

ارزیابی مخاطرات ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز زنونچای

موسی عابدینی^۱

بیوک فتحعلی زاد^۲

معصومه رجبی^۳

چکیده

در پژوهش حاضر مخاطرات ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز زنونچای- واقع در شمال شهرستان مرند استان آذربایجان شرقی- مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این پژوهش از طریق تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی نئوتکتونیک، سیلاب و زمین‌لغزش صورت گرفت. پهنه‌بندی فعالیت‌های تکتونیک نسبی (Iat) از طریق میانگین‌گیری و ترکیب شاخص‌های ژئومورفیک گرادیان طولی آبراهه، انتگرال هیپسومتریک، شکل حوضه زهکشی، سینوزیته جبهه کوهستان، نسبت پهنای کف دره به عمق دره و فاکتور عدم تقارن حاصل می‌شود. نقشه‌های پهنه‌بندی مخاطرات سیلاب و زمین‌لغزش نیز از طریق ترکیب لایه‌های موضوعی با بهره‌گیری از مدل فرایند تحلیل شبکه (ANP) در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه شدند. داده‌های بارش، تصاویر مدل رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای Sentinel مهم‌ترین داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر می‌باشند. نتایج حاصل از شاخص‌های ژئومورفیک بیانگر این است که بخش قابل توجهی از آنومالی‌های این شاخص‌ها از اختلافات سنگ‌شناسی حوضه نشأت می‌گیرند. پهنه‌بندی تکتونیک فعال منطقه نیز حاکی از ضعف نسبی فرایندهای نئوتکتونیک و جنبش گسل‌های منطقه و غلبه فرایندهای فرسایشی می‌باشد. در رابطه با خطر وقوع سیلاب نتایج مدل ANP نشان داد که متغیرهای شیب، فاصله از رودخانه و تحدب سطح زمین اهمیت بالاتری در پخش سیلاب برعهده دارند. از نظر خطر وقوع سیلاب، در حدود ۴ درصد از سطح حوضه زنونچای در کلاس خطر بسیار زیاد و ۷/۴ درصد در کلاس خطر زیاد واقع شده است. پهنه‌های خطرناک منطبق بر بستر دره‌های دو آبراهه اصلی حوضه می‌باشند و در نتیجه، بخش‌هایی از سکونتگاه‌های موجود در این دره‌ها در معرض سیلاب‌های مخرب قرار دارند. در نهایت، براساس نتایج مدل ANP سه متغیر شیب، لیتولوژی و بارش اهمیت بالاتری در احتمال وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه دارند. در حدود ۱۶ درصد حوضه زنونچای در کلاس خطر زیاد و ۷ درصد آن در کلاس خطر بسیار زیاد زمین‌لغزش واقع شده‌اند. وقوع زمین‌لغزش در قسمت‌های میانی حوضه به دلیل مجموعه‌ای از شرایط، مانند حضور شیب و سازندهای زمین‌شناسی مستعد، از احتمال بالاتری برخوردار است.

واژگان کلیدی: مخاطرات ژئومورفولوژیکی، سیلاب، زمین‌لغزش، نئوتکتونیک، GIS، حوضه زنونچای.

مقدمه

هنگامی که یک فرایند طبیعی تهدیدی را متوجه جان یا مال انسان کند آن را یک مخاطره طبیعی می‌نامند (هیدمن و هیدمن^۴، ۲۰۰۹: ۳). بنابراین، مخاطرات زمانی ایجاد می‌شوند که فرایندهای در حال توسعه چشم‌انداز در تضاد با فعالیت‌های انسانی باشند که اغلب با نتایج فاجعه‌بار همراه هستند. بدین ترتیب، حوادث ژئومورفیک می‌توانند باعث تلفات جانی و مالی شوند (الکانتارا-ایالا و گودی^۵،

^۱ استاد گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران (نویسنده مسئول)

Email: abedini@uma.ac.ir- Tel: 09143555226

^۲ دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۳ استاد گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۴ - Hyndman and Hyndman

^۵ - Alcántara-Ayala and Goudie

۲۰۱۰: ۱). در این رابطه، تخمین زده می‌شود که در طی دو دهه گذشته، بلایای طبیعی مسئول مرگ حدود سه میلیون نفر و آسیب دیدن ۸۰۰ میلیون نفر دیگر گردیده‌اند. براساس تخمین دفتر هماهنگ کننده امدادسانی سازمان ملل، بلایای طبیعی سالانه بالغ بر ۵۰-۳۰ میلیارد دلار زیان اقتصادی را در سراسر دنیا به بار می‌آورند (ساندرز و کلارک^۱، ۲۰۱۰: ۵). آمارهای مربوط به بلایا حاکی از این است که اثرات بلایا در مقیاس جهانی به شدت در حال افزایش می‌باشد. بسیاری از این بلایا از رخدادهای حدى ژئومورفولوژیکی نشأت می‌گیرند (الکانتارا- ایالا و گودی، ۲۰۱۰: ۲۲۱). در واقع، بلایای طبیعی یک نگرانی عمده در مقیاس جهانی بوده و بسیاری از آنها اساساً ژئومورفولوژیکی هستند. در این رابطه، مخصوصاً کشورهای در حال توسعه عمیقاً تحت تأثیر این بلایا قرار دارند (لاتروبس^۲، ۲۰۱۰: ۱). به همین دلیل، بیست و یکمین دستور کار سازمان ملل پیشنهاد می‌دهد که تمامی کشورها می‌بایست یک فهرست ملی مناسبی از منابع اراضی خود را تهیه نموده، یک نوع سیستم اطلاعات اراضی ایجاد کرده و منابع زمین را براساس مناسب‌ترین استفاده، طبقه‌بندی نموده و نواحی شکننده از لحاظ محیط زیست یا نواحی مستعد بلایا را به منظور اقدامات حفاظتی خاص شناسایی کنند (ساندرز و کلارک، ۲۰۱۰: ۵).

مخاطرات ژئومورفولوژیکی در زمره‌ی فرآیندهای محیطی به شمار می‌روند که در سراسر جهان باعث اختلال جدی در فعالیت‌های انسانی می‌شوند. در این رابطه، پانیزا^۳ (۱۹۹۶) به مفهوم «لندفرم ناپایدار»^۴ اشاره کرد که به عنوان لندفرمی توصیف می‌شود که با محیط طبیعی در تعادل نیست و بنابراین تمایل دارد با تغییر خود به تعادل دست یابد. چنین تغییراتی ممکن است ایجاد مخاطره کند که می‌تواند افراد و دارایی‌ها را تهدید نماید (ویئیرا^۵ و همکاران، ۲۰۲۰: ۷۳). از آنجا که بلایای طبیعی به راحتی قابل پیش‌بینی نیستند، دولت‌ها و افراد می‌بایست میزان ریسک را ارزیابی نموده و برای کاهش اثرات آن از آمادگی لازم برخوردار باشند. کاهش اثر^۶ به آمادگی در برابر بلایا و کاهش خسارات آن اطلاق می‌گردد. کاهش اثر می‌تواند شامل پروژه‌های مهندسی (مانند احداث خاکریزها) و همچنین سیاست-گذاری‌های دولت و آموزش عمومی باشد. یکی از راه‌های کاهش خسارات ناشی از بلایای طبیعی شناسایی مناطق مستعد بروز بلایا و ممانعت از توسعه در آن مناطق با استفاده از برنامه‌ریزی کاربری اراضی است. در حالت ایده‌آل، می‌بایست از توسعه در مجاورت گسل‌های فعال اصلی از طریق اختصاص آن اراضی برای پارک‌ها و عرصه‌های طبیعی اجتناب کرد. همچنین توسعه مسکونی و صنعتی باید بر روی دشت‌های سیلابی به منظور به حداقل رساندن سیلاب‌ها، و در امتداد سواحل به منظور به حداقل رساندن هوریکان‌ها و کاهش فرسایش ساحلی محدود شوند. محدودیت ساخت و ساز در نزدیکی کوه‌های آتشفشانی فعال و دره‌های رودخانه‌ای زهکشی‌کننده آنها می‌تواند مخاطرات مرتبط با فوران‌ها را به حداقل برساند (هیدمن و هیدمن، ۲۰۰۹: ۷). در این رابطه، ژئومورفولوژیست‌ها در تحقیقات مخاطره نقش‌های زیادی را برعهده دارند. از مهم‌ترین آنها می‌توان به تهیه نقشه نواحی مخاطره‌آمیز (گریفیتس^۷، ۲۰۰۱)؛ مشخص نمودن تاریخ وقوع حوادث خطرناک گذشته؛ تعیین فراوانی و بزرگی آنها؛ پیش‌بینی وقوع و تعیین محل رخدادهای آینده؛ پایش تغییرات ژئومورفولوژیکی؛ و مشاوره در مورد استراتژی‌های مناسب کاهش اثر با استفاده از شناخت دینامیک فرایندهای ژئومورفولوژیکی اشاره نمود. در سال‌های اخیر قابلیت‌های ژئومورفولوژیست‌ها برای ایفای این نقش‌ها افزایش یافته و کاربست ژئومورفولوژی برای حل مسائل محیطی توسعه یافته است (الکانتارا- ایالا و گودی، ۲۰۱۰: ۱-۲). ارزیابی تلفات و خسارات مورد انتظار ناشی از رخدادهای خطرناک مستلزم تحلیل فضایی می‌باشد زیرا تمامی مولفه‌های ارزیابی ریسک در فضا و زمان متغیرند. بنابراین ارزیابی خطر، آسیب‌پذیری و ریسک تنها زمانی می‌تواند به صورت موثر و کارآمد صورت پذیرد که ابزارهایی مورد استفاده قرار گیرند که با اطلاعات فضایی از قبیل سیستم-های اطلاعات جغرافیایی سر و کار دارند (الکانتارا- ایالا و گودی، ۲۰۱۰: ۲۲۱). در پژوهش حاضر مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی

1 - Sanders and Clark

2 - Latrubesse

3 - Panizza

4 - unstable landform

5 - Vieira

6 - Mitigation

7 - Griffiths



حوضه آبریز زنونزچای- واقع در شهرستان مرند استان آذربایجان شرقی- مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این مخاطرات شامل سیلاب، زمین‌لغزش و نئوتکتونیک می‌باشند. مطالعات در زمینه مخاطرات ژئومورفولوژیکی با تاکید بر یک مخاطره خاص و یا به صورت ترکیبی (چندخطره) صورت گرفته است. در این رابطه، یوسف و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از انواع لایه‌های موضوعی در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مخاطرات ژئومورفولوژیکی (با تاکید بر سیلاب و ناپایداری‌های دامنه‌ای) در بخشی از امتداد ساحل دریای سرخ را مورد بررسی قرار دادند. پنگ^۱ (۲۰۱۲) با استفاده از روش ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره^۲ (MCDM) و استفاده از ۱۱ شاخص به ارزیابی آسیب‌پذیری ۳۱ منطقه در کشور چین پرداخت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که به کارگیری MCDM در ارزیابی آسیب‌پذیری به دلیل یکپارچه‌سازی معیارهای متناقض می‌تواند ارزیابی جامعی از آسیب‌پذیری در منطقه به دست دهد. گارسیا- سوریانو^۳ و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی مخاطرات ژئومورفولوژیکی در نواحی متراکم شهری (مکزیکوسیتی) پرداختند. آنها با کاربست نقشه‌های ژئومورفولوژیکی و لندفرم‌های منطقه اقدام به تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی مخاطرات ژئومورفولوژیکی سیلاب، فرونشست، شکستگی زمین و سقوط سنگ‌ها نمودند. کیانی و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی و اولویت‌سنجی مخاطرات محیط طبیعی شهر زابل پرداختند. در رابطه با ارزیابی‌های نئوتکتونیک از طریق شاخص‌های کمی ژئومورفیک، تحقیقات صورت گرفته توسط ویلمین و نیوپفر^۴ (۱۹۹۴)، بول و مک فادن^۵ (۱۹۷۷)، بول (۲۰۰۷) و بول (۲۰۰۹) جزو مهم‌ترین و بنیادی‌ترین تحقیقات صورت گرفته می‌باشند. همچنین ال همدونی^۶ و همکاران (۲۰۰۸)، پرز پنا^۷ (۲۰۰۹)، فیگارو و نات^۸ (۲۰۱۰)، گیاکونیا^۹ و همکاران (۲۰۱۲) و نیری و سالاری (۱۳۹۷) تحقیقات جالب توجهی را در این خصوص انجام داده‌اند. پهنه‌بندی مخاطره زمین‌لغزش در مقیاسی بسیار گسترده توسط محققان مختلف داخلی و خارجی صورت گرفته است. تحقیقات در این زمینه عمدتاً از طریق ترکیب لایه‌های موضوعی موثر بر زمین‌لغزش با کاربست مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (از قبیل گمیتزی^{۱۰} و همکاران؛ ۲۰۱۱؛ کونفورتی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۴؛ همزه^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۷؛ امیراحمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ منصوری و همکاران، ۱۳۹۵؛ روستایی و جانانه، ۱۳۹۸؛ نوجوان و همکاران، ۱۳۹۸) و یا روش‌های آماری (از قبیل ادھیکاری^{۱۳}، ۲۰۱۱؛ ایالو و یاماگیشی^{۱۴}، ۲۰۰۵؛ چوئی^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۲؛ بیلماز^{۱۶}، ۲۰۰۹؛ گیلانی‌پور و متولی، ۱۳۹۴؛ اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۷؛ رسایی و همکاران، ۱۳۹۴) در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی صورت گرفته‌اند. رویکرد مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره برای پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب نیز به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به فرناندز و لوتز^{۱۷} (۲۰۱۰)، قین^{۱۸} و همکاران (۲۰۱۱)، شارما^{۱۹} و همکاران (۲۰۱۸)، عابدینی و بهشتی جاوید (۱۳۹۵)، موسوی و همکاران (۱۳۹۵)، مددی و همکاران (۱۳۹۵) و حاتمی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۶) اشاره نمود.

1 - Peng

2 - Multiple-criteria decision-making

3 - García-Soriano

4 - Willemin & Knuepfer

5 - Bull & McFadden

6 - El Hamdouni

7 - Perez Pena

8 - Figueroa & Knott

9 - Giaconia

10 - Gemitzi

11 - Conforti

12 - Hamza

13 - Adhikari

14 - Ayalew & Yamagishi

15 - Choi

16 - Yilmaz

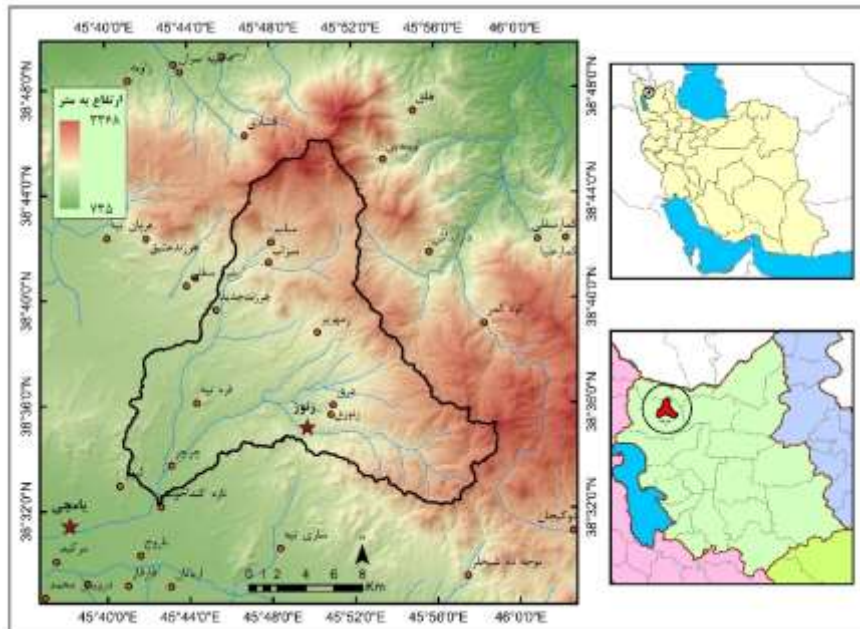
17 - Fernandez & Lutz

18 - Qin

19 - Sharma

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز زنونچای با مختصات جغرافیایی ۳۸ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۵۹ دقیقه طول شرقی در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. این حوضه با مساحتی در حدود ۳۲۳ کیلومترمربع در محدوده سیاسی-اداری شهرستان مرند قرار گرفته است (شکل ۱). حوضه مطالعاتی از شمال به ارتفاعات قزل‌داغ با ارتفاع ۲۷۱۲ متر و از شرق به ارتفاعات دربند داغی با ارتفاع ۳۱۸۲ متر و از جنوب به کوه اوداغی با ارتفاع ۲۴۲۴ متر و کوه آق‌داغ محدود گردیده است. در محدوده حوضه زنونچای مراکز مسکونی مهمی مکان‌گزینی شده‌اند که در این میان شهر زنونز از اهمیت بیشتری برخوردار است. همچنین جاده ترانزیتی تبریز-مرند-جلفا و راه آهن سراسری ایران-آذربایجان-ارمنستان از جنوب منطقه مطالعاتی عبور می‌کند. از این‌رو توجه به مخاطرات ژئومورفولوژیکی منطقه ضرورت پیدا می‌کند. زنونچای آبراهه اصلی حوضه مطالعاتی به شمار می‌رود. این رودخانه به هنگام خروج از واحد کوهستان و ورود به دشت انباشتی مرند مخروط‌افکنه نسبتاً وسیعی را ایجاد می‌کند. این رودخانه پس از عبور از شهر یامچی وارد رودخانه زیلبرچای می‌شود. خود رودخانه زیلبرچای پس از طی دشت مرند وارد قطورچای شده و از این طریق به رودخانه ارس و در نهایت دریای خزر منتهی می‌شود.



شکل (۱). موقعیت حوضه آبریز زنونچای در شمال غرب کشور

مواد و روش‌ها

هدف پژوهش حاضر ارزیابی مخاطرات ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز زنونچای از طریق تهیه نقشه‌های پهنبندی خطر سیلاب، زمین‌لغزش و نتوتکتونیک می‌باشد. جهت تهیه نقشه خطر سیلاب و زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز زنونچای، ۱۰ متغیر و پارامتر موثر بر سیل‌گیری و پخش سیلاب در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی ترکیب شدند. این متغیرها برای پهنبندی خطر وقوع سیلاب شامل ارتفاع، شیب، تحدب سطح زمین، عمق دره، واحدهای سنگ‌شناختی، تراکم زهکشی، فاصله از آبراهه‌های اصلی، ارتفاع رواناب، کاربری اراضی و پوشش گیاهی می‌باشند. برای پهنبندی خطر وقوع زمین‌لغزش نیز متغیرهای مذکور (به استثنای ارتفاع رواناب، تراکم زهکشی و عمق دره) همراه با سه متغیر فاصله از گسل، جهت شیب و بارش مورد استفاده قرار گرفتند. توزیع ارتفاعات، شیب، جهت شیب، شبکه‌های زهکشی و آبراهه‌های اصلی، تحدب سطح زمین و عمق دره از روی تصویر DEM منطقه با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر (مربوط به ماهواره ALOS-PALSAR) استخراج گردیدند. کاربری اراضی منطقه از روی تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث استخراج شد. نقشه پوشش



گیاهی حوضه مطالعاتی بر اساس شاخص NDVI و از روی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 (اوایل تابستان ۱۳۹۹) تهیه گردید. لایه لیتولوژی و گسل‌های حوضه از روی نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برگه جلفا (سازمان زمین‌شناسی کشور) تهیه گردید. در نهایت برای محاسبه ارتفاع رواناب از روش SCS (سازمان حفاظت خاک آمریکا) بهره گرفته شد. به منظور ترکیب متغیرهای موثر بر خطر سیلاب و زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز زوزچای، مدل فرایند تحلیل شبکه (ANP) در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به کار بسته شد. کارهای تحقیقی بسیار متنوعی با استفاده از مدل ANP صورت گرفته است و در نتیجه از توضیحات مدل مذکور اجتناب می‌شود.

