جغرافیا و روابط انسانی، تابستان ۱۴۰۳، دوره۷، شماره۱، صص۱۸۵-۱۷۸

ارزیابی پتانسیل فرسایش خاک در سطح حوضه آبریز فیروزآبادچای با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و منطق فازی

الهامه عبادی[۱]، فریبا اسفندیاری درآباد*[۲]، صیاد اصغری[۳]، رئوف مصطفی‌زاده[۴]

۱-دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیای طبیعی، اردبیل،

۲-استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیای طبیعی، اردبیل

fariba.darabad@gmail.com

۳- استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیای طبیعی، اردبیل،

۴-دانشیار علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل،

تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۰۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱

چکیده

فرسایش خاک جزو مهم‌ترین فرایندهای ژئومورفولوژیکی سطح زمین به‌شمار می‌رود که با دخالت انسان آهنگ پرشتابی به خود گرفته است. این فرایند باعث خسارت‌های متعدد نظیر از بین رفتن خاک‌های حاصلخیز، تخریب زیرساخت‌ها و پر شدن سدها می‌شود. در ارزیابی فرسایش خاک می‌بایست فاکتورهای متعددی به صورت ترکیبی و یکپارچه استفاده شوند. در این رابطه، در حوضه‌های فاقد آمار یا با آمار محدود می‌توان از مجموعه‌ای از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی در ترکیب با سایر شاخص‌ها استفاده کرده و پتانسیل فرسایش را مورد ارزیابی قرار داد. در پژوهش حاضر پتانسیل فرسایش حوضه آبریز فیروزآبادچای واقع در استان اردبیل مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این رابطه از تعداد ۱۳ شاخص عمدتا ژئومورفولوژیکی استفاده شد. به‌منظور ترکیب و روی‌هم‌گذاری لایه‌ها از منطق فازی در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده گردید. نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای فرسایش خاک در سطح حوضه آبریز فیروزآباد می‌باشد. عوامل متعددی در فرسایش‌پذیری خاک‌های حوضه موثرند که در این زمینه می‌توان به رخنمون وسیع سازندهای آبرفتی کواترنری، مارن‌های ژیپس‌دار، لاهار و خاکسترهای آتشفشانی، پوشش گیاهی ضعیف، غلبه شیب‌های تند، تراکم زهکشی بالا و وجود آبراهه‌های متعدد، مقادیر بالای عدد ناهمواری و دامنه‌های طولانی اشاره نمود. در پهنه‌هایی از حوضه مطالعاتی که چندین فاکتور موثر بر فرسایش از شرایط مساعدی برخوردارند میزان فرسایش تشدید شده است. در این رابطه، می‌توان به زیرحوضه‌های مرکزی حوضه مطالعاتی اشاره نمود که به دلیل وجود سازندهای آبرفتی و مارنی، پوشش گیاهی ضعیف، شیب زیاد، تراکم زهکشی بالا و چندین عامل دیگر جزو پهنه‌های بحرانی حوضه به‌شمار می‌روند.

واژگان کلیدی: فرسایش، ژئومورفولوژی، GIS، منطق فازی، حوضه فیروزآبادچای اردبیل.

شاپا الکترونیکی:3851-645 doi: 10.22034/GAHR.2024.430119.2005

۱- مقدمه

خاک جزو مهم‌ترین ثروت‌های ملی هر کشوری قلمداد می‌شود. مادامی که بهره‌برداری از خاک مبتنی بر استعداد و توان تولیدی آن و بر اساس رعایت اصول صحیح و علمی باشد، میزان هدررفت و تخریب خاک تا حد زیادی کاهش پیدا می‌کند (لال[1] و همکاران، ۲۰۰۰: ۲۷۵). در این رابطه فرسایش، همچنان در زمره‌ی فاکتورهای اصلی تخریب خاک در سطح جهان به‌شمار می‌رود و به‌عنوان مقوله‌ای مهم و نگران‌کننده از بعد اجتماعی و زیست‌محیطی مطرح می‌باشد (وئی[2] و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۴۷). فرسایش خاک را می‌توان جداشدن یا گسیختگی ذرات خاک از سطح زمین توسط برخی عوامل فرساینده- عمدتا آب یا باد- و انتقال ذرات جدا شده به مکانی دیگر تعریف کرد (گودون و استانچی[3]، ۲۰۱۱: ۱۲). پاشمان باران[4] اساسی‌ترین فاکتور جداسازی ذرات خاک است. به دلیل برخورد قطره‌های باران به سطح خاک بایر، ذره‌های خاک ممکن است به مسافت چند سانتیمتر به هوا پرتاب شوند. قرارگرفتن مداوم ذرات خاک در معرض باران‌های شدید، منجر به سست شدن قابل توجه خاک می‌شود. افزون بر این، خاک توسط فرایندهای مختلف هوازدگی، هم به صورت مکانیکی، به‌واسطه خشک و مرطوب شدن متناوب، انجماد و عمل ذوب و یخ بستن و هم به صورت بیوشیمیایی، تجزیه و خرد می‌گردد. خاک همچنین به دلیل عملیات خاک‌ورزی و لگدمال شدن توسط مردم و دام مختل و آشفته می‌شود. آب جاری و باد عوامل دیگری برای جداسازی ذرات خاک می‌باشند. تمامی این فرآیندها خاک را سست نموده به گونه‌ای که توسط عوامل مختلف حمل به سهولت برداشت می‌شوند (مورگان[5]، ۲۰۰۵: ۱۱).

فرسایش آبی اساساً یک فرآیند دو بخشی است. بخش نخست شامل سست شدن ذرات خاک است که عمدتا در اثر برخورد قطرات باران ایجاد می‌شود. بخش دیگر فرآیند انتقال ذرات خاک است که عمدتا از طریق آب جاری انجام می‌شود. موقعیت‌های عمده فرسایش آبی شامل دامنه‌های خاکی، گالی‌ها، مناطق کشاورزی، عملیات معدن‌کاری، و سایت‌های ساختمانی می‌باشند (وانگ[6] و همکاران، ۲۰۱۵: ۵۷). فرسایش و رسوب‌گذاری خاک توسط آب شامل جدا شدن ذرات از توده خاک و انتقال قسمتی یا تمامی خاک فرسایش یافته به پایین‌دست است. در حین انتقال مقداری از رسوب نهشته‌گذاری شده یا خاک فرسایش‌یافته بیشتری برداشت می‌شود (گارسیا[7]، ۲۰۰۸: ۸۲۸). فرسایش خاک سطحی منجر به از دست رفتن ذرات ریز غنی از مواد آلی و مواد مغذی اساسی گیاه مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم می‌شود که به رسوبات فرسایش یافته متصل بوده و برای تولید محصول ضروری‌اند (نورمان و داوگلاس[8]، ۱۹۹۴: ۵). بدین ترتیب، فرسایش باعث کاهش ظرفیت نگهداری آب خاک می‌شود، عمق ریشه‌دوانی موثر و ذخایر آبِ در دسترس گیاه را کاهش می‌دهد، خاک زیرین نسبتا غیرحاصلخیز را ظاهر می‌سازد، و بر رشد و توان گیاه تاثیر معکوس می‌گذارد (هلین[9]، ۲۰۰۶: ۲).

فرسایش فرآیندی طبیعی محسوب می‌شود و جزو مهم‌ترین عوامل شکل‌گیری خاک از سنگ مادر می‌باشد. فعالیت‌های انسانی را می‌توان مهم‌ترین عامل تشدیدکننده نرخ‌های فرسایش به‌شمار آورد. این امر غالبا به‌دلیل کاهش یا حذف پوشش گیاهی و بقایای آنها اتفاق می‌افتد. فرسایش خاک یکی از اساسی‌ترین مسائل زیست‌محیطی در سراسر جهان و علت اصلی کاهش بهره‌وری خاک محسوب می‌شود (گودون و استانچی، ۲۰۱۱: ۱۲). در این رابطه، فرسایش خاک ناشی از فعالیت‌های انسان بالغ بر ۱۹۶۶ میلیون هکتار از اراضی سراسر جهان را تحت تاثیر قرار داده است. این رقم حدود ۱۵ درصد از مساحت کل سطح زمین یا ۳۸ درصد از اراضی کشاورزی در سراسر

---

1 - Lal
2 - Wei
3 - Godone & Stanchi
4 - Rainsplash
5 - Morgan
6 - Wang
7 - García
8 - Norman and Douglas
9 - Hellin

جهان را شامل می‌شود. افزون بر این، برآوردها نشان می‌دهند که در سراسر جهان، حدود ۱۲×۱۰^{۶} هکتار از اراضی قابل کشت به دلیل کاربست شیوه‌های کشاورزی ناپایدار از بین رفته‌اند (هلین، ۲۰۰۶: ۲). برخی از فعالیت‌های انسان مانند جنگل‌زدایی، چرای بیش از حد دام، تغییرات در کاربری اراضی، و شیوه‌های کشاورزی ناپایدار باعث تشدید فرسایش خاک می‌شوند. فرسایش خاک و رسوب‌گذاری نه‌تنها باعث تخریب منابع طبیعی غیر قابل تجدید درمحل می‌شود، بلکه همچنین باعث مشکلاتی خارج از آن محل از قبیل نهشته‌گذاری رسوبات در پایین‌دست مزارع، دشت‌های سیلابی و آبراهه‌ها می‌گردد (لال، ۲۰۰۰: ۲۷۵). بدیهی است که خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک نسبت به فرسایش آبی دارای حساسیت زیادی می‌باشند. این امر عمدتا به دلیل پوشش گیاهی اندک، محتوای اندک مواد آلی و مقاومت کم به نیروهای فرسایش است. مقدار فرسایش آبی نیز به بافت، میزان آب موجود در خاک، تبخیر، نفوذ و شستگی[1] بستگی دارد (کورنلیس[2]، ۲۰۰۶: ۱۴۱).

به طور کلی عوامل متعددی در بروز و تشدید فرسایش موثرند که شماری از آنها دارای بعد مدیریتی بوده و می‌توان با اتخاذ و اجرای سیاست‌ها و راهبردهای علمی و عملی از بروز فرسایش جلوگیری کرد. بدین ترتیب در راستای مقابله و کنترل فرسایش آبی در گام نخست می‌بایست عوامل مدیریتی همراه با عوامل محیطی شناسایی شده و با ارزیابی میزان نقش هر یک از آنها در وقوع فرسایش، راه‌کارهایی مطلوب ارائه گردد (مورگان، ۲۰۰۵: ۱۹۸). جلوگیری از فرسایش خاک- به معنی کاهش نرخ از دست رفتن خاک به تقریبی که در شرایط طبیعی رخ می‌دهد- بر انتخاب راهکارهای مناسب به‌منظور حفاظت خاک استوار است و این به نوبه خود مستلزم درک کاملی از فرآیندهای فرسایش می‌باشد (مورگان، ۲۰۰۵: ۲). به‌منظور ارزیابی خطر فرسایش، رویکردهای متعددی به‌کار گرفته می‌شوند که می‌توان آنها را به دو گروه استفاده از مدل‌های فرسایش خاک و روش‌های کیفی تفکیک نمود. در هر رویکرد، ارزیابی خطر فرسایش از طریق برآورد فاکتورهای کنترل‌کننده فرسایش خاک (ویژگی‌های اقلیمی، توپوگرافی، خصوصیات خاک و پوشش گیاهی) صورت می‌پذیرد (وریلینگ[3] و همکاران، ۲۰۰۶: ۲؛ وریلینگ و همکاران، ۲۰۰۸: ۲۶۷). برای ترکیب کیفی اطلاعات روش استانداردی وجود ندارد. متداول‌ترین رویکرد کیفی، امتیازدهی به عوامل کنترل‌کننده فرسایش است که در آن خطر فرسایش از طریق امتیاز دادن به عوامل کنترل کننده فرسایش و ضرب آنها حاصل می‌شود. از معایب این روش این است که نتایج تحت تاثیر روش امتیازدهی به فاکتورها قرار می‌گیرد (وریلینگ و همکاران، ۲۰۰۶: ۲). در پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی پتانسیل مکانی فرسایش حوضه آبریز فیروزآبادچای از منطق فازی در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شد. منطق فازی، ترکیب انعطاف‌پذیر انواع لایه‌های موضوعی را امکان‌پذیر ساخته و عدم‌قطعیت‌های مرتبط با کلاسه‌بندی و تصمیم‌گیری را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. در ادامه شماری از تحقیقات مرتبط با موضوع پژوهش حاضر به اختصار معرفی می‌شود. عرفانیان و همکاران (۱۳۹۳)، در پژوهشی به تهیه و اعتبارسنجی یک نوع مدل فازی به‌منظور سنجش مخاطره فرسایش خاک در حوضه آبریز قرناوه گلستان اقدام نمودند. حسینی و همکاران (۱۳۹۴) برخی از عوامل موثر بر فرسایش شیاری را با استفاده از منطق فازی مدل‌سازی نمودند. نتایج نشان دادند که در مدل‌سازی فرسایش شیاری، استفاده از توابع نرم‌تر نظیر توابع گوسی نتایج بهتری نسبت به توابع تیز و ساده نظیر ذوزنقه و مثلث به دنبال دارد. مددی و بلواسی (۱۳۹۷)، خطر فرسایش خاک در حوضه‌ی آبریز سیمره چنار را با استفاده از مدل منطق فازی ارزیابی کردند. بدین منظور، داده‌های هفت پارامتر تاثیرگذار در فرسایش خاک شامل شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، بارش، خاک و آبراهه در محیط GIS آماده شد. ارزیابی نتایج به دست آمده با ضریب آماری کاپا نشان داد که عملگر گامای فازی ۰/۹ با ضریب کاپای ۰/۸۳، در پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک در حوضه‌ی آبریز سیمره چنار دقت بسیار خوبی دارد. رحمتی و همکاران (۱۴۰۰) تغییرات کاربری اراضی بر فرسایش و سیل‌خیزی حوضه سقز را قبل و بعد از احداث سد شهید کاظمی با استفاده از مدل ArcSWAT مورد بررسی قرار دادند. نزدیک بودن نتایج داده‌های

