

تحلیل فعالیت زمین‌ساختی و ارتباط گسل‌ها با خطر زمین‌لغزش در حوضه سد کردستان

علی‌رضا ایلدرمی

دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

نویسنده مسئول: a.ildoromi@malayeru.ac.ir *

دریافت: ۹۹/۱۲/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۱۲

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

حوضه آبخیز سد کردستان با مساحت ۱۲۰/۱۵ کیلومتر مربع در شمال‌شرقی شهرستان سقز واقع شده است. هدف از این تحقیق تحلیل فعالیت زمین‌ساخت حوضه و ارتباط گسل‌ها با خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل ارزش اطلاعاتی است. ابتدا منطقه با استفاده از نرم‌افزار ArcHydro به ۱۵ زیرحوضه تقسیم و شاخص‌های مورفوتکتونیک شامل گرادیان طولی رودخانه (SL)، عدم تقارن حوضه زهکشی (AF)، هیپسومتریک (Hi)، تقارن توپوگرافی عرضی (T) و نسبت شکل حوضه (Bs) محاسبه و نتایج ارزیابی آن‌ها با شاخص زمین‌ساخت فعال (IAT) بررسی شد. جهت ارزیابی ارتباط گسل‌ها با خطر زمین‌لغزش ابتدا نقشه گسل‌ها و نقشه‌های عوامل موثر بر لغزش با پردازش تصاویر ماهواره‌ای سنجنده لندست ۸ و نرم‌افزار ENVI تهیه و با مشاهدات میدانی بررسی شد. سپس با استفاده از مدل ارزش اطلاعاتی نقشه خطر زمین‌لغزش حوضه تهیه و با نقشه گسل‌ها تلفیق و ارتباط بین گسل‌ها و خطر زمین‌لغزش در محیط ArcGIS 10.3 بررسی شد. نتایج محاسبه شاخص‌های زمین‌ساخت فعال نسبی نشان می‌دهد که ۷۷/۷۷ درصد حوضه از نظر تکتونیک در کلاس فعال و در مدل ارزش اطلاعاتی ۵۵/۵۵ درصد وقوع لغزش‌ها در محدوده خطر ناپایداری زیاد قرار دارد. ضرایب فاصله از گسل در هر دو مدل مثبت و بیشترین لغزش‌ها در فاصله کمتر از ۱۰۰۰ متری رخ داده و به علت تکتونیک فعال ارتباط معناداری بین گسل‌ها و مناطق با خطر لغزش بالا در حوضه وجود دارد. نتایج نشان داد که مدل ارزش اطلاعاتی از عملکرد بهتری برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش برخوردار است. به طور کلی تنوع لیتولوژی، توپوگرافی، گسل‌های سراسری و محلی فراوان و وضعیت اقلیمی را می‌توان از مهم‌ترین عوامل موثر در رخداد و پراکنش لغزش‌های حوضه ذکر نمود.

واژه‌های کلیدی: زمین‌لغزش، مورفوتکتونیک، گسل، شاخص IAT، کردستان

پیشگفتار

ناحیه و برای تعیین سطح فعالیت‌های تکتونیک مفید هستند و از این اطلاعات برای بدست‌آوردن جزئیات زمین‌ساخت فعال در یک منطقه‌ی خاص استفاده می‌شود. در تحلیل زمین‌ساخت فعال حوضه با کمک شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) شناسایی و پهنه‌بندی فعالیت تکتونیک و پرخطرترین بخش منطقه بسیار مهم می‌باشد. چرا که بسیاری از عوارض ژئومورفیک در مقابل حرکات تکتونیک فعال حساس هستند و می‌توان با ارزیابی زمین‌ساخت منطقه، خطر برخی از عوامل موثر بر ناپایداری دامنه‌ها را مانند زمین‌لغزش بررسی کرد (عزتی و همکاران، ۱۳۹۳). شاخص‌های ژئومورفیک برای شناسایی نواحی‌ای که تغییر شکل سریع تکتونیک را تجربه کرده‌اند، یک ابزار کارآمد بوده و این اطلاعات جزئیات تکتونیک فعال یک منطقه خاص را به خوبی ارزیابی می‌کنند. هر یک از این شاخص‌ها ارائه‌دهنده یک طبقه‌بندی نسبی از میزان

با توجه به فعال بودن حرکات کوهزایی در برخی از نواحی ایران و برای آگاهی از میزان فعالیت نیروهای درونی و تکتونیک استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک بسیار ضروری به نظر می‌رسد. دانش تکتونیک ژئومورفولوژی، مطالعه ساختارهایی است که بر اثر تکتونیزم و عکس‌العمل میان فرآیندهای تکتونیک و ژئومورفولوژیکی حاصل شده است (جباری و همکاران، ۱۳۹۱). در سال‌های اخیر روش‌های نوزمین‌ساختی برای بررسی حرکات تکتونیک فعال، با استفاده از داده‌های ژئومورفولوژی و مورفوتکتونیک و تهیه نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش برای ارزیابی خطرهای لغزش با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک بسیار مهم بوده و به روش موثری تبدیل شده‌اند (رائو و همکاران، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۵). شاخص‌های مورفوتکتونیک برای شناسایی خصوصیات خاص یک

لذا هدف از این پژوهش پهنه‌بندی نسبی تکتونیک فعال حوضه آبخیز سد کردستان در شمال شرقی شهرستان سقز است. با تحلیل فعالیت زمین‌ساختی حوضه سد کردستان می‌توان یک پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای ارائه و ارتباط گسل‌ها با فعالیت نسبی را مشخص نمود. همچنین با توجه به رخداد لغزش در حوضه می‌توان ارتباط فعالیت نسبی تکتونیک را با خطر زمین‌لغزش بررسی و مناطق ناپایدار را شناسایی کرد. ترکیب چنین روشی موجب افزایش دقت در کلاس‌بندی قابل‌قبول درجه خطر با استفاده از شاخص‌های ارزیابی نسبی فعالیت تکتونیک و مدل پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش خواهد شد. لذا در این بررسی سعی شده فعالیت زمین‌ساختی و ارتباط گسل‌ها با خطر زمین‌لغزش به عنوان دو پدیده متأثر از فعالیت تکتونیک حوضه ارزیابی شود و از نتایج آن ضمن ارائه تحلیل روابط و افزایش دقت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش بتوان در جهت اتخاذ مدل‌های مناسب حفاظتی در راستای تثبیت دامنه‌های لغزشی و کاهش رسوب ورودی حاصل از لغزش‌ها به مخزن سد طرح و برنامه‌ریزی نمود.

تاکنون تحقیقات متعددی در رابطه با تکتونیک فعال و لغزش به طور مجزا در سایر نقاط جهان و ایران صورت گرفته و در طول دو دهه گذشته محققین طیف وسیعی از فرآیندهای مدل‌سازی و روش‌هایی را برای بهبود، پیش‌بینی و تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش‌ها توسعه داده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تکنیک‌های ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش‌ها به دو دسته کمی و کیفی تقسیم می‌شوند. تکنیک‌های کمی برای ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش شامل مدل رگرسیون لجستیک (دبویس و همکاران، ۲۰۱۵؛ شمس و همکاران، ۱۳۹۷)، آنتروپی (یوسف و همکاران، ۲۰۱۶)، مدل دمپستر شفر و وزن شاهد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۶)، مدل‌های نسبت فراوانی، وزن واقعه، شاخص آنتروپی و دمستر-شیفر (هونگ و همکاران، ۲۰۱۶)، مدل‌های ماشین‌بردار و آنتروپی (خان و همکاران، ۲۰۱۸)، مدل‌های حساسیت و مقایسه آن‌ها (برا و همکاران، ۲۰۱۹)، سیستم عصبی و منطق فازی (اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۳۹۹) و مدل‌های LNRF و WINF (زارع و همکاران، ۱۳۹۷) از آن جمله هستند. اما برخی از مدل‌های کیفی در شرایط جغرافیایی ویژه‌ای ارائه می‌شوند، به طوری که عوامل هر مدل متناسب با شرایط خاص آن منطقه بوده، یا بر بعضی عوامل تأکید بیشتری

فعالیت تکتونیک می‌باشد و وقتی که از چند شاخص برای یک ناحیه استفاده شود، نسبت به بکارگیری یک شاخص نتایج معناتری را ارائه می‌دهد. به طوری که با ترکیب نتایج چند شاخص با یکدیگر، رده فعالیت تکتونیک در سطح گسترده‌ای برای تخمین درجه نسبی فعالیت تکتونیک در یک ناحیه بهتر و دقیق‌تر مشخص می‌شود و می‌توان منطقه را به نواحی تکتونیک خلی، فعال، نیمه‌فعال و غیرفعال رده‌بندی نمود (کلر و همکاران، ۲۰۰۲). در این رابطه پژوهش‌های زیادی در ارتباط با بررسی تکتونیک فعال با استفاده از شاخص‌های ژئومورمتریک انجام شده که از آن جمله می‌توان به کارهای (توپال و همکاران، ۲۰۱۶؛ الحمدونی و همکارانش، ۲۰۰۸؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ شیرانی، ۱۳۹۷) اشاره کرد. اما مطالعات معدودی در زمینه استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتریک در رابطه با ارزیابی زمین‌لغزش‌ها و پهنه‌بندی و افزایش دقت نقشه‌های خطر زمین‌لغزش انجام شده است (کوستانزو و همکاران، ۲۰۱۲؛ چوسیانیتی و همکاران، ۲۰۱۶).

شاخص‌های کمی ژئومورفومتریک در شناسایی و پهنه‌های مناطق مستعد زمین‌لغزش از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و روش‌های متعددی به منظور بررسی ارتباط لغزش‌های یک منطقه با فعالیت نسبی تکتونیک وجود دارد. در این میان استفاده از تکنیک جداول متقاطع می‌تواند انطباق قابل قبولی بین نقشه‌های زمین‌لغزش و شاخص‌های مورفوتکتونیک ارائه دهد (احمدآبادی و همکاران، ۱۳۹۴). پس از تهیه نقشه پراکنش لغزش‌ها و بررسی شاخص‌های مورفوتکتونیک محدود می‌توان با استفاده از مدل پهنه‌بندی، خطر لغزش حوضه را طبقه‌بندی و سپس با استفاده از تکنیک جداول متقاطع و شمارش نقاط لغزشی، انطباق قابل قبولی بین نقشه‌های زمین‌لغزش و شاخص‌های مورفوتکتونیک ارائه نمود (حبیبی، ۱۳۹۴). بررسی‌ها نشان می‌دهد که ارزیابی پتانسیل مناطق نسبت به زمین‌لغزش از راه تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش امکان‌پذیر است و عبور گسل‌های بزرگ و فعال منجر به فعالیت تکتونیک بالا، شکستگی، لرزه‌خیزی، افزایش ناهمواری (توپوگرافی) و رخداد زمین‌لغزش در یک منطقه می‌شود و بیانگر این است که این مسئله نقش مهمی در افزایش احتمال رخداد انواع زمین‌لغزش‌ها دارد (هونگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ باسو و همکاران، ۲۰۱۹؛ بروکس و همکاران، ۲۰۱۸).

آبخیزداری و منابع طبیعی، برنامه‌ریزی محیط و آمایش سرزمین تبدیل شده است. در این زمینه می‌توان با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک فعالیت‌های تکتونیکی در نواحی مختلف را بررسی و به وسیله آن‌ها می‌توان اطلاعاتی در مورد نواحی خاصی از یک منطقه که در معرض فعالیت تکتونیکی نسبتاً سریع و یا حتی کند و کم قرار دارند، به دست آورد (صفاری و همکاران، ۱۳۹۷). در این مطالعه حوضه سد کردستان به دلیل ویژگی‌های تکتونیکی و ژئومورفولوژیکی مانند وجود گسل‌ها و سازندهای حساس به لغزش‌ها و با توجه به موقعیت سد مورد ارزیابی قرار گرفته تا مشخص شود که استعداد وقوع زمین‌لغزش را می‌توان با پارامترهای مورد استفاده برای ارزیابی تکتونیک فعال مورد بررسی قرار داد.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سد کردستان با مساحت ۱۲۰۱۵ هکتار در شمال شرقی شهرستان سقز استان کردستان و در محدوده طول جغرافیایی "۴۰°۰۰'۱۴" تا "۴۰°۰۹'۴۲" و عرض جغرافیایی "۳۶°۰۴'۰۰" تا "۳۶°۰۸'۰۰" واقع و حداکثر ارتفاع حوضه ۲۶۵۴ متر و حداقل ارتفاع ۱۶۰۲ متر از سطح دریا می‌باشد (شکل ۱). متوسط درجه حرارت حوضه ۱۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سه دهه گذشته برابر ۵۲۱ میلی‌متر بوده و این در حالی است که در بعضی از سال‌های پرباران میزان بارندگی از مرز ۷۰۰ میلی‌متر نیز تجاوز نموده است. حوضه مورد مطالعه در زون دگرگونی سندانج-سیرجان قرار گرفته و از واحدهای سنگی دگرگونی، آذرین و رسوبی شامل شیست، گرانیت، شیل، آهک، دولومیت و ماسه‌سنگ با گسل‌ها و شکستگی‌های فراوان تشکیل شده و دارای اقلیم سرد مرطوب کوهستانی است.

