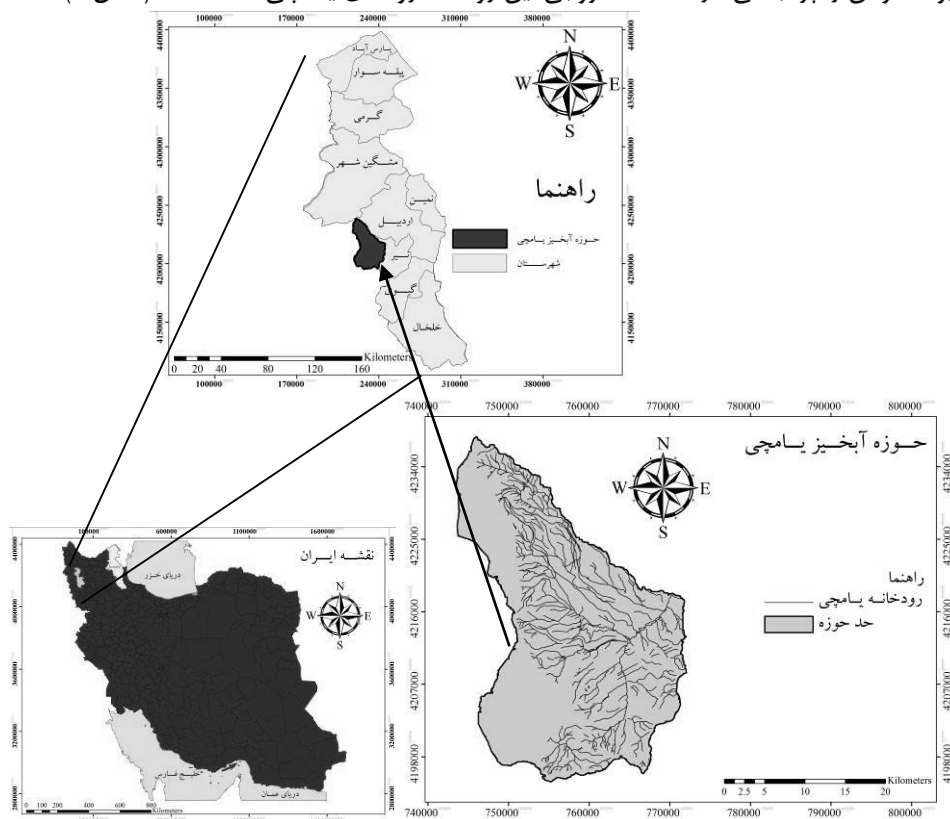
شکل ۱: نقشه‌های معیارهای خطر فرسایش خاک: الف- تراکم شبکه زهکش، ب- بیشترین بارندگی روزانه، ج- خاک، د- کاربری زمین و- زمین‌شناسی، ز- شیب، ح- ارتفاع، خ- انحنا پروفیل، ر- انحنا پلانیمتریک

ب- مدل فازی

دانشمندان علوم زمین و مهندسين همواره با در نظر گرفتن بسیاری از عوامل و شرایط توپوگرافیکی، زمین‌شناسی، هیدرولوژی، کاربری زمین و اقلیم، معیارهایی را برای تعیین چگونگی مناسب و یا نامناسب بودن فضای خاصی در نظر می‌گیرند. هر معیاری می‌تواند با داده‌های جغرافیایی و نقشه‌های موضوعی نشان داده شود و برای برنامه‌ریزی و نقشه‌برداری اقدام به مدل‌سازی شود. مدل فازی یکی از این مدل‌هاست. منطق فازی اولین بار در پی تنظیم نظریه مجموعه‌های فازی به‌وسیله لطفی زاده (۱۹۶۵ میلادی) در صحنه محاسبات نو ظاهر شد (لطفی زاده، ۱۹۶۵: ۳۳۹). واژه فازی به معنای غیردقیق، ناواضح و مبهم (شناور) است. این نظریه قادر است بسیاری از مفاهیم و متغیرها و سیستم‌هایی را که نادقیق و مبهم هستند صورت‌بندی ریاضی بخشیده و زمینه را برای استدلال، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد (فرهودی و همکاران، ۱۳۸۴: ۱۷). منطق فازی می‌تواند در زمینه تحلیل سایت‌ها و مکان‌ها مورد استفاده قرار گیرد. فن کار به صورت تلفیق و هم‌پوشانی داده‌های رستری است. مکانیسم عمل به این گونه است که ابتدا پارامترهای مؤثر در فرسایش خاک شناسایی می‌شوند، سپس با استفاده از توابع عضویت فازی، فازی‌سازی می‌شوند و در نهایت با استفاده از شبکه استنتاج فازی باهم ترکیب می‌شوند. شبکه استنتاج فازی بر اساس عملگرهای منطق فازی این کار را انجام می‌دهد. بعد از آن که خروجی هر یک از عملگرها به دست آمد، آن‌ها را باهم مقایسه کرده و بر اساس اعداد به دست آمده نتیجه‌گیری و جمع‌بندی می‌کنند. آگاهی به مسائل توپوگرافی، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و شرایط اقلیمی محدوده مورد مطالعه هنگامی که با نرم‌افزار آرک جی‌آی‌اس و مدل‌های زمین فضا مانند مدل فازی ترکیب شوند، می‌تواند با دقت نسبتاً بالا سایت‌های در معرض خطر فرسایش خاک را شناسایی کنند و به صورت یک نقشه پهنه‌بندی ارائه دهند. استفاده از نرم‌افزار جی‌آی‌اس به همراه مدل‌های مختلف ابزارهای مفیدی برای پیش‌بینی و پهنه‌بندی در جهت برنامه‌ریزی فراهم می‌کند.

موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

حوضه آبخیز رودخانه بالخلی چای سد یامچی در شهرستان نیر استان اردبیل واقع شده است. این حوضه از نظر مختصات جغرافیایی بین عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۹ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی استقرار یافته است و ارتفاع آن ۱۵۸۴ متر از سطح دریاهای آزاد است. مساحت این حوضه ۶۹۵/۹۵ کیلومترمربع است. رودخانه بالیخلو (بالیخلی چای) به طول ۲۵/۷۱ کیلومتر یکی از رودخانه‌های دائمی استان اردبیل است که از گردنه بالخلی در جنوب غربی شهر نیر حدفاصل دو رشته کوه بزقوش و سبلان سرچشمه می‌گیرد، از جمله سرشاخه‌های مهمی چون برجلوچای، سقزچی چای، آغلاغان، جورابچای، درویشچای، لاطران چای در مسیر به این رودخانه پیوسته و آن را پرآب می‌سازند. نقطه خروجی این رودخانه روستای یا مچی سفلا است (شکل ۲).



شکل ۲: موقعیت محدوده مورد مطالعه

واحدهای زمین‌شناسی حوضه آبخیز یا مچی در مناطق کم مرتفع، رسوبات پادگانه‌های آبرفتی، مارن، شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرا هستند (شکل ۳) و در مناطق مرتفع و کوهستانی مشتمل بر سنگ‌های آتشفشانی از نوع آندزیت و بازالت و توف و خاکستر لاهار هستند.



شکل ۳: نمایی از پادگانه‌های آبرفتی رودخانه بالیخلی چای سد یامچی: اردبیل، شهرستان نیر، حوضه آبخیز سد یامچی، جاده نیر به سراب، مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

این حوضه را از لحاظ توپوگرافی می‌توان به پنج واحد تقسیم کرد: ۱- دشت‌ها: این دشت‌ها قسمت‌های شرقی حوضه را در برمی‌گیرند و عمدتاً در ارتفاع ۱۷۰۰-۱۹۰۰ متر قرار گرفته‌اند. شهر نیر در این بخش واقع شده است. ۲- کوه‌پایه‌ها: از ارتفاع ۲۰۰۰ متر شروع می‌شوند و به ارتفاع ۲۲۰۰ متر ختم می‌شوند. این واحد توپوگرافی در قسمت‌های شرقی و جنوب شرقی حوضه قرار گرفته‌اند. ۳- کوهستان‌های نسبتاً مرتفع: عمدتاً در قسمت جنوب غربی حوضه واقع شده‌اند که از ارتفاع ۲۳۰۰ متر آغاز می‌شوند و به ارتفاع ۲۶۰۰ متری ختم می‌شوند. کوه بزقوش در این واحد قرار گرفته است. ۴- کوهستان‌های مرتفع: در ارتفاع ۲۹۰۰ متر تا ۳۳۰۰ متری قرار گرفته‌اند که قسمت‌های شمال شرقی حوضه را در بر گرفته‌اند. ۵- کوهستان‌های بسیار مرتفع: شامل بخش‌های مرتفع و کوهستانی حوضه است که عمدتاً ارتفاعات بیشتر از ۳۵۰۰ متر تا ۴۴۰۰ متر را در برمی‌گیرند. این واحد توپوگرافی در بخش شمالی حوضه واقع شده است. کوه سبلان در این بخش قرار دارد (شکل ۱ ح).

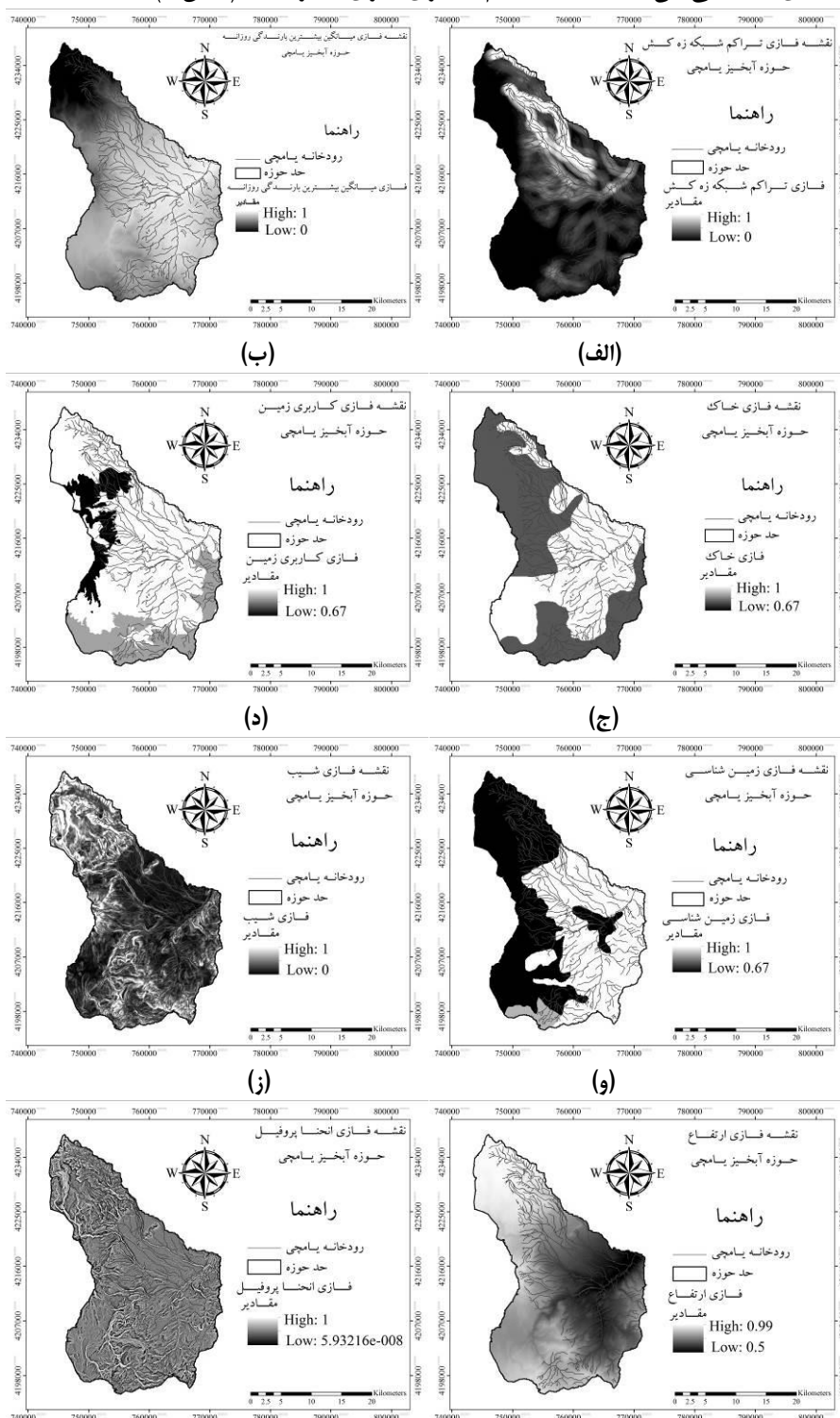
از لحاظ اقلیمی بیشترین میزان دما با مقدار ۱۰/۹۱ سانتی‌گراد مربوط به مناطق کم‌مرتفع‌تر، دشت‌های دامنه‌ای و فلاتی بوده است و کمترین میزان دما با مقدار ۰/۴ درجه سانتی‌گراد، عمدتاً ارتفاعات کوهستانی حوضه را در برمی‌گیرد. بیشترین میزان بارندگی سالانه با مقدار ۳۷۸ میلی‌متر مشتمل بر مناطق مرتفع و کوهستانی حوضه است و کمترین میزان بارندگی سالانه با مقدار ۲۷۱ میلی‌متر مربوط به مناطق کم‌مرتفع‌تر شامل نواحی تپه‌ای، دشت‌های دامنه‌ای و فلاتی است. همچنین بیشترین میزان بارندگی روزانه با مقدار ۴۷/۵۲ میلی‌متر در نواحی تپه‌ای، دشت‌های دامنه‌ای و فلاتی رخ می‌دهد و کمترین میزان بارندگی روزانه با مقدار ۱۴/۵۴ در نواحی مرتفع و کوهستانی حوضه رخ می‌دهد.