[1] - lixiviation
[2] - Cornelis
[3] - Vrieling

مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده نشان می‌دهد مدل SWAT برای حوضه به خوبی پاسخگو است. نیسار احمد و همکاران (۲۰۰۰)، پتانسیل مکانی فرسایش خاک را با بهره‌گیری از روش عضویت فازی مدل‌سازی نمودند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که منطق فازی از کارایی مطلوبی در شناسایی پهنه‌های حساس به فرسایش در سطح منطقه مطالعاتی برخوردار است. وو و وانگ[1] (۲۰۰۷) پتانسیل فرسایش خاک در محدوده استان شانخی[2] چین را با کاربست روش‌های فرآینـد تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، دورسنجی (RS) و مدل فازی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. به این نتیجه دست یافتند که تخریب و کاهش ۲۰ درصدی پوشش گیاهی منجر به افزایش ۲۰ درصدی خطر فرسایش در سطح منطقه مطالعاتی شده است. باکیمچندرا[3] (۲۰۱۱) مدلی ساده و کارآمد، بر مبنای توابع عضویت فازی به منظور ارزیابی و تحلیل خطر فرسایش خاک در یک مقیاس منطقه‌ای را ارائه نمود. این مدل با کاربست یک پلاتفرم GIS عملی شد. نقشه کاربری زمین و پوشش زمین، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده (NDVI)، توان فرسایندگی بارش، میزان فرسایش‌پذیری خاک و زاویه شیب سطح زمین به عنوان فاکتورهای ورودی مدل استفاده شدند. نتایج نشان داد که یک مدل متکی بر منطق فازی از این توانایی برخوردار است تا به عنوان ابزاری کاربردی و کارامد به منظور تحلیل مکانی خطر فرسایش منطقه‌ای خاک توسط تصمیم‌گیران و پژوهشگران مختلف به کار گرفته شود. گاژبهیه[4] و همکاران (۲۰۱٤) مناطق مستعد فرسایش را از طریق تجزیه و تحلیل مورفومتریک و بهره‌گیری از RS و GIS اولویت‌بندی کردند. اولویت‌بندی بر اساس پارامترهای مورفولوژیکی با تحقیقات میدانی زمین‌شناسی انجام شده در طول کارهای میدانی از انطباق مطلوبی برخوردار شد. فائوزی[5] و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی به تهیه نقشه ریسک فرسایش با استفاده از رویکرد منطق فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) پرداختند. نتایج نقشه ریسک فرسایش با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی صحت‌سنجی شد. نتایج نشان‌دهنده تطابق مناسب پارامتر فرسایش‌پذیری خاک (K) با داده‌های اندازه‌گیری میدانی می‌باشد. تسما[6] (۲۰۲۲) نقاط داغ فرسایش حوضه آبخیز جیجیگا واقع در اتیوپی را با استفاده از پارامترهای مورفومتریک و کاربری اراضی/پوشش زمین پهنه‌بندی نمود. این تحقیق اطلاعاتی را در خصوص مناطق تخریب شده در اختیار مدیران حوضه آبخیز، برنامه‌ریزان شهری و تصمیم‌گیران جهت مدیریت منابع طبیعی برای توسعه پایدار حوضه قرار داده است.

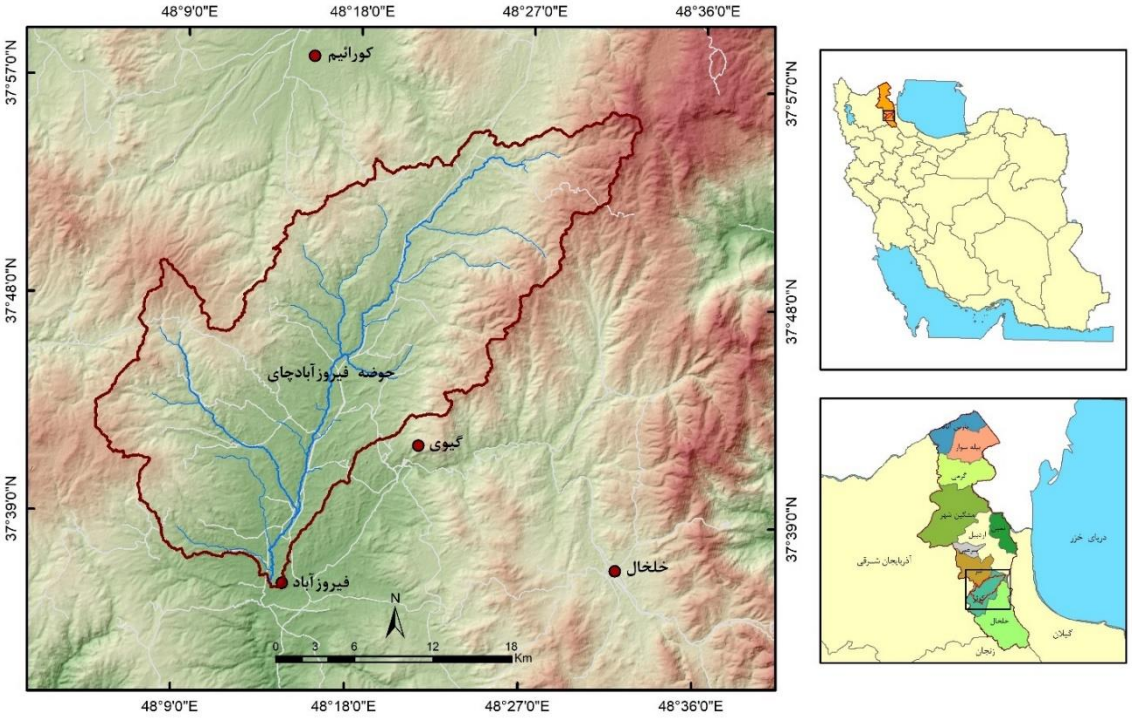
۲- روش‌شناسی

۲- ۱- معرفی منطقه مطالعاتی

در پژوهش حاضر به ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی فرسایش در سطح حوضه آبریز فیروزآبادچای پرداخته شده است. حوضه مطالعاتی با مختصات جغرافیایی ٤٨ درجه و ٤ دقیقه و ۲۵ ثانیه تا ٤٨ درجه و ۳۳ دقیقه و ۲ ثانیه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۳٦ دقیقه و ۵ ثانیه تا ۳۷ درجه و ٥٦ دقیقه و ۷ ثانیه عرض شمالی در استان اردبیل واقع شده است (شکل ۱). حوضه فیروزآبادچای بخش عمده‌ای از محدوده شهرستان کوثر را زهکشی می‌کند. مساحت این حوضه بالغ بر ٦٦۳ کیلومترمربع و محیط آن حدود ۲۱٤ کیلومتر می‌باشد. این حوضه یکی از مهم‌ترین زیرحوضه‌های گیوی‌چای بوده و درنتیجه جزئی از سیستم زهکشی قزل‌اوزن به‌شمار می‌رود. میانگین دبی سالانه رودخانه فیروزآبادچای حدود ۳/٦ مترمکعب در ثانیه است. بیشترین میزان دبی رودخانه مربوط به فروردین‌ماه با میانگین ۱۱/۷ مترمکعب

[1] - Wu &Wang
[2] - Shanxi
[3] - Bakimchandra
[4] - Gajbhiye
[5] - Fauzi
[6] - Tesema

در ثانیه و سپس اردیبهشت‌ماه با میانگین ۹/۸ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. کمترین میزان دبی نیز مربوط به ماه‌های شهریور و مهر به ترتیب با ۰/۳ و ۰/۹ مترمکعب در ثانیه است.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز فیروزآبادچای در شمال غرب کشور

۲- ۲- مواد و روش‌ها

متغیرهای زیادی فرایند وقوع فرسایش در سطح حوضه‌های آبریز را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در پژوهش حاضر تاکید بر روی متغیرهای ژئومورفولوژیکی می‌باشد که تا حد زیادی فرسایش را تحت کنترل خود دارند. بدین منظور از شاخص‌های بدین شرح استفاده شد: شیب، جهت شیب، شاخص تقعر سطح زمین، شاخص همگرایی جریان، فاکتور طول دامنه، عدد ناهمواری ملتون، شاخص حفاظت مورفومتریک، شاخص توان رودخانه، شاخص رطوبت توپوگرافیک، تراکم زهکشی، فاصله از آبراهه‌ها، لیتولوژی، پوشش گیاهی. در این راستا مهم‌ترین داده‌های تحقیق شامل تصویر مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر مربوط به ماهواره ALOS PALSAR، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ (مربوط به اوایل تابستان ۱۴۰۱ هـ . ش) و گوگل ارث می‌باشند. برای حوضه آبریز مطالعاتی داده‌های محدودی وجود دارد؛ بدین ترتیب روش‌شناسی تحقیق متکی بر تکنیک‌های دورسنجی (RS) و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌باشد. در ارزیابی مکانی پتانسیل فرسایش لازم است که فاکتورهای متعدد به صورت ترکیبی و یکپارچه مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. بدین منظور در پژوهش حاضر ارزیابی و پهنه‌بندی فرسایش در سطح حوضه آبریز مطالعاتی با بهره‌گیری از قابلیت‌ها و امکانات تحلیل‌های مکانی سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به انجام رسید. به منظور استاندارد نمودن و ترکیب لایه‌های موضوعی موثر بر فرسایش از رویکرد منطق فازی استفاده شد. منطق فازی جزو مدل‌های هوشمندی به‌شمار می‌رود که برای اقدام در شرایط عدم اطمینان معرفی شده است. این نظریه قادر است بخش قابل توجهی از مفاهیم، متغیرها، شاخص‌ها و سیستم‌های نامشخص و مبهم را صورت‌بندی ریاضی بخشد و زمینه را برای استدلال کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط نامطمئن فراهم آورد. نظریه مجموعه

فازی با عدم قطعیت‌ها سروکار دارد و اجازه می‌دهد تا نظرات و عقاید تصمیم‌گیرندگان نیز ترکیب شوند. بدین ترتیب می‌تواند ابزاری مناسب برای ایجاد سیستم‌های مدیریت ریسک بلایا، از قبیل تکنیک‌های مبتنی بر قاعده فازی و ترکیب رویکرد فازی با سایر تکنیک‌ها، فراهم سازد (لی[1]، ۲۰۱۳: ۲۳۹). این روش‌شناسی تحولات مختلفی را تجربه کرده و در حال حاضر به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد (ناندالال و راتنایاک[2]، ۲۰۱۱: ۱۲۸). در این رابطه، امروزه منطق فازی در حوزه هیدرولوژی به‌منظور ارزیابی منابع آب و تجزیه و تحلیل هیدرولوژیک به‌طور گسترده‌ای به‌کار گرفته می‌شود (داتاوادکار و وانی[3]، ۲۰۲۱: ۱۶۰۱). روی‌هم‌گذاری فازی لایه‌های موضوعی و تهیه نقشه پتانسیل مکانی فرسایش در سطح حوضه آبریز فیروزآبادچای شامل سه مرحله اساسی است:

- آماده‌سازی و ارزیابی مکانی لایه‌های موضوعی موثر بر فرسایش؛
- فازی‌سازی لایه‌های موضوعی با کاربست توابع مختلف عضویت فازی؛
- روی‌هم‌گذاری فازی لایه‌ها با استفاده از عملگرهای فازی.

به منظور روی‌هم‌گذاری و ترکیب لایه‌های موضوعی فازی پنج اپراتور موسوم به «و» فازی، «یا» فازی، ضرب جبری فازی، جمع جبری فازی و گامای فازی به‌کار گرفته می‌شوند (لی[4]، ۲۰۰۷: ۶۲۰؛ ازری[5]، ۲۰۲۰):

رابطه (۱)– «و» فازی $\mu_{combination} = MIN(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \ldots)$

رابطه (۲)– «یا» فازی $\mu_{combination} = MAX(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \ldots)$

رابطه (۳)– ضرب فازی $\mu_{combination} = \prod_{i=1}^{n} \mu_i$

رابطه (٤)– جمع فازی $\mu_{combination} = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - \mu_i)$

رابطه (۵)– گامای فازی $\mu_{combination} = (\text{Fuzzy algebraic sum})^{\lambda} * (\text{Fuzzy algebraic product})^{1-\lambda}$

در روابط فوق، μi تابع عضویت فازی برای لایه موضوعی i ام و λ یک پارامتر انتخابی در دامنه (۱و۰) می‌باشد. با توجه به هدف تحقیق و همچنین ماهیت روابط مذکور از اپراتور گامای فازی برای ترکیب و روی‌هم‌گذاری فازی لایه‌های موثر بر فرسایش استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

در پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی فرسایش در سطح حوضه آبریز فیروزآبادچای از روی‌هم‌گذاری فازی لایه‌های موضوعی موثر بر فرسایش استفاده شد. در گام نخست توزیع فضایی فاکتورهای مورد استفاده برای پهنه‌بندی فرسایش مورد ارزیابی قرار گرفت. در گام دوم فاکتورهای مذکور با استفاده از توابع مختلف فازی در بستر سیستم اطلاعات جغرافیای (GIS) فازی شدند. درنهایت، لایه‌های فازی با کاربست اپراتور گامای فازی ترکیب شده و نقشه پهنه‌بندی فرسایش در سطح حوضه مطالعاتی تهیه گردید.