روش تحقیق

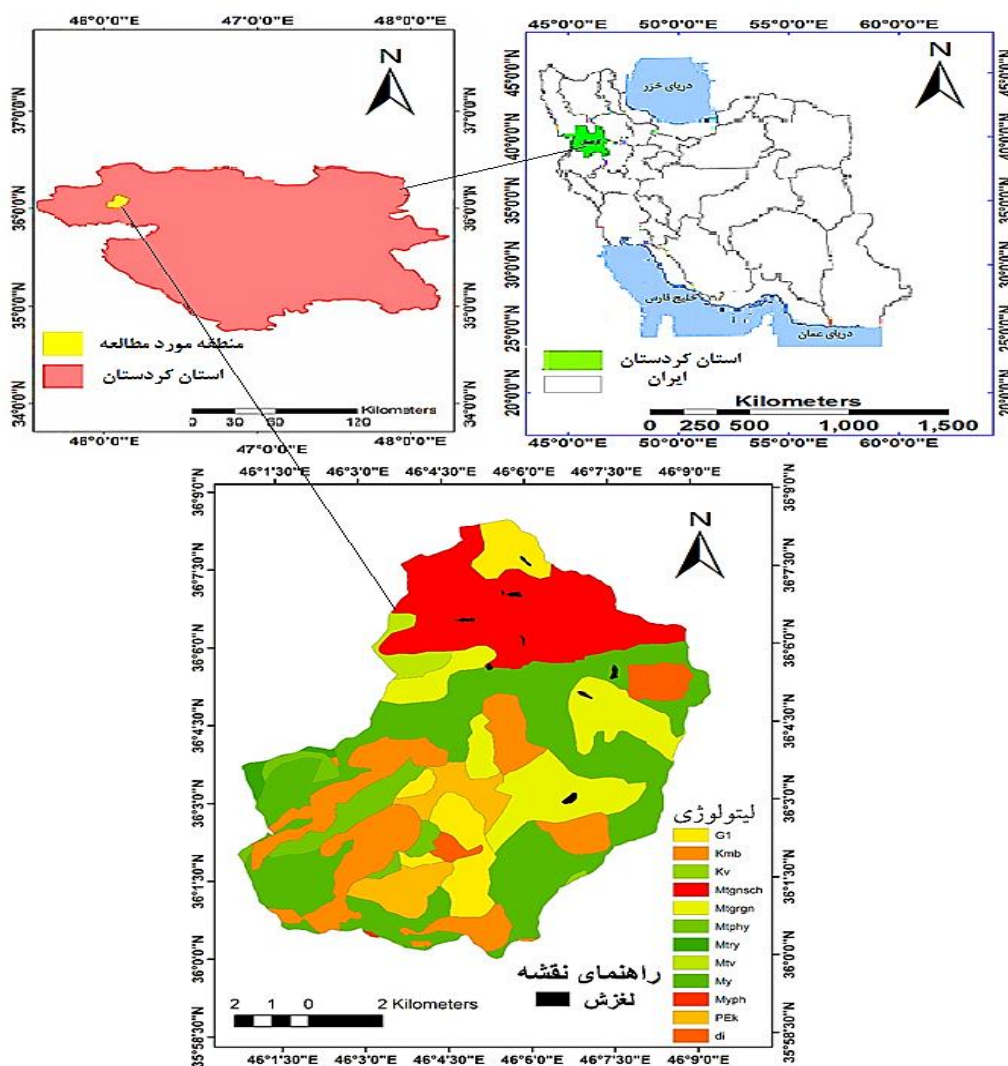
در این بررسی پس از تعیین محدوده مورد مطالعه بر روی نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، با استفاده از عکس‌های هوایی ۱:۴۰۰۰۰، (خط پرواز ۱۴-۱۵-۱۶) و مشاهدات میدانی تعداد ۹ لغزش رخ داده با دستگاه GPS تعیین موقعیت و نقشه پراکنش زمین‌لغزش تهیه شد. در مرحله بعد با استفاده از داده‌های سنجنده لندست ۸ (سنجنده ETM) باند ۱۶۸- (شکل ۲) و به روش نظارت شده نقشه کاربری

شده و ممکن است برای مناطق دیگر چندان مناسب نباشد. نظیر فرآیند تحلیل سلسله مراتبی ANP که مفهوم وزن‌دهی و رتبه‌بندی را نیز در نظر می‌گیرند و ممکن است نیمه کمی نیز نامیده شوند. که می‌توان به مدل‌های سلسله مراتبی (رجبی و همکاران، ۱۳۹۵)، مدل‌های ارزش اطلاعاتی، تراکم سطح و ال.ان.آ.راف (ایلانلو و همکاران، ۱۳۹۵) مدل ارزش اطلاعات و تراکم سطح (پرتابیان و همکاران، ۱۳۹۶) مدل تراکم سطح، تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و رگرسیون لجیستیک (ایلدرمی و همکاران، ۱۳۹۶؛ عابدینی و همکاران، ۱۳۹۸؛ روستایی و همکاران، ۱۳۹۸) اشاره نمود.

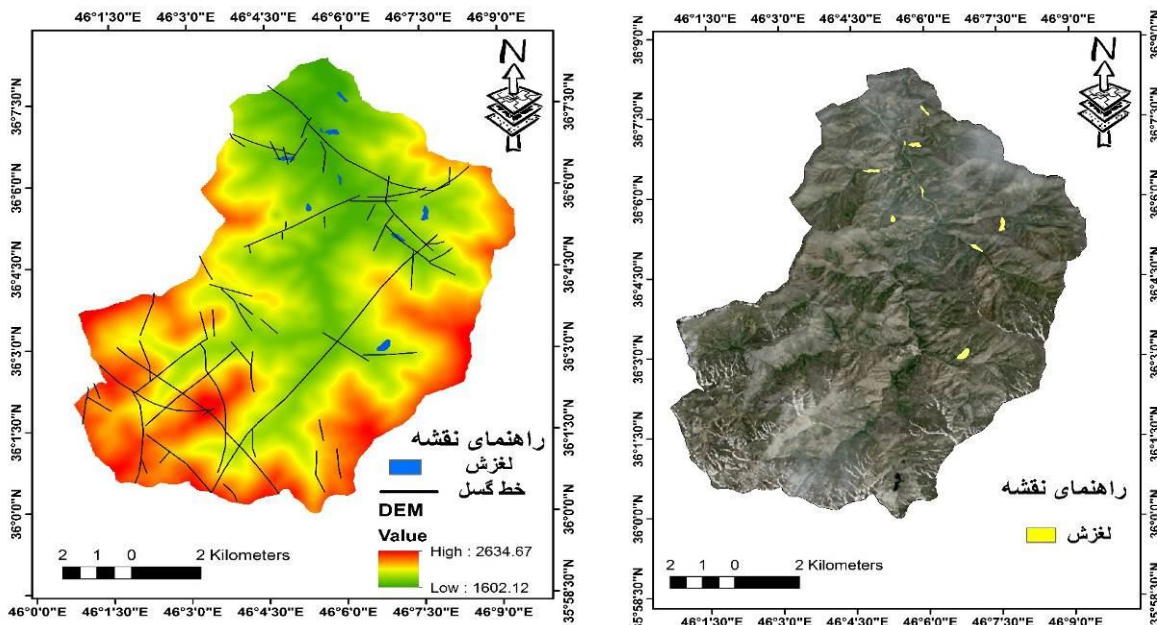
بررسی‌ها نشان می‌دهد که هر یک از روش‌های پهنه‌بندی، مزایا و معایب خاص خود را دارند. بطوری‌که هیچ روش جامع و مورد قبول تمامی محققین در سراسر دنیا وجود ندارد. بر این اساس و با توجه به شرایط هر منطقه، می‌بایست روش مناسب انتخاب و پهنه‌بندی بر اساس آن روش صورت گیرد. در این میان استفاده از روش‌های ترکیبی جهت کاهش خطاها و ارزیابی دقت آن‌ها بسیار مهم و ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک در بررسی فعالیت‌های تکتونیکی به عنوان یک ابزار مفید و قابل اطمینان مورد توجه بسیار قرار گرفته است. زیرا با استفاده از آن‌ها می‌توان مناطقی را که در گذشته فعالیت‌های سریع و یا کند تکتونیکی را تجربه کرده‌اند، به راحتی شناسایی نمود (صفاری و همکاران، ۱۳۹۷). از طریق بررسی شاخص‌های مورفوتکتونیک می‌توان زمین‌لغزش‌ها را ارزیابی و پهنه‌بندی کرد. امروزه این شاخص‌ها از روش‌های کارآمد برای ارزیابی وضعیت تکتونیکی و پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌ها به شمار می‌آیند و یکی از موضوعات مهمی است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است (بهاروند و همکاران، ۱۳۹۷؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۷؛ صفاری و همکاران، ۱۳۹۷؛ شیرانی، ۱۳۹۷؛ شارما و همکاران، ۲۰۱۷؛ راثو و همکاران، ۲۰۱۷). چرا که با استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیک می‌توان نقشه‌هایی تهیه کرد که در پیش‌بینی مکان‌هایی که در اثر زلزله‌های آتی دچار ناپایداری می‌شوند، برنامه‌ریزان را یاری داد. در حال حاضر مسئله ناپایداری دامنه‌ها و زمین‌لغزش‌ها یکی از موضوعات مهم و مورد توجه دانشمندان علوم ژئومورفولوژی، مهندسی زمین‌شناسی و ژئوتکنیک و رشته‌های مرتبط دیگر چون

حوضه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.3 شاخص‌های ارزیابی نسبی فعالیت تکتونیکی (IRAT) (Relative Active Tectonics Index) شامل پنج شاخص SL، AF، Hi، T و Bs محاسبه و نقشه کلاس‌بندی نسبی فعالیت تکتونیکی هر یک از شاخص‌ها در سه کلاس خطر شدید، متوسط و کم تهیه گردید (جدول ۲). پس از کلاس‌بندی هر یک از شاخص‌ها، آن‌ها با هم جمع شده و بر تعداد کل شاخص‌ها تقسیم و نقشه ارزیابی نسبی فعالیت تکتونیکی تهیه و با نقشه پراکنش لغزش‌ها بر همدیگر در محیط GIS انطباق داده شد (الحمودنی و همکاران، ۲۰۰۸). در نهایت با بهره‌گیری از تکنیک جداول متقاطع و شمارش نقاط لغزشی در هر پهنه همبستگی شدت فعالیت تکتونیکی و زمین‌لغزش‌ها بر اساس میزان انطباق شاخص مورفوتکتونیک و رخداد زمین‌لغزش‌ها در مدل ارزیابی شد.

اراضی با نرم‌افزار ENVI تهیه شد. همچنین نقشه‌های لیتولوژی و فاصله از گسل و تراکم گسل از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ استان تهیه گردید. سپس نقشه بارندگی با استفاده از روش درونیابی معکوس وزنی (IDW) بر اساس میانگین بلند مدت سالیانه بارندگی ایستگاه سد، نقشه‌های شیب، ارتفاع با استفاده از نقشه DEM (۵۰ متر)، (شکل ۳) فاصله از رودخانه بر اساس فواصل از طرف شبکه آبراهه‌های منطقه تهیه و برای هر یک از ویژگی‌های موثر، لایه‌های اطلاعاتی مجزا تهیه شد. در نهایت با امتیازدهی به عوامل موثر و با استفاده از مدل آماری ارزش اطلاعاتی تمامی لایه‌ها جداگانه وزن‌دهی و نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با روی هم‌گذاری لایه‌ها به وسیله نرم‌افزار Arc/GIS10.3 در حوضه سد کردستان تهیه گردید. سپس منطقه به ۱۵ زیرحوضه تقسیم (شکل ۴) و در داخل هر

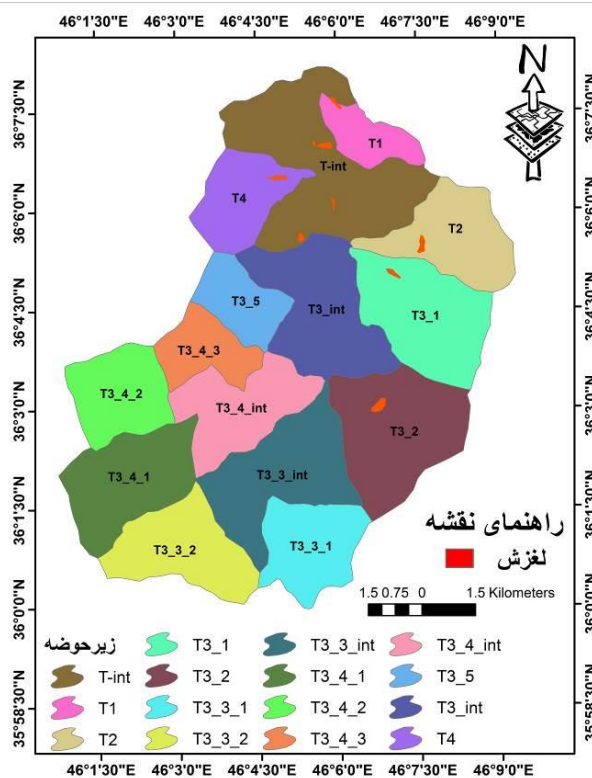


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. محل زمین‌لغزش‌های حوضه بر روی تصویر ماهواره‌ای

شکل ۳. نقشه مدل رقومی ارتفاعی، لغزش‌ها و گسل‌های منطقه



شکل ۴. نقشه پراکنش حرکات توده‌ای در سطح زیرحوضه‌های سد

$$IAT = S/N$$

(۱)

که در آن S مجموع طبقات شاخص‌های ژئومورفیک و N تعداد شاخص‌های محاسبه شده می‌باشد. در این بررسی بر اساس مقدار IAT شدت فعالیت‌های زمین‌ساختی هر زیر حوضه مشخص شده است. اگر $1 < IAT < 1/5$ فعالیت‌های زمین‌ساختی شدید، $2 < IAT < 1/5$ فعالیت‌های تکتونیکی

معرفی شاخص‌های ارزیابی نسبی فعالیت تکتونیکی (IAT)

جهت تعیین میزان فعالیت تکتونیکی از پنج شاخص SL، Hi، AF، T و Bs در حوضه استفاده شده تا ارتباط بین نقاط لغزشی با شدت فعالیت تکتونیکی (IAT) مشخص شود (الحمدونی و همکاران، ۲۰۰۸) (رابطه ۱).