در پژوهش حاضر با استفاده از شاخص فعالیت تکتونیکی نسبی (ال‌همدونی^۱ و همکاران، ۲۰۰۸)، پهنه‌بندی فعالیت‌های نسبی نئوتکتونیکی برای منطقه مورد مطالعه صورت گرفت. شاخص فعالیت تکتونیکی نسبی (Iat) از ترکیب سایر شاخص‌ها توسعه یافته است. این شاخص چشم‌اندازها را به چهار کلاس فعالیت تکتونیکی نسبی طبقه‌بندی می‌کند. در این روش ابتدا شاخص‌های شیب طولی آبراهه (SL)، انتگرال هیپسومتری (Hi)، شکل حوضه زهکشی (Bs)، سینوزیته جبهه کوهستان (Smf)، نسبت پهنای کف دره به عمق دره (Vf) و فاکتور عدم تقارن (Af) به سه کلاس تحت عنوان کلاس یک فعالیت بالا، کلاس دو فعالیت متوسط و کلاس سه فعالیت پایین تقسیم‌بندی می‌گردد. این شاخص‌ها براساس روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$SL = \frac{\Delta H \times L}{\Delta L}$	شیب طولی آبراهه
$HI = (E_{mean} - E_{min}) / (E_{max} - E_{min})$	انتگرال هیپسومتری
$Bs = BI/Bw$	شاخص شکل حوضه زهکشی
$Af = 100 (Ar/At)$	عدم تقارن حوضه زهکشی
$S_{mf} = L_{mf}/L_s$	شاخص سینوزیته جبهه کوهستان
$V_f = \frac{V_{fc}}{(A_{lf} - A_{sc}) + (A_{mf} - A_{sc})}$	نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره

در روابط بالا: ΔH اختلاف ارتفاع بالادست و پایین‌دست مقطع جدا شده از آبراهه، ΔL طول آبراهه در مقطع مورد نظر، L طول آبراهه اصلی از سرچشمه تا مرکز مقطع، E_{mean} میانگین ارتفاع حوضه، E_{max} حداکثر ارتفاع، E_{min} حداقل ارتفاع حوضه، BI طول حوضه از سرچشمه تا خروجی، Bw عرض حوضه در پهن‌ترین قسمت حوضه، Ar مساحت قسمت راست حوضه نسبت به رودخانه اصلی (در جهت پایین‌دست)، At مساحت کل حوضه آبریز، L_{mf} طول جبهه کوهستان در امتداد پایکوه، L_s طول جبهه کوهستان در امتداد یک خط مستقیم، V_{fw} پهنای کف دره، E_{ld} و E_{rd} ارتفاع خط تقسیم در دست چپ و راست دره (نگاه در جهت پایین‌دست) و E_{sc} ارتفاع کف دره می‌باشد.

سپس Iat از طریق متوسط کلاس‌های مختلف شاخص‌های ژئومورفیک (S/n) محاسبه شده و به چهار کلاس طبقه‌بندی می‌شود:

کلاس ۱: فعالیت تکتونیکی بسیار بالا با مقادیر $1 < S/n < 1.5$ ؛

کلاس ۲: فعالیت تکتونیکی بالا با مقادیر $1.5 < S/n < 2$ ؛

کلاس ۳: فعالیت تکتونیکی متوسط با مقادیر $2 < S/n < 2.5$ ؛

کلاس ۴: فعالیت تکتونیکی پایین با مقادیر $S/n > 2.5$.

^۱ - El Hamdouni

به منظور آماده‌سازی و استخراج شاخص‌های کمی ژئومورفیک از نرم‌افزارهای Global Mapper و ArcGIS به همراه الحاقی ArcHydro استفاده شد. بخش عمده‌ای از شاخص‌ها مستلزم محاسبات حوضه‌ای و آبراهه‌ای می‌باشند؛ بنابراین، کل منطقه مورد مطالعه به ۳۲ زیرحوضه تقسیم‌بندی شد و برای هر زیرحوضه شاخص‌های کمی ژئومورفیک محاسبه گردید.

یافته‌های تحقیق

پهنه‌بندی فعالیت تکتونیکی نسبی

به منظور ارزیابی آنومالی‌های موجود در زیرحوضه‌ها و آبراهه‌های حوضه آبریز زونچای از شاخص‌های کمی ژئومورفیک استفاده شد و بر اساس این شاخص‌ها نسبت به پهنه‌بندی فعالیت‌های تکتونیکی نسبی در سطح حوضه مطالعاتی اقدام گردید. در جدول (۱) میانگین شاخص‌های کمی ژئومورفیک به همراه کلاس‌های مربوطه در سطح زیرحوضه‌های زونچای ارائه شده است. در ادامه تغییرپذیری فضایی این شاخص‌ها در سطح حوضه مطالعاتی به اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

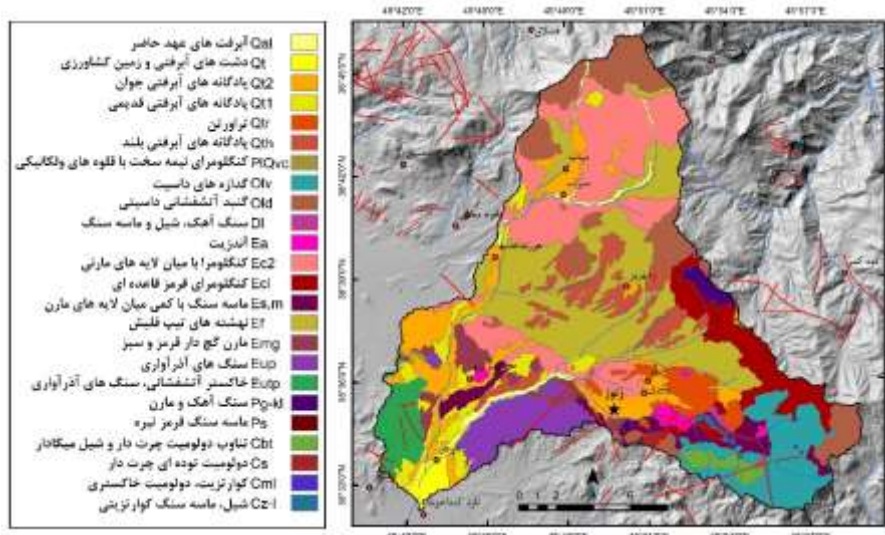
جدول (۱). مقادیر شاخص‌های ژئومورفیک و کلاس فعالیت تکتونیکی نسبی در زیرحوضه‌های زونچای

Iat	Smf		Vf		Bs		Af		Hi		SL		زیرحوضه
	کلاس	مقدار	کلاس	مقدار	کلاس	مقدار	کلاس	مقدار	کلاس	مقدار	کلاس	مقدار	
۱	۱	۱/۲۹	۱	۰/۴۳	۳	۲/۸	۱	۸۱/۱	۲	۰/۴۰	۱	۴۳۷/۸	Sub1
۲	۲	۱/۵۹	۱	۰/۴۵	۲	۳/۱	۲	۳۵/۵	۳	۰/۳۱	۱	۴۰۵/۲	Sub2
۲	۱	۱/۴۳	۱	۰/۵۰	۲	۳/۲	۲	۳۷/۱	۳	۰/۳۴	۱	۳۹۸/۸	Sub3
۳	۲	۲/۰۴	۲	۰/۵۷	۳	۲/۴	۲	۴۲/۵	۲	۰/۴۴	۳	۱۱۸/۸	Sub4
۳	۲	۲/۵۶	۲	۰/۵۹	۲	۳/۹	۳	۴۳/۱	۳	۰/۳۵	۲	۲۱۸/۱	Sub5
۳	۳	۳/۰۲	۲	۰/۷۲	۲	۳/۵	۳	۵۵/۹	۲	۰/۴۰	۲	۱۷۲/۹	Sub6
۳	۲	۲/۹۱	۲	۰/۹۹	۱	۵/۳	۳	۵۲/۹	۳	۰/۳۸	۲	۲۳۴/۶	Sub7
۳	۳	۳/۵۱	۲	۰/۶۹	۲	۳/۸	۲	۶۱/۷	۳	۰/۳۵	۲	۲۵۲/۵	Sub8
۴	۳	۳/۹۴	۲	۰/۹۷	۳	۲/۵	۳	۵۴/۷	۳	۰/۳۸	۲	۳۷۵/۰	Sub9
۳	۳	۳/۳۶	۲	۰/۷۸	۱	۷/۶	۳	۴۷/۰	۳	۰/۳۴	۲	۳۵۷/۹	Sub10
۲	۲	۲/۹۸	۱	۰/۴۷	۱	۶/۵	۳	۴۴/۵	۳	۰/۳۴	۱	۳۹۰/۹	Sub11
۲	۱	۱/۳۳	۱	۰/۴۹	۲	۳/۹	۱	۲۵/۷	۳	۰/۳۸	۲	۲۳۳/۴	Sub12
۳	۳	۳/۶۸	۲	۰/۵۵	۳	۲/۲	۳	۵۵/۵	۲	۰/۴۸	۱	۳۹۸/۵	Sub13
۱	۱	۱/۲۲	۱	۰/۳۹	۱	۴/۶	۱	۶۵/۴	۱	۰/۵۳	۱	۴۲۹/۶	Sub14
۱	۱	۱/۱۴	۱	۰/۴۴	۳	۲/۴	۱	۳۷/۰	۱	۰/۵۱	۱	۴۱۴/۸	Sub15
۳	۳	۳/۰۷	۲	۰/۶۳	۳	۲/۰	۲	۴۱/۹	۳	۰/۳۹	۱	۳۸۸/۱	Sub16
۲	۲	۱/۹۸	۱	۰/۵۰	۳	۲/۴	۱	۷۹/۳	۲	۰/۴۴	۲	۲۳۰/۱	Sub17
۲	۲	۲/۱۱	۱	۰/۴۸	۳	۲/۲	۱	۳۱/۱	۲	۰/۴۴	۲	۲۲۳/۲	Sub18
۳	۲	۲/۹۹	۲	۰/۹۵	۲	۳/۰	۳	۵۱/۱	۳	۰/۳۸	۲	۲۶۰/۳	Sub19
۳	۳	۴/۹۶	۲	۰/۹۷	۲	۴/۴	۳	۴۵/۹	۳	۰/۳۹	۲	۳۰۲/۹	Sub20
۳	۲	۳/۰۰	۳	۲/۰۹	۳	۲/۴	۱	۳۷/۷	۲	۰/۴۹	۳	۹۹/۳	Sub21
۴	۳	۴/۸۶	۳	۲/۸۴	۲	۳/۰	۳	۴۳/۶	۳	۰/۳۹	۳	۱۳۹/۷	Sub22
۴	۳	۵/۳۲	۲	۰/۸۹	۳	۲/۶	۳	۵۰/۷	۲	۰/۴۰	۳	۶۹/۳	Sub23
۲	۲	۳/۰۰	۱	۰/۵۰	۲	۳/۷	۱	۷۲/۱	۳	۰/۳۵	۲	۱۹۵/۴	Sub24
۱	۱	۱/۴۶	۱	۰/۵۰	۱	۵/۲	۱	۲۷/۸	۲	۰/۴۳	۳	۹۲/۳	Sub25
۳	۳	۳/۱۰	۲	۰/۶۱	۱	۷/۰	۳	۵۰/۶	۲	۰/۴۲	۳	۱۲۵/۵	Sub26
۳	۳	۳/۲۶	۲	۰/۷۴	۳	۲/۸	۲	۶۰/۱	۲	۰/۴۵	۳	۹۵/۹	Sub27
۳	۳	۴/۵۹	۲	۰/۹۱	۲	۳/۸	۲	۶۲/۱	۳	۰/۳۸	۳	۸۹/۰	Sub28
۴	۳	۴/۹۶	۳	۲/۴۶	۳	۲/۹	۳	۴۴/۶	۳	۰/۳۹	۲	۱۵۷/۳	Sub29
۴	۳	۵/۳۴	۳	۳/۰۱	۳	۲/۵	۲	۵۸/۷	۳	۰/۳۲	۳	۶۰/۰	Sub30
۳	۳	۴/۷۹	۲	۰/۹۸	۳	۲/۵	۱	۷۰/۳	۳	۰/۳۹	۳	۹۵/۸	Sub31
۴	۳	۶/۴۱	۳	۸/۶۳	۳	۰/۶	۳	۴۴/۱	۳	۰/۲۷	۳	۱۷/۰	Sub32