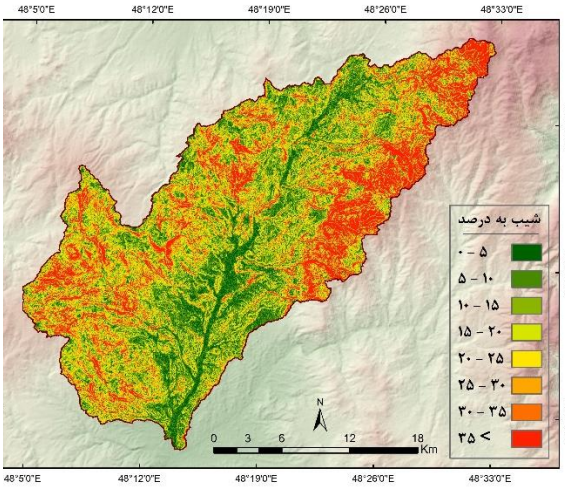
۳- ۱- ارزیابی مکانی فاکتورهای موثر بر فرسایش

در پژوش حاضر از ۱۳ فاکتور موثر بر وقوع فرسایش استفاده شد. در ادامه توزیع فضایی فاکتورهای مذکور به اختصار و در قالب نقشه‌های موضوعی ارائه شده است.

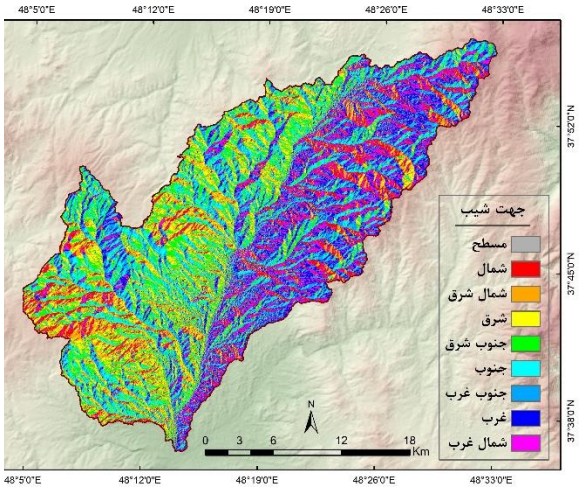
[1] - Li
[2] - Nandalal and Ratnayake
[3] - Dattawadkar and Vani
[4] - Lee
[5] - Esri

شیب: شیب سطح زمین را می‌توان یکی از مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر فرسایش خاک به‌شمار آورد. فرسایش در سطوح شیب‌دار از شدت عمل بیشتری برخوردار است. شیب حوضه آبریز فیروزآباد با استفاده از تصویر DEM منطقه با قدرت تفکیک فضایی ۱۲/۵ متر تهیه شد (شکل ۲). بر این اساس میانگین شیب حوضه مطالعاتی حدود ۲۰/۷ درصد با انحراف معیار ۱۳/۹ محاسبه گردید. بدین ترتیب در سطح حوضه مطالعاتی فاکتور شیب از تغییرپذیری مکانی زیادی برخوردار است که شدت عمل فرایندهای فرسایشی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. حدود ۷/٦ درصد مساحت حوضه آبریز فیروزآباد در طبقه شیب ۰ تا ۵ درصد واقع شده است. در حالت تطبیقی، شیب‌های کمتر از ۵ درصد و مخصوصا کمتر از ۲ درصد از فرسایش‌پذیری کمتری برخوردارند. با افزایش شیب شرایط برای تشدید فرایندهای فرسایشی مساعدتر می‌گردد. همچنین ناپایداری‌های دامنه‌ای نیز به عنوان عوامل محرک و تشدیدکننده فرسایش آغاز می‌شوند. در سطح حوضه مطالعاتی حدود ۱۵/۹ درصد ارضی در سطوح شیب ۵ تا ۱۰ درصد و ۱۵/۷ درصد در سطوح شیب ۱۰ تا ۱۵ درصد توزیع شده‌اند. در طبقات شیب مذکور به تدریج پتانسیل فرسایش خاک افزایش پیدا می‌کند. سطوح شیب ۰ تا ۱۵ درصد عرصه فعالیت‌های ساختمانی و مخصوصا کشاورزی منطقه می‌باشند که در ترکیب با فرسایش‌پذیری سازندهای زمین‌شناسی باعث افزایش قابل توجه نرخ‌های فرسایش شده است. طبقات پرشیب نیز در سطح حوضه از وسعت زیادی برخوردارند. در این رابطه حدود ۱۲/۳ درصد حوضه در طبقه شیب ۲۰ تا ۲۵ درصد، ۱۰/۳ درصد در طبقه شیب ۲۵ تا ۳۰ درصد، حدود ٦/۹ درصد در طبقه شیب ۳۰ تا ۳۵ درصد و درنهایت حدود ۱۵/۳ درصد در طبقه شیب بیشتر از ۳۵ درصد توزیع شده‌اند. بدین ترتیب، مورفولوژی پرشیب و ناهموار یکی از مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده فرسایش در سطح حوضه آبریز فیروزآباد محسوب می‌شود.

جهت شیب: اثر مستقیم جهت شیب به‌واسطه تاثیر بر ذوب برف و اثر غیرمستقیم آن به واسطه تاثیر بر پوشش گیاهی است. در دامنه‌های جنوبی و غربی، برف‌های حوضه با سرعت بالاتری ذوب می‌شوند. این امر در اواخر زمستان و اوایل بهار که منطقه بارش‌های همرفتی-رگباری فراوانی را تجربه می‌کند حائز اهمیت زیادی است. تراکم پایین پوشش گیاهی و اثرات حفاظتی محدود آن در مقابله با سیلاب و فرسایش را می‌توان به موارد مذکور اضافه نمود. با توجه به روند عمومی زهکشی، حوضه فیروزآباد را از نظر جهت شیب می‌توان به دو بخش غربی و شرقی تقسیم نمود. در نیمه غربی غلبه با شیب‌های غربی و جنوب غربی بوده و در نیمه شرقی شیب‌های شرقی و جنوب شرقی غلبه دارند (شکل ۳). در رابطه با فرسایش، شیب‌های جنوبی، جنوب غربی و غربی از اهمیت بیشتری برخوردارند. در این رابطه، شیب‌های جنوبی حدود ١٤/۵ درصد، شیب‌های جنوب غربی حدود ۱۳/٦ درصد و شیب‌های غربی حدود ۱۲/٦ درصد مساحت حوضه را به‌خود اختصاص داده‌اند. در شیب‌های مذکور به دلیل پوشش گیاهی ضعیف‌تر و وقوع شیت‌فلادها فرایندهای فرسایشی از شدت عمل بیشتری برخوردارند.



شکل ۲- توزیع شیب در حوضه فیروزآباد



شکل ۳- توزیع جهت شیب در حوضه فیروزآباد

فاکتور طول دامنه: طول دامنه به عنوان فاصله از نقطه مبدا (سرچشمه) رواناب سطحی تا نقطه‌ای که شیب تا حدی کاهش می‌یابد که رسوب‌گذاری آغاز می‌شود یا تا نقطه‌ای که رواناب وارد یک کانال مشخص می‌شود، تعریف می‌شود (ژانگ[1] و همکاران، ۲۰۱۷: ۳۸). فاکتور طول دامنه به عنوان یکی از عوامل کلیدی تاثیرگذار بر حجم جریان (یونگمی[2] و همکاران، ۲۰۱۱: ۱) و سرعت رواناب (گیلی[3] و همکاران، ۱۹۸۷: ۱۴۸) به‌شمار می‌رود. طول دامنه هنگام ارزیابی اثر آن بر فرسایش به کرات مورد توجه قرار گرفته است. اثر طول دامنه بر فرسایش از طریق افزایش حجم و سرعت رواناب رخ می‌دهد و در نتیجه ظرفیت رواناب برای جداسازی و انتقال رسوبات افزایش می‌یابد (باگارلو و فرو[4]، ۲۰۱۰: ۴۱۱). بدین ترتیب، هر چه طول دامنه بیشتر باشد، سرعت جریان بیشتر و حجم رواناب بیشتر می‌شود. این امر به طور قابل توجهی شکل‌گیری سیل و فرایندهای فرسایشی را تحت تاثیر قرار می‌دهد (دونگ[5] و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۱۸). در تحقیق حاضر، برای استخراج لایه طول دامنه از رابطه زیر استفاده شد (لوکا[6] و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۹۷):

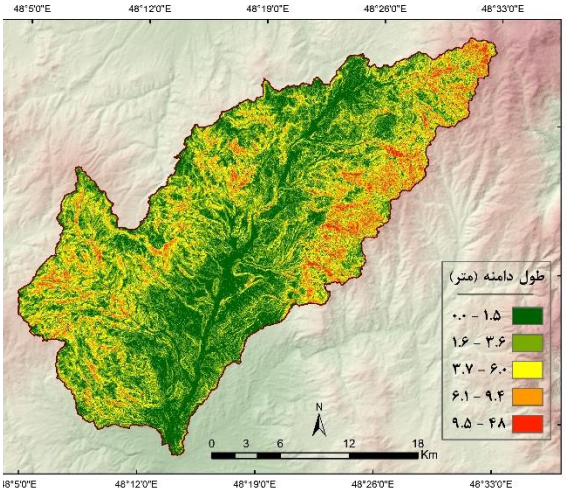
$$LSF=(fa*Cell_size/22.3)^{0.4}*(Sin\sigma/0.0896)^{1.3}$$ رابطه (۶)

که در آن: LSF فاکتور طول دامنه و fa تجمع جریان می‌باشد. توزیع فاکتور طول دامنه در سطح حوضه آبریز فیروزآباد در شکل (۴) ارائه شده است. در حوضه مطالعاتی مقادیر این شاخص از حداقل صفر تا حداکثر ۴۸ متر متغیر است. بین فرسایش و طول دامنه رابطه‌ای مستقیم برقرار است؛ بدین ترتیب در شرایط برابر پهنه‌هایی از حوضه که دارای طول دامنه بالاتری می‌باشند نسبت به فرایندهای فرسایشی آسیب‌پذیرترند. در این پهنه‌ها فرایندهای ناپایداری دامنه‌ای نیز از پتانسیل بالایی برخوردار بوده که به‌نوبه‌ی خود باعث تشدید فرسایش می‌شوند.

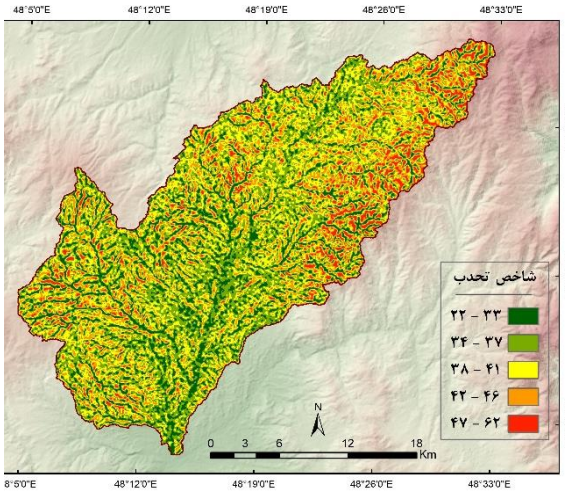
[1] - Zhang
[2] - Yongmei
[3] - Gilley
[4] - Bagarello and Ferro
[5] - Dung
[6] - Luca

شاخص تحدب سطح زمین: در پژوهش حاضر از شاخص تحدب سطح زمین[1] به‌عنوان یک متغیر ژئومورفومتریکی در ارزیابی پتانسیل مکانی فرسایش خاک استفاده شد. شاخص مذکور برای نخستین بار توسط ایواهاشی و پیکه[2] (۲۰۰۷) معرفی شد و هدف از ارائه آن طبقه‌بندی عوارض سطح زمین بود. تحدب سطح زمین از طریق کاربست فیلتر لاپلاسی تهیه می‌شود. فیلتر لاپلاسی عملیاتی در پردازش تصویر است که در تقویت لبه استفاده شده و مشتق دوم ارتفاع را تقریب می‌زند (ایواهاشی و پیکه، ۲۰۰۷). مقادیر بالاتر این شاخص نشان‌دهنده سطوح محدب و مقادیر پایین نشان‌دهنده سطوح مقعر است. مقادیر شاخص تحدب حوضه آبریز فیروزآباد در شکل (۵) ارائه شده است. برای استخراج شاخص تحدب سطح زمین از مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه به عنوان داده پایه استفاده شد. سطوح محدب با مقادیر بالاتر از ٤٧ مشخص می‌شوند که حدود ٦ درصد مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. سطوح مذکور به دلیل مورفولوژی محدب از نفوذپذیری پایینی برخوردارند و درنتیجه بخش قابل توجهی از بارش به رواناب تبدیل شده و رسوبات قابل توجهی را با خود حمل می‌کنند. بدین ترتیب، سطوح مذکور به‌عنوان پهنه‌هایی برای تامین و تولید رسوب حوضه عمل می‌کنند. پهنه‌های با مقادیر شاخص ٤٢ تا ٤٦ را می‌توان به‌عنوان سطوح نسبتا محدب مد نظر قرار داد. سطوح مذکور را می‌توان حدواسط مورفولوژی‌های محدب و مستقیم به‌شمار آورد و حدود ۱۸ درصد مساحت حوضه را شامل می‌شوند. در سطوح مذکور علاوه بر تاثیر تحدب زمین در تامین رسوب، نیروی ثقل زمین نیز به‌عنوان محرک فرسایش خاک عمل می‌کند. مورفولوژی‌های مستقیم با مقادیر شاخص ۳۸ تا ٤١ مشخص شده و حدود ۲۹ درصد مساحت حوضه را دربرمی‌گیرند. سطوح مستقیم را می‌توان رابط بین پایکوه‌ها و سطوح هموار حوضه به‌شمار آورد که علی‌رغم شکل مستقیم خود در معرض فرایندهای فرسایشی، مخصوصا از نوع شیاری و گالی، می‌باشند. دستکاری سطوح مذکور توسط عامل انسانی نقش عمده‌ای در افزایش فرسایش در سطوح مذکور داشته است. سطوح نسبتا مقعر حوضه منطبق بر مقادیر ٣٤ تا ۳۷ بوده و حدود ۳۲ درصد مساحت حوضه را شامل می‌شوند. سطوح مذکور عمدتا در پای دامنه‌ها توزیع شده‌اند که محل نهشته‌گذاری رسوبات دامنه‌های فوقانی می‌باشند. با این حال، بسته به میزان دخالت‌های عامل انسانی می‌توان شاهد برداشت مجدد رسوبات و فرسایش تشدیدی در سطوح مذکور بود. درنهایت، سطوح مقعر با مقادیر شاخص تحدب ۲۲ تا ۳۳ می‌شوند که بالغ بر ١٦ درصد مساحت حوضه را دربرمی‌گیرند. این سطوح با مورفولوژی مقعر و فرورفته خود محل انباشت آب و رسوب می‌باشند. بخش قابل توجهی از رسوبات فوقانی حوضه در سطوح مقعر نهشته می‌شوند که در برخی موارد منجر به مسائل متعدد از قبیل پر شدن بندها و شبکه‌های انتقال آب در سطح حوضه می‌شوند. در سطوح مذکور فرسایش کناری مجرای رودخانه‌ها شکل مسلط فرسایش آبی می‌باشد.