شاخص هیپسومتریک (Hi^3)

این شاخص توزیع ارتفاعات (پستی و بلندی) را در راستای عمود بر یک ناحیه از زمین یا یک حوضه زهکش توصیف می‌کند. این شاخص بیانگر توزیع مساحت به ازای ارتفاعات می‌باشد که متفاوت است (رابطه ۴). کلاس (۱) دارای شاخص هیپسومتریک $Hi > 0.5$ و کلاس (۲) در کلاس $0.4 < Hi < 0.5$ و کلاس (۳) کوچک تر از 0.4 می‌باشد.

$$Hi = (H_{Ave} - H_{min}) / (H_{max} - H_{min}) \quad (4)$$

شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (T)^۴

این شاخص عدم تقارن توپوگرافی در شبکه زهکشی را در حوضه‌هایی با لیتولوژی تقریباً همسان با عملکرد تکتونیک فعال را نشان می‌دهد. مقدار T برداری با جهت‌گیری خاص و با مقادیری از صفر تا یک می‌باشد که مقادیر عددی نزدیک به ۱ می‌تواند بیانگر فعالیت مورفودینامیکی و فرسایش باشد و بر عکس. اگر T برابر صفر باشد، حوضه متقارن و آرام است و اگر T به سمت یک میل کند، حوضه نامتقارن و از لحاظ تکتونیک فعال است که با رابطه (۵) تعریف می‌شود (علی پور و همکاران، ۲۰۱۱).

$$T = Da/Dd \quad (5)$$

که در آن Da : فاصله نواری رودخانه از خط میانی حوضه Dd : فاصله خط میانی حوضه تا مرز حوضه است.

شاخص نسبت شکل حوضه (Bs^5)

حوضه‌های فعال تکتونیک، از لحاظ شاخص شکل حوضه (Bs) دارای شکل کشیده‌های می‌باشند. به طور کلی شکل حوضه با توقف فعالیت تکتونیک در طول زمان با کاهش میزان بالآمدگی مواجه بوده، به تدریج دایره‌ای شکل می‌شود. این شاخص با رابطه (۶) بیان می‌شود (بول و مک فادن، ۱۹۷۶؛ رامیرز، ۱۹۸۸).

$$Bs = BI/Bw \quad (6)$$

که در آن BI : بیشترین طول حوضه و Bw : بیشترین عرض حوضه می‌باشد. اگر Bs : بزرگ‌تر از چهار باشد کلاس (۱) و بین سه تا چهار کلاس (۲) و کمتر از سه کلاس (۳) می‌باشد. بطور کلی نحوه ارزیابی شدت فعالیت تکتونیک شاخص‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

زیاد، $2 < IAT < 2/5$ فعالیت‌های زمین‌ساختی متوسط، $IAT < 2/5$ فعالیت‌های کم و ناچیز است.

شاخص شیب طولی رودخانه (SL^1)

این شاخص با توجه به تغییرات شیب آبراهه هرگونه بی‌نظمی را که در اثر فعالیت‌های تکتونیک یا مقاومت سنگ در شیب طولی آبراهه ایجاد شده را نشان می‌دهد و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$SL = (\Delta H / \Delta L) \cdot L \quad (2)$$

که در آن ΔH : اختلاف ارتفاع مقطع اندازه‌گیری شده ΔL : فاصله افقی اندازه‌گیری شده و L : طول رودخانه از نقطه مرکزی مقطع تا سرچشمه می‌باشد (دلاستا، ۲۰۰۸: ۱۱۹). الحمدونی و همکاران (۲۰۰۸) سه کلاس تکتونیک را برای ارزیابی این شاخص تعیین نموده‌اند که شامل: طبقه (۱) با فعالیت تکتونیک بالا $SL > 500$ و کلاس (۲) با فعالیت تکتونیک متوسط $300 \leq SL < 500$ و کلاس (۳) با فعالیت تکتونیک کم $SL < 300$ است.

شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی (AF)^۲

این شاخص کج‌شدگی جانبی حوضه در اثر نیروهای تکتونیک را نسبت به مسیر اصلی رودخانه نشان می‌دهد و با رابطه (۳) تعریف می‌شود. بر طبق نظر الحمدونی و همکاران (۲۰۰۸)، هر گاه مقادیر عددی این شاخص در حدود ۵۰ باشد، بیانگر وجود تقارن زهکش‌های فرعی نسبت به آبراهه اصلی و در نتیجه عدم وجود کج‌شدگی بر اثر فرایش خواهد بود. مقادیر عددی بیشتر از ۵۰ نشان دهنده عملکرد فرایش در ساحل سمت راست و مقدار کمتر از ۵۰، فرایش را در ساحل سمت چپ نمایش می‌دهد، که موجب انحراف کلی رودخانه به سمت ساحل راست حوضه زهکشی می‌گردد. به عبارت دیگر $AF - 50 > 15$ نشان‌دهنده فعالیت تکتونیک بسیار فعال، $7 < AF - 50 < 15$ بیانگر فعالیت تکتونیک متوسط و اگر $AF - 50 < 7$ باشد، یعنی منطقه غیرفعال است، که از رابطه (۳) قابل محاسبه می‌باشد.

$$AF = 100(Ar/At) \quad (3)$$

Ar : مساحت حوضه در سمت راست آبراهه اصلی و At : مساحت کل حوضه است.

⁵ Drainage Basin Shape Index

¹ Stream Length Gradient Index

² Asymmetric Factor

³ Hypsometric Integra

⁴ Transverse Topographic Symmetry Factor

جدول ۱. نحوه ارزیابی شدت فعالیت تکتونیکی شاخص‌ها

کلاس	فعالیت تکتونیکی	SI	Af	Hi	Bs	T
۱	زیاد	$sl \geq 500$	$[Af-50] > 15$	$0.1-0.55$	$4 <$	۱
۲	متوسط	$300 \leq SL < 500$	$[Af-50] = 7-15$	$0.10-0.45/0.55$	$4-3$	$0 > T < 1$
۳	کم	$SL < 300$	$[Af-50] < 7$	$0-1/45$	$3 >$	۰

مدل ارزش اطلاعاتی (Winf)

مدل ارزش اطلاعاتی از مدل‌های آماری دومتغیره می‌باشد که در آن تحلیل‌ها با همپوشانی نقشه‌های عوامل موثر و تراکم زمین‌لغزش‌های حوضه انجام می‌شود. در تحلیل‌های آماری دومتغیره با یک متغیر وابسته (زمین‌لغزش‌های رخ داده در حوضه) و یک متغیر مستقل (ویژگی موثر در وقوع زمین‌لغزش) انجام و اهمیت هر ویژگی جداگانه تحلیل و بررسی می‌شود. این مدل براساس این فرض بنا شده‌اند که عوامل مهمی که منجر به زمین‌لغزش می‌شوند، می‌توانند به واسطه محاسبه تراکم زمین‌لغزش‌ها برای هر کلاس از متغیر کمی شوند (نیازی و همکاران، ۲۰۱۰). در این بررسی جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش از مدل ارزش اطلاعاتی و نرم‌افزار Arc/GIS10.3 استفاده شده است.

$$Winf = Ln [A/B / C/D] \quad (7)$$

که در آن: Winf: وزن ارزش اطلاعاتی، Ln: لگاریتم طبیعی، A: مساحت زمین‌لغزش‌های رخ داده در هر کلاس (ha)، B: مساحت هر کلاس (ha)، C: مساحت زمین‌لغزش‌های حوضه (ha)، D: مساحت حوضه مورد بررسی (ha). با جمع جبری وزن لایه‌های اطلاعاتی، احتمال رخ داد زمین‌لغزش کلی محاسبه و نقشه پهنه‌بندی خطر تهیه می‌شود. ایلانلو و همکاران (۱۳۹۵) ابتدا با امتیازدهی به عوامل موثر شامل سنگ‌شناسی، بارش، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل، شیب، ارتفاع لایه‌های اطلاعاتی مجزا تهیه و نقشه پهنه‌بندی پتانسیل لغزش با روی هم‌گذاری لایه‌ها به وسیله نرم‌افزار Arc/GIS10.3 در حوضه سد کردستان در سه رده خطر زیاد، متوسط و کم تهیه شد. جهت بررسی رابطه بین متغیرها با حالات یا مقادیر محدود، نقشه واحد کاری به صورت واحد شبکه‌ای به اندازه $50 * 50$ متر و به تعداد 48060 (پیکسل) تهیه شد. در نهایت جدول خروجی از نقشه‌ها برای هر سلول (واحد شبکه‌ای) و بر اساس متغیر وابسته (y) دارای لغزش، که در آن مساحت هر عامل به صورت متغیر مستقل تعیین گردیده و یا اینکه وقوع لغزش

(۱) و عدم وقوع آن (۰) نشان داده شده تهیه و برای تحلیل داده‌های تهیه شده از نرم‌افزار Spss16 استفاده شده است. به منظور تعیین درجه حساسیت واحدهای شبکه‌ای به وقوع لغزش، بر اساس رابطه (۸)، نسبت به وزن‌دهی عوامل موثر به ویژه گسل پرداخته و در نهایت نقشه حساسیت‌پذیری نسبت به وقوع لغزش بر اساس اینکه تراکم سطح رده به تراکم سطح نقشه تقسیم می‌شود، تهیه شده است.

$$Lnwi = \frac{Npix(Si) / Npixl(Ni)}{[\sum Npix(Si) / \sum Npixl(Ni)]} \quad (8)$$

w: نوزن داده شده به یک رده عامل ویژه

Ln: مولفه تراکم سطح که برابر است با چگالی زمین‌لغزش

در رده عامل بر چگالی زمین‌لغزش در کل نقشه

(N pix (Si): تعداد واحدهای شبکه‌ای که در یک رده از

عامل ویژه دارای زمین لغزشند

(N pix (Ni): تعداد کل واحدهای شبکه‌ای در رده‌های

عامل ویژه

بررسی ارتباط گسل‌ها با نقشه‌های خطر زمین‌لغزش

جهت بررسی ارتباط گسل‌ها با خطر زمین‌لغزش، ابتدا نقشه شکستگی‌ها، گسل‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی و نقشه‌های زمین‌شناسی تهیه و برای تهیه نمودارهای گل سرخی از اکستنشن Polar-Plots در محیط نرم‌افزار Arc/GIS10.3 استفاده شد. جهت بررسی روند گسل‌های حوضه و عوامل موثر بر لغزش‌ها و تلفیق آن با نقشه گسل‌ها (ارتباط بین گسل‌ها و نقشه خطر زمین‌لغزش) در مدل‌های ارزش اطلاعاتی و IAT نیز از نرم‌افزار Arc/GIS10.3 استفاده شده است. بر اساس تکنیک جداول متقاطع بین متغیرهای واحد سنگ‌شناسی و گسل با رخداد لغزش تفاوت‌های موجود بررسی و مقادیر رخداد لغزش با لیتولوژی و گسل مقایسه و ارزیابی شد. تا مشخص شود بیشترین لغزش‌ها در کدام واحدهای سنگ‌شناسی و گسل اتفاق افتاده و در این رابطه از روش تحلیل آماری مربع کای (کمی) پیرسون استفاده و با

نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های حوضه، اگر درصد گسیختگی در طبقه‌های با خطر زیاد بیشتر باشد و روند توزیع درصد گسیختگی، از طبقه‌های کم خطر به سمت کلاس با خطر زیاد افزایش یابد و روند آن صعودی باشد، بیانگر این است که مدل در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش مناسب است. اگر این روند نزولی یا به شکل یکسان باشد، نشان دهنده کارایی ضعیف مدل است. شاخص آماری نسبت تراکمی با Dr تقریباً نشان داده می‌شود و از رابطه زیر محاسبه می‌شود (مصفايي و همکاران، ۲۰۰۹).

$$Dr = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{A_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{A_i}} \quad (11)$$

در این رابطه، S_i : مجموع مساحت زمین‌لغزش‌های واقع در هر پهنه خطر، A_i : مساحت پهنه خطر هدف در یک نقشه پهنه‌بندی $\sum S_i$: مجموع کل مساحت‌های زمین‌لغزش‌ها در حوضه آبخیز، $\sum A_i$: مساحت کل حوضه آبخیز.