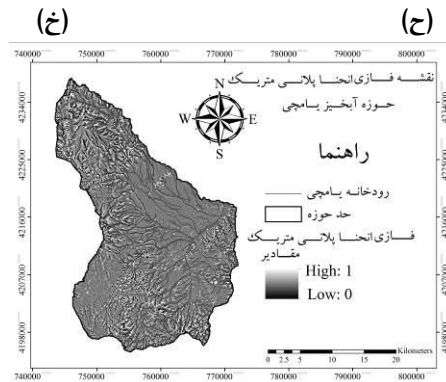
خاک‌های این حوضه را می‌توان به سه رده تقسیم کرد: ۱- اینسپتی سلز: این خاک‌ها در دشت‌ها، کوه‌پایه‌ها و اندکی در نواحی کوهستانی حوضه قرار گرفته‌اند. این نوع خاک‌ها، خاک‌های نارس هستند که سیمای توسعه‌یافته مشخص راسته‌های دیگر را ندارند. ویژگی این خاک‌ها پایداری زیاد مواد مادری، فراوانی خاکسترهای آتش‌فشانی، موقعیت زمین‌نما (زمین‌های شیب‌دار یا نواحی گود)، جوان بودن سطوح زمین و محدود شدن گسترش تکامل خاک و حذف رژیم رطوبتی خاک اریدیک

است. ۲- رده اتی سلز و برون‌زدهای سنگی: این خاک‌ها مشتمل بر مناطق مرتفع و کوهستانی حوضه هستند. این نوع خاک‌ها فاقد مواد مادری متصل هستند. به جز افق A افق مشخصی ندارند. این نوع خاک‌ها تنوع زیادی دارند. ۳- رده اینسپتی سلز و برون‌زدهای سنگی.

بحث و یافته‌ها

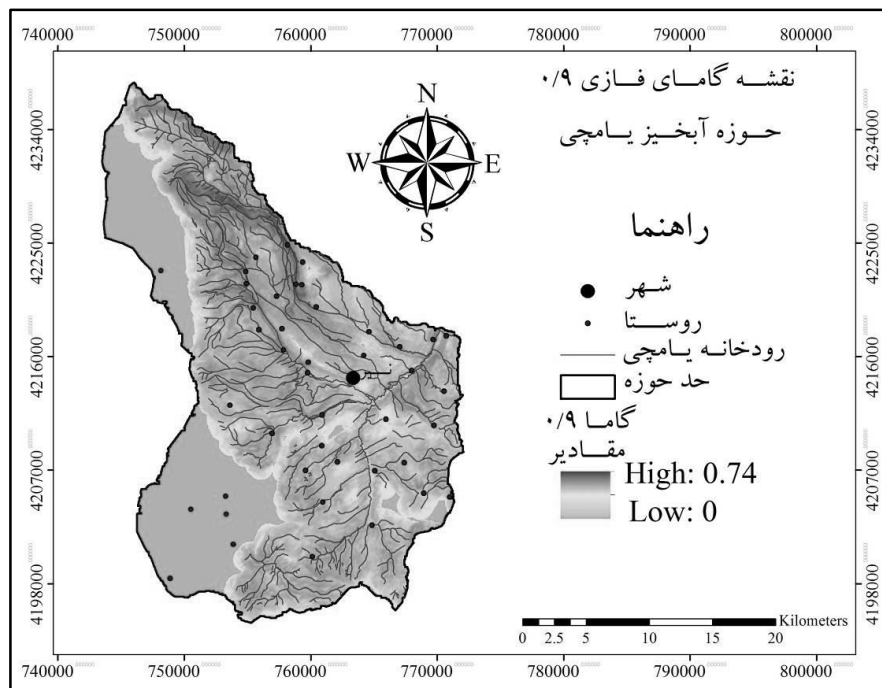
پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی این نقشه‌ها، ابتدا اقدام به فازی سازی معیارها شد (شکل ۴).