[1] - Terrain Surface Convexity
[2] - Iwahashi & Pike



شکل ٤- توزیع طول دامنه در حوضه فیروزآباد



شکل ۵- تحدب سطح زمین در حوضه فیروزآباد

شاخص رطوبت توپوگرافیک: شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI) به‌عنوان یکی از ورودی‌های پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش حوضه فیروزآباد به‌کار گرفته شد. شاخص TWI بر این فرض استوار است که توپوگرافی کنترل‌کننده حرکت آب در چشم‌انداز می‌باشد. در واقع، شاخص مذکور تاثیر توپوگرافی محلی در فرآیندهای هیدرولوژیکی را به صورت کمّی نشان می‌دهد و از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است (کومار و گوپتا[1]، ۲۰۱٦: ١٤٦٣):

$$\mathrm{TWI} = \mathrm{Ln}\frac{(A_S * \text{Pixel area})}{\mathrm{Tan}((S * \pi)/180))}$$

رابطه (۷)

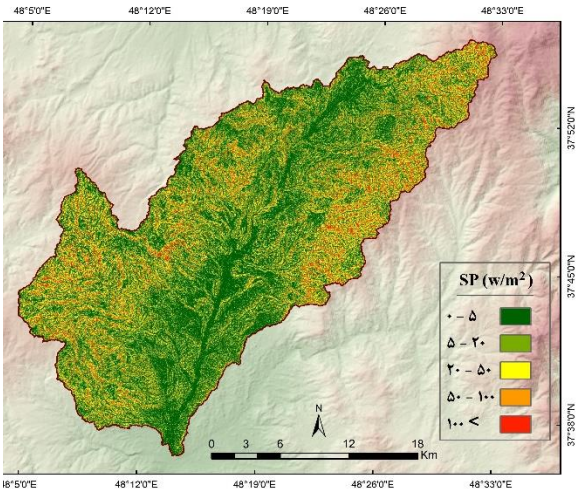
که در آن: As مساحت زهکشی دامنه فوقانی در واحد عرض خط کانتور (مترمربع/ متر) و S شیب به درجه است. مقادیر رطوبت توپوگرافیک در سطح حوضه فیروزآباد از حداقل ۱/۸ تا حداکثر ۲۲/۹ متغیر است (شکل ٦). در رابطه با تاثیر شاخص TWI در میزان فرسایش می‌توان بیان داشت که رابطه‌ای معکوس بین شاخص مذکور و فرسایش خاک برقرار است. بدین ترتیب در پهنه‌هایی از حوضه مطالعاتی که شاخص TWI مقادیر بالایی را نشان می‌دهد پتانسیل فرسایش تاحدودی کاهش پیدا می‌کند. به‌واقع در سطوح با مقادیر بالای رطوبت توپوگرافیک، خاک موجود در سطح زمین از رطوبت بالایی برخوردار می‌باشد و بدین ترتیب چسبندگی ذرات خاک (مخصوصا خاک‌های ریزدانه رسی) افزایش پیدا می‌کند که مانعی اساسی در برابر گسیختن و جدا شدن ذرات خاک به‌شمار می‌رود. از سوی دیگر در پهنه‌های با رطوبت توپوگرافیک بالا معمولا پوشش گیاهی از تراکم بالاتری برخوردار بوده و به‌عنوان یک پوشش حفاظتی برای خاک عمل می‌کند.

توان رودخانه: توان رودخانه، به عنوان یک مفهوم ژئومورفولوژیکی، عبارت است از: مقدار انرژی موجود یک رودخانه برای حرکت یا جابجایی رسوب، سنگ یا آوار. توان رودخانه را می‌توان معیاری برای سنجش نیروهای محرک اصلی عمل کننده در یک مجرا به‌حساب آورد که در واقع ظرفیت یک رودخانه برای انتقال رسوب و انجام کار ژئومورفیک را مشخص می‌سازد (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵). مدل‌های رقومی ارتفاع جدید، محاسبه شیب مجرا و بدین ترتیب، توان رودخانه را با قدرت تفکیک مکانی قابل توجهی امکان‌پذیر ساخته‌اند (بیزی و لرنر[2]، ۲۰۱۵: ١٦). توان رودخانه از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است (لوکا و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۹۷):

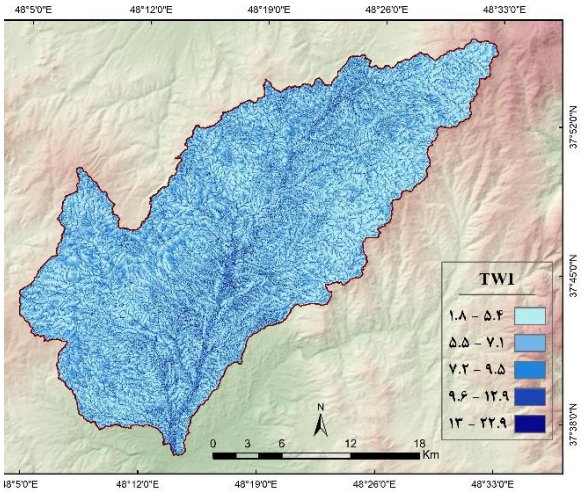
[1] - Kumar & Gupta
[2] - Bizzi and Lerner

رابطه (۸) $$SPI=In(As/tan\sigma)$$

که در آن: SPI شاخص قدرت جریان، As مساحت ویژه جریان و σ درجه شیب می‌باشد. مقادیر شاخص توان رودخانه (SPI) نشان‌دهنده قدرت فرسایندگی جریان آب است. مقادیر این شاخص در سطح حوضه آبریز فیروزآباد از تغییرپذیری بالایی برخوردار است؛ به‌گونه‌ای که مقدار آن از حداقل صفر تا بیش از ۲۰ هزار وات بر مترمربع متغیر است (شکل ۷). مقادیر بالای شاخص SPI دلالت بر توانایی انجام کار ژئومورفیک بالاتر دارد که از نظر تولید رسوب، فرسایش و قدرت تخریبی سیلاب‌ها حائز اهمیت است. در جهت ارتفاعات حوضه مطالعاتی با افزایش شیب بر میزان توان رودخانه افزوده می‌شود. در قسمت‌هایی از دامنه‌های میانی و فوقانی حوضه مطالعاتی توان رودخانه به اندازه‌ای افزایش پیدا می‌کند که قادر است تخته‌سنگ‌های بزرگ را در طی دبی‌های بالا جابجا کند. در همین قسمت‌ها، مقادیر بسیار بالای توان رودخانه را می‌توان به وجود پرتگاه‌ها، تنداب‌ها و آبشارها در مسیر جریان نسبت داد. در قسمت‌هایی از پایین‌دست و میانه‌های حوضه مطالعاتی مقادیر شاخص توان رودخانه بین ۰ تا ۲۰ وات بر مترمربع متغیر است. در این قسمت‌ها مقادیر بالاتر منطبق بر بستر آبراهه‌های اصلی حوضه بوده که از نظر فرسایش رودخانه‌ای حائز اهمیت زیادی است.



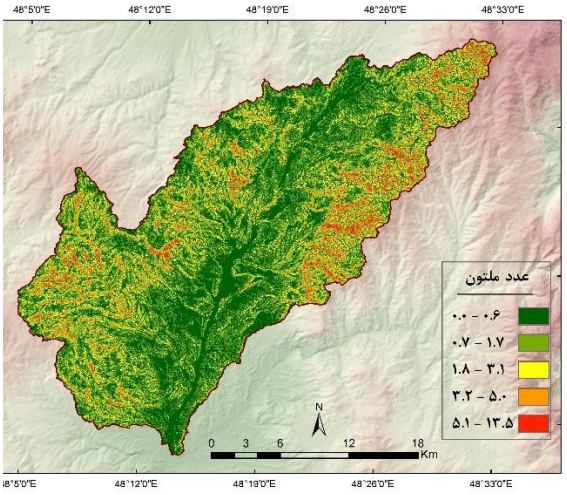
شکل ۷- شاخص توان رودخانه در حوضه فیروزآباد



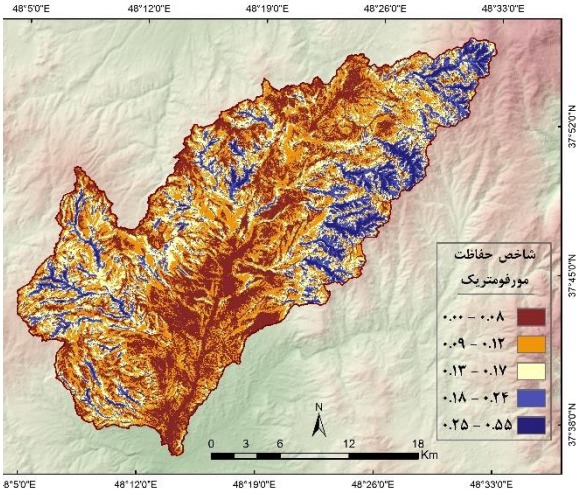
شکل ٦- رطوبت توپوگرافیک در حوضه فیروزآباد

عدد ناهمواری ملتون: در پژوهش حاضر عدد ناهمواری ملتون به منظور دخالت دادن میزان ناهمواری‌ها و پستی و بلندی‌ها در فرایندهای فرسایشی مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر بالاتر عدد ناهمواری ملتون نشان‌دهنده پهنه‌های با درجه ناهمواری بالا می‌باشد و برعکس. فرض بر این است که در شرایط برابر، سطوح با درجه ناهمواری و پستی و بلندی زیاد نسبت به فرایندهای فرسایش آبی حساسیت بیشتری دارند و به‌عنوان منبع تامین رسوب حوضه عمل می‌کنند. مقادیر شاخص مذکور در سطح حوضه آبریز فیروزآباد بین ۰ تا ۱۳/۵ متغیر است (شکل ۸). کلاس با مقادیر ۵/۱ تا ۱۳/۵ نشان‌دهنده ناهموارترین قسمت‌ها حوضه بوده و عمدتا در قسمت‌های غربی و شرقی حوضه توزیع شده‌اند. برعکس، کلاس با مقادیر کمتر از ۰/٦ نشان‌دهنده سطوح با کمترین میزان ناهمواری می‌باشد که عمدتا در قسمت‌های میانی حوضه، یعنی در پیرامون رودخانه اصلی فیروزآباد پراکنده شده‌اند. در کل، از قسمت‌های غربی و شرقی در جهت مرکز حوضه عدد ناهمواری ملتون کاهش پیدا می‌کند.

شاخص حفاظت مورفومتریک: این الگوریتم اطراف هر سلول را تا یک فاصله معین تجزیه و تحلیل کرده و چگونگی محافظت از آن را ارزیابی می‌کند (یوکویاما و پیکه[1]، ۲۰۰۲: ۲۵۷). مقادیر بالاتر این شاخص دلالت بر حفاظت بهتر سطوح توسط مورفولوژی‌های پیرامون است و برعکس مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده حفاظت محدودتر و غلبه سطوح باز و بدون حفاظ در چشم‌انداز است. مقادیر این شاخص در سطح حوضه آبریز فیروزآباد از حداقل صفر تا ۰/۵۵ متغیر است (شکل ۹). در این رابطه کلاس با مقادیر ۰/۲۵ تا ۰/۵۵ از بیشترین میزان حفاظت مورفومتریکی برخوردار بوده که بالغ بر ٤/٦ درصد مساحت حوضه را به‌خود اختصاص داده و عمدتا منطبق بر قسمت‌های مرتفع و ناهموار حوضه است. در نقطه مقابل، کلاس با مقادیر ۰ تا ۰/۰۸ پهنه‌های با کمترین حفاظت مورفومتریکی بوده و بالغ بر ۲۹ درصد مساحت حوضه را شامل می‌شوند. پهنه‌های مذکور سطوح باز و بدون حفاظ بوده و در قسمت‌های کم‌ارتفاع، تپه‌ماهوری و هموار تا نسبتا هموار حوضه توزیع شده‌اند. این سطوح در شرایط برابر از آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به فرسایش آبی- مخصوصا فرسایش پاشمانی، شیاری و گالی- برخوردارند. افزون بر این، سطوح مذکور با توجه به موقعیت قرارگیری در پای دامنه‌ها و دره‌های منطقه، در معرض شیت‌فلادها قرار دارند که از توان فرسایشی بالایی برخوردارند.