شاخص‌های جمع کیفیت

پس از محاسبه مقدار Dr با استفاده از شاخص جمع کیفیت یا Q_s ، مقایسه عملکرد مدل‌ها ارزیابی شد. مقدار Q_s ، انحراف مقدار Dr برای هر یک از نقشه‌های داده شده از مقدار متوسط یک و جمع مربعات این انحراف‌ها بعد از به کار بردن یک نوع وزن‌دهی را نشان می‌دهد. Q_s بیشتر نمایانگر جداشدگی بهتر رده‌های مختلف خطر است، به طوری که هر چه مقدار جمع کیفیت بیشتر باشد، آن مدل برای منطقه مناسب‌تر است (مصفايي، ۱۳۸۵؛ نیازی و همکاران، ۲۰۱۰).

$$Q_s = \sum_{i=1}^n ((Dr - 1)^2 \times S) \quad (12)$$

Q_s : شاخص جمع مطلوبیت، S : نسبت مساحت هر کلاس خطر به مساحت کل حوضه، Dr : تراکم لغزش در هر کلاس خطر، n : تعداد کلاس‌های خطر.

نتایج و بحث

بررسی نتایج حاصل از ارزیابی شاخص‌های نسبی فعالیت تکتونیکی (مدل IAT) نشان می‌دهد که ۶ زیرحوضه دارای فعالیت تکتونیکی شدید و ۷ زیرحوضه متوسط و ۲ زیرحوضه دارای فعالیت تکتونیکی کم می‌باشند و نشان می‌دهد که مقدار آن بین ۱/۸ تا ۲/۶ متغیر بوده و حوضه از نظر تکتونیکی در کلاس فعال قرار دارد (شکل ۵،

ارزیابی و بهره‌گیری از تکنیک جداول متقاطع و شمارش نقاط لغزشی در هر پهنه لغزشی، همبستگی شدت فعالیت تکتونیکی و زمین‌لغزش‌ها بر اساس میزان انطباق شاخص مورفوتکتونیک و رخداد زمین‌لغزش‌ها در مدل IAT و مدل ارزش اطلاعاتی با گسل‌ها بررسی شده است.

ارزیابی و مقایسه کارایی مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

به منظور ارزیابی مدل‌های ارزش اطلاعاتی و (IAT) برای پیش‌بینی خطر وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه سد کردستان، از سه شاخص زمین‌لغزش، ویژگی دقت، نتایج پیش‌بینی شده و نسبت تراکمی استفاده شد.

شاخص زمین‌لغزش (Li) Land slide Index

شاخص زمین‌لغزش درصد نسبت سطح لغزش در هر پهنه به مساحت آن پهنه، تقسیم بر نسبت مجموع لغزش به سطح کل پهنه‌ها است (پورهاشمی، ۲۰۱۴).

$$Li = \left(\frac{S_i}{A_i} \right) / \left(\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{A_i} \right) \times 100 \quad (9)$$

Li : شاخص وقوع لغزش

در هر پهنه خطر (به درصد)

S_i : مساحت لغزش در هر پهنه خطر

A_i : مساحت هر پهنه خطر

N_i : تعداد کلاس‌های خطر

ویرژگی دقت نتایج پیش‌بینی شده Percision of the predicted result

برای مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی شده از ویژگی دقت - نتایج پیش‌بینی شده (P) استفاده شده است. شاخص آماری دقت نتایج پیش‌بینی شده برای پهنه‌های خطر لغزش زیاد و خیلی زیاد کاربرد دارد (نیازی و همکاران، ۲۰۱۰).

$$P = Ks/S \quad (10)$$

P : دقت مدل در پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد، Ks : مساحت سطح لغزشی یافته در پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد

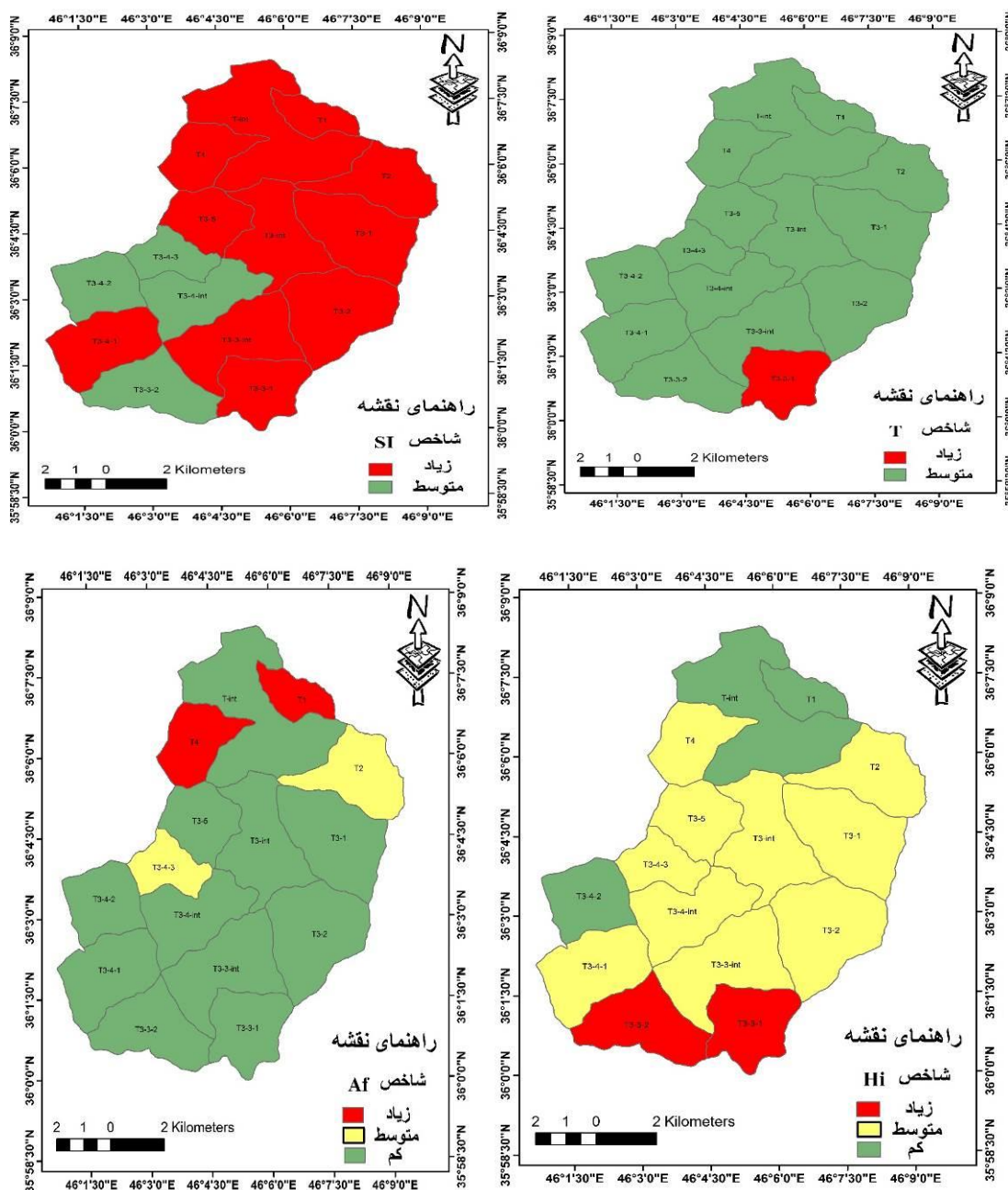
S : مساحت پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد.

نسبت تراکمی

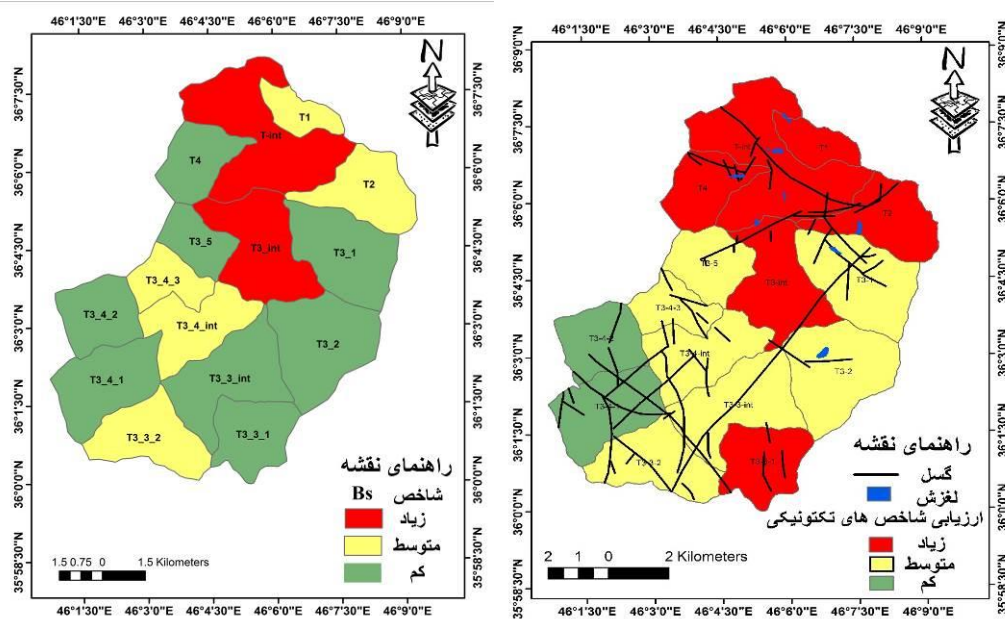
از شاخص نسبت تراکمی برای ارزیابی توانایی مدل در تشخیص کلاس خطر استفاده می‌شود. هر چه تفکیک بین طبقه‌های خطر بهتر باشد، مدل تواناتر است. پس از انطباق

نشان می‌دهد که ۲۰/۱ درصد در کلاس خطر زیاد، ۵۳/۷۵ درصد در کلاس متوسط و ۲۶/۱۵ درصد در کلاس خطر کم قرار دارد و نشان می‌دهد که ۵ لغزش با مساحتی برابر ۲۴۱۴/۴۵ هکتار و با ۵۵/۵۵ درصد رخداد وقوع لغزش در کلاس خطر زیاد، ۳ لغزش با وسعتی معادل ۶۴۵۸/۱۲ هکتار و با ۳۳/۳۳ درصد رخداد وقوع لغزش در کلاس متوسط و ۱ لغزش با مساحتی برابر ۳۰۳/۸۵ و ۱۱/۱۲ درصد رخداد وقوع لغزش در کلاس کم خطر قرار دارند (شکل ۶ و جدول ۵).