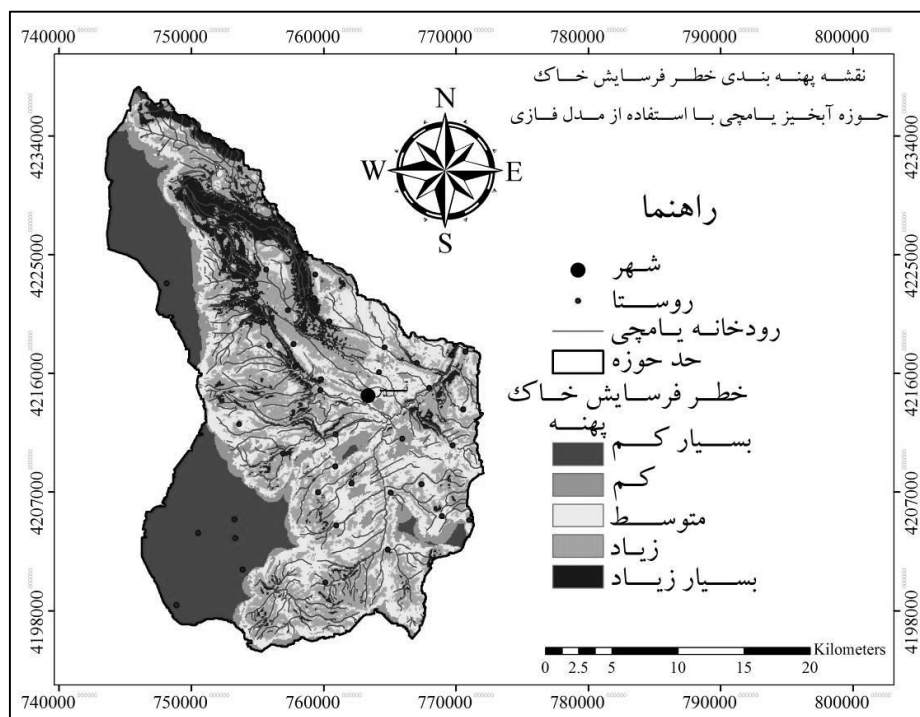


(ر)

شکل ۴: نقشه‌های فازی شده معیارهای خطر فرسایش خاک: الف- تراکم شبکه زهکش، ب- بیشترین میزان بارندگی روزانه، ج- خاک، د- کاربری زمین و- زمین‌شناسی، ز- شیب، ح- ارتفاع، خ- انحنا پروفیل، ر- انحنا پلانی متریک سپس، برای پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک از عملگر گامای فازی ۰/۹ استفاده شد (شکل ۵). علت انتخاب این گاما، هم‌پوشانی نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک با چندین نقشه اصلی است. به عبارت دیگر، نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک با نقشه‌های تراکم شبکه زهکش، بیشترین بارندگی روزانه، کاربری زمین و از طریق جداول متقاطع هم‌پوشانی شدند و مشخص شد که بیشترین تطابق فرسایش خاک با تراکم شبکه زهکش، بیشترین بارندگی روزانه، زمین‌های مرتعی، اراضی مخلوط، مراتع متوسط و فقیر و برون‌زدهای سنگی، در گاما ۰/۹ دیده شده است. همان‌طور که شکل شماره (۴) نشان می‌دهد، پهنه‌هایی از حوضه در معرض فرسایش خاک، رقم ۰/۷۴ را نشان می‌دهد. این یعنی این‌که این پهنه‌ها در معرض خطر فرسایش هستند؛ زیرا هرچه رقم مذکور به عدد ۱ نزدیک‌تر می‌شود، یعنی این‌که خطر فرسایش بیشتر می‌شود. در نهایت با توجه به عملگر گامای فازی ۰/۹، نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک در پنج طبقه با قابلیت خطر بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تهیه گردید (شکل ۶). جدول شماره (۱) به ترتیب نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک را در حوضه آبخیز یا مچی نشان می‌دهد.



شکل ۵: نقشه گامای فازی ۰/۹



شکل ۶: نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک با استفاده از مدل فازی

جدول ۱: نتایج پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک حوزه آبخیز بالیخلی‌چای سد یامچی

پهنه‌های خطر فرسایش خاک	کیلومتر مربع	درصد مساحت
بسیار کم	۱۵۹/۶۲	۲۲/۹۳
کم	۵۵/۳۸	۷/۹۵
متوسط	۱۸۷/۴۷	۲۶/۹۳
زیاد	۲۲۰/۲۴	۳۱/۶۴
بسیار زیاد	۷۳/۲۸	۱۰/۵۲
مجموع	۶۹۵/۹۹	۹۹/۹۷

با توجه به جدول (۱) حدود ۷۳/۲۸ کیلومتر مربع معادل با ۱۰/۵۲ درصد از مساحت حوزه در پهنه با خطر فرسایش بسیار زیاد قرار گرفته است. در حدود ۲۲۰/۲۴ کیلومتر مربع معادل با ۳۱/۶۴ درصد در پهنه با خطر فرسایش زیاد قرار دارد. حدود ۱۸۷/۴۷ کیلومتر مربع در پهنه با خطر فرسایش متوسط واقع گردیده است. این رقم معادل ۲۶/۹۳ درصد برای حوزه به‌دست آمده است. پهنه‌های با شدت خطر فرسایش خاک در واحدهای توپوگرافی دشت‌ها، کوه‌پایه‌ها، کوهستان‌های نسبتاً مرتفع و مرتفع قرار دارند. در حدود ۵۵/۳۸ کیلومتر مربع معادل با ۷/۹۵ درصد در پهنه با خطر فرسایش کم و حدود ۱۵۹/۶۲ کیلومتر مربع معادل با ۲۲/۹۳ درصد در پهنه با خطر فرسایش بسیار کم قرار گرفته است. این پهنه‌ها در واحد توپوگرافی تپه‌ها، در بخش‌هایی که دور از رودخانه‌ها و شعبات آن قرار دارند، واقع شده‌اند. در کل در حدود ۴۲/۱۶ درصد از مساحت حوزه در پهنه‌های با خطر فرسایش بسیار زیاد تا زیاد قرار گرفته است. حدود ۲۶/۹۳ درصد در پهنه با خطر فرسایش متوسط قرار دارد. در حدود ۳۰/۸۸ درصد از مساحت حوزه در پهنه‌های با خطر فرسایش کم و بسیار کم قرار گرفته است. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته و نقشه پهنه‌بندی (شکل ۵) علت‌های اصلی فرسایش خاک با درجه بسیار زیاد و زیاد در این حوزه عبارت‌اند از:

- ۱- تراکم شبکه زهکش: باهم پوشانی نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش با نقشه تراکم شبکه زهکش مشخص شده است که بیشترین میزان خطر فرسایش خاک در تراکم زهکش با مقدار تراکم از ۷۶۳۷ متر تا ۵۵۶۴۵ متری شبکه زهکش دیده شده است. به عبارت دیگر، هر چه قدر تراکم شبکه زهکش بیشتر شده است، به میزان فرسایش خاک هم اضافه شده است. کمترین میزان فرسایش خاک در پهنه‌هایی واقع شده‌اند که تراکم شبکه زهکش کمتر بوده است. پس می‌توان این‌طور استنباط کرد که علت فرسایش خاک با درجه زیاد عامل تراکم شبکه زهکش است.
- ۲- بیشترین میزان بارندگی روزانه: باهم پوشانی نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش با نقشه بیشترین میزان بارندگی روزانه در حوضه آبخیز یا مچی این نتیجه به دست آمده است که بیشترین میزان فرسایش خاک در بارندگی با میزان بیشتر از ۲۰ میلی‌متر اتفاق افتاده است. کمترین میزان فرسایش در بارندگی با مقدار کمتر از ۲۰ میلی‌متر رخ داده است. لذا نقش بیشترین میزان بارندگی روزانه در فرسایش خاک آشکار است؛ زیرا بارندگی زیاد و بیش‌ازحد در طی یک روز به میزان آب رودخانه و شعبات آن می‌افزاید و این قدرت شعبات شبکه‌های زهکش را در فرسودن و کندن خاک زیاد می‌کند.
- ۳- خاک: از هم‌پوشانی نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش با نقشه این نتیجه به دست آمده است که بیشترین میزان فرسایش در خاک‌های انبساطی سلز/ برون‌زدهای سنگی و آنتی سلز رخ داده است. این خاک‌ها چون خاک‌های نارس هستند و در مناطق مرتفع و کوهستانی حوضه واقع شده‌اند و چون منفصل هستند در مقابل فرسایش حساس‌اند.
- ۴- کاربری زمین: بیشترین میزان فرسایش در زمین‌های مخلوط کشاورزی و باغ، زمین‌های مخلوط با کشت دیم، زمین‌های مخلوط با جنگل، مراتع متوسط، مراتع فقیر و برون‌زدهای سنگی مشاهده شده است. از مشاهداتی که از حوضه به عمل آمد، برای مثال در واحد توپوگرافی دشت‌ها (روستای بوران) (شکل ۷) یا واحد توپوگرافی کوه‌پایه‌ها (روستای سرخاب) (شکل ۸) اقدام به تغییر کاربری زمین و تبدیل آن به زمین‌های کشاورزی و ساخت‌وساز شده است که این خود باعث تخریب زمین و در نتیجه فرسایش‌پذیری خاک با شدت بسیار زیاد تا زیاد می‌شود. همچنین در بعضی از بخش‌های حوضه، (روستای ایلانجوق) اقدام به راه‌سازی و جاده‌سازی شده است که این خود باعث تخریب زمین و در نتیجه فرسایش‌پذیری آن می‌شود. بنابراین نقش تغییر کاربری زمین و تخریب پوشش بومی گیاهی محدوده مورد مطالعه در فرسایش خاک آشکار است.



شکل ۷: تغییر کاربری زمین و تبدیل آن به زمین‌های کشاورزی: اردبیل، شهرستان نیر، حوضه آبخیز سد یامچی، روستای بوران، مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴



شکل ۸: تغییر کاربری زمین: اردبیل، شهرستان نیر، حوضه آبخیز سد یامچی، روستای سرخاب، مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

۵- زمین‌شناسی: بیشترین میزان فرسایش در واحدهای زمین‌شناسی پادگانه‌های آبرفتی، مارن، شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرا و سنگ‌های آتشفشانی مانند آندزیت و بازالت مشاهده شده است. علت فرسایش پذیری زیاد خاک به دلیل سست بودن رسوبات فوق است (شکل ۹) و اگر هم این میزان فرسایش در سنگ‌های آتشفشانی دیده شده است، به این علت است که این سنگ‌ها در ارتفاعات زیاد واقع شده‌اند (ارتفاعات بیشتر از ۲۱۲۲ متر) و به دلیل انقباض و انبساطی که در این سنگ‌ها رخ می‌دهد، آن‌ها خرد می‌شوند، در نتیجه مواد لازم برای حمل توسط رودخانه‌ها فراهم می‌شود. البته نباید از قدرت فرساینده‌گی آب غافل بود. کمترین میزان فرسایش هم در آن واحدهای زمین‌شناسی دیده شده است که دور از عملکرد رودخانه و شعبات آن قرار دارند.



شکل ۹: هوازدگی در رسوبات پادگانه‌های آبرفتی رودخانه بالیخلو: اردبیل، شهرستان نیر، حوضه آبخیز سد یامچی، جاده نیر به سراب، مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