شکل ۸- عدد ناهمواری ملتون در حوضه فیروزآباد

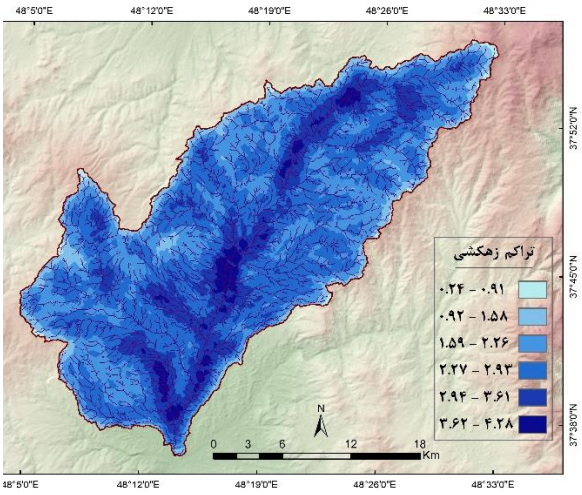


شکل ۹- شاخص حفاظت مورفومتریک در حوضه فیروزآباد

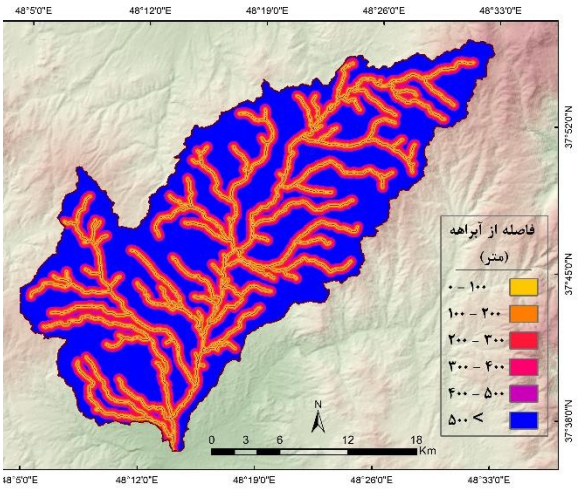
تراکم زهکشی: تراکم زهکشی یکی از مهم‌ترین فاکتورهای موثر در پاسخ هیدرولوژیکی حوضه محسوب می‌شود. در حالت کلی تراکم زهکشی بالاتر باعث پاسخ سریع‌تر حوضه نسبت به بارش شده و رواناب‌ها با سرعت و شدت بیشتری از حوضه تخلیه می‌شوند. بدین ترتیب، می‌توان گفت که سطوح با تراکم زهکشی بالاتر نسبت به فرسایش از حساسیت بیشتری برخوردارند. در پژوهش حاضر تراکم زهکشی حوضه مطالعاتی با کاربست توابع تراکم[2] نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید (شکل ۱۰). مقادیر تراکم زهکشی حوضه مطالعاتی از حداق ۰/۲٤ تا حداکثر ٤/۲۸ کیلومتر در کیلومترمربع متغیر است. در حالت کلی، در جهت آبراهه اصلی حوضه بر میزان تراکم زهکشی افزوده می‌شود. این امر به دلیل توسعه آبراهه‌ها و به‌هم‌پیوستن آبراهه‌های مختلف در جهت پایین‌دست است. بدین ترتیب، در رابطه با فاکتور تراکم زهکشی، دره‌های اصلی حوضه- مخصوصا در محل تلاقی آبراهه‌های متعدد- از فرسایش‌پذیری بیشتری برخوردارند.

[1] - Yokoyama & Pike
[2] - Density

فاصله از آبراهه‌ها: فرسایش آبراهه‌ای یکی از مهم‌ترین اشکال فرسایش خاک است که مخصوصا کناره‌های رودخانه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بدین ترتیب یکی از کانون‌های فرسایش حوضه آبریز مطالعاتی بستر و کناره‌های آبراهه‌ها- مخصوصا آبراهه‌های رده بالا- می‌باشد. از سوی دیگر سیلاب‌ها بیشترین تاثیر را در منطقه رودکنار و دشت‌های سیلابی حوضه دارند. در پژوهش حاضر فاصله از آبراهه‌ها به عنوان یکی از لایه‌های موثر در پهنه‌بندی و تهیه نقشه حساسیت فرسایش حوضه آبریز فیروزآباد مورد استفاده قرار گرفت. در این رابطه، آبراهه‌های رده ۳ و بالاتر مورد توجه قرار گرفتند (شکل ۱۱).



شکل ۱۰- توزیع تراکم زهکشی در حوضه فیروزآباد



شکل ۱۱- فاصله از آبراهه‌ها در حوضه فیروزآباد

شاخص همگرایی جریان: شاخص همگرایی جزو پارامترهای تبیین‌کننده شرایط هیدروژئومورفیک حوضه می‌باشد که در پژوهش حاضر برای پهنه‌بندی فرسایش مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱۲). شاخص همگرایی پارامتری به شمار می‌رود که ساختمان ناهمواری را به صورت مجموعه‌ای از سطوح همگرا و واگرا نمایش می‌دهد. مقادیر منفی این شاخص نشان‌دهنده سطوح همگرا بوده که بیشتر در معرض سیلاب و فرسایش قرار می‌گیرند. بدیهی است که مقادیر منفی‌تر این شاخص دلالت بر همگرایی بیشتر و خطرپذیری بیشتر نسبت به سیلاب و فرسایش دارد. در این رابطه کلاس با مقادیر شاخص همگرایی کمتر از ۲۰- معرف سطوح با همگرایی بسیار زیاد هستند. این سطوح مشتمل بر بستر آبراهه‌ها و اراضی مجاور آنها بوده و همه ساله توسط دبی‌های معمول و طغیانی (سیلاب‌های با دوره بازگشت ۱ تا ۳ ساله) تحت تاثیر قرار می‌گیرند. کلاس با مقادیر شاخص همگرایی ۲۰- تا ٤- نیز دلالت بر سطوح با همگرایی زیاد هستند. این سطوح عمدتا در مجاورت بلافصل کلاس فوق‌الذکر توزیع شده‌اند و خطرپذیری بالایی نسبت به وقوع سیلاب و فرسایش دارند.

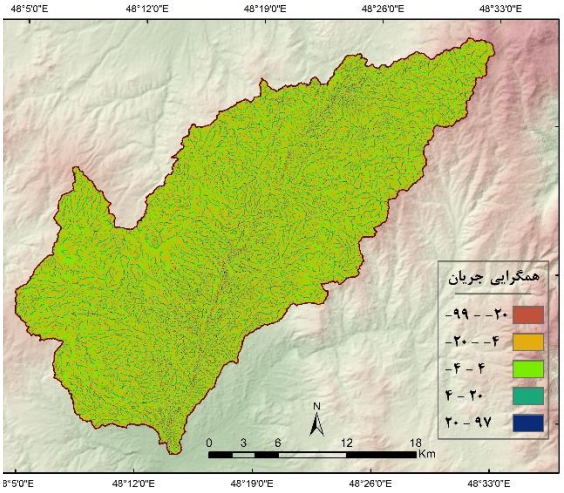
شاخص NDVI: پوشش گیاهی یکی از مهم‌ترین فاکتورهای حفاظتی در مقابل فرسایش خاک است. پوشش گیاهی نفوذپذیری خاک را افزایش داده و از اصابت مستقیم قطرات باران به سطح خاک جلوگیری می‌کند. همچنین ریشه آنها باعث افزایش چسبندگی ذرات خاک می‌شود. بدین ترتیب در هر گونه پهنه‌بندی فرسایش خاک، پوشش گیاهی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فاکتورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر به‌منظور مشارکت پوشش گیاهی در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش حوضه مطالعاتی از شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) استفاده شد (شکل ۱۳). شاخص مذکور از طریق رابطه زیر به‌دست می‌آید (لیو و ماسون[1]، ۲۰۰۹: ۲۰۹):

[1] - Liu & Mason

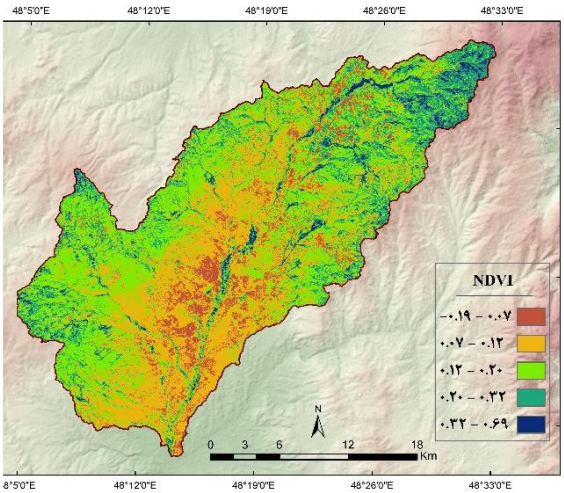
رابطه (۹)

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}.$$

در رابطه بالا: NIR باند مادون قرمز نزدیک و RED باند قرمز است. در تصاویر ماهواره‌ای سنتیل (مورد استفاده در پژوهش حاضر) باند ۸ معرف باند مادون قرمز نزدیک و باند ٤ معرف باند قرمز می‌باشد. مقادیر شاخص NDVI در دامنه بین ۱- تا ۱+ قرار می‌گیرد. مقادیر منفی NDVI (اعداد نزدیک به ۱-) نشان‌دهنده توده‌های آب است. مقادیر نزدیک به صفر (در دامنه بین ۰/۱- تا ۰/۱+) عموما دلالت بر سطوح برهنه سنگی، ماسه‌ای یا برفی دارد. مقادیر پایین و مثبت شاخص NDVI (در دامنه بین ۰/۲+ تا ۰/٤+) بیانگر پوشش درختچه‌ای و مراتع یا علفزار و درنهایت، مقادیر بالای این شاخص (یعنی مقادیر نزدیک به ۱+) دلالت بر جنگل‌های بارانی مناطق گرم و استوایی دارد (وییر و هرینگ[1]، ۲۰۰۰). در سطح حوضه آبریز فیروزآباد، کلاس ۱ (با مقادیر NDVI بین ۰/۰۷ – ۰/۱۹-) دلالت بر اراضی بایر و فاقد پوشش گیاهی دارد. این کلاس منطبق بر سطوح آبی، برونزدهای سنگی، اراضی بایر و اراضی ساخته‌شده (شهرها، روستاها، جاده‌های آسفالت و ...) می‌باشند. بالغ بر ۸/٤ درصد مساحت حوضه مطالعاتی در این کلاس قرار گرفته است. تمرکز اصلی این کلاس در قسمت‌های پایین‌دست حوضه است. در قسمت‌هایی از بالادست حوضه کلاس مذکور منطبق بر مورفولوژی‌های پرتگاهی و برنزدهای سنگی می‌باشد. کلاس ۲ (با مقادیر NDVI بین ۰/۱۲ – ۰/۰۷) عموما بیانگر مراتع با پوشش گیاهی ضعیف تا نسبتا ضعیف می‌باشد. حدود ۳۳ درصد مساحت حوضه در کلاس مذکور قرار گرفته است. بدین ترتیب، اراضی بایر یا با پوشش گیاهی ضعیف در سطح حوضه مطالعاتی از درصد قابل توجهی برخوردارند. در سطوح کم‌ارتفاع حوضه، دریافت نزولات جوی نسبتا کم از دلایل اساسی توسعه اراضی با پوشش گیاهی ضعیف می‌باشد. کلاس ۳ (با مقادیر NDVI بین ۰/۲۰ – ۰/۱۲) در سطح حوضه مطالعاتی معرف مراتع با پوشش گیاهی متوسط و اراضی دیم است. بالغ بر ۳۸/٦ درصد مساحت حوضه در کلاس مذکور قرار گرفته است. در واقع، بخش عمده‌ای از دامنه‌های ارتفاعات حوضه دارای پوشش گیاهی متوسط می‌باشند. کلاس ٤ (با مقادیر NDVI بین ۰/۳۲ – ۰/۲۰) شامل اراضی زراعی آبی و نیز مراتع با پوشش گیاهی متراکم می‌باشد که حدود ۱۵/۵ درصد مساحت حوضه را شامل می‌شود. در نهایت، کلاس ۵ (با مقادیر NDVI بیشتر از ۰/۳۲) به طور عمده نشان‌دهنده باغات و زمین‌های زراعی با پوشش گیاهی متراکم و همچنین در قسمت‌های بالادست حوضه معرف مراتع متراکم می‌باشد که به دلیل تراکم بالای پوشش گیاهی و سبزینگی از بیشترین میزان NDVI برخوردارند.