جدول‌های ۲ و ۳. نتایج حاصل از پهنه‌بندی فعالیت نسبی تکتونیکی در مدل IAT درحوضه سد کردستان نشان می‌دهد که ۴۰/۵ درصد از منطقه در فعالیت تکتونیکی زیاد و ۴۷/۴ درصد در کلاس متوسط و ۱۲/۱ درصد در کلاس کم خطر قرار دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تعداد ۷ لغزش در پهنه خطر زیاد با وسعتی معادل ۲۸۲۷/۵۲ هکتار و با ۷۷/۷۷ درصد وقوع، تعداد ۲ لغزش با مساحتی برابر ۸۰۸/۵ هکتار و ۲۲/۲۳ درصد وقوع در کلاس متوسط قرار دارد (شکل ۵ و جدول ۴). بررسی و تحلیل نقشه پهنه‌بندی خطر لغزش حوضه در مدل ارزش اطلاعاتی



شکل ۵. ارزیابی شاخص‌های فعالیت تکتونیکی IAT



ادامه شکل ۵. ارزیابی شاخص‌های نسبی فعالیت تکتونیکی IAT

جدول ۲. نتایج ارزیابی شاخص‌های شدت فعالیت تکتونیکی و IAT

Sl	Hi	T	Af	Bs	IAT	فعالیت نسبی تکتونیکی	مساحت Km2	زیر حوضه
۱	۲	۲	۱	۳	۱/۸	شدید	۵/۸۲	T4
۱	۳	۲	۳	۳	۲/۴	متوسط پایین	۱۰/۳۲	T3-1
۱	۲	۲	۳	۳	۲/۲	متوسط پایین	۱۰/۸۳	T3-2
۱	۱	۱	۳	۳	۱/۸	شدید	۶/۷۸	T3-3-1
۳	۱	۲	۳	۲	۲/۲	متوسط پایین	۷/۹۱	T3-3-2
۱	۳	۲	۳	۳	۲/۴	متوسط پایین	۹/۹۳	T3-3-int
۳	۲	۲	۳	۳	۲/۶	کم	۸/۳۲	T3-4-1
۲	۳	۲	۳	۳	۲/۶	کم	۶/۱۸	T3-4-2
۳	۲	۲	۲	۲	۲/۲	متوسط پایین	۴/۲۵	T3-4-3
۲	۳	۲	۳	۲	۲/۴	متوسط پایین	۷/۹۶	T3-4-int
۱	۳	۲	۳	۳	۲/۴	متوسط پایین	۵/۷۹	T3-5
۱	۳	۲	۳	۱	۲	شدید	۹/۲۳	T3-int
۱	۲	۲	۲	۲	۱/۸	شدید	۷/۵۷	T2
۱	۳	۲	۱	۲	۱/۸	شدید	۳/۳۸	T1
۱	۳	۲	۳	۱	۲	شدید	۱۵/۸۹	T-int

جدول ۳. نتایج ارزیابی شاخص‌های شدت فعالیت تکتونیکی و IAT

Sl	Hi	Tp	Af	Bs	IAT	کلاس بندی	مساحت Km2	حوضه
۱	۳	۲	۳	۱	۲	شدید	۱۲/۱۵	سد کردستان

جدول ۴. مساحت مناطق از لحاظ حساسیت به فعالیت تکتونیکی (IAT) و تعداد زمین‌لغزش مشاهده شده

روش	کلاس خطر	مساحت کلاس خطر (هکتار)	درصد مساحت کلاس خطر	تعداد رخداد زمین‌لغزش	مساحت زمین لغزش (هکتار)	درصد وقوع زمین لغزش
IAT	زیاد	۴۸۶۶/۸۵	۴۰/۵	۷	۲۸۲۷/۵۲	۷۷/۷۷
	متوسط	۵۶۹۵/۶	۴۷/۴	۲	۸۰۸/۵	۲۲/۲۳
	کم	۱۴۵۲/۵۵	۱۲/۱	۰	۰	۰

جدول ۵. نتایج حاصل از نقشه مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه با مدل ارزش اطلاعات

روش	کلاس خطر	مساحت کلاس خطر (هکتار)	درصد مساحت کلاس خطر	تعداد رخداد زمین‌لغزش	مساحت زمین لغزش (هکتار)	درصد وقوع زمین‌لغزش
ارزش اطلاعاتی	زیاد	۲۴۱۴/۴۵	۲۰/۱	۵	۱۹۵۲/۸۸	۵۵/۵۵
	متوسط	۶۴۵۸/۱۲	۵۳/۷۵	۳	۱۳۷۹/۲۹	۳۳/۳۳
	کم	۳۱۴۲/۴۳	۲۶/۱۵	۱	۳۰۳/۸۵	۱۱/۱۲

به منظور ارزیابی تاثیر نرخ کلاس‌های عوامل موثر در وقوع زمین‌لغزش، پراثرترین و کم‌اثرترین کلاس‌های مربوط به هر کدام از عوامل در مدل‌ها بررسی شد (جدول‌های ۶ و ۷) و از آنجایی‌که عملکرد گسل‌ها در حوضه به صورت مستقیم (حرکت ناشی از انرژی گسل) و به صورت غیرمستقیم (تاثیر لیتولوژی) سبب رخداد لغزش‌ها در حوضه شده لذا دو عامل گسل و لیتولوژی مورد ارزیابی دقیق‌تر قرار گرفته است. واحدهای سنگی حوضه دربرگیرنده سنگ‌های دگرگونی- آذرین و رسوبی می‌باشند که به همراه واحدهای آبرفتی دوران چهارم و عهد حاضر در نقاط مختلف حوضه رخنمون دارند. قدیمی‌ترین واحد سنگی حوضه در برگیرنده گنایس و گرانیت گنایس (Mtgr-gn) است که مربوط به پرکامبرین می‌باشد. پس از آن واحد میکاشیست و گنایس (Mtgn-sch) و متاریولیت، گنایس و شسیت (Mtry) و واحد متاولکانیک (MtV) و اسلیت و فیلیت (Mtphy) و شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سازند کهر (PEKsh) که این واحد در مناطق مرکزی و جنوبی حوضه به شکل محدود و تنها به صورت دو واحد کوچک رویت می‌شود. لیتولوژی آن در برگیرنده سنگ‌های دگرگونی از قبیل اسلیت و فیلیت است که به رنگ سبز متمایل به خاکستری رویت می‌شوند. این واحد دارای میان لایه‌های ماسه‌سنگی نیز می‌باشد. لایه‌بندی در اسلیت‌ها از نوع لایه متوسط می‌باشد. این واحد نماینگر وجود محیط رسوب‌گذاری دلتایی در هنگام رسوب‌گذاری است که رسوبات شیلی و ماسه‌سنگی در آن برجای گذاشته می‌شده است و همگی با سن پرکامبرین قرار دارند. دوران دوم در این منطقه شامل شیل - آهک شیلی - آهک (Mtksl) و دولومیت و آهک (Kbm) با سن کرتاسه می‌باشد. در دوران چهارم واحد تراس‌های آبرفتی قدیمی (Qt1) و در عهد حاضر واحد آبرفت رودخانه‌ای (Qal) برجای گذاشته شده‌اند. بخش اعظم مساحت حوضه در برگیرنده ارتفاعاتی با شیب توپوگرافی می‌باشد و میزان نهشته‌های رسوبی حوضه بسیار کم است. این نهشته‌ها شامل تراس‌های

مجموعه سنگ‌های آذرین و رسوبی منطقه بطور عمده شامل سنگ‌های آتشفشانی اسیدی، مافیک و آتشفشانی- رسوبی بوده که در زمان کرتاسه تحت رخساره شیست‌سبز دگرگون شده و همزمان تحت تاثیر عملکرد پهنه‌های برشی با روند شمال‌شرقی - جنوب‌غربی قرار گرفته و دگرریخت شده‌اند. تنوع فازهای کوهزایی شامل دگرریختی‌ها، دگرگونی‌ها و ماگماتیسم سبب شده که توالی‌های سنگی رخنمون یافته در منطقه نظم و ترتیب اولیه خود را از دست داده و واحدهای لیتولوژی مختلف با ساختارها و فابریک‌های متفاوت در کنار هم دیده شوند. بنابراین واحدهای سنگی منطقه شامل سکانس به نسبت کاملی از سنگ‌های پرکامبرین تا ترشیری همراه با رسوبات کواترنری به همراه توده‌های نفوذی با سنین مختلف از پرکامبرین تا ترشیری می‌باشد. به این ترتیب واحدهای سنگی رخنمون یافته شامل: سنگ‌های دگرگونی با سن پرکامبرین شامل گنایس، شیست و نهشته‌های شیلی و ماسه‌سنگی سازند کهر، توده گرانیتی، نهشته‌های قرمز و آهک‌های ضخیم لایه پرمین، رسوبات شیل و ماسه‌سنگی نازک لایه ژوراسیک، نهشته‌های آهکی کرتاسه با تناوبی از شیل، شیست و دولومیت به همراه توده دیوریتی کرتاسه، توده گابرویی ائوسن و همچنین پادگانه‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه‌های جوان می‌باشد. بنابراین لیتولوژی متفاوت با نفوذپذیری و سختی متفاوت، وجود رسوبات سست مثل لایه‌های رسی و مازنی، وجود یک لایه قابل لغزش نفوذناپذیر در زیر لایه نفوذپذیر، از مهمترین عوامل ناپایداری دامنه‌ای حوضه می‌باشند. بررسی نقشه زمین‌شناسی منطقه نشان می‌دهد که بیشتر محدوده مورد مطالعه از دیدگاه زمین‌شناسی در زون سنندج - سرجان قرار دارد و تنها بخش کوچکی در زون زاگرس واقع شده است. علیرغم تشابه ویژگی‌های موجود در زون سنندج - سرجان، اما به شدت با زاگرس نیز در ارتباط می‌باشد. مرزی بودن منطقه و نقش ارتعاشات و فشارهای دینامیکی سپر عربستان، از جمله دلایل این موضوع می‌باشد.

آبرفتی قدیم (Qt₁) با سن کواترنری و آبرفت رودخانه‌ای (Qal) با سن عهد حاضر است که صرفاً در امتداد رودخانه اصلی و آبراهه‌های بزرگ حوضه تجمع یافته‌اند. جنس اجزاء تشکیل‌دهنده از جنس واحدهای دگرگونه، آذرین و رسوبی واحد ارتفاعات حوضه تجمع یافته‌اند و بسیار متغیر بوده و از حد ماسه تا قطعه‌سنگ‌هایی با قطر چند ده سانتی‌متر متغیر است. هیچ‌گونه سیمانی در بین اجزاء رویت نمی‌گردد و ذرات کاملاً منفصل از یکدیگر هستند. این نهشته‌ها حاصل فرسایش و تخریب واحد ارتفاعات حوضه هستند که در اثر عمل حمل و نقل توسط آب‌های جاری از محل تشکیل اولیه خود جابجا شده و با کاهش انرژی جریان آب در امتداد رودخانه اصلی حوضه و دامنه‌های مشرف بر رودخانه‌ها برجای گذاشته شده‌اند. واحد سنگی Jst و Jph با مساحت ۴۴/۳ درصد از کل حوضه بیشترین رخنمون‌های سنگی را در بخش شرقی حوضه داراست. عمده تشکیلات این واحد فیلیت، اسلیت، شیست و ماسه‌سنگی دگرگونه محلی است. واحد Q^t شامل نهشته‌های آبرفتی قدیم و جدید است که بستر اصلی

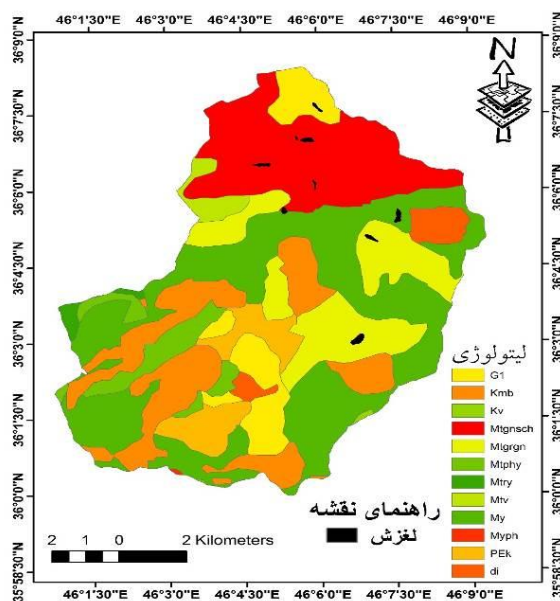
رودخانه حوضه را شامل می‌شود. در این واحد به علت فعالیت‌های زیستی (انسانی، گیاهی و جانوری) افزایش ضخامت خاک از جمله خاک‌های رسی و آبرفت‌ها، با جذب آب‌های نزولات جوی، سطحی و زیرزمینی در برابر وقوع حرکات توده‌ای حساسیت بیشتری دارد. تنوع سنگ‌های سخت تا سست به همراه گسل‌های اصلی و فرعی از مهمترین ویژگی‌های زمین‌شناسی حوضه بوده و از شاخص‌های تأثیرگذار بر زمین‌لغزش محسوب می‌شوند (شکل ۷). اما گسل‌ها در فرآیند زمین‌لغزش به عنوان یکی از شاخص‌های تأثیرگذار در فرآیند زمین‌لغزش هستند. گسل‌های منطقه شامل گسل‌های زاگرس به عنوان گسل سراسری و گسل سقر در مرحله بعد در پویایی و ناپایداری روند ژئومورفیک نقش اساسی دارند و با توجه به وضعیت زمین‌ساخت منطقه و بررسی‌های صورت گرفته در ارتباط با زلزله‌خیزی منطقه می‌توان نتیجه گرفت که قسمت‌های غرب و جنوب غرب و شمال غرب از دیدگاه خطر زمین‌لرزه در ناحیه با خطر بسیار بالا واقع شده و تراکم گسل‌ها نیز در این نواحی بیشتر از سایر مناطق حوضه است.

جدول ۶. نرخ کلاس‌های عوامل موثر در وقوع زمین‌لغزش در مدل ارزش اطلاعاتی

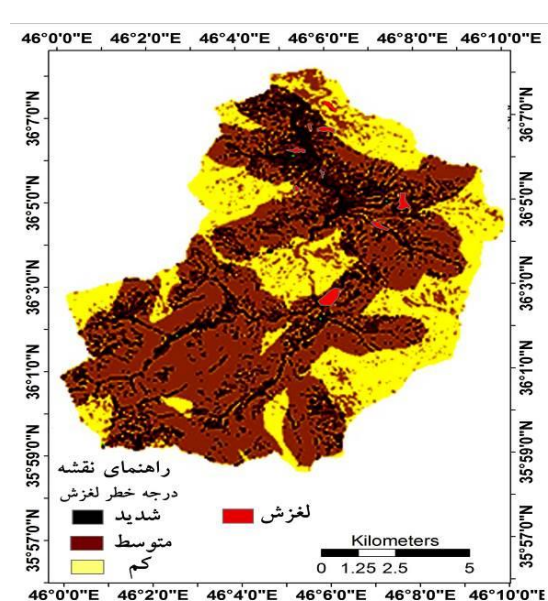
شماره رده	فاصله از گسل	لیتولوژی	فاصله از جاده	سطوح ارتفاعی	میزان بارندگی	درصد شیب	کاربری اراضی
۱	۰/۱۲	۰	۰/۸	۳/۴۸	۱/۵۸	۲/۳۲	-۱/۹
۲	۰/۵۹	۰/۱۴	۴/۳	۰/۱۴	۰/۷۴	۰/۳۵	-۰/۱۷
۳	۰	۰	-۰/۱۲	۰	۰/۹۳	۰/۵	۰/۴
۴	۰	۰	۱/۷۷	۰	-۰/۰۷	-۲	
۵	۰/۸۱		-۲/۳		۰		
۶	۰/۹۹				۰		
۷	۰				۰		
۸	۰						
۹	۰						
۱۰	۰/۵۳						
۱۱	۰						
۱۲	۰						

جدول ۷. پراثرترین و کم‌اثرترین کلاس‌های هر کدام از عوامل

مدل		(ارزش اطلاعاتی)	
کلاس	پراثرترین	کم‌اثرترین	
فاصله از گسل	<۱۰۰۰	۳۰۰۰<	
لیتولوژی	گرانیت گنیس	کوارتز	
فاصله از جاده	۱۰۰-۵۰	۵۰۰-۷۰۰۰	
سطوح ارتفاعی	۱۸۰۰-۰	۲۶۰۰	
میزان بارندگی	۵۰۰-۴۰۰	۱۱۰۰-۱۰۰۰	
درصدشیب	۲۰-۵	≥۴۰	
کاربری اراضی	مرتع	باغ	



شکل ۷. وضعیت لیتولوژی حوضه مورد مطالعه



شکل ۶. پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با مدل ارزش اطلاعات

اساس داده‌های لرزه‌نگاری، فراوانی وقوع زمین‌لرزه‌های ۳/۵ ریشتر در منطقه بیشتر است. عمق کانونی این زمین‌لرزه‌ها به تابعیت از ویژگی‌های لرزه‌خیزی منطقه شمال غرب کشور، کم عمق (۳۰-۴۰ کیلومتر) می‌باشد و اینکه اغلب زمین‌لرزه‌های منطقه در پیرامون گسل‌های منطقه اتفاق افتاده و نقشه گسل نشان‌دهنده روند گسترش لغزش‌ها در بخش‌های غربی و شمال شرقی محدوده و در محدوده گسل‌های فرعی درجه ۲ رخ داده، بیانگر این است که زمین‌لرزه‌های با بزرگی ۳/۵ ریشتر با گسل‌های اصلی و فرعی مهم و لغزش‌ها انطباق خوبی را نشان می‌دهد. بررسی‌ها و مقایسه تعداد پیکسل‌ها نشان می‌دهد که بیشترین لغزش‌ها در واحدهای سنگ‌شناسی گرانیت و گنیس اتفاق افتاده است. مقایسه درصد احتمال مقادیر مورد انتظار و مشاهده شده از پیکسل‌ها نشان می‌دهد که گسترش لغزش‌ها در لیتولوژی فوق قابل توجه است و بیانگر این است که نسبت درصد لغزش‌های رخ داده در گروه‌های لیتولوژیکی با هم برابر نیستند. چرا که تعداد واحدهای شبکه‌ای و مساحت گروه‌های مختلف لیتولوژیکی با هم برابر نیستند. برای دستیابی به نتیجه منطقی در هر یک از واحدها مقادیر منتظره و مشاهده شده درج گردیده و آخرین عدد هر یک از آن‌ها اختلاف بین این مقادیر در نظر گرفته و بررسی شد. مثبت بودن باقیمانده‌ها به این معنی است که مقدار مشاهده شده از مقدار منتظره بیشتر و منفی بودن باقیمانده‌ها به معنی این است که مقدار

مجاورت گسل‌های متعدد (گسل‌های رودخانه سقز، رودخانه ولیخان، سننه و غیره) با حوضه و بررسی داده‌های لرزه‌نگاری و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در منطقه بیانگر این است که امکان وقوع زلزله‌های با شدت بالا در حوضه وجود دارد. بر اساس بررسی نقشه سائزموکتونیک و تاریخ وقوع زمین‌لرزه در بخش‌های شمال غربی حوضه به ویژه در ارتفاعات و در حریم گسل‌های فرعی و درجه ۲، امکان وقوع زلزله‌های با شدت بالا وجود دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که حوضه از یک سو تحت تاثیر فعالیت‌های تکتونیکی و از سوی دیگر تحت تاثیر عوامل فرسایشی قرار دارد. وجود تشکیلات کرتاسه به شکل قابل توجه و دوران چهارم در اطراف رودخانه‌ها با گسترش و عمق محدود و تشکیلات کامبرین از نوع دولومیت، ماسه‌سنگ، شیل، شیست و سنگ‌های اسیدی به همراه سنگ‌های پرمین شامل آهک و دولومیت موجب پیچیدگی فرآیند لغزش در حوضه شده و از طرف دیگر تنوع و تفاوت در سختی و سستی و ایجاد نهشته‌های دامنه‌ای، موجب پراکنش لغزش‌ها در حوضه شده است. اکثر گسل‌ها در راستای شمال شرقی- جنوب غربی است که کارکرد آن راستالغز و راستاگرد بوده و سنگ‌های دگرگونی و رسوبی در امتداد آن بریده شده است. رودخانه سقز با گسل شمال غربی- جنوب شرقی (چپ‌گرد) و رودخانه ولی خان با جهت جنوب غربی - شمال شرقی (راستاگرد) و حداقل دو نوع گسل فرعی احتمالی از گسل‌های مهم منطقه هستند. بر

دهانه خروجی رودخانه‌ها وجود آورده است که بسیار مستعد حرکت توده‌ای هستند. بررسی‌های میدانی بیانگر این است که حوضه تحت تأثیر حاکمیت سیستم فرسایشی پریگلاسیر می‌باشد و بر اساس نوع لیتولوژی، عوامل مورفوژنز و اندیس‌های چون ارتفاع، درجه حرارت، میزان ریزش‌های جوی و نوع آن، تحت تأثیر فرآیندهای دامنه‌ای قرار دارد.

بررسی ارتباط گسل‌ها با نقشه خطر زمین لغزش

جهت بررسی اثرات گسل‌ها در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه، تحلیل آماری صورت گرفته و مقایسه تعداد و موارد مشاهده شده و منتظره در (جدول ۹) ارائه شده است. این اطلاعات بر اساس تجزیه و تحلیل تعداد واحدهای شبکه‌ای درگیر لغزش و فاقد آن بدست آمده است. مقایسه تعداد واحدهای شبکه‌ای واجد و فاقد لغزش در فواصل مختلف گسل‌ها نشان می‌دهد که وقوع حداکثر لغزش‌ها در فواصل نزدیک به گسل‌های مهم منطقه صورت گرفته و مقایسه درصد احتمال مقادیر مورد انتظار و مشاهده شده از پیکسل‌ها نیز نشان می‌دهد که گسترش لغزش‌ها در رابطه با گسل‌ها قابل توجه است. برای دستیابی به نتیجه منطقی در هر یک از واحدها مقادیر منتظره و مشاهده شده درج گردیده و آخرین عدد هر یک از آن‌ها اختلاف بین این مقادیر در نظر گرفته و بررسی شد. مثبت بودن باقیمانده‌ها به این معنی است که مقدار مشاهده شده از مقدار منتظره بیشتر و منفی بودن باقیمانده‌ها به این معنی است که مقدار مشاهده شده از مقدار منتظره کمتر بوده است. با مقایسه باقیمانده‌ها مشخص شد که گسل‌ها بیشترین تأثیر را در وقوع لغزش‌ها دارند. مثبت بودن ضریب‌ها در (جدول ۹) به معنی این است که مقدار مشاهده شده از مقدار منتظره بیشتر بوده است. که در حوضه سد کردستان عدم وجود اعداد منفی یعنی وقوع لغزش کمتر از توزیع طبیعی آن مشاهده نشده است و این مقدار در مورد لغزش و گسل همگی مثبت می‌باشند (جدول ۹). نتایج حاصل از نقشه فاصله از گسل بیانگر این است که بیشترین رخداد زمین لغزش در فاصله کمتر از ۱۰۰۰ متری گسل‌ها رخ داده و عملکرد گسل‌ها در حوضه به صورت مستقیم (حرکت ناشی از انرژی گسل) و به صورت غیرمستقیم (تأثیر لیتولوژی و شیب) سبب رخداد لغزش‌ها در حوضه شده است.

مشاهده شده از مقدار منتظره کمتر بوده است. با مقایسه باقیمانده‌ها مشخص شد که به ترتیب گرانیته، گرانیته-گنیس، شیست-گنیس، شیل و کلریت بیشترین تأثیر و سنگ‌های کواتز، آهک و ماسه‌سنگ‌ها کمترین تأثیر را در وقوع لغزش‌ها دارند (جدول ۸). نتایج آزمون آماری مربع کای بر اساس جدول متقاطع و سطح معنی‌داری مشاهده شده برای مقادیر مربع کای پیرسون کمتر از $0/0005$ می‌باشد که به معنی این است که اگر فرضیه صفر صحیح باشد کمتر از ۵ در ۱۰۰۰ انتظار می‌رود که مقدار مربع کای حداقل به بزرگی اعداد محاسباتی باشد. بنابراین چون سطح معنی‌داری مشاهده شده بسیار کوچک‌اند می‌توان فرضیه صفر را رد نمود و اختلاف معنی‌دار بین گروه‌های لیتولوژیکی و وقوع لغزش را به اثبات رساند. با توجه به ویژگی‌های لیتولوژی، شیب، شرایط آب و هوایی، جهت دامنه‌ها، سیستم زهکشی، پوشش گیاهی و شرایط محلی، هر قسمت از دامنه‌های حوضه دارای مورفولوژی خاصی بوده که تحت تأثیر سیستم فرسایشی پریگلاسیر تحول می‌یابند. به طوری که تکرار، فراوانی وقوع فرآیندهای دامنه‌ای منطقه نیز تحت تأثیر این سیستم معنی و مفهوم پیدا کرده است. تشکیلات گرانیته برون‌زده (انواع دایک‌ها) به شکل توده نفوذی تحت حاکمیت سیستم فرسایش پریگلاسیر به شدت در معرض تخریب هستند. عمل کریوکلاسیسم در دامنه‌های گرانیته بر اثر هوازدگی و فرسایش ورقه‌ای (پوست پیازی) و فرآیند شیمیایی، تخریب، نفوذ آب و تناوب ذوب و انجماد یخ در شکاف‌ها به دلیل دیاکلازه بودن، به فراوانی به وقوع می‌پیوندد و مواد حاصل از این فرآیند به طور گسترده‌ای به شکل مواد واریزه‌ای بزرگ بر روی دامنه‌ها به شکل کلوویوم و رگولیت تجمع یافته است. مواد مذکور شامل ذرات درشت و ریزی می‌باشند که بدون لایه‌بندی بوده و تشکیل نهشته‌های دامنه‌ای را داده است. اغلب این مواد در بریدگی شیب‌ها و پای دامنه‌ها تجمع حاصل کرده، به طوری که می‌توان آن‌ها را جز سازندهای متناسب و جوان که مستعد جابجایی و حرکت می‌باشند محسوب نمود. افزایش جابجایی مواد دامنه‌ای به سمت رودخانه‌ها و حمل کمتر آن‌ها توسط جریانات سطحی موجب انباشته شدن آن‌ها در نقاط مناسب به ویژه در دره‌های انباشته شده و یا منجر به تشکیل تراس‌های رودخانه‌ای متعدد در دره‌های رودخانه سقر گردیده و در نهایت مخروطه‌افکنه‌های فراوان را در

جدول ۸. ضرایب سنگ‌شناسی

ضریب	مساحت لغزش‌های موجود در هر کلاسه (m ²)	مساحت هر کلاسه (m ²)	کلاسه‌های زمین‌شناسی
.	.	۲۸۶۰۹۰۵	(Di) دیوریت
۱/۲۸۳	۳۰۳۸۴/۳	۵۵۶۶۳۸	(G1) گرانیت
.	.	۱۸۴۸۵۳۲۸	(Kmb) آهک-دولومیت
.	.	۶۱۵۷۱۷	(Kv) آهک
۰/۸۲۳	۱۴۲۸۸۴	۲۰۸۳۹۹۹۲	(Mtgnsch) گنایس-شیست
۰/۹۵۷	۱۲۸۸۳۹/۲	۱۵۷۹۶۶۸۰	(Mtgrgn) گرانیت گنایس
.	.	۵۲۱۳۸۴۶	(Mtphy) شیست-اسلیت-کوارتزیت
.	.	۱۲۴۴۸۹۴	Mtry شیست
.	.	۱۸۶۳۶۰۲	(Mtv) کوارتز _ کلریت _ امفیبول و اپیدوت
۰/۲۹۵	۶۱۴۹۵	۳۸۳۹۶۰۲۸	(My) کلریت
.	.	۴۷۲۱۹	(Myph) کلریت _ کوارتز و سرسیت
.	.	۶۲۳۴۰۵۶	(PEK) شیست-اسلیت-ماسه‌سنگ
-	۳۶۳۶۰۲/۵	۱۲۰۱۵۴۹۱۱	جمع

جدول ۹. ضرایب فاصله از گسل در مدل IAT

فاصله از گسل	<۱۰۰۰	۲۰۰۰-۱۰۰۰	۳۰۰۰-۲۰۰۰	>۳۰۰۰
ضریب	۰/۱۲۵	۰/۲۵	۰/۱۱	۰/۰۷۹

پیوسته که بیانگر نقش فعالیت تکتونیکی گسل‌ها در وقوع زمین‌لغزش‌ها است. بررسی نقشه زمین‌شناسی و مشاهدات میدانی نشان می‌دهد که وجود گسل‌های فراوان و تراکم آن در بخش جنوبی به دلیل تزریق توده‌های بزرگ گرانیت در میان اسلیت‌های سطح حوضه بر فعالیت‌های تکتونیکی تأثیر گذاشته و با دور شدن از گسل‌ها از ناپایداری دامنه‌ها، تعداد و تراکم لغزش‌ها کاسته می‌شود (جدول ۱۰). بررسی معادله همبستگی در نرم‌افزار SPSS بین فاصله اقلیدسی محاسبه شده گسل و لغزش نشان می‌دهد که بین گسل‌ها و رخداد لغزش‌ها رابطه متوسط و مثبت معنی‌دار وجود دارد. نتایج حاصل از جداول متقاطع بین متغیر واحدهای عامل و مقادیر رخداد لغزش در عامل گسل و مقایسه تعداد پیکسل‌ها نشان می‌دهد که بیشترین لغزش در واحد کاری فاصله از گسل در مدل IRAT رخ داده است. مقایسه درصد احتمال مقادیر مورد انتظار و مشاهده از پیکسل‌ها نشان می‌دهد که گسترش و تعداد رخ داد لغزش‌ها در واحد کاری فاصله از گسل بیشتر از سایر عوامل موثر در وقوع زمین‌لغزش است. به طوری که از مجموع پیکسل‌های کل محدوده به میزان ۴۸۰۶۰ تعداد ۱۹۴۸۰ شبکه، مساحتی معادل ۴۸۷۰ هکتار از وسعت منطقه در کلاس خطر شدید قرار دارد. نتایج آزمون آماری مربع کای بر اساس جدول متقاطع و

نتایج حاصل از بررسی گسل‌های منطقه نشان می‌دهد که مجموع طول گسل‌های منطقه برابر ۴۹/۵۶ کیلومتر و روند آن‌ها عمدتاً جنوب‌غربی-شمال‌شرقی و در امتداد زمین‌لغزش‌های منطقه (طول زخمه‌ایی که در اثر لغزش در دامنه ایجاد می‌شود، (طول کل، L) می‌باشند (شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰). تراکم گسل‌ها در سطح حوضه برابر ۰/۴۱ کیلومتر بر کیلومتر مربع است که نشان از فعالیت تکتونیکی شدید حوضه دارد و نشان می‌دهد عمده لغزش‌ها در مناطقی رخ داده که تعداد و طول گسل‌ها بیشتر و قابل توجه می‌باشد. به منظور بررسی ارتباط گسل‌ها و خطر زمین‌لغزش، نقشه گسل‌ها با نقشه خطر زمین‌لغزش حوضه تلفیق شد. بررسی‌ها در مدل ارزش اطلاعاتی نشان می‌دهد که در بین عوامل موثر در وقوع حرکات توده‌ای بیشترین تأثیر و وزن عامل را فاصله از گسل با وزن ۲ نسبت به سایر عوامل در پتانسیل ناپایداری و حرکات تکتونیکی و رخداد زمین‌لغزش‌ها دارد. جهت بررسی دقیق‌تر این موضوع ابتدا نقشه گسل با فاصله ۱۰۰۰ متر بافربندی و با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها تلفیق گردید (شکل ۱۱). بررسی شاخص فاصله از گسل در مدل ارزش اطلاعاتی نشان می‌دهد که بیش از ۹۱/۶۴ درصد از مساحت کل لغزش‌های به وقوع پیوسته و بیشترین تعداد لغزش‌ها در فاصله کمتر از ۱۰۰۰ متر و در پهنه خطر زیاد به وقوع

اختلاف معنی‌دار بین گسل‌ها و وقوع لغزش را به اثبات رساند (رابطه ۱۳). به طوری‌که معادله همبستگی بین فاصله اقلیدسی محاسبه شده گسل و رخداد لغزش‌ها رابطه متوسط و مثبت معنی‌داری را نشان می‌دهد.

0.481 Pearson correlation, sig0.000 is Significant at the 0.01 level (2-tailed) (۱۳)

سطح معنی‌داری مشاهده شده برای مقادیر مربع کای پیرسون کمتر از ۰/۴۸ می‌باشد که به این معنی است که اگر فرضیه صفر صحیح باشد کمتر از ۰/۴۸ در ۱۰۰۰ انتظار می‌رود که مقدار مربع کای حداقل به بزرگی اعداد محاسباتی باشد. بنابراین چون سطح معنی‌داری مشاهده شده بسیار کوچک‌اند می‌توان فرضیه صفر را رد نمود و



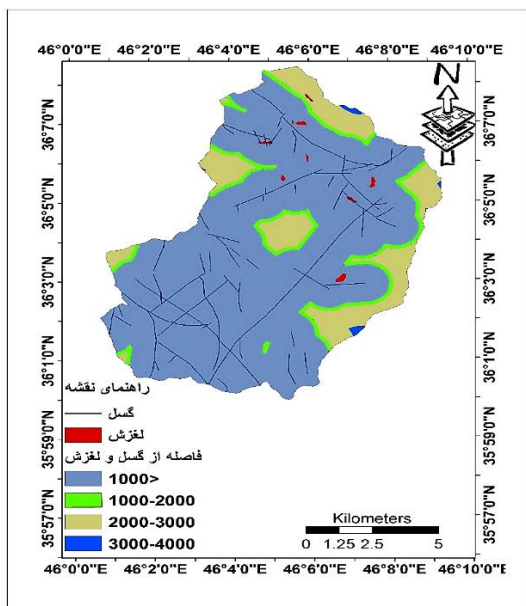
شکل ۸. امتداد گسل‌ها با امتداد زمین‌لغزش‌های رخ داده در حوضه



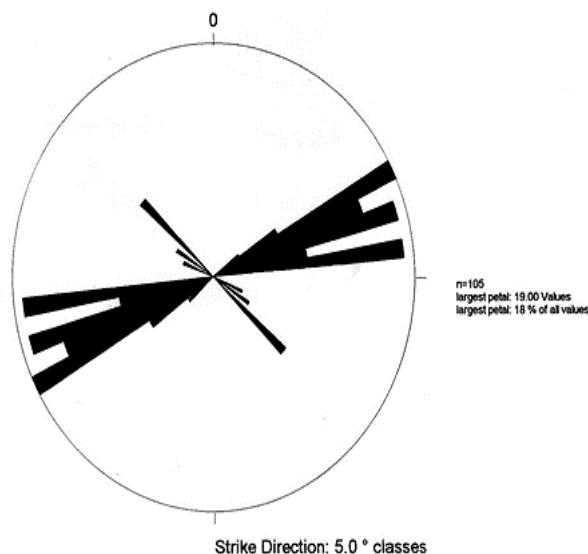
شکل ۹. لغزش رخ داده در شیب‌ها، سطوح ارتفاعی، لیتولوژی و کاربری‌های متفاوت حوضه مورد مطالعه

جدول ۱۰. مساحت طبقات فاصله از گسل و لغزش رخ داده در واحد در مدل ارزش اطلاعاتی

ناپایداری	وزن	ارزش اطلاعاتی	مساحت لغزش‌ها		مساحت طبقات		فاصله از گسل	طبقه
			درصد	M ²	درصد	M ²		
زیاد	۲	۳/۶	۹۱/۶۴	۳۳۳۲۱۸/۳	۸۱/۳	۹۷۷۲۱۹۰۳	<۱۰۰۰	۱
کم	۰	۰/۳۳	۸/۳۶	۳۰۳۸۴/۲	۱۵	۱۷۸۶۶۳۱۱	۲۰۰۰-۱۰۰۰	۲
کم	۰	۰	۰	۰	۳	۳۶۷۸۷۷۴	۳۰۰۰-۲۰۰۰	۳
کم	۰	۰	۰	۰	۰/۷	۸۸۷۹۲۲	>۳۰۰۰	۴
			۱۰۰	۳۶۳۶۰۲/۵	۱۰۰	۱۲۰۱۵۴۹۱۰	جمع	-



شکل ۱۱. نقشه پراکنش گسل‌ها و زمین‌لغزش‌ها



شکل ۱۰. امتداد درزها و شکستگی‌های اندازه‌گیری شده

چشمه‌های متعدد در منطقه بیانگر نقش این گسل در این زمینه می‌باشد. درزه‌ها گروه دیگری از عناصر ساختاری موجود در منطقه هستند که به فراوانی در واحدهای سنگی حوضه رویت می‌شوند. درزه‌های موجود در واحدهای سنگی حوضه امتدادهای مختلفی دارند، اما امتداد شمال شرق - جنوب غرب از فراوانی بیشتری برخوردار هستند، این درزه‌ها در اثر نیروهای جهت‌دار بوجود آمده‌اند و بصورت دسته درزه مشاهده می‌شوند. سطح آن‌ها زبر و خشن می‌باشد و از بازشدگی اندکی برخوردار هستند و در رخنمون‌های آهکی کرتاسه به دلیل تاثیر پدیده انحلال، درزه‌ها از بازشدگی بیشتری برخوردار می‌باشند. درزه‌های فوق باعث تقسیم توده یکپارچه سنگ به قطعات کوچک‌تر و مجزا از هم گردیده و واریزه‌های حاصله در ابعاد نسبتاً بزرگ به شکل مکعبی - مکعب مستطیلی - ورقه‌ای و گوه‌ای در پای اکثر دامنه‌ها را بوجود آورده‌اند که در حوضه به خوبی قابل رویت می‌باشند. در بخش قابل توجهی از سطح دامنه‌ها این درزه‌ها توسط مواد تخریبی دانه‌ریز نیز پر شده‌اند.

نتایج ارزیابی مدل‌ها

نتایج محاسباتی با استفاده از شاخص‌های ارزیابی و مقایسه مدل‌های ارزیابی خطر زمین‌لغزش نشان داد که در مدل ارزش اطلاعاتی مقدار شاخص Li برابر $۷۲/۳۲$ و در مدل IAT $۸۰/۵۵$ می‌باشد که بیانگر روند صعودی رخداد

با توجه به الگوی گسل‌ها در منطقه مورد مطالعه که با استفاده از برداشت‌های صحرائی مورد بررسی قرار گرفت. روند شمال غربی - جنوب شرقی مربوط به گسل اصلی سقز و شکستگی‌ها هم‌روند با آن است. اکثر شکستگی حوضه از نوع شکستگی‌های ریدل (R) هم‌سو و تحت تأثیر بیشتر زاگرس و ناشی از فشار برخورد صفحه عربی به ایران است که از نتایج آن می‌توان به ایجاد امتداد لغز راست‌گرد در گسل‌های فرعی حوضه اشاره نمود. بنابراین حرکت در طول گسل سقز منجر به انتقال تنش به شکستگی و گسل‌های امتداد لغز شده و با تحت تأثیر قرار دادن پهنه وسیعی از حوضه مقدمه را برای ناپایداری دامنه‌های از جمله زمین‌لغزش‌های حوضه فراهم می‌سازد. عناصر ساختاری موجود در منطقه مورد مطالعه و پیرامون آن بسیار متنوع می‌باشد. این عناصر ساختاری در برگزیده گسل‌ها و درزه‌ها می‌باشند. گسل‌های زیادی در واحدهای سنگی حوضه رویت می‌گردند که باعث ایجاد دره‌های گسله، چشمه‌های تکتونیک و پرتگاه‌ها و... گردیده‌اند. گسل‌های مذکور باعث ایجاد خردشدگی شدید در واحدهای سنگی حوضه به ویژه گرانبیت‌ها شده‌اند. این گسل‌ها دو روند غالب شمال غرب - جنوب شرقی و شمال شرق - جنوب غرب را دارا می‌باشند. گسل‌های دسته اول بطور عمده از نوع راست‌گرد است و از فراوانی بیشتری برخوردار هستند. گسل‌های دسته دوم از نوع چپ‌گرد بوده و باعث ایجاد نفوذپذیری ثانویه در واحدهای سنگی حوضه گردیده‌اند. وجود

زمین لغزش است و نشان می‌دهد که تفکیک طبقات خطر به خوبی در مدل‌ها انجام شده است (جدول ۱۱). نتایج نشان می‌دهد که مدل ارزش اطلاعاتی با مقدار کیفیت (Q) به مقدار ۲/۴۱ درصد و شاخص آماری دقت (P) با مقدار ۰/۸۱ نسبت به مدل IAT از دقت بیشتر و عملکرد بهتری برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش برخوردار است (جدول‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴). همچنین ارزیابی مقدار شاخص نسبت تراکمی (Dr) نشان داد که مدل ارزش اطلاعاتی با میزان ۲/۶۸ نسبت به مدل IAT به مقدار ۱/۹۱ از کارایی بهتری برخوردار است (جدول ۱۳). به طور کلی نتایج ارزیابی مدل‌ها با استفاده از سه شاخص نشان می‌دهد که مدل ارزش اطلاعاتی نسبت به مدل IAT برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز سد کردستان دارای دقت بیشتری است (جدول ۱۵).

جدول ۱۱. شاخص‌های زمین لغزش (Li) در مدل ارزش اطلاعاتی و IAT در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش

مدل پهنه‌بندی	کلاس خطر	Si (هکتار)	Ai (هکتار)	تراکم در هر رده Si/Ai (درصد)	Ln $\sum(Si/Ai)$	Li درصد
IAT	زیاد	۲۸۲۷/۵۲	۴۸۶۶/۸۵	۰/۵۸	۰/۷۲	۸۰/۵۵
	متوسط	۸۰۸/۵	۵۶۹۵/۶	۰/۱۴		۱۹/۴۴
	کم	۰	۱۴۵۲/۵۵	۰		۰
ارزش اطلاعاتی	زیاد	۱۹۵۲/۸۸	۲۴۱۴/۴۵	۰/۸۱	۱/۱۲	۷۲/۳۲
	متوسط	۱۳۷۹/۲۹	۶۴۵۸/۱۲	۰/۲۱		۱۸/۷۵
	کم	۳۰۳/۸۵	۳۱۴۲/۴۳	۰/۱		۸/۹۲

جدول ۱۲. شاخص آماری دقت نتایج پیش‌بینی شده برای دو مدل ارزش اطلاعاتی و IAT

ردیف	مدل	مساحت زمین لغزش دو پهنه زیاد و خیلی زیاد (Ks)	مساحت دو پهنه زیاد و خیلی زیاد (S)	P = (Ks/s)
۱	IAT	۲۸۲۷/۵۲	۴۸۶۶/۸۵	۰/۵۸
۲	ارزش اطلاعاتی	۱۹۵۲/۸۸	۲۴۱۴/۴۵	۰/۸۱

جدول ۱۳. مقدار شاخص‌های نسبت تراکمی در مدل‌های ارزش اطلاعاتی و IAT در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش

مدل پهنه‌بندی	کلاس خطر	Ai (هکتار)	Si (هکتار)	$\sum si$	$\sum Ai$	نسبت تراکمی (Dr)
IAT	زیاد	۴۸۶۶/۸۵	۲۸۲۷/۵۲	۳۶۳۶/۰۲۵	۱۲۰/۱۵	۱/۹۱
	متوسط	۵۶۹۵/۶	۸۰۸/۵			۰/۴۶
	کم	۱۴۵۲/۵۵	۰			۰
ارزش اطلاعاتی	زیاد	۲۴۱۴/۴۵	۱۹۵۲/۸۸	۳۶۳۶/۰۲۵	۱۲۰/۱۵	۲/۶۷
	متوسط	۶۴۵۸/۱۲	۱۳۷۹/۲۹			۰/۶۹
	کم	۳۱۴۲/۴۳	۳۰۳/۸۵			۰/۳۳

جدول ۱۴. مقدار کیفیت با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعاتی و IAT در طبقه‌های مختلف خطر

مدل پهنه‌بندی	کلاس خطر	Dr	Dr-1	$(Dr-1)^2$	S=Si/St	$(Dr-1)^2 \times S$	Qs
IAT	زیاد	۱/۹۱	۰/۹۱	۰/۸۳	۱/۳۴	۱/۱۱	۱/۹۶
	متوسط	۰/۴۶	-۰/۵۴	۰/۲۹	۱/۵۷	۰/۴۵	
	کم	۰	-۱	۱	۰/۴	۰/۴	
ارزش اطلاعاتی	زیاد	۲/۶۸	۱/۶۸	۲/۸۲	۰/۶۶	۱/۸۶	۲/۴۱
	متوسط	۰/۶۹	-۰/۳۱	۰/۰۹	۱/۷۸	۰/۱۶	
	کم	۰/۳۳	-۰/۶۷	۰/۴۵	۰/۸۶	۰/۳۹	

جدول ۱۵. نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل‌های IAT، ارزش اطلاعاتی

Qs	نسبت تراکمی (Dr)	p	Li	کلاس خطر	مدل پهنه‌بندی
۱/۹۶	۱/۹۱	۰/۵۸	۱/۹۱	زیاد	IAT
	۰/۴۶		۰/۴۶	متوسط	
	۰		۰	کم	
۲/۴۱	۲/۶۸	۰/۸۱	۲/۶۸	زیاد	ارزش اطلاعاتی
	۰/۶۹		۰/۶۹	متوسط	
	۰/۳۳		۰/۳۳	کم	

نتیجه‌گیری

زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان یکی از اشکال حرکات توده‌های زمین اغلب با شاخص‌های ژئومورفیک قابل بررسی است. محاسبه شاخص‌های ژئومورفولوژیکی یکی از ابزارهای نسبتاً دقیق جهت شناسایی میزان فعالیت تکتونیکی، ارزیابی احتمالی و پهنه‌بندی حوضه به شمار می‌آیند. در این بررسی نتایج محاسبه شاخص‌های زمین‌ساخت فعال نسبی نشان می‌دهد که ۷۷/۷۷ درصد حوضه از نظر تکتونیکی در کلاس فعال و نتایج پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش نیز در مدل ارزش اطلاعاتی بیانگر این است که ۵۵/۵۵ درصد حوضه در محدوده خطر ناپایداری زیاد قرار دارد. ضرایب فاصله از گسل در هر دو مدل مثبت و بیشترین لغزش‌ها در فاصله کمتر از ۱۰۰۰ متری رخ داده و نشان می‌دهد که به علت تکتونیک فعال، ارتباط معناداری بین گسل‌ها و مناطق با خطر لغزش بالا در حوضه وجود دارد. نتایج مجموع کیفیت و شاخص دقت نشان داد که مدل ارزش اطلاعاتی از عملکرد بهتری برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش برخوردار است. بررسی نقشه زمین‌شناسی منطقه نشان می‌دهد که علی‌رغم وجود تشابه ویژگی‌های منطقه با زون سنندج - سیرجان، حوضه به شدت تحت تأثیر فعالیت زمین‌ساختی زون زاگرس است. نتایج نشان می‌دهد که خطر وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه تحت تأثیر تنوع سنگ‌های سخت تا سست به همراه گسل‌های اصلی و فرعی می‌باشد. اما گسل‌ها یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در فرآیند زمین‌لغزش هستند. گسل‌های منطقه شامل گسل‌های زاگرس به‌عنوان گسل سراسری و گسل سقز در مرحله بعد در پویایی و ناپایداری روند ژئومورفیک نقش اساسی دارند و با توجه به وضعیت زمین‌ساخت منطقه و بررسی‌های صورت گرفته در ارتباط با زلزله‌خیزی منطقه می‌توان نتیجه گرفت که قسمت‌های غرب و جنوب‌غرب و

شمال‌غرب به دلیل تراکم گسل‌ها از دیدگاه خطر زمین‌لرزه و خطر وقوع زمین‌لغزش در ناحیه با خطر بسیار بالا واقع شده‌اند. از طرف دیگر وضعیت توپوگرافی و مورفولوژی حوضه به صورت کوهستان‌های فشرده با دره‌های تنگ و دامنه‌های پرشیب در روند فرآیند لغزش و تسریع آن بسیار مهم می‌باشد. به طور کلی تنوع لیتولوژی به همراه هوازدگی شدید، تراکم مواد هوازده تخریبی بر روی شیب‌های دامنه‌ای و ناپایداری آن‌ها به ویژه در کنار گسل‌ها، شرایط آب و هوایی به‌ویژه از نظر بارندگی، تغییرات رطوبت و دما به ترتیب از مهم‌ترین دلایل وقوع و پراکنش لغزش‌ها در حوضه سد کردستان است. با توجه به حساسیت حوضه آبخیز سد کردستان به رخداد لغزش‌ها و به علت رفتار پیچیده و غیرخطی بودن متغیرهای دخیل در وقوع لغزش در منطقه مطالعاتی پیشنهاد می‌شود در مطالعات مربوط به شناسایی رفتار پیچیده دامنه‌ها در خصوص رخداد زمین‌لغزش از شاخص‌های ژئومتریک دیگری همچون تأثیر انحناء، انحنای متقاطع، انحنای سطح و انحنای گوسی جهت تکمیل کردن نتایج این مطالعه استفاده شود.

منابع

- احمدآبادی، ع.، و رحمتی، م (۱۳۹۴) کاربرد شاخص‌های کمی ژئومورفومتریک در شناسایی پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش با استفاده از مدل SVM (مطالعه موردی: آزاد راه خرم آباد- پل‌زال). نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۴، شماره ۳، ص ۲۱۳-۱۹۷.
- اصغری سراسکانرود، ص.، پالیزبان، د.، امامی، ه.، قلعه، ا (۱۳۹۹) تحلیل مدل‌های تحلیل شبکه و منطق فازی برای تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش مطالعه موردی: (جاده سراب - نیر). نشریه جغرافیا و برنامه ریزی، سال ۲۴، شماره ۷۳، ص ۲۱-۱.

حبیبی، ع (۱۳۹۴) بررسی زمین‌لغزش‌ها با استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیک. نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۷، شماره ۱، ص ۹۸-۱۰۸.

رجبی، م، ولی‌زاده، کامران، خ. و عابدی قشلاقی، ح (۱۳۹۵) ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوضه آذر شهر چای). نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۵، شماره ۱، ص ۶۰-۷۴.

صفاری، ا، یمانی، م، کرم، ا، و کرمی، پ (۱۳۹۷) تاثیرات مورفوتکتیکی تکتونیک فعال بر زمین‌لغزش در حوضه جاجرد، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۷، شماره ۳، ص ۱۳۵-۱۱۷.

شیرانی، ا (۱۳۹۷) ارزیابی کارایی عوامل ژئومورفومتریک در افزایش درستی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه دزعلیا، استان اصفهان). نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی اصفهان، دوره ۲۹، شماره ۳، ص ۱۱۱-۱۳۰.

شمس، ج، عزیززاده، ا (۱۳۹۷) پهنه‌بندی حساسیت خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل احتمالات شرطی (قضیه بیز)، مطالعه موردی: قارداغ (ارسباران، از قره‌سو تا دره‌دیز). جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۲۲، شماره ۶۳، ص ۱۸۲-۱۶۱. عابدینی، م، رنجبری، احد، و مختاری، د (۱۳۹۸) تجزیه و تحلیل خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های LR و ANP در محیط GIS (مطالعه موردی پهنه گسلی قوشاداغ-ارسباران در آذربایجان شرقی). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۸، شماره ۱، ص ۸۸-۷۰.

عزتی، م، و آق‌آتابای، م (۱۳۹۳) تحلیل زمین‌ساخت فعال حوضه بجنورد با کمک شاخص‌های مورفوتکتونیک. نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۲، شماره ۴، ص ۱۴۴-۱۳۰.

علی‌پور، ر، پورکرمانی، م، زارع، م (۱۳۸۸) تکتونیک فعال مرتبط با گسل جوان اصلی زاگرس در محدوده سد رودبار لرستان. نشریه علوم (دانشگاه خوارزمی)، دوره ۹، شماره ۲، ص ۴۳۶-۴۱۷.

کرمی، ف، رجبی، م، و ابادری، ک (۱۳۹۷) تحلیل ناهنجاری-های شبکه زهکشی و ارتباط آن با تکتونیک فعال در حوضه‌های آبریز شمال تبریز، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۱، ص ۴۷-۳۰.

محمدی، د، جلالی، ح، و سعدی، ب (۱۳۹۶) ارزیابی زمین‌ساخت فعال نسبی در حوضه آبخیز آبشینه همدان با استفاده از شاخص‌های زمین‌ریختی و لرزه‌خیزی منطقه‌ای.

ایلدرمی، ع، نوری، ح، محمدی‌پور، م، و موسوی، م (۱۳۹