- ۶- شیب: بیشترین میزان فرسایش در شیب‌های بیشتر از ۵ درصد مشاهده شده است. شیب زیاد باعث افزایش سرعت آب رودخانه‌ها و شعبات آن می‌شود که این امر منجر به فرسایش‌پذیری زیاد خاک‌ها و رسوبات می‌شود.
- ۷- ارتفاع: باهم پوشانی نقشه ارتفاع و نقشه پهنه‌بندی (شکل ۵) این نتیجه به دست آمده است که بیشترین میزان فرسایش در ارتفاعات بیشتر از ۱۸۵۲ متر رخ داده است. علت این فرسایش‌پذیری بسیار زیاد تا زیاد به دلیل تأثیری است که ارتفاع برافزایش بارندگی دارد. این مقدار افزایش ارتفاع برای شاخص بیشترین میزان بارندگی روزانه در حدود ۲۰ میلی‌متر برآورد شده است. با افزایش ارتفاع بارندگی بیشتر می‌شود و بارندگی بیشتر به مقدار جریان آب رودخانه‌ها و شعبات آن می‌افزاید، در نتیجه قدرت فرساینده رودخانه‌ها زیادتر می‌شود و خاک‌ها فرسایش می‌یابند. همچنین در ارتفاعات زیاد (ارتفاعات بیشتر از ۲۱۲۲ متر) به دلیل عمل انقباض و انبساطی که در سنگ‌ها و خاک‌ها رخ می‌دهد، باعث خرد شدن و سست شدن این سنگ‌ها و خاک‌ها می‌شود و در نتیجه مواد و مصالح لازم برای حمل توسط رودخانه‌ها فراهم می‌آید.
- ۸- انحنا پروفیل: در این شاخص، مقادیر ارزشی به سمت عدد (-۱) بیانگر تحدب دامنه‌ها و مقادیر ارزشی به سمت عدد (+۱) بیانگر تفرع دامنه‌ها است. باهم پوشانی شاخص انحنا پروفیل با نقشه پهنه‌بندی (شکل ۵)، دامنه‌های محدب با مقادیر ارزشی به سمت عدد (-۱) فرسایش بیشتری را دارند.
- ۹- انحنا پلانی متریک: در این شاخص، مقادیر ارزشی به سمت عدد (-۱) بیانگر خط رأس‌ها و مقادیر ارزشی به سمت عدد (+۱) بیانگر دره‌ها هستند. باهم پوشانی شاخص انحنا پلانی متریک با نقشه پهنه‌بندی (شکل ۵) مشخص می‌شود که از شیب دامنه‌ها به سمت خط رأس، فرسایش بیشتر می‌شود. همان‌طور که گفته شد این مقدار برای خط رأس‌ها به سمت مقادیر ارزشی عدد منها میل می‌کند.
- از مطالعه معیارها و نقشه پهنه‌بندی (شکل ۵) این نتیجه حاصل می‌شود که علت فرسایش‌پذیری بسیار زیاد تا زیاد در این حوضه عوامل تراکم شبکه زهکش، زمین‌شناسی و کاربری زمین هستند. باهم پوشانی نقشه تراکم شبکه زهکش با نقشه پهنه‌بندی معلوم شده است که در پهنه‌هایی که تراکم شبکه زهکش به هم فشرده‌تر بودند، فرسایش هم زیادتر بوده است. برای مثال فرسایش با خطر بسیار زیاد تا زیاد در تراکم زهکش با مقدار تراکم ۷۶۳۷ متر تا ۵۵۶۴۵ متری شبکه زهکش دیده شده است. همچنین مورفولوژی پهنه‌های فرسایش از مورفولوژی تراکم شبکه زهکش تبعیت کرده است. این نشان‌دهنده نقش رودخانه یا مچی در فرسودن خاک‌ها است. با توجه به سست بودن بعضی از واحدهای زمین‌شناسی در مقابل فرسایش اگر عوامل مخرب انسانی مانند تغییر کاربری زمین و تخریب جنگل‌ها و مراتع ادامه یابد، می‌تواند باعث فرسایش‌پذیری بیشتر خاک در این حوضه شود؛ بنابراین از این اعمال باید جلوگیری کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود که عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک به وسیله مهندسين منابع طبیعی و آبخیزداری در این حوضه اعمال شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد در اکثر حوضه‌های آبخیز ایران، عدم وجود آمار دقیق از میزان کمی فرسایش، استفاده از مدل‌های برآورد فرسایش خاک را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. همچنین با توجه به ماهیت فازی بودن شاخص‌ها و معیارها در برآورد پتانسیل خطر فرسایش خاک و زمان‌بر بودن و پرهزینه بودن روش‌های قدیمی و بررسی‌های میدانی، استفاده از مدل‌های فیزیکی و تجربی مانند مدل فازی توصیه می‌شود. خطاهای احتمالی هم که در این نقشه‌ها با استفاده از این مدل به وجود می‌آید، مربوط به روش‌های مختلف فازی سازی لایه‌ها و نوع عملگر گامای فازی به کاررفته است. از مزایای مدل فازی هنگامی که با سیستم اطلاعات جغرافیایی ترکیب شود، سرعت بالا در پردازش داده‌ها، کم‌هزینه بودن این روش و دقت نسبتاً بالای این مدل است. نمونه کارهای انجام شده در زمینه انواع پهنه‌بندی‌ها با استفاده از این مدل و تلفیق لایه‌های نقشه‌ای گویای این موضوع است. البته دقت بالا در زمینه بستگی به تعریف صحیح توابع و آستانه‌ها دارد. همچنین می‌توان در آینده نزدیک از مدل‌ها و روش‌هایی همچون سلول‌های اتومات، روش شبکه‌های حس گر فازی و روش داده محور برای مطالعات و پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک استفاده کرد. نقشه‌های حاصل از این روش‌ها می‌تواند مورد استفاده مهندسين منابع طبیعی و آبخیزداری قرار گیرد؛ زیرا با شناسایی پهنه‌های در معرض فرسایش خاک می‌توان با اقدامات مناسب از خساراتی که این