شکل ۱۲- توزیع همگرایی جریان در حوضه فیروزآباد

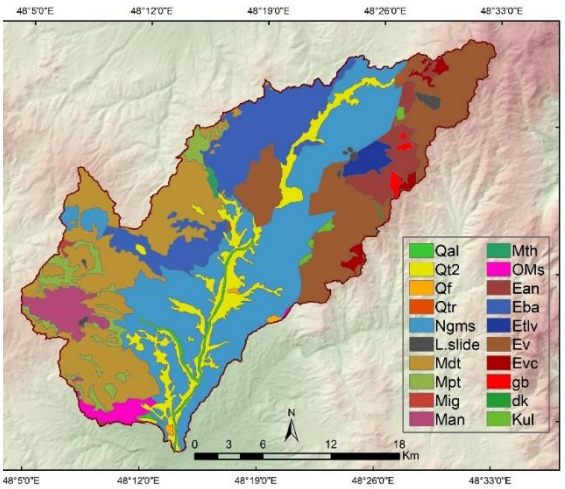


شکل ۱۳- توزیع شاخص NDVI در حوضه فیروزآباد

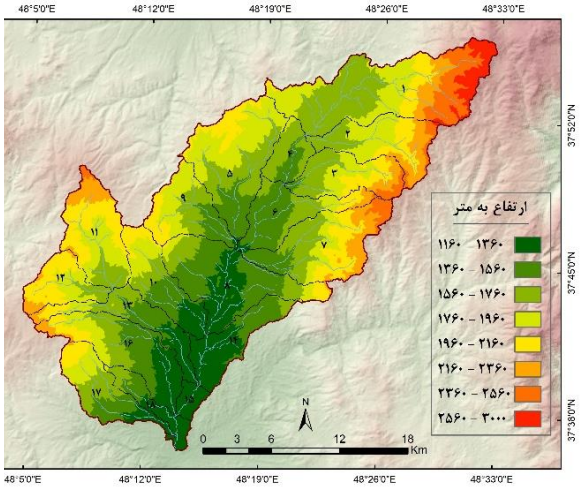
[1] - Weier & Herring

سازندهای زمین‌شناسی: بی‌شک سازندهای زمین‌شناسی یکی از مهم‌ترین فاکتورهای موثر در فرسایش خاک به‌شمار می‌آید. بدین ترتیب، در پژوهش حاضر لایه سازندهای زمین‌شناسی در پهنه‌بندی فرسایش خاک مورد استفاده قرار گرفت (شکل ١٤). در سطح حوضه آبریز فیروزآباد، سازندهایی از دوره‌های کواترنری، پلیوسن، میوسن، الیگوسن، ائوسن و کرتاسه رخنمون یافته‌اند که در ادامه به اختصار مورد اشاره قرار گرفته‌اند. سازندهای دوره کواترنری: این سازندها شامل واحد Qal (آبرفت‌های عهد حاضر)، واحد Qt2 (تراس‌ها و دشت‌های آبرفتی جدید)، واحد Qf (مخروط‌های گراولی) و واحد Qtr (تراورتن) می‌باشند. سازندهای مذکور- به استثنای تراورتن‌ها که در سطح محدودی از حوضه رخنمون یافته‌اند- از فرسایش‌پذیری بالایی برخوردارند. در این رابطه سازند Qt2 حدود ٧/٨ درصد مساحت حوضه را پوشش داده و از اهمیت بیشتری برخوردار است. سازند مذکور ترکیبی از رس، ماسه و گراول است که نسبت به فرسایش آبی آسیب‌پذیرند. زمین‌لغزش‌های منطقه نیر مربوط به دوره کواترنری می‌باشند که عمدتا در داخل آندزیت‌های هوازده و توف‌ها اتفاق افتاده‌اند و باعث تشدید محلی فرسایش خاک شده‌اند. از دوره پلیوسن سازند Ngms در سطح حوضه رخنمون یافته است که شامل تناوبی از مارن ژیپس‌دار، ماسه‌سنگ و کنگلومرا می‌باشد. سازند مذکور حدود ٢٩/١ درصد حوضه را پوشش می‌دهد و عمدتا در قسمت‌های میانی حوضه رخنمون یافته است. در حالت کلی، از فرسایش‌پذیری متوسطی برخوردار می‌باشد. ماسه‌سنگ‌های موجود در این واحد نسبت به فرسایش مقاوم‌اند؛ در حالی که مارن‌ها و تاحدودی کنگلومراها نسبت به فرسایش آبی آسیب‌پذیرند. سازندهای دوره میوسن: این سازندها عمدتا شامل سنگ‌های آذرین می‌باشند و در ارتباط با فعالیت‌های آتشفشانی دوران سوم زمین- شناسی شکل‌گرفته‌اند. سازندهای مذکور مشتمل بر واحد Man (تراکی آندزیت هوازده و توف آندزیتی)، واحد Mdt (گدازه داسیتی و تراکیتی)، واحد Mig (گدازه ایگنمبریت)، واحد Mpt (توف و خاکستر آتشفشانی) و واحد Mth (لاهار همراه با قطعات تراکیتی و داسیتی) می‌باشند. تمامی واحدهای مذکور در جنوب غرب حوضه رخنمون یافته‌اند. در مجموع حدود ٢٥/٤ درصد مساحت حوضه را پوشش می‌دهند. در این میان واحد Mdt از وسعت زیادی برخوردار بوده و بالغ بر ١٨/٧ درصدمساحت حوضه را به خود اختصاص داده است. سازند مذکور از فرسایش‌پذیری اندکی برخوردار می‌باشد و به همین دلیل به صورت مورفولوژی تند و مرتفع پدیدار شده است. در حالت کلی، تراکیت‌ها، آندزیت‌ها و داسیت‌ها جزو مقاوم‌ترین سازندهای حوضه مطالعاتی می‌باشند؛ در حالی که لاهارها، خاکسترهای آتشفشانی و توف‌ها نسبت به فرسایش آبی حساسیت نسبتا بالایی دارند. از دوره الیگوسن سازند Oms در سطح حوضه فیروزآباد رخنمون یافته و شامل مارن‌های قرمز ژیپس‌دار و نمک‌دار همراه با تناوب‌هایی از مارن‌های ماسه‌ای و ماسه‌سنگ (سازند قرمز زیرین) می‌باشد. حدود ١/٤ درصد مساحت حوضه را به خود اختصاص داده و به صورت نسبتا محدود در جنوب حوضه رخنمون یافته است. سازند مذکور نسبت به فرایندهای فرسایش آبی آسیب‌پذیر است و به دلیل وجود نمک در داخل این سازند باعث افت کیفیت منابع آب و خاک می‌شود. سازندهای دوره میوسن: سازندهای دوره میوسن در سطح حوضه مطالعاتی رخنمون وسیعی یافته‌اند و شامل واحد Ean (تناوب گدازه‌های آندزیتی، آندزی بازالت همراه با توف)، واحد Eba (گدازه‌های بازالتی و تراکی بازالت)، واحد Etlv (تناوب توف‌های سبز و توف آهکی (سازند کرج))، واحد Ev (آندزیت)، واحد Evc (کنگلومرای آتشفشانی ضخیم‌لایه همراه با ماسه- سنگ توفی، توف آندزیتی و بین‌لایه‌ای‌های شیلی و شیل آهکی)، واحد gb (گابرو) و واحد dk (دایک‌های دلریتی و دیابازی) می‌باشند. بدین ترتیب سازندهای دوره ائوسن در ارتباط با فعالیت‌های آتشفشانی شدید دوره ائوسن در منطقه آذربایجان شکل گرفته‌اند. در این میان سازند Ev رخنمون وسیعی در سطح حوضه یافته و حدود ١٦ درصد مساحت حوضه را به خود اختصاص داده است. این سازند در بخش‌های وسیعی از شرق و شمال شرق حوضه توزیع شده و به دلیل مقاومت بالا به صورت ناهمواری‌های سترگی نمایان شده است. در مرتبه بعد سازند Eba جای می‌گیرد که بالغ بر ١٢ درصد مساحت حوضه را پوشش می‌دهد و در نیمه غربی حوضه رخنمون یافته است. در میان سازندهای دوره ائوسن تنها توف‌ها و تاحدودی کنگلومراها نسبت به فرسایش حساسیت دارند و سایر سازندهای مذکور در مقابل فرایندهای فرسایش از مقاومت بالایی برخوردارند. از دوره کرتاسه تنها سازند Kul (سنگ آهک ضخیم‌لایه و توده‌ای)

به صورت محدود در نیمه شرقی حوضه رخنمون یافته است. تنها حدود ۰/٤ درصد مساحت حوضه را دربرمی‌گیرد و نسبت به فرسایش آبی نسبتا مقاوم است.



شکل ١٤- سازندهای زمین‌شناسی در حوضه فیروزآباد

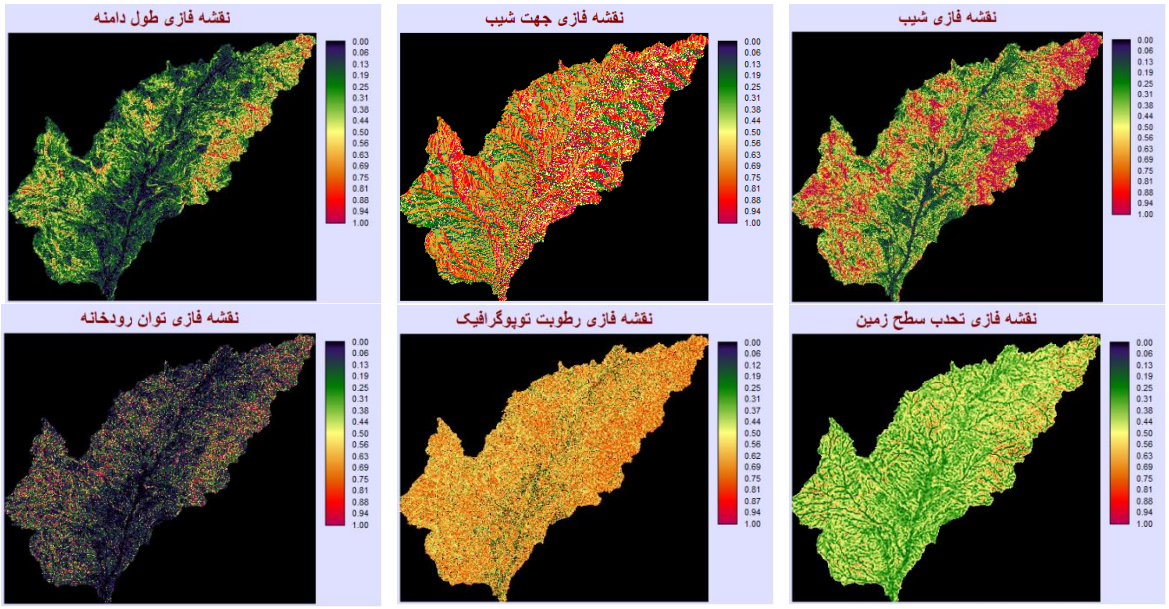


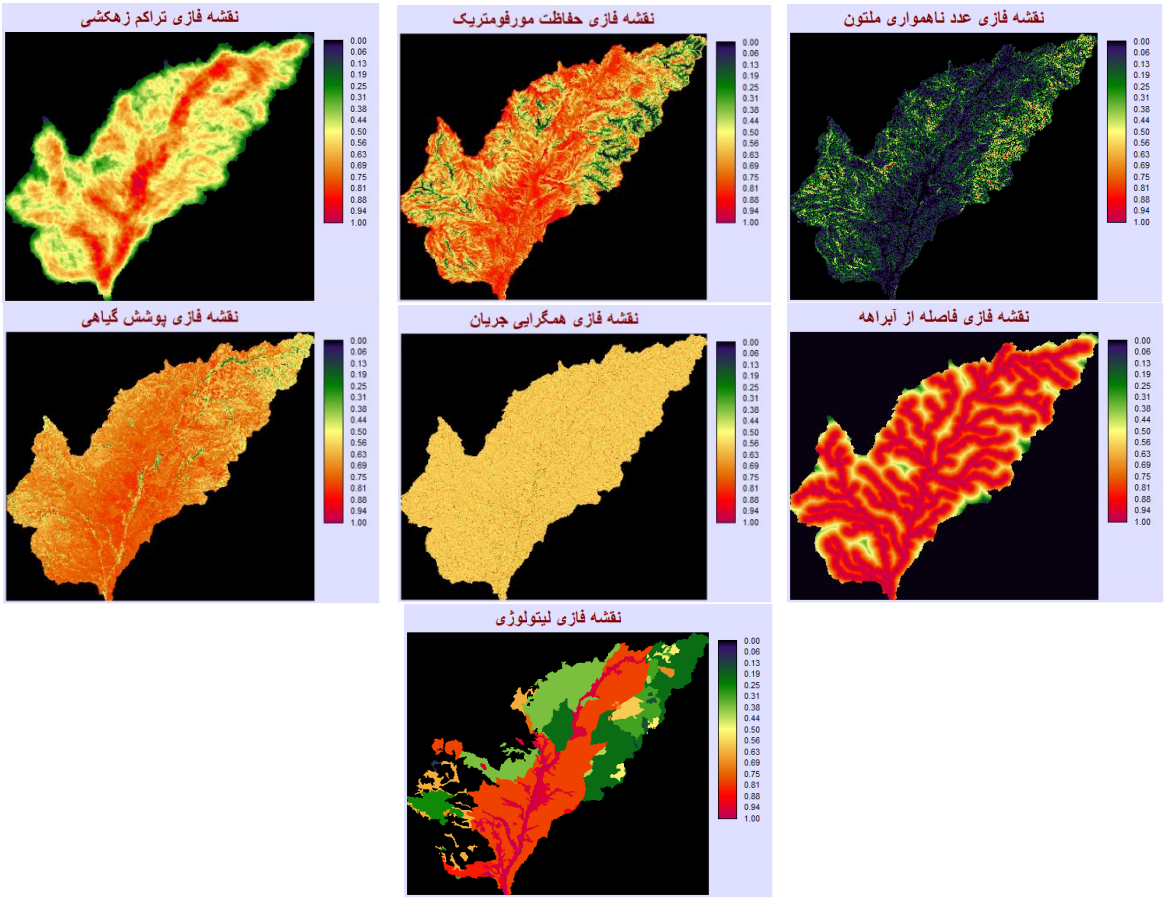
شکل ۱۵- ارتفاعات همراه با زیرحوضه‌های فیروزآباد