در پژوهش حاضر شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL) در ۱۳۳ مقطع بر روی آبراهه‌های حوضه آبریز زونچای مورد محاسبه قرار گرفت. مقادیر این شاخص در سطح حوضه مطالعاتی تغییرپذیری فضایی بالایی را نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که از حداکثر ۸۳۲/۵ تا حداقل ۱۷ متغیر می‌باشد. حداکثر میانگین شاخص SL در زیرحوضه‌های شماره ۱ با مقدار ۴۳۷/۸ و شماره ۲ با مقدار ۴۰۵/۲ در شمال

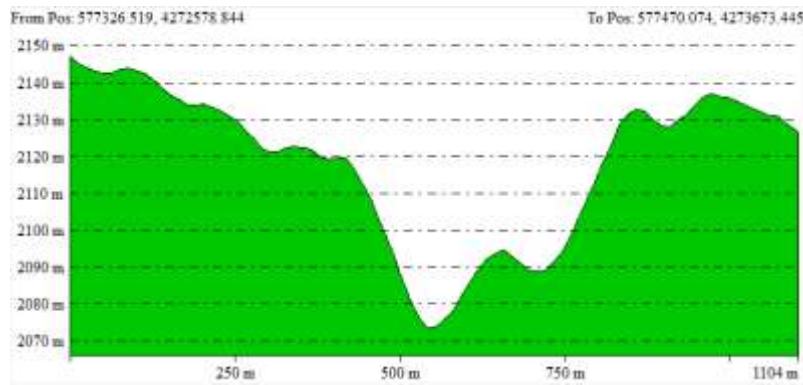


حوضه و زیرحوضه‌های شماره ۱۴ با مقدار ۴۲۹/۶ و شماره ۱۵ با مقدار ۴۱۴/۸ مشاهده می‌شود. پایین‌ترین مقادیر این شاخص نیز با کمتر از ۸۹ در زیرحوضه‌های ۲۸، ۲۳، ۳۰ و ۳۲ دیده می‌شود. در حالت کلی، مقادیر بالاتر این شاخص در زیرحوضه‌های بالادست (سرچشمه-ها)، مقادیر متوسط در زیرحوضه‌های میانی و مقادیر کم در زیرحوضه‌های پایین‌دست توزیع شده‌اند. درخصوص تفکیک تاثیر تغییرات لیتولوژی و جنبش گسل‌ها بر مقادیر این شاخص به طور قطع نمی‌توان اظهار نظر نمود؛ اما با توجه به محدود بودن گسل‌های بزرگ در سطح حوضه آبریز مطالعاتی و در مواردی انطباق خطوط شکستگی کوچک با اختلافات سنگ‌شناسی (شکل ۲) می‌توان بیان داشت که بخش قابل توجهی از آنومالی‌های مرتبط با SL مربوط به اختلافات سنگ‌شناسی در سطح حوضه می‌باشد. مقادیر بالاتر این شاخص در قسمت‌های بالادست حوضه آبریز مطالعاتی در اکثر موارد منطبق بر اختلافات سنگ‌شناسی، مخصوصا تباین بین سازندهای آذرین و رسوبات نوع فلیش، می‌باشد. با این حال، آنومالی‌های موجود در امتداد گسل زوز-هرزند در قسمت‌های میانی حوضه را می‌توان به جنبش‌های این گسل نسبت داد. در قسمت‌های پایین‌دست حوضه به دلیل عدم وجود خطوط شکستگی و فقدان اختلاف سنگ‌شناسی شاخص SL مقادیر پایینی را نشان می‌دهد. در حالت کلی، آنومالی‌های موجود در مقاطعی از آبراهه‌ها که از شرایط سنگ‌شناختی همگنی برخوردار می‌باشند را می‌توان به جنبش گسله‌های حوضه نسبت داد.



شکل (۲). نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز زوزچای (منبع: نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ جلفا)

در سطح حوضه مطالعاتی شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره (Vf) در ۱۵۰ مقطع با استفاده از امکانات نرم‌افزار GlobalMapper مورد محاسبه قرار گرفت (به عنوان مثال؛ شکل ۳) که در جدول (۱) میانگین این شاخص در سطح هر یک از زیرحوضه‌ها ارائه شده است. کمترین مقدار این شاخص (با مقادیر کمتر از ۰/۴۵) در سطح زیرحوضه‌های شماره ۱، ۲، ۱۴ و ۱۵ دیده می‌شود. این زیرحوضه‌ها جزو ناهموارترین و پرشیب‌ترین زیرحوضه‌های زوزچای به‌شمار می‌روند. در واقع، دره‌های این زیرحوضه‌ها در جهت پایین‌دست تا قسمت‌های قابل توجهی کم‌عرض می‌باشند. مقادیر پایین انحراف معیار در این زیرحوضه‌ها نشان‌دهنده این است که عرض دره‌ها در قسمت‌های میانی و پایین‌دست، افزایش محسوسی نسبت به قسمت‌های بالادست نداشته و مورفولوژی عرضی این دره‌ها هنوز هم نسبتاً پرشیب، تنگ و V شکل می‌باشند. مقادیر پایین نسبت عرض به عمق در قسمت‌های بالادست حوضه مطالعاتی را می‌توان تا حد زیادی به عامل لیتولوژی نسبت داد. درواقع، به دلیل فرسایش‌پذیری اندک این سنگ‌ها، مجرای رودخانه‌ها از توانایی اندکی جهت فرسایش کناره و افزایش عرض دره برخوردار می‌باشند. به همین دلیل، انرژی رودخانه متوجه بستر مجرا گردیده و همین امر یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش نسبت شاخص Vf می‌باشد. در جهت پایین‌دست و خروجی حوضه آبریز زوزچای بر مقدار شاخص Vf افزوده می‌شود که حاکی از افزایش عرض یا پهنای دره‌هاست. این امر به دلیل دریافت انشابات بیشتر، فعالیت ضعیف تا نسبتاً ضعیف نتوتکتونیک و غلبه فرایندهای فرسایشی می‌باشد.



شکل (۳). نمونه‌ای از مقاطع دره زیرحوضه شماره ۱۴ در نرم‌افزار GlobalMapper

در رابطه با شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی، حوضه‌های با مقادیر $Af \geq 65$ یا $Af < 35$ نشان‌دهنده فعالیت‌های بالای نئوتکتونیک می‌باشند (کلاس ۱). مقادیر $Af \geq 35$ یا $Af > 43$ یا $57 \leq Af < 65$ نشان‌دهنده مناطق با فعالیت متوسط نئوتکتونیک (کلاس ۲) و مقادیر $Af \geq 43$ یا $57 > Af$ نشان‌دهنده مناطق با فعالیت‌های نئوتکتونیک اندک (کلاس ۳) می‌باشند (ال همدونی و همکاران، ۲۰۰۸). نتایج این شاخص باید در رابطه با سایر شاخص‌های کمی ژئومورفیک، لیتولوژی، ساختمان زمین‌شناسی و پراکندگی فضایی گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه تفسیر شود. در واقع، این شاخص بدون در نظر گرفتن سایر متغیرها می‌تواند نتایج گمراه‌کننده‌ای به همراه داشته باشد. در زیرحوضه‌های شماره ۱، ۱۴، ۱۷، ۲۴ و ۳۱ مقادیر Af بالاتر از ۶۵ و در زیرحوضه‌های شماره ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱ و ۲۵ مقادیر این شاخص کمتر از ۳۵ است. بنابراین دارای عدم تقارن شدیدی هستند. با توجه به کلاسه‌بندی این شاخص، زیرحوضه‌های مذکور در طبقه عدم تقارن شدید قرار گرفته‌اند. در ۱۴ زیرحوضه، یعنی زیرحوضه‌های شماره ۵، ۶، ۷، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۹، ۲۰، ۲۲، ۲۳، ۲۶، ۲۹ و ۳۲ مقادیر این شاخص در دامنه بین ۴۳ و ۵۷ قرار دارند و در نتیجه از تقارن نسبتاً بالایی برخوردار می‌باشند (کلاس ۳) که نشان‌دهنده تقارن بالا و فعالیت‌های نئوتکتونیک ضعیف است. زیرحوضه‌هایی نیز که مورد اشاره قرار نگرفتند در کلاس ۲ جای می‌گیرند.

حوضه‌های زهکشی نسبتاً جوان در نواحی تکتونیک فعال، گرایش به کشیدگی دارند. با تداوم تحول و یا کاهش فعالیت فرآیندهای تکتونیک، شکل کشیده حوضه به یک شکل دایره‌ای تمایل پیدا می‌کند. تصویر افقی شکل حوضه می‌تواند از طریق شاخص کشیدگی (Bs) توصیف شود (ال همدونی و همکاران، ۲۰۰۸). در حالت تطبیقی، روند مشخصی در مقادیر این شاخص در زیرحوضه‌های منطقه مطالعاتی دیده نمی‌شود (جدول ۱). زیرحوضه‌های شماره ۷، ۱۰، ۱۱، ۱۴، ۲۵ و ۲۶ جزو زیرحوضه‌های بسیار کشیده می‌باشند و در نتیجه در کلاس ۱ قرار می‌گیرند. سایر زیرحوضه‌ها در کلاس‌های ۱ و ۲ جای می‌گیرند که در تمامی قسمت‌های حوضه مطالعاتی پراکنده شده‌اند. در زیرحوضه‌های قسمت‌های میانی و پایین‌دست تمایلی به سمت پهن‌شدگی و کاهش مقادیر این شاخص دیده می‌شود که نشان از ضعیف بودن فعالیت‌های نئوتکتونیک و حاکمیت فرایندهای فرسایشی می‌باشد.

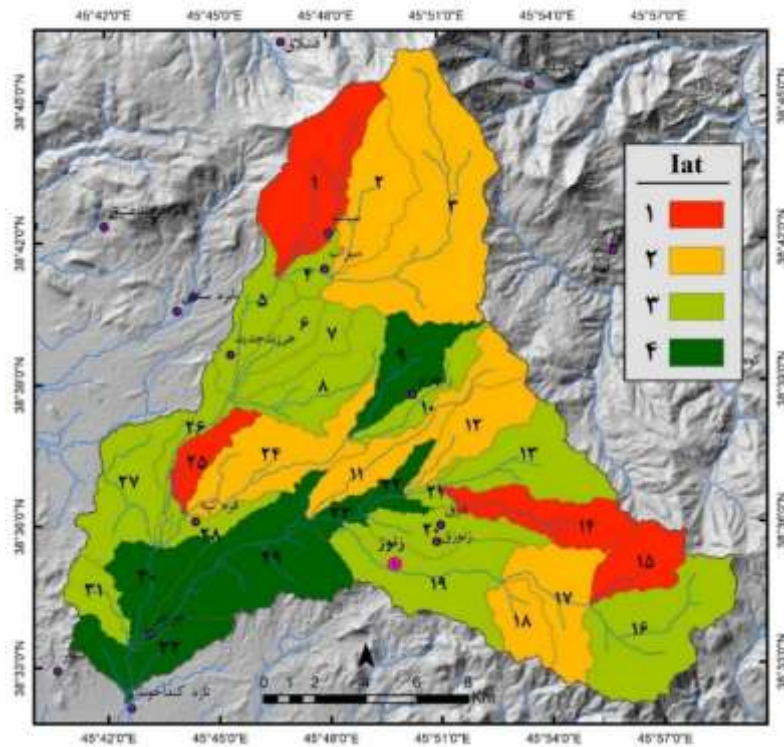
انتگرال هیپسومتری شاخصی است که به عنوان مساحت زیر منحنی هیپسومتریک تعریف می‌شود و از اینرو بیان‌کننده حجمی از یک حوضه می‌باشد که فرسایش نیافته است. باید توجه داشت که انتگرال هیپسومتری به طور مستقیم وابسته به تکتونیک فعال نسبی نیست. در واقع، مقاومت سنگ‌ها و سایر فاکتورها می‌تواند مقادیر این شاخص را همانند شاخص SL تحت‌تاثیر قرار دهد. مقادیر بالای این شاخص احتمالاً مربوط به تکتونیک فعال جوان هستند و مقادیر پایین مربوط به چشم‌اندازهای قدیمی می‌باشند که بیشتر فرسایش یافته‌اند و توسط تکتونیک فعال جدید کمتر تحت‌تاثیر قرار گرفته‌اند. به طور کلی، مقادیر بالای انتگرال هیپسومتری محذب بوده و معمولاً دارای مقادیر $(Hi > 0.5)$ می‌باشند. مقادیر متوسط متمایل به مستقیم هستند و معمولاً دارای مقادیر بین ۰/۴ و ۰/۵ می‌باشند. سرانجام، مقادیر پایین‌تر $(Hi < 0.4)$ تمایل دارند تا شکل مقعر داشته باشند (ال همدونی و همکاران، ۲۰۰۸). در حوضه زون‌چای تنها در زیرحوضه‌های شماره ۱۴ و ۱۵ مقادیر این شاخص به ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۵۱ می‌باشد. در سایر زیرحوضه‌ها مقادیر این شاخص کمتر از ۰/۵ می‌باشد. در زیرحوضه‌های شماره ۱، ۴، ۶، ۱۳، ۱۷، ۱۸، ۲۱، ۲۳، ۲۵، ۲۶ و ۲۷ مقادیر این شاخص در دامنه بین ۰/۴۰ تا ۰/۴۹ می‌باشد و



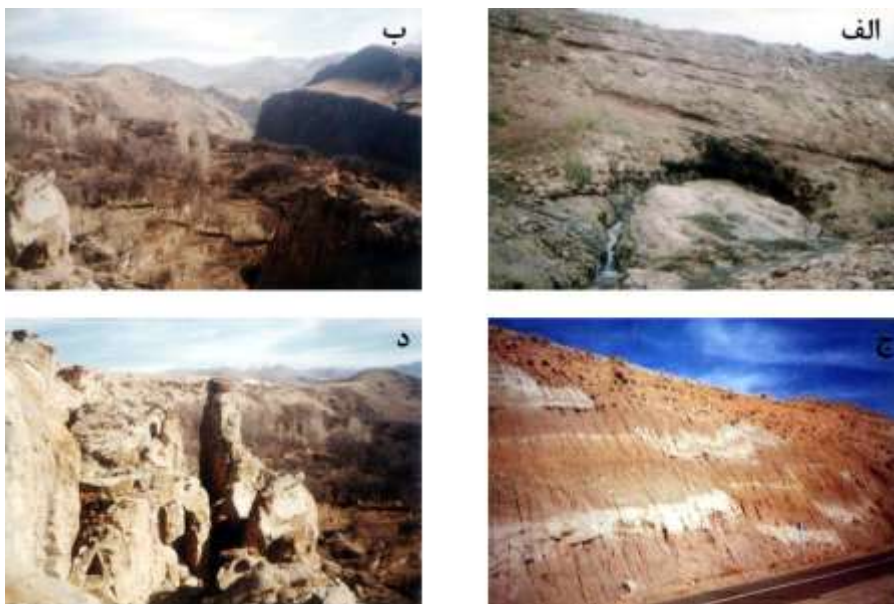
در نتیجه در کلاس ۲ واقع می‌شوند. اکثر این زیرحوضه‌ها در شرق حوضه زوزچای واقع شده‌اند که از درجه ناهمواری بالایی نیز برخوردار می‌باشند. در سایر زیرحوضه‌ها (۱۹ زیرحوضه) مقادیر این شاخص کمتر از ۰/۳۹ می‌باشد و در نتیجه در کلاس ۳ جای می‌گیرند. براساس این شاخص می‌توان نتیجه گرفت که در کل منطقه مورد مطالعه تمایلی در جهت غلبه فرایندهای فرسایشی بر فعالیت‌های زمین‌ساختی دیده می‌شود که این روند در قسمت‌های میانی و پایین‌دست حوضه مورد مطالعه محسوس‌تر می‌باشد.

شاخص دیگری که به طور معمول برای ارزیابی فعالیت‌های تکتونیکی در امتداد جبهه‌های کوهستان (صرف‌نظر از وابستگی آنها به اقلیم و لیتولوژی) به کار گرفته می‌شود، سینوزیته جبهه کوهستان (S_{mf}) می‌باشد. مقدار این شاخص برای مناطق بسیار فعال تکتونیکی معمولاً بین ۱ تا ۱/۵، برای مناطق با فعالیت متوسط بین ۱/۵ تا ۳ و برای مناطق غیر فعال از ۳ تا بیش از ۱۰ می‌باشد (بول، ۲۰۰۷: ۱۲۴). برای منطقه مورد مطالعه، این شاخص در مقاطع مختلفی در طول جبهه کوهستان اندازه‌گیری شد. مقادیر کلی این شاخص در قسمت‌های مختلف منطقه نشان‌دهنده متوسط و ضعیف بودن تکتونیک فعال در کل حوضه آبریز مطالعاتی می‌باشد (جدول ۱)؛ تنها در ۶ زیرحوضه شماره ۱، ۳، ۱۲، ۱۴، ۱۵ و ۲۵ مقادیر این شاخص کمتر از ۱/۵ می‌باشد که عموماً منطبق بر جبهه کوهستان‌های متشکل از سنگ‌های آذرین می‌باشند که از مقاومت بالایی در برابر فرایندهای فرسایشی برخوردار هستند. با توجه به نتایج جدول (۱) در تعداد ۱۶ زیرحوضه مقادیر شاخص سینوسیته جبهه کوهستان بیشتر از ۳ است. این زیرحوضه‌ها مخصوصاً در قسمت‌ها میانی و پایین‌دست حوضه آبریز زوزچای واقع شده‌اند. مقادیر بالاتر این شاخص در این زیرحوضه‌ها بیانگر حاکمیت فرایندهای فرسایشی و ضعف فرایندهای تئوتکتونیکی در این قسمت از حوضه است.

در نهایت با توجه به شاخص‌های فوق‌الذکر برای حوضه آبریز زوزچای براساس شاخص I_{at} پهنه‌بندی فعالیت‌های نسبی تکتونیکی صورت گرفت. ذکر این نکته مهم است که این شاخص نشان‌دهنده فعالیت‌های نسبی تکتونیک فعال می‌باشد و مقادیر پایین آن در همه موارد دلالت بر فعالیت‌های تئوتکتونیکی شدید در یک منطقه نیست. براساس نتایج این پهنه‌بندی (شکل ۴) مشخص است که در کل، فعالیت‌های تئوتکتونیکی در سطح حوضه آبریز زوزچای متوسط تا نسبتاً ضعیف می‌باشد. شواهد میدانی نیز نشان‌دهنده حاکمیت فرایندهای فرسایشی (علی‌رغم وجود برخی سازندهای مقاوم) در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. فقدان و یا پراکندگی نه‌چندان زیاد لندفرم‌های تئوتکتونیکی، عقب‌نشینی و تخریب جبهه‌های کوهستان و عریض‌شدگی دره‌ها از جمله دلایلی است که ضعیف یا نسبتاً ضعیف بودن تکتونیک فعال در حوضه آبریز زوزچای را نمایان می‌سازد. بخش عمده‌ای از لندفرم‌های مورفوتکتونیکی حوضه در امتداد گسل زوز-هرزند واقع شده‌اند. برای بسیاری از زیرحوضه‌ها، مقادیر I_{at} در کلاس ۳ و ۴ قرار گرفته است که نشانگر متوسط تا ضعیف بودن تکتونیک فعال نسبی در این حوضه‌ها می‌باشد. در برخی از زیرحوضه‌های واقع در کلاس ۱ و ۲ پایین بودن این شاخص را می‌توان به مشارکت عواملی غیرتکتونیکی نیز نسبت داد. مقادیر نسبتاً پایین این شاخص در زیرحوضه‌های بالادست را با احتمال بالایی می‌توان به عوامل لیتولوژیکی و هیدرولوژیکی نسبت داد. اطلاعات زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی شمال‌غرب کشور (موسسه ژئوفیزیک کشور، ۱۳۹۳) با مقیاس زمانی ۱۱۵ سال نیز نشان می‌دهد که زمین‌لرزه قابل توجهی در منطقه مورد مطالعه اتفاق نیفتاده است. بنابراین، داده‌های لرزه‌ای به خوبی تایید کننده نتایج این پژوهش می‌باشد. با وجود این، خطرات جنبش گسله‌های منطقه را در ایجاد مخاطراتی از قبیل ناپایداری‌های دامنه‌ای نباید نادیده گرفت؛ کما اینکه در امتداد گسل‌های منطقه، مخصوصاً گسل زوز-هرزند، شواهدی از تحرک و جنبش دیده می‌شود (شکل ۵).



شکل (۴). پهنه‌بندی فعالیت‌های تکتونیکی نسبی در سطح حوضه آبریز زونوزچای



شکل (۵). الف) چشمه آهک ساز که در مسیر گسل در شمال شرقی زونوز ظهور پیدا کرده است؛ ب) افتادگی و نشست زونوزچای در مسیر گسل هرزند- زونوز و شرقی و غربی شدن آن؛ ج) بهم خوردن نظم طبقات لیتولوژی در اثر گسل؛ د) گسیختگی‌های سنگ‌های آندزیت در مسیر گسل هرزند- زونوز و افتادگی آنها

پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب

در شکل (۷) پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب در سطح حوضه آبریز زونوزچای ارائه شده است. این نقشه بر اساس ترکیب ۱۰ متغیر مهم و تاثیرگذار بر پخش سیلاب در سطح حوضه‌های آبریز تهیه شده است. برای محاسبه میزان اهمیت هر یک از متغیرها از مدل ANP



استفاده به عمل آمد (شکل ۶). در پژوهش حاضر تنها به ارائه وزن‌های نهایی حاصل از این مدل اکتفا شد و از ارائه سوپرماتریس‌های مدل اجتناب به عمل آمد. لایه‌های موضوعی بعد از نرمالیزه شدن با استفاده از ضرایب حاصل از مدل ANP در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی ترکیب شدند (رابطه زیر).

$$\text{لایه پهنه‌بندی خطر سیلاب} = (0.227 \times \text{لایه شیب}) + (0.186 \times \text{لایه فاصله از رود}) + (0.160 \times \text{لایه تحدب}) + (0.130 \times \text{لایه ارتفاع رواناب}) + (0.094 \times \text{لایه ارتفاع}) + (0.078 \times \text{لایه عمق دره}) + (0.053 \times \text{لایه تراکم زهکشی}) + (0.033 \times \text{لایه کاربری اراضی}) + (0.024 \times \text{لایه پوشش گیاهی}) + (0.016 \times \text{لایه لیتولوژی}).$$

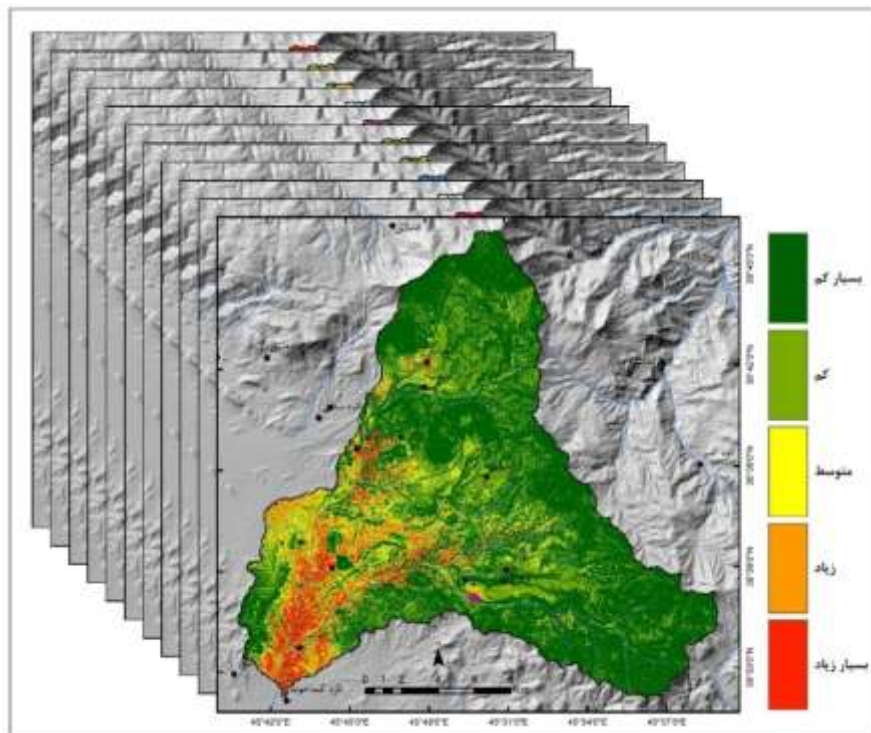
در بین متغیرهای مورد استفاده، متغیرهای شیب، فاصله از رودخانه و تحدب سطح زمین به ترتیب با ضرایب ۰/۲۳، ۰/۱۹ و ۰/۱۶ از بیشترین میزان اهمیت برخوردار می‌باشند. در واقع، متغیرها مذکور نقش قاطع و تعیین کننده‌ای در پخش سیلاب ایفا می‌کنند. سایر متغیرها عمدتاً نقش بارزی در تولید رواناب دارند.

Icon	Name	Normalized by Cluster	Limiting
No Icon	شیب	0.22659	0.226591
No Icon	فاصله از رودخانه	0.18554	0.185543
No Icon	تحدب سطح	0.16033	0.160331
No Icon	ارتفاع رواناب	0.12960	0.129599
No Icon	ارتفاع	0.09385	0.093852
No Icon	عمق دره	0.07753	0.077534
No Icon	تراکم زهکشی	0.05257	0.052569
No Icon	کاربری اراضی	0.03312	0.033117
No Icon	پوشش گیاهی	0.02441	0.024414
No Icon	لیتولوژی	0.01645	0.016451

شکل (۶). وزن هر یک از معیارهای موثر بر خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز زنونچای

حوضه آبریز زنونچای براساس خطر وقوع سیلاب به پنج کلاس خطر (از بسیار کم تا بسیار زیاد) طبقه‌بندی گردید. نتایج حاکی از این است که بالغ بر ۴ درصد از سطح حوضه آبریز زنونچای در کلاس با خطر بسیار زیاد، ۷/۴ درصد در کلاس خطر زیاد، ۸/۳ درصد در کلاس خطر متوسط، ۲۱/۷ درصد در کلاس خطر بسیار کم و ۵۸/۶ درصد در کلاس خطر بسیار کم واقع شده است. توزیع فضایی این پهنه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. تقریباً تمامی بخش‌های بالادست حوضه آبریز مطالعاتی در کلاس‌های خطر کم و بسیار کم قرار گرفته‌اند. این امر مخصوصاً به دلیل ارتفاع و درجه ناهمواری بالا، شیب زیاد و تحدب بالا می‌باشد. هر چند این پهنه‌ها از نظر تولید رواناب در اولویت بالایی قرار دارند اما رواناب تولید شده در این قسمت‌ها به دلیل شیب تند به سرعت به طرف قسمت‌های میانی و پایین دست حوضه منقل می‌شوند. از طرف دیگر، در این پهنه‌ها به دلیل خشونت عناصر اقلیمی و ژئومورفولوژیکی هیچ‌گونه سکونتگاه انسانی مکان‌گزینی نشده است. بدین ترتیب مفهوم مخاطره در این قسمت‌های حوضه از موضوعیت چندانی برخوردار نیست. هر چند این قسمت‌های حوضه در چارچوب برنامه‌های حفاظت از منابع آب و خاک و مدیریت سیلاب می‌بایست جزو برنامه‌های آبخیزداری قرار گیرند. در قسمت‌های میانی حوضه مطالعاتی پهنه‌های سیل‌گیر عمدتاً معطوف به دو دره اصلی حوضه می‌باشد. پهنای این دره‌ها در مقاطع مختلف افزایش پیدا کرده و در نتیجه دشت‌های سیلابی در بستر این دره‌ها شکل گرفته‌اند. وجود دشت‌های سیلابی حاصلخیز منجر به شکل‌گیری چندین سکونتگاه در بطن این دره‌ها شده است. همچنین، این دشت‌های سیلابی بستر فعالیت‌های کشاورزی جوامع ساکن دره‌ها می‌باشد. با این حال، دشت‌های سیلابی مذکور به دلیل وجود شرایط مساعد، از قبیل شیب ملایم و مجاورت با بستر رودخانه، همیشه در معرض سیلاب‌ها- مخصوصاً سیلاب‌های با دوره بازگشت بالا- می‌باشند. بخش‌هایی از روستاهای میاب و هرزند جدید در این موقعیت ژئومورفولوژیکی واقع شده‌اند و در نتیجه اقدامات مهندسی یا سازه‌ای (از قبیل احداث سیل‌بند) و غیرسازه‌ای (از قبیل برنامه‌ریزی کاربری

اراضی) برای مهار سیلاب در این دره‌ها لازم و ضروری به نظر می‌رسد. در قسمت‌های پایین‌دست حوضه، عرض دره زوزچای افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند و همچنین دو آبراهه اصلی حوضه آبریز مطالعاتی به یکدیگر ملحق می‌شوند. وجود اراضی کم‌شیب که پخش سیلاب را مساعدت می‌کنند، ارتفاع نسبی پایین که محل هدایت رواناب‌های بالادست می‌باشند، مجاورت با رودخانه‌های اصلی، به هم-پیوستن دو آبراهه اصلی حوضه در پایین‌دست حوضه آبریز مطالعاتی، مقادیر پایین شاخص تحدب و به عبارت دیگر مقعر بودن سطح زمین که امکان سیل‌گرفتنی را مهیا می‌سازد، مقادیر بالای تراکم زهکشی که در واقع محل پیوستن آبراهه‌های منطقه و راس مخروط-افکنه زوزچای می‌باشد و مقادیر بالای عمق دره از مهم‌ترین عوامل موثر بر خطرناک بودن این بخش از حوضه از نظر وقوع سیلاب می‌باشد. هر چند با توجه به کاربری اراضی، پوشش گیاهی و حضور سازندهای نفوذپذیر شرایط مساعدی از نظر وقوع سیلاب برقرار نیست اما تاثیر این متغیرها در مقایسه با سایر متغیرهای موثر خنثی شده‌اند.



شکل (۷). پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز زوزچای با استفاده از مدل ANP

پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

مشابه مورد سیلاب، به منظور ترکیب متغیرهای موثر بر خطر وقوع زمین‌لغزش از مدل ANP در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بهره گرفته شد. براساس نتایج مدل ANP سه متغیر شیب با ضریب ۰/۲۴، لیتولوژی با ضریب ۰/۲۲ و بارش با ضریب ۰/۱۶ تاثیر عمده‌ای بر وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه مطالعاتی دارند. این متغیرها کنترل‌کننده‌های اصلی زمین‌لغزش‌ها نه تنها در حوضه آبریز زوزچای بلکه در بسیاری از حوضه‌های دیگر محسوب می‌شوند. در واقع، برای رخداد زمین‌لغزش- به عنوان یک حرکت توده‌ای- وجود شیب مناسب (در این تحقیق شیب‌های بین ۱۰ تا ۴۰ درصد به عنوان شیب‌های ایده‌آل)، مواد مستعد و حضور آب لازم و ضروری می‌باشد.



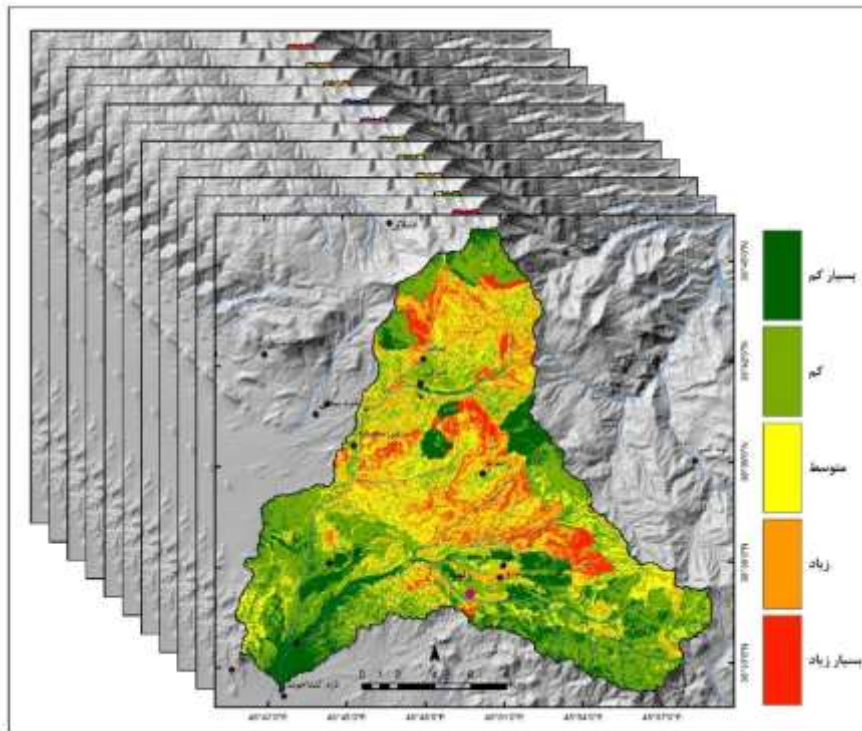
Icon	Name	Normalized by Cluster	Limiting
No Icon	شیب	0.23664	0.236636
No Icon	لیتولوژی	0.21943	0.219427
No Icon	بارش	0.16370	0.163701
No Icon	تحدب سطح	0.08773	0.087726
No Icon	ارتفاع	0.06263	0.062627
No Icon	فاصله از رودخانه	0.04425	0.044249
No Icon	جهت شیب	0.03128	0.031281
No Icon	پوشش گیاهی	0.02251	0.022508
No Icon	کاربری اراضی	0.01693	0.016935
No Icon	فاصله از گسل	0.11491	0.114911

شکل (۸). وزن هر یک از معیارهای موثر بر خطر وقوع زمین لغزش در حوضه آبریز زنونزچای

متغیرهای موثر بر رخداد زمین لغزش بعد از نرمالیزه شدن با توجه به ضرایب محاسباتی (شکل ۸) ترکیب شدند و نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش در سطح حوضه آبریز زنونزچای حاصل گردید (شکل ۹). برای ترکیب لایه‌ها از رابطه زیر استفاده به عمل آمد:

$$\text{لایه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش} = (0.23664 \times \text{لایه شیب}) + (0.21943 \times \text{لایه لیتولوژی}) + (0.16370 \times \text{لایه بارش}) + (0.08773 \times \text{فاصله از رودخانه}) + (0.06263 \times \text{ارتفاع}) + (0.04425 \times \text{لایه فاصله از رود}) + (0.03128 \times \text{لایه جهت شیب}) + (0.02251 \times \text{لایه پوشش گیاهی}) + (0.01693 \times \text{لایه کاربری اراضی}) + (0.11491 \times \text{لایه فاصله از گسل})$$

حوضه مطالعاتی از نظر احتمال وقوع زمین لغزش به پنج کلاس خطر طبقه‌بندی شد. بر این اساس، در حدود ۱۶/۶ درصد مساحت حوضه در کلاس خطر بسیار کم، در حدود ۳۸/۱ درصد در کلاس خطر کم، در حدود ۲۳ درصد در کلاس خطر متوسط، ۱۵/۸ درصد در کلاس خطر زیاد و در نهایت در حدود ۶/۵ درصد در کلاس خطر بسیار زیاد واقع شده است. بخش عمده‌ای از پایین‌دست و نوار جنوبی حوضه و همچنین بخش‌هایی از بالادست و شمال حوضه در کلاس خطر زمین لغزش بسیار کم و کم واقع شده‌اند. توزیع فضایی کلاس‌های خطر حاکی از تمرکز کلاس‌های خطر زیاد و بسیار زیاد در قسمت‌های میانی حوضه می‌باشد. این امر را به عوامل متعددی می‌توان نسبت داد. شاید مهم‌ترین دلیل مربوط به وجود سازندهای زمین‌شناسی مستعد زمین لغزش و شیب‌های مناسب برای رخداد این فرایند ژئومورفولوژیکی باشد. در واقع، در قسمت‌های میانی غلبه طبقات شیب ۱۰ تا ۴۰ درصد شرایط مستعدی را برای رخداد زمین لغزش فراهم نموده است. این در حالی است که در قسمت‌های پایین دست غلبه شیب‌های ملایم و در قسمت‌های بالادست غلبه شیب‌های بسیار تند و پرتگاهی احتمال وقوع این رخداد را کاهش می‌دهد. با این توضیح که در پژوهش حاضر فرض شد که در شیب‌های بسیار تند فرایند توده‌ای زمین لغزش تبدیل به فرایندهایی از قبیل سقوط سنگ‌ها و واژگونی می‌شود. در قسمت‌های میانی حوضه، پادگانه‌های آبرفتی مرتفع (واقع بر روی دامنه‌ها) و همچنین رخنمون مارن‌ها و سازند کنگلومرا با میان‌لایه‌های ماری و پراکنندگی رسوبات تیپ فلیش شرایط نسبتاً مساعدی را برای زمین لغزش فراهم نموده است. این قسمت از حوضه با تقریباً ۳۸۰ میلی‌متر بارش بیشتری را نسبت به قسمت‌های پایین دست دریافت می‌کند. در اواخر زمستان و اوایل بهار بارش‌های همرفتی با ذوب برف دامنه‌ها همراه شده و آب لازم و ضروری برای فعال شدن فرایندهای دامنه‌ای زمین لغزش مهیا می‌شود. در سطوحی که شرایط فوق‌الذکر برقرار بوده و سایر متغیرها نیز مساعدت کنند احتمال وقوع زمین لغزش افزایش پیدا می‌کند. استقرار اغلب سکونتگاه‌های منطقه در اراضی هموار باعث شده است که زمین لغزش‌ها مخاطرات مستقیمی را متوجه جوامع روستایی و شهری مستقر در محدوده حوضه آبریز زنونزچای ننمایند. بنابراین مخاطرات زمین لغزش می‌تواند از منظر تحمیل خسارت به جاده‌ها و سایر تاسیسات زیربنایی و مواردی مانند فرسایش مورد توجه قرار گیرد.



شکل (۹). پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز زوزچای با استفاده از مدل ANP

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر مخاطرات ژئومورفولوژیکی (نئوتکتونیک، سیلاب و زمین‌لغزش) در سطح حوضه آبریز زوزچای مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی نئوتکتونیک از شاخص‌های کمی ژئومورفیک و ترکیب آنها با کاربست شاخص فعالیت تکتونیک نسبی (Iat) بهره گرفته شد. به منظور ارزیابی خطر وقوع سیلاب و زمین‌لغزش نیز متغیرهای موثر بر رخداد این مخاطرات با استفاده از مدل فرایند تحلیل شبکه (ANP) در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ترکیب شدند.

میانگین شاخص Iat برای حوضه مطالعاتی ۲/۲ می‌باشد که نشان‌دهنده نئوتکتونیک متوسط در سطح منطقه است. با این حال، مقادیر این شاخص در سطح حوضه مطالعاتی از حداقل ۱/۳ تا حداکثر ۲/۸ متغیر است که نشان‌دهنده تباین فضایی از نظر شاخص‌های مورد استفاده در حوضه آبریز زوزچای می‌باشد. بررسی توزیع فضایی مقادیر شاخص‌های کمی ژئومورفیک و پراکندگی گسله‌ها و خطوط شکستگی موجود در سطح حوضه مطالعاتی نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از آنومالی‌های شاخص‌های ژئومورفیک از اختلافات سنگ-شناسی و فرایندهای هیدرولوژیکی نشأت می‌گیرند. در مواردی نیز آنومالی‌هایی در اطراف گسله‌های منطقه دیده می‌شوند که ارقام محسوس و قابل توجهی را نشان نمی‌دهند. در واقع، اغلب گسل‌های موجود در سطح حوضه زوزچای (به استثنای گسل زوز-هرزند) به دلیل طول اندک قادر به تحمیل ناهنجاری‌های محسوس در چشم‌اندازهای منطقه نیستند. محدود بودن لندفرم‌های نئوتکتونیک و عدم رخداد زمین‌لرزه‌های شدید در سطح حوضه مطالعاتی یافته‌های تحقیق را تایید می‌کند. نتیجه اینکه در سطح حوضه آبریز زوزچای حاکمیت و غلبه فرایندهای فرسایشی بر فعالیت‌های نئوتکتونیک دیده می‌شود. پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب در سطح حوضه زوزچای نشان می‌دهد که در حدود ۱۱ درصد از سطح حوضه در کلاس‌های خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته است. توزیع فضایی کلاس‌های خطر بیانگر این است که بخش قابل توجهی از بستر دره‌های اصلی منطقه در معرض سیلاب‌های رودخانه‌ای قرار دارند. این امر مخصوصاً در امتداد دره‌های قسمت‌های میانی و پایین‌دست حوضه دیده می‌شود که می‌تواند به عنوان یک مخاطره و تهدید جدی برای سکونتگاه‌های مستقر در این دره‌ها به شمار آید. این امر اتخاذ اقدامات سازه‌ای (مخصوصاً در مجاورت دو آبراهه اصلی حوضه) و غیرسازه‌ای را ضروری می‌سازد. بر اساس نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش می‌توان بیان داشت که در حدود ۲۲ درصد از سطح



حوضه زوزچای فرایند زمین لغزش از احتمال وقوع بالایی برخوردار است. این پهنه‌ها عمدتاً در قسمت‌های میانی حوضه واقع شده‌اند. در این قسمت‌ها وجود شیب‌های مناسب، پراکندگی سازندهای زمین‌شناسی مستعد زمین لغزش، حضور آب به دلیل بارش و ذوب برف، وجود مراتع با پوشش گیاهی ضعیف تا متوسط، غلبه سطوح محدب و وجود چندین خط شکستگی باعث شده است که شرایط مساعد برای رخداد زمین لغزش مهیا شود. در سایر قسمت‌ها وجود موانع و عوامل محدودکننده احتمال وقوع زمین لغزش را کاهش داده است. در حالت کلی، زمین لغزش‌ها تهدید چندانی برای سکونتگاه‌های منطقه ایجاد نمی‌کنند.

در حالت کلی، پژوهش حاضر نشان داد که فعالیت‌های نئوتکتونیک و دامنه‌ای (زمین لغزش) در سطح حوضه آبریز زوزچای از شدت عمل زیادی برخوردار نیستند. برعکس، فرایند سیلاب رودخانه‌ای می‌تواند باعث مخاطراتی در دره‌های اصلی حوضه شود. در پایان خاطر نشان می‌شود که شناسایی پهنه‌های پایدار و کم‌خطر از نظر فرایندهای ژئومورفولوژی به اندازه شناسایی پهنه‌های خطرناک دارای اهمیت می‌باشد.

منابع

- حاتمی‌نژاد، حسین، آتش‌افروز، نسرین و آروین، محمود، (۱۳۹۶)، پهنه‌بندی خطر سیل با استفاده از تحلیل چندمعیاره و GIS مطالعه موردی: شهرستان ایذه، فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران، دوره ۷، شماره ۲، صص ۴۴-۵۷.
- رسایی، آرمان، خسروی، خهبات، حبیب‌نژاد روشن، محمود، حیدری، ارکان و مشایخان، آرمین، (۱۳۹۴)، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با مدل رگرسیون چندمتغیره در محیط GIS (مطالعه موردی: حوزه آق مشهد، استان مازندران)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، سال ششم، شماره ۱۲، صص ۲۰۵-۲۱۵.
- روستایی، شهرام و جانانه، کریستینه، (۱۳۹۸)، پهنه‌بندی خطر وقوع ناپایداری دامنه‌ای در حوضه آبریز بالقلوچای اردبیل با استفاده از روش سلسله‌مراتبی فازی، جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۲۳، شماره ۷۰، شماره پیاپی ۲۳، صص ۱۶۹-۱۸۸.
- عابدینی، موسی و بهشتی جاوید، ابراهیم، (۱۳۹۵)، پهنه بندی خطر وقوع سیلاب حوضه آبخیز ليقوان چای با استفاده از مدل فرآیند تحلیل شبکه و سیستم اطلاعات جغرافیایی، نشریه فضایی جغرافیایی، جلد ۱۶، شماره ۵۵، صص ۲۹۳-۳۱۲.
- کیانی، اکبر، فاضل‌نیا، غریب و رضایی، بیت‌اله، (۱۳۹۱)، بررسی و اولویت‌سنجی مخاطرات محیط طبیعی شهر زابل، نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱، شماره ۱، صص ۹۸-۱۱۱.
- گیلانی‌پور، علی و متولی، صدرالدین، (۱۳۹۴)، پهنه بندی خطر زمین لغزش های کم عمق با استفاده از روش های آماری دو متغیره و GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گلندرد)، فصلنامه اکوسیستم های طبیعی ایران، دوره ۶، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۹، صص ۵۷-۷۸.
- مددی، عقیل، پیروزی، الناز و پرستار، سمیه، (۱۳۹۵)، پهنه‌بندی و خطر سیلاب در حوضه آبخیز آق‌لاقان چای، طرح پژوهشی، دانشگاه محقق اردبیلی.
- منصور، هاشم، وکیلی اوندیری، فاطمه و خطیب، محمد مهدی، (۱۳۹۵)، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به روش تحلیل سلسله مراتبی و منطق بولین در کوه باقران (جنوب بیرجند)، دوفصلنامه علمی یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۰، شماره ۲۰، صص ۴۹-۶۱.
- موسسه ژئوفیزیک، مرکز لرزه‌نگاری کشوری، (۱۳۹۳)، نقشه‌های لرزه‌خیزی استان‌های ایران ۱۹۰۰-۲۰۱۵ (۱۳۹۳-۱۳۷۸).
- موسوی، سیده معصومه، نگهبان، سعید، رخشانی مقدم، حیدر و حسین‌زاده، سید محسن، (۱۳۹۵)، ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیل‌خیزی با استفاده از منطق فازی TOPSIS در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شهر باغملک)، مجله مخاطرات محیط طبیعی، سال پنجم، شماره دهم، صص ۷۹-۹۸.
- نوجوان، محمد رضا، سادات شاه‌زیدی، سمیه، داودی، محمود و امین رعایا، هاجر، (۱۳۹۸)، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از تلفیق دو مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و فازی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کمه، استان اصفهان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۷، شماره ۴، شماره پیاپی ۲۸، صص ۱۴۲-۱۵۹.
- نیری، هادی و سالاری، ممد، (۱۳۹۷)، ارزیابی حوضه‌های آبخیز استان کردستان از منظر تکتونیک فعال با رویکرد کمی - مقایسه‌ای مبتنی بر تحلیل شبکه زهکشی، جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۲۲، شماره ۶۴، صص ۲۸۹-۳۱۰.
- Adhikari, M. (2011). Bivariate statistical analysis of landslide susceptibility in western Nepal. Master thesis in geosciences. University of Oslo. pp: 1-88.
- Alcántara-Ayala, I and Goudie, A.S. (2010). Geomorphological Hazards and Disaster Prevention. Cambridge University Press.
- Ayalew, L and Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. Geomorphology 65: 15-31.

- Bull, W.B and McFadden, L.D. (1977). Tectonic geomorphology of North fault, California InDoehring (Ed.), Geomorphology of arid regions. Allen &Unwin. London. Pp:115-138.
- Bull, W.B. (2007). Tectonic geomorphology of mountains: a new approach to paleoseismology. Blackwell Publishing.
- Bull, W.B. (2009). Tectonically active landscapes. Wiley- Blackwell.
- Choi, Jaewon., Oh, Hyun-Joo., Lee, Hong-Jin., Lee, Changwook., Lee, Saro. (2012). Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS. Engineering geology 124: 12-23.
- Conforti, M., Pascale, S., Robustelli, G., and Sdao, F. (2014). Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy). Catena, 113, 236-250.
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacon, J and Keller, E.A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (Southern Spain). Geomorphology 96, pp: 150-173.
- Fernández, D.S and Lutz, M.A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. Engineering Geology No.111, PP: 90–98.
- Figueroa, A. M and Knot, J. R. (2010). Tectonic geomorphology of the southern Sierra Nevada Mountains (California): Evidence for uplift and basin formation. Geomorphology 123, 34-45.
- García-Soriano, Daniel., Quesada-Román, Adolfo and Zamorano-Orozco, José Juan. (2020). Geomorphological hazards susceptibility in high-density urban areas: A case study of Mexico City. Journal of South American Earth Sciences 102, 102667, 1-11.
- Gemitzi, A., Falalakis, G., Eskioglou, P and Petalas, C. (2010). Evaluating landslide susceptibility using environmental factors, fuzzy membership functions and GIS. Global nest, vol.12.
- Giaconia, F., Booth-Rea, Guillermo., Martínez-Martínez, José Miguel., Azañón, José Miguel., Pérez-Peña, José Vicente., Pérez-Romero, Joaquín and Villegas, Irene. (2012). Geomorphic evidence of active tectonics in the Serra Alhamila (eastern Betics, SE Spain). Geomorphology 145-146, 90-106.
- Griffiths, J. S. (ed.). (2001). Land Surface Evaluation for Engineering Practice. Geological Society Engineering Geology Special Publication, 18.
- Hamza, T and Raghuvanshi, T. K. (2017). GIS based landslide hazard evaluation and zonation—A case from Jeldu District, Central Ethiopia. Journal of King Saud University-Science, 29 (2), 151-165.
- Hyndman, Donald and Hyndman, David. (2009). Natural Hazards and Disasters, Second Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Latrubesse, Edgardo M. (2010). Natural hazards and human-exacerbated disasters in Latin America, special volumes of geomorphology. Elsevier.
- Peng, Y. (2012). Regional earthquake vulnerability assessment using a combination of MCDM methods. Annals of Operations Research volume 234, 95–110.
- Perez Pena, J.V. (2009). GIS-Based tools and methods for landscape
- Qin, Q., H. Tang and Chen, H. (2011). Zoning of highway flood-triggering environment for highway in Fuling District, Chongqing. In: 2011 International Conference on Photonics, 3D imaging, and Visualization. International Society for Optics and Photonics, pp 820530 820530– 820538.

- Sanders, M. H and Clark, P. D. (2010). *Geomorphology: Processes, Taxonomy and Applications*. Nova Science Publishers, Inc. 216 P.
- Sharma, S., P. S. Roy, V. Chakravarthi and Srinivasa, R. G. (2018). Flood risk assessment using multi-criteria analysis: a case study from Kopili River Basin, Assam, India.
- Vieira, Gonçalo; Zêzere, José Luís and Mora, Carla. (2020). *Landscapes and landforms of Portugal*. Springer.
- Willemin, J. H. and Knuepfer, Peter L.K. (1994). Kinematics of arc- continent collision in the Eastern Central Range of Taiwan inferred from geomorphic analysis. *Journal of Geographical Research*, pp: 1-56.
- Yilmaz, I. (2009). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat-Turkey). *Comp Geosci* 35(6):1125–1138.
- Youssef, A.M., Pradhan, B., Gaber, A.F.D and Buchroithner, M.F. (2009). Geomorphological hazard analysis along the Egyptian Red Sea coast between Safaga and Quseir. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 751- 766.