پدیده بر محیط‌زیست، آلودگی منابع آبی سطحی و زیرزمینی و تخریب زمین‌های کشاورزی در این حوضه آبخیز می‌گذارد، جلوگیری به عمل آورد و آن را کنترل کرد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای ارزیابی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز رودخانه بالخلی چای سد یامچی از ۹ شاخص مؤثر در فرسایش خاک مانند تراکم شبکه زهکش، بیشترین میزان بارندگی روزانه، خاک، کاربری زمین، زمین‌شناسی، شیب، ارتفاع، انحنا پروفیل و انحنا پلانی متریک استفاده شده است. سپس اقدام به فازی سازی معیارها با استفاده از توابع عضویت فازی شده است و نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک تهیه شد. مطالعات نشان داده است که در حدود ۴۲/۱۶ درصد از مساحت حوضه در پهنه‌های با خطر فرسایش بسیار زیاد تا زیاد قرار گرفته است. حدود ۲۶/۹۳ درصد در پهنه با خطر فرسایش متوسط قرار دارد. در حدود ۳۰/۸۸ درصد از مساحت حوضه در پهنه‌های با خطر فرسایش کم و بسیار کم قرار گرفته است. از مطالعاتی که از حوضه به دست آمده است می‌توان این‌طور نتیجه‌گیری کرد که علت فرسایش‌پذیری بسیار زیاد تا زیاد در این حوضه آبخیز عوامل تراکم شبکه زهکش، سست بودن بعضی از واحدهای زمین‌شناسی در مقابل فرسایش، سست و نارس بودن خاک‌ها در مقابل اعمال فرسایشی، بارندگی روزانه با مقدار بیشتر از ۴۷ میلی‌متر، کاربری زمین و عوامل توپوگرافی هستند. با توجه به این که سد رودخانه یا مچی نقش تهیه آب برای مصارف شهری اردبیل دارد و این که اکثر زمین‌های این حوضه اختصاص به مراتع خوب، کشاورزی و باغ دارد بنابراین برای جلوگیری از تخریب زمین و آلودگی منابع آبی سطحی و زیرزمینی، پیشنهاد می‌شود که عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک در این حوضه به وسیله مهندسی منابع طبیعی و آبخیزداری اعمال شود. نقشه‌های حاصل از پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک می‌تواند مورد استفاده مهندسی منابع طبیعی و آبخیزداری قرار گیرد؛ زیرا با شناسایی پهنه‌های در معرض فرسایش خاک می‌توان با اقدامات مناسب از خسارتی که این پدیده بر محیط‌زیست، آلودگی منابع آبی سطحی و زیرزمینی و زمین‌های کشاورزی در این حوضه آبخیز می‌گذارد، جلوگیری به عمل آورد و آن را کنترل کرد.

منابع

- احمدی؛ حسن، ملکی؛ محسن، جعفری؛ محمد، قدوسی؛ جمال، آذر نیوند؛ حسین، مسیبی؛ مرضیه، ۱۳۸۷، کمی کردن روش کیفی ژئومورفولوژی برای برآورد فرسایش آبی (مطالعه موردی: سه زیر حوضه آبخیز سد لتیان)، فصلنامه منابع طبیعی ایران، شماره ۶۱ (۴)، صص. ۷۷۵-۷۹۵.
- خدابخش؛ سعید، محمدی؛ اکبر، رفیعی؛ بهروز، بزرگ‌زاده؛ عیسی، ۱۳۸۸، مقایسه برآورد میزان فرسایش و رسوب زایی در زیر حوضه سزار (حوضه آبریز سد دز) با استفاده از مدل‌های تجربی‌ای پی‌ام و ام پسیاک با کمک دانش فازی، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، شماره ۱۲ (۳)، صص. ۵۱-۶۱.
- دهقانی؛ مرتضی، قاسمی؛ حسین. ملکیان؛ آرش، ۱۳۹۲، اولویت‌بندی مکانی عملیات کاهش سیل و کنترل فرسایش با استفاده از روش منطق فازی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز فورگ)، نشریه مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران، شماره ۱ (۶۶)، صص. ۷۳-۸۸.
- روستایی؛ شهرام، نیک جو؛ محمدرضا، حبیب زاده؛ احد، ۱۳۸۹، بررسی فرسایش‌پذیری اراضی در حوضه آبخیز بجوش چای با استفاده از تئوری فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، نشریه علمی- پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی (دانشگاه تبریز)، شماره ۳۳ (۱۵)، صص. ۱۴۷-۱۷۳.

- سپهر؛ عادل، هنرمند نژاد؛ سعیده، ۱۳۹۱، تهیه نقشه خطر فرسایش واقعی خاک با استفاده از مدل کربن اصلاح‌شده (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چهارم)، مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۳ (۱)، صص. ۵۷-۷۲.
- سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۹۱، مدل رقومی ارتفاع استان تهران. ایران.
- سازمان زمین‌شناسی تهران، ۱۳۹۱، نقشه رقومی شده زمین‌شناسی استان تهران. ایران.
- سازمان جنگل‌ها و مراتع، ۱۳۹۱، نقشه رقومی شده کاربری زمین استان تهران. ایران.
- سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۳، آمار ایستگاه‌های اقلیمی استان تهران. ایران.
- عرفانیان؛ مهدی، قهرمانی، پریسا، سعادت، حسین، ۱۳۹۲، تهیه نقشه خطر پتانسیل فرسایش خاک با استفاده از منطق فازی در حوضه آبخیز قرناوه گلستان، نشریه علمی- پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شماره ۲۳ (۷)، صص. ۴۳-۵۲.
- عابدینی؛ موسی، بهشتی جاوید؛ ابراهیم، فتحی؛ محمدحسین، ۱۳۹۴، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با مدل‌های آماری دومتغیره و منطق فازی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز رودخانه بالخو چای)، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۶، شماره ۳، شماره پیاپی ۵۹، صص. ۴۳-۶۰.
- عابدینی؛ موسی، ۱۳۹۳، تحلیل مسائل هیدروژئومورفولوژی حوضه آبریز دریاچه نئور جهت آمایش بهینه (با تأکید بر فرسایش خاک و رسوب)، مجله هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱، صص: ۱۳۰-۱۱۱.
- طولانی؛ سوسن، عابدینی؛ موسی، موسوی؛ معصومه، ۱۳۹۴، ارزیابی کارایی مدل (*Weep*) در برآورد رسوب حوضه سولاچای- اردبیل. مجله پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، شماره ۱۲ صص. ۱۹۲-۱۸۴.
- عابدینی؛ موسی، طولابی؛ سوسن، موسوی؛ معصومه، ۱۳۹۱، بررسی پتانسیل رسوب‌دهی و شدت فرسایش حوضه آبخیز سولاچای- اردبیل با استفاده از مدل هیدرو فیزیکی در محیط *GIS*، اولین کنفرانس ملی راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار. صص. ۸-۱.
- عابدینی؛ موسی، ۱۳۹۲، تجزیه و تحلیل کمی فرسایش خندقی در حوضه آبخیز کلکانچای (شرق سهند)، مجله جغرافیا و آمایش شهری و منطقه‌ای، شماره ۷، صص. ۹۷-۱۱۰.
- عابدینی؛ موسی، فتحی؛ محمدحسین؛ سوزنده پور؛ فاطمه، حسینی؛ میر کامل، ۱۳۹۳، کاربرد فناوری *GIS* در پهنه‌بندی و برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب حوضه آبخیز دهکده سفید، اولین همایش علوم جغرافیایی ایران، صفحات. ۷-۱.
- فتحی؛ ملک‌کیان، افشار؛ عباس، موسوی؛ سید جمشید، ۱۳۸۵، توسعه مدل تشخیص الگوی فازی به‌منظور ارزیابی پتانسیل فرسایش‌پذیری حوضه بر مبنای روش *PSIAK*، مجله آب و فاضلاب، شماره ۵۷ (۱۷)، صص. ۷۱-۵۹.
- فرهودی؛ رحمت‌الله، حبیبی؛ کیومرث، زندی بختیاری، پروانه، ۱۳۸۴ مکان‌یابی محل دفن مواد زائد جامد شهری با استفاده از منطق فازی (*Fuzzy Logic*) در محیط *GIS* (مطالعه موردی: شهر سنندج)، نشریه هنرهای زیبا، ۲۳ (۶)، صص. ۱۵-۲۴.
- قلمی؛ وحید، فتاحی نصرآبادی؛ فرناز، ۱۳۹۰، تخمین روند تشکیل و حرکت دلتا در مخازن سدها مطالعه موردی سد یا مچی اردبیل، اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، صص. ۷-۱.
- کشاورزی؛ بخشایش، محمد، ۱۳۷۷، بررسی فرسایش‌پذیری حوضه آبریز رودخانه اوجان چای (بستان آباد - آذربایجان شرقی) با استفاده از تئوری فازی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: ماشالله خادمچیان، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، صص. ۱-۱۴۰.