۳- ۲- فازی‌سازی لایه‌های موضوعی

در مراحل قبلی پژوهش توزیع مکانی فاکتورهای موثر بر فرسایش خاک حوضه آبریز فیروزآباد مورد ارزیابی قرار گرفت و لایه‌های موضوعی مربوطه ارائه شدند. در این بخش از پژوهش نسبت به فازی‌سازی لایه‌های مذکور اقدام شده است. فازی‌سازی لایه‌های موضوعی با اهداف متعددی صورت می‌گیرد. در این رابطه می‌توان به چهار هدف عمده اشاره نمود: نخست اینکه فاکتورهای موثر در فرایند فرسایش دارای واحدهای اندازه‌گیری و مقیاس همسانی نیستند. بی‌بعد نمودن مقیاس سنجش لایه‌های موضوعی یکی از مهم‌ترین گام‌ها در فرایند پهنه‌بندی فرسایش در سطح حوضه می‌باشد که در پژوهش حاضر این‌کار توسط توابع مختلف فازی صورت گرفت. هدف دوم در ارتباط با ارزش‌گذاری مجدد فاکتورهای موثر بر فرسایش است. در واقع، مقادیر پیکسل‌های لایه‌های رستری مختلف می‌بایست با توجه به اثرگذاری آنها در میزان فرسایش مجددا ارزش‌گذاری شوند. در این رابطه می‌توان به لایه رستری فاصله از شبکه آبراهه‌ای اشاره نمود که در آن ارزش پیکسل‌ها با دور شدن از بستر رودخانه افزایش می‌یابد؛ این در حالی است که در رابطه با فرایند فرسایش آبی پیکسل‌های مجاور و نزدیک بستر رودخانه می‌بایست از ارزش بالاتری برخوردار باشند. بدین ترتیب، با استفاده از توابع مختلف فازی نسبت به تغییر ارزش پیکسل‌های لایه‌های موضوعی اقدام گردید. هدف سوم در رابطه با کاهش عدم‌قطعیت‌های مرتبط با کلاسه‌بندی لایه‌های موضوعی می‌باشد که یکی از مهم‌ترین اهداف ارائه توابع فازی در چارچوب سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌باشد. بدین ترتیب در فرایند فازی‌سازی، لایه‌های موضوعی مختلف به صورت پیوسته (و نه گسسته) در نظر گرفته شده و عدم-قطعیت‌های مرتبط با فرایند طبقه‌بندی مجدد لایه‌ها تا حد زیادی کاهش پیدا می‌کند. در نهایت باید به رفع عدم‌قطعیت‌های مرتبط با فرایند تصمیم‌گیری اشاره نمود. بسیاری از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره درجه‌ای از عدم‌قطعیت را شامل می‌شوند که ناشی از ذهن‌گرایی قضاوت‌ها و تصمیمات کارشناسان و متخصصان مختلف می‌باشد. فازی‌سازی و ترکیب فازی لایه‌های موضوعی موثر بر فرسایش با استفاده از توابع مختلف ریاضیاتی صورت گرفته و درنتیجه دخالت نظرات کارشناسان را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. این ویژگی به نتایج مدل قابلیت تعمیم و تکرارپذیری می‌دهد که یکی از مهم‌ترین مزیت‌های مدل مورد استفاده به‌شمار می‌رود.

لایه‌های فازی پژوهش حاضر در شکل (۱۵) ارائه شده‌اند. در رابطه با لایه‌های شیب، طول دامنه، تحدب سطح زمین، توان رودخانه، عدد ناهمواری ملتون و تراکم زهکشی، پیکسل‌های با ارزش‌های عددی بالاتر باعث تشدید فرسایش می‌شوند. بنابراین، از توابع فازی افزایشی برای فازی‌سازی این لایه‌ها استفاده به عمل آمد. در واقع، رابطه‌ای مستقیم بین فاکتورهای مذکور با فرسایش خاک برقرار است. در لایه‌های رطوبت توپوگرافیک، حفاظت مورفومتریک، فاصله از آبراهه، پوشش گیاهی و همگرایی جریان، مقادیر پایین‌تر لایه‌ها از اهمیت بیشتری در رابطه با فرایندهای فرسایشی برخوردارند. بدین ترتیب، رابطه‌ای معکوس بین فاکتورهای مذکور و فرسایش خاک برقرار است. درنتیجه، از توابع فازی کاهشی به‌منظور فازی‌سازی لایه‌های موضوعی مذکور استفاده شد. دو لایه جهت شیب و لیتولوژی، لایه‌های کیفی موثر بر فرسایش خاک می‌باشند. بدین ترتیب، قبل از فازی‌سازی این لایه‌ها لازم است نسبت به کمی‌سازی آنها اقدام شود. در رابطه با کمی‌سازی لایه جهت شیب از کدهایی بین ۱ تا ۹ استفاده شد که در آن کد ۱ برای اراضی مسطح و کد ۹ برای جهت‌های غربی استفاده گردید. سایر کدها با توجه به تاثیر جهت‌های مختلف در فرایندهای فرسایشی تخصیص داده شدند. برای نمونه کد ۷ برای جهت‌های جنوبی و کد ۸ برای جهت‌های جنوب غربی اختصاص یافت که از تاثیرگذاری بیشتری در رابطه با فرسایش برخوردارند. لایه لیتولوژی با کدهایی بین ۱ تا ۲۰ کمی شدند. در این رابطه برای سازندهای با بیشترین میزان فرسایش‌پذیری از کدهای بالا و برای سازندهای با کمترین میزان فرسایش‌پذیری از کدهای پایین استفاده شد. در این رابطه برای سازند Qal (آبرفت‌های عهد حاضر) کد ۲۰ و برای سازند Qt2 (تراس‌ها و دشت‌های آبرفتی جدید) کد ۱۹ اختصاص داده شد. دو سازند مذکور نسبت به سایر سازندها از بیشترین میزان حساسیت نسبت به فرایندهای فرسایشی برخوردارند. برعکس برای سازند Mdt (گدازه داسیتی و تراکیتی) کد ۱ و برای سازند dk (دایک‌های دلریتی و دیابازی) کد ۲ اختصاص داده شد که جزو سازندهای مقاوم حوضه به‌شمار می‌روند. سایر سازندها با توجه به توضیحاتی که در بخش سازندهای زمین‌شناسی ارائه گردیده کدگذاری شدند. در حالت کلی، سازندهای آذرین جزو سازندهای مقاوم حوضه محسوب می‌شوند و درنتیجه کدهای پایینی را کسب نمودند. در نهایت، برای فازی‌سازی دو لایه جهت شیب و لیتولوژی با توجه به کدهای اختصاص یافته از توابع فازی افزایشی استفاده شد.



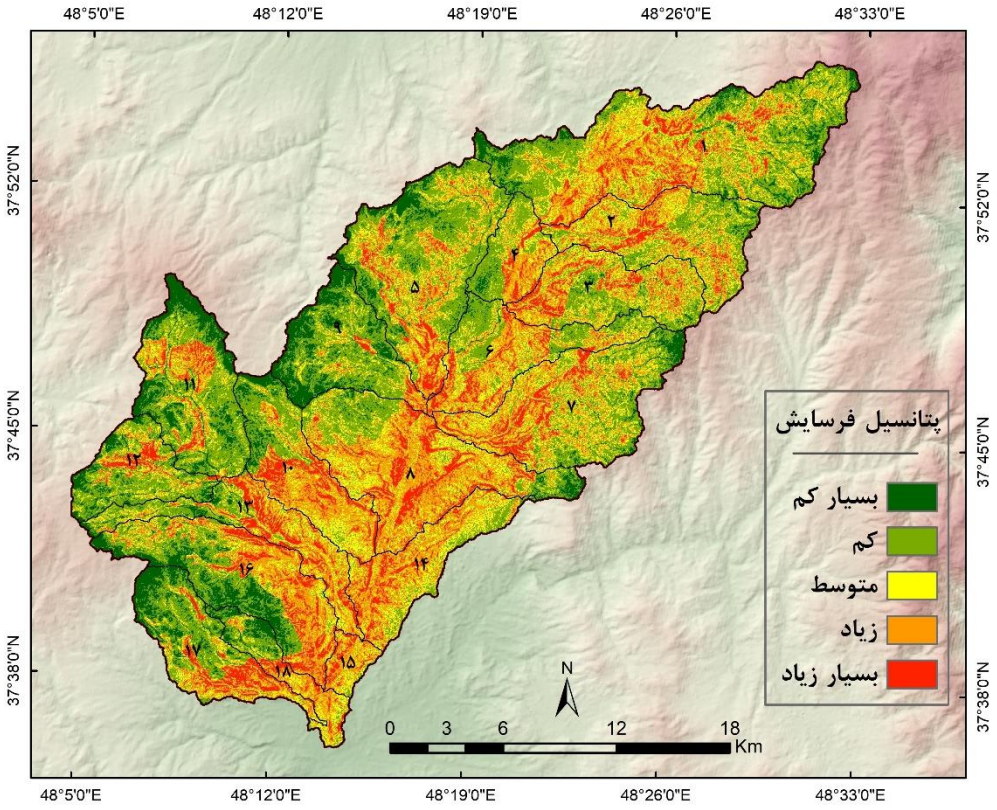


شکل ۱۶- نقشه‌های فازی لایه‌های موضوعی مورد استفاده در پهنه‌بندی فرسایش حوضه فیروزآباد

۳- ۳- ترکیب فازی لایه‌ها و تهیه نقشه فرسایش

در پژوهش حاضر برای ترکیب و روی‌هم‌گذاری ۱۳ لایه فازی‌شده موثر بر فرسایش حوضه آبریز فیروزآباد از اپراتور گامای فازی استفاده شد که ترکیبی از جمع جبری فازی و ضرب جبری فازی می‌باشد. در لایه نهایی حاصل از ترکیب فازی لایه‌ها، ارزش اکثر پیکسل‌ها مقادیر بالایی را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده پتانسیل بالای فرسایش حوضه آبریز فیروزآباد می‌باشد. در واقع، ترکیب مجموعه‌ای از عوامل باعث شده است که حوضه فیروزآباد نسبت به فرسایش خاک از حساسیت بالایی برخوردار باشد. از جمله این عوامل می‌توان به وسعت زیاد سازندهای فرسایش‌پذیر در سطح حوضه، شیب زیاد اراضی و پوشش گیاهی ضعیف اشاره نمود که کنترل‌کننده‌های اصلی فرسایش در سطح کل حوضه آبریز فیروزآباد به‌شمار می‌روند. در این رابطه، تاثیر عامل لیتولوژی در پهنه‌بندی فرسایشی حوضه زیاد بوده است. با کاهش سخت‌گیری طبقه‌بندی، در شکل (۱۷) نقشه نهایی پتانسیل فرسایش حوضه آبریز فیروزآباد در پنج کلاس فرسایشی از حساسیت بسیار پایین تا حساسیت بسیار بالا ارائه شده است. با توجه به نقشه مذکور حدود ۱۰/۸ درصد حوضه آبریز مطالعاتی در کلاس فرسایشی بسیار کم قرار گرفته است. کلاس مذکور عمدتا در غرب حوضه، مخصوصا در زیرحوضه‌های شماره ۹، ۱۱، ۱۶ و ۱۷، توزیع شده است. با توجه به تاثیر نسبتا زیاد لایه لیتولوژی در روی‌هم‌گذاری فازی لایه‌ها می‌توان وسعت زیاد سازندهای آذرین مقاوم، مخصوصا داسیت و تراکیت، را جزو مهم‌ترین عوامل موثر در کاهش پتانسیل فرسایشی در این قسمت از حوضه به‌شمار آورد. تاثیر سایر عوامل مانند پوشش گیاهی متراکم تا نسبتا متراکم، حفاظت مورفومتریکی مطلوب، تراکم زهکشی پایین، غلبه شیب‌های