- نادری؛ فتح‌الله، کریمی؛ حاجی، ناصری؛ بهروز، ۱۳۸۹، پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش خاک در حوضه آبخیز آسمان‌آباد ایلام به روش شاخص فرسایش، مجله پژوهش‌های آبخیزداری، شماره ۴ (۲۳)، صص. ۴۴-۵۱.
- نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ شهرستان نیر، برگ ۵۵۶۶II، سری K753
- نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ رازلیق، برگ ۵۵۶۶III، سری K753
- نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ کورائیم، برگ ۵۵۶۶IV، سری K753
- نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ امام‌چای، برگ ۵۵۶۶I، سری K753
- نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ شهرستان اردبیل، برگ NJ39-5، سری K551
- نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ شهرستان اهر، برگ NJ38-8، سری K551
- نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ شهرستان میانه، برگ NJ38-12، سری K551
- یمانی؛ مجتبی، دادرسی؛ ابوالقاسم، داور زنی؛ زهرا، ۱۳۸۴، پهنه‌بندی فرسایش در حوضه آبخیز داور زن با استفاده از الگوهای منطق فازی، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، شماره ۵ (۳)، صص. ۱۸۵-۲۰۰.
- Attanda Mouinou Igue., 2002, *The Qualitative Assessment of water erosion risk in moist savanna of Benin. 12 th ISCO conference Beijing.*
- Biswas, H, Raizada, A, Mandal, D, Kumar, S, Srinivas, S, Mishra, K., 2015, *Identification of areas vulnerable to soil erosion risk in India using GIS methods, Journal of Solid earth, 7(2), pp: 1247- 1257.*
- Cartagena, D. F., 2004, *Remotely sensed land cover parameter extraction for watershed erosion modeling. MS Thesis, Geo- information Science and Earth Observation, Water Resources and Environmental Management (Environmental Systems Analysis and Management Specialization), pp.1-104.*
- Lotfi Zadeh, A., 1965, *Fuzzy Sets. Journal of Information and Control, 8(1), pp: 338-353.*
- Mitra, B., Scott, H.D., Dixon, J.C., McKimney, J.M., 1998, *Applications of fuzzy logic to the prediction of soil erosion in a large watershed, Volume 86 (3-4), 183-209.*
- Malava, J., F. Bonda., 1999, *Proposal for research to support erosion hazard assessment in Malawi, Agricultural engineering Bunda College of Agriculture, pp. 1-22.*
- - Merritt, W. S., Letcher, R. A., and Jakeman, A.J, 2003, *A review of erosion and sediment transport models, Journal of Environmental Modelling & Software, Volume 18(8-9), 761-799.*
- Murat, E. and Candan, G., 2003, *Use of fuzzy relation to produce landslide susceptibility map of a landslide pron area (west black sea region, turkey). Journal of Eengineering Geology, 75(3-4), pp. 229-250.*
- 39- Nigel, R., Rughooputh, S.D.D.V., 2010, *Soil erosion risk mapping with new dataset: An improved prioritisation of high erosion risk area, Journal of CATENA, Volume 82(3), pp. 191-205.*
- Oinam. B., 2011, *Integrated Fuzzy-GIS approach for assessing regional soil erosion risks. University of Stuttgart, Germany. Ph.D. Thesis. pp. i-169.*
- Tangestani, M, 2006, *Comparison of EPM and PSIAC models in GIS for erosion and sediment yield in a semi-arid environment. Journal of Asian Earth Science, 27(5), 585-597.*

- Yang, Qiyong, Xie, Yunqiu, Li, Wenjun, Jiang, Zhongcheng, Li, Hui, Qin, Xingming., 2014, *Assessing soil erosion risk in karst area using fuzzy modeling and method of the analytical hierarchy process*, *Journal of Environmental Earth Sciences*, 71(1), pp: 287- 292.