شمالی و شمال غربی نیز در کاهش پتانسیل فرسایش این قسمت از حوضه موثر واقع شده است. همچنین بالغ بر ۳۳/۸ درصد از مساحت حوضه مطالعاتی در کلاس با پتانسیل فرسایش کم قرار گرفته است. بخش عمده‌ای از زیرحوضه‌های شماره ۹، ۱۱ و ۱۲، غرب زیرحوضه‌های ۱۰، ۱۳، ۱٦، ۱۷ و ۱۸ در این کلاس قرار گرفته‌اند. فرسایش‌پذیری اندک پهنه‌های مذکور نیز در ارتباط مستقیم با وجود سازندهای داسیتی- تراکیتی مقاوم و پوشش گیاهی نسبتا متراکم می‌باشد. در پهنه‌های مذکور تاثیر سایر فاکتورها تا حدودی به صورت محلی می‌باشد. ضمن اینکه فاکتورهایی مانند شیب سطح زمین در کل حوضه از اثرگذاری قابل توجهی برخوردارند. در بخش‌هایی از شرق حوضه مطالعاتی نیز کلاس با پتانسیل فرسایش کم دیده می‌شوند که در ارتباط با وجود سازندهای آذرین مقاوم، پوشش گیاهی متراکم، حفاظت مورفومتریکی بالا، تراکم زهکشی پایین، مقادیر پایین همگرایی جریان و سایر فاکتورهای محلی می‌باشد. این فاکتورها اثرگذاری فاکتورهایی مانند عدد ناهمواری ملتون و طول دامنه را خنثی کرده‌اند. حدود ۲۰/۱ درصد مساحت حوضه مطالعاتی در کلاس با پتانسیل فرسایش متوسط قرار گرفته است. این کلاس در سطح حوضه مطالعاتی به صورت لکه‌های کوچک و بزرگ پراکنده شده است. وسعت کلاس مذکور در زیرحوضه‌های شماره ۱، ۲، ۳، ۷ و ۸ بیشتر است. بخش‌های قابل توجهی از کلاس مذکور منطبق بر تراس‌ها و دشت‌های آبرفتی جدید (Qt2) و تناوبی از مارن ژیپس‌دار، ماسه‌سنگ و کنگلومرا (Ngms) می‌باشد که در بخش‌های زیادی به صورت سطوح شیب‌دار رخنمون یافته‌اند و از تراکم پوشش گیاهی متوسط تا ضعیفی برخوردارند. سایر فاکتورها مانند فاصله از آبراهه‌ها و تراکم زهکشی به‌عنوان عوامل تشدیدکننده یا کاهش‌دهنده فرسایش در پهنه‌های مذکور عمل می‌کنند. حدود ۲٤/٦ درصد مساحت حوضه در کلاس با پتانسیل فرسایش زیاد و ۱۰/٦ درصد نیز در کلاس با پتانسیل فرسایش بسیار زیاد قرار گرفته که ارقام قابل توجهی به‌شمار می‌روند. اقدامات حفاظتی کنترل فرسایش- سازه‌ای و غیرسازه‌ای- در این دو کلاس پیشنهاد می‌شود. دو کلاس مذکور اکثرا در مجاورت هم توزیع شده‌اند. بخش عمده‌ای از زیرحوضه‌های ۸، ۱٤ و ۱۵ در این دو کلاس قرار گرفته‌اند. در سایر زیرحوضه‌ها- به استثنای چند زیرحوضه غربی- نیز کلاس‌های مذکور کم و بیش وجود دارند. با توجه به وسعت زیاد کلاس‌های با پتانسیل فرسایش زیاد و خیلی زیاد می‌توان نتیجه گرفت که حوضه فیروزآباد یکی از حوضه‌های فرسایش‌پذیر استان اردبیل به‌شمار می‌رود. رخنمون قابل توجه سازندهای فرسایش‌پذیر، مخصوصا سازندهای آبرفتی کواترنری، مارن‌های ژیپس‌دار، لاهار و خاکسترهای آتشفشانی همراه با پوشش گیاهی ضعیف، شیب زیاد، تراکم زهکشی بالا، وجود آبراهه‌های متعدد و طول زیاد دامنه‌ها از جمله مهم‌ترین عوامل موثر در فرسایش‌پذیری بالای حوضه مطالعاتی می‌باشد. بدیهی است در پهنه‌هایی که مجموعه‌ای از فاکتورهای موثر بر فرسایش وجود داشته باشند فرسایش از شدت عمل زیادی برخوردار خواهد بود. به منظور مقابله با فرسایش در این پهنه‌ها می‌بایست نسبت به تعدیل برخی از مهم‌ترین فاکتورها اقدام شود. شاید موثرترین روش در منطقه مطالعاتی اقدامات آبخیزداری باشد.



شکل ۱۷- پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش خاک در سطح حوضه آبریز فیروزآباد

٤- نتیجه‌گیری

فرسایش خاک جزو مهم‌ترین فرایندهای ژئومورفولوژیکی سطح زمین به‌شمار می‌رود که به دلیل دخالت‌های عامل انسانی روند تشدیدی به خود گرفته است. عوامل متعددی وجود دارند که در فرایند فرسایش دخالت دارند. در این میان، عوامل ژئومورفیک نقش بارزی در تغییرپذیری مکانی این پدیده ایفا می‌کنند. بدین ترتیب، زمانی که متغیرهای ژئومورفیک در ترکیب با سایر متغیرهای مهم نظیر پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گیرند می‌تواند درک جامعی از پتانسیل مکانی فرسایش خاک ارائه دهد. مخصوصا که اکثر حوضه‌های آبریز ایران فاقد اطلاعات اساسی در رابطه با میزان فرسایش خاک می‌باشند. با توجه به موارد مذکور در پژوهش حاضر پتانسیل مکانی فرسایش خاک در سطح حوضه آبریز فیروزآبادچای استان اردبیل با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک مورد ارزیابی قرار گرفت. از شاخص پوشش گیاهی NDVI نیز برای دخالت فاکتور مهم پوشش سطح زمین استفاده شد. به‌منظور ترکیب ۱۳ لایه موضوعی موثر در فرسایس خاک از منطق فازی در بستر سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) بهره گرفته شد. نتایج بیانگر شدت عمل فرایندهای فرسایشی در سطح حوضه آبریز فیروزآباد می‌باشد. در این رابطه، رخنمون وسیع آبرفت‌های کواترنری، مارن‌های ژیپس‌دار، لاهار و خاکسترهای آتشفشانی در سطح حوضه، پوشش گیاهی ضعیف، غلبه شیب‌های تند، تراکم زهکشی بالا و وجود آبراهه‌های متعدد، مقادیر بالای عدد ناهمواری ملتون و دامنه‌های طولانی جزو مهم‌ترین فاکتورهای به‌شمار می‌روند که باعث افزایش پتانسیل فرسایش خاک در سطح حوضه مطالعاتی شده‌اند. انطباق لایه نهایی پتانسیل فرسایش خاک با فاکتورهای موثر بر فرسایش نشانگر اهمیت قابل توجه فاکتور زمین‌شناسی و سپس پوشش گیاهی در فرسایش خاک حوضه است؛ به‌گونه‌ای که می‌توان دو فاکتور مذکور را جزو کنترل‌کننده‌های اصلی فرسایش

در محدوده کلی حوضه به‌شمار آورد و تاثیر سایر فاکتورها را تا حدودی به صورت محلی درنظر گرفت. بدین ترتیب، در برنامه‌های مقابله با فرسایش خاک حوضه می‌توان نسبت به کنترل فاکتورهای مذکور و همچنین شیب سطح زمین اقدام کرد که منجر به افزایش کارایی برنامه‌های حفاظتی خواهد شد.

منابع

- **حسینی، سیده مطهره؛ مساعدی، ابوالفضل؛ گلکاریان، علی؛ ناصری، کمال‌الدین. ۱۳۹٤. مدل‌سازی برخی از عوامل موثر بر فرسایش شیاری با استفاده از منطق فازی. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دوره ۲۲، شماره ٤، صص ۱۲۰-۱۰۳.**
- رحمتی، فاطمه؛ رضائی‌مقدم، محمدحسین؛ نیکجو، محمدرضا. ۱٤۰۰. بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر فرسایش و سیل‌خیزی حوضه سقز قبل و بعد از احداث سد شهید کاظمی با استفاده از مدل ArcSWAT. جغرافیا و روابط انسانی، دوره ٤، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۳، صص ۱٤٤-۱۲۷.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ رجبی، معصومه؛ دانشفراز، رسول؛ خیری زاده، منصور. ۱۳۹۵. پهنه‌بندی و بررسی اثرات مورفولوژیکی سیلاب‌های رودخانه زرینه‌رود (از ساری‌قمیش تا سد نوروزلو). جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره هفدهم، صص ۲۰-۱.
- عرفانیان، مهدی؛ قهرمانی ساعتلو، پریسا؛ سعادت، حسین. ۱۳۹۳. ارزیابی خطر فرسایش خاک با استفاده از یک مدل فازی در آبخیز قرناوه گلستان. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد بیست و یکم، شماره ششم، صص ۱۳۵-۱٥٤.
- مددی، عقیل؛ بلواسی، ایمانعلی. ۱۳۹۷. ارزیابی خطر فرسایش خاک با استفاده از مدل منطق فازی در حوضه ی آبریز سیمره چنار. نشریه پژوهش های فرسایش محیطی » (پیاپی ۳۰)، تابستان ۱۳۹۷ شماره۲، صص ۸۳-٦۲.
- Bagarello V. and Ferro V. 2010. Analysis of soil loss data from plots of differing length for the Sparacia experimental area, Sicily, Italy. Biosystems Engineering, [online]. 105(3), 411-422.
- Bakimchandra, Oinam. 2011. Integrated Fuzzy-GIS approach for assessing regional soil erosion risks. Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart.
- Bizzi, S and Lerner, D. N. 2015. The use of stream power as an indicator of channel sensitivity to erosion and deposition processes. River Research and Applications, Vol. 31, pp. 16-27.
- Cornelis, W.M. 2006. Hydroclimatology of wind erosion in arid and semiari environments. Chapter 9. PDryland Ecohydrology, D´Odorico and A. Porporato (eds.), 141-159. Springer. Printed in the Netherlands.
- Dattawadkar, D. J and Vani, S. B. 2021. A Review on Fuzzy Based Flood Warning Expert System using IoT and LoRa Technology. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 08 Issue: 03, pp. 1601-1603.
- Dung, Nguyen Ba., Minh, Dang Tuyet., Ahmad, Adeel., Long, Nguyen Quoc. 2020. The Role Of Relative Slope Length In Flood Hazard Mapping Using Ahp And Gis (Case Study: Lam River Basin, Vietnam). Geography, Environment, Sustainability, Vol.13, No 2, p. 118-126.
- Esri. 2020. ArcGIS Desktop Help.

- Fauzi, Manyuk., Suprayogi, Imam., Sutikno, Sigit., Sandhyavitri, Ari., Riyawan, Eko. 2017. Development of erosion risk map using fuzzy logic approach. MATEC Web of Conferences , 04021 (2017).
- Gajbhiye, Sarita., Mishra, S. K., Pandey, Ashish. 2014. Prioritizing erosion-prone area through morphometric analysis: an RS and GIS perspective. Appl Water Sci (2014) 4:51–61.
- García, Marcelo H. 2008. Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice. Published by American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Gilley J.E, Finkner S.C., Varvel G.E. 1987. Slope Length and Surface Residue Influences on Runoff and Erosion. Biological Systems Engineering: Papers and Publications, 148-152.
- Godone, Danilo; Stanchi, Silvia. 2011. Soil erosion studies. Published by InTech
- Hellin, Jon. 2006. Better land husbandry, from soil conservation to holistic land management. Science Publishers. 315p.
- Iwahashi, J., and R. J. Pike. 2007. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. Geomorphology, Vol. 86, pp. 409–440.
- Kumar, Suresh; Gupta, Surya. 2016. Geospatial approach in mapping soil erodibility using CartoDEM – A case study in hilly watershed of Lower Himalayan Range. J. Earth Syst. Sci., DOI 10.1007/s12040-016-0738-2, 125, No. 7, pp. 1463–1472.
- Lal, R., Ahmadi, M. and Bajracharya. R. M. 2000. Erosional impacts on soil properties and corn yield on alfisols in central Ohio. Land Degradation and Development. 11: 575-585.
- Lee S. 2007. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. Environ Geol 52, pp: 615–623.
- Li, Q. 2013. Fuzzy approach to analysis of flood risk based on variable fuzzy sets and improved information diffusion methods. Natural Hazards and Earth System Sciences., 13, 239–249.
- Liu, Jian Guo., Mason, Philippa J. 2009. Essential image processing and GIS for remote sensing. John Wiley & Sons. 443p.
- Luca, Federica; Conforti, Massimo; Robustelli, Gaetano. 2011. Comparison of GIS-based gullying susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. Geomorphology, 134: 297-308.
- Morgan, R. P. C. 2005. Soil erosion and conservation, third edition. Blackwell Publishing.
- Nandalal, H.K; Ratnayake, U.R. 2011. Flood risk analysis using fuzzymodels. Journal of Flood Risk Management, 4: 128–139.
- Nisar Ahmad, T.R., Gopal Rao, K., Murthy, J.S.R. 2000. Fuzzy class membership approach to soil erosion modelling. Agricultural Systems 63, 97–110.
- Norman, D. and Douglas, M. 1994. Farming Systems Development and Soil Conservation. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Tesema, Tesfu Abebe. 2022. Erosion hotspot mapping using integrated morphometric parameters and Land use/land cover of Jigjiga Watershed, Ethiopia. Heliyon 8.
- Vrieling, A., de Jong, S.M., Sterk, G., and Rodrigues, S.C. 2008. Timing of erosion and satellite data: a multi-resolution approach to soil erosion risk mapping. Inter. J. Appl. Earth Observ. Geoinf, 10: 267–281.
- Vrieling, A., Sterk, G., and Vigiak, O. 2006. Spatial evaluation of soil erosion risk in the West Usambara Mountains, Tanzania. Land Degradation and Development, 17: 301-319.
- Wang, Zhao-Yin; Lee, Joseph H. W; Melching, Charles S. 2015. River dynamics and integrated river management. Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Wei, W.; Chen, L.; Fu, B.; Huang, Z.; Wu, D. & Gui, L. (2007). The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. Journal of hydrology, 335, 247-258.
- Wu, Q., and Wang, M. 2007. A framework for risk assessment on soil erosion by water using an integrated and systematic approach. J. Hydrol, 337: 11-21.
- Yokoyama, Ryuzo & Pike, Richard J. 2002. Visualizing Topography by Openness: A New Application of Image Processing to Digital Elevation Models, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing(68), No. 3, March 2002, pp. 257-266.
- Yongmei D., Xihuan S., Xianghong G., Shijun N. & Juanjuan M. 2011. Analysis of Slope Length on Water Soil Erosion. International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet. [online] 2943-2946, DOI: 10.1109/CECNET.2011.5769391.
- Zhang, X., Yang, X., Li, Y., He, X., Lv, G., Yang, J. 2017. Influence of edaphic factors on plant distribution and diversity in the arid area of Xinjiang, Northwest China. Arid Land Research and Management, Vol. 32, Issue 1, 38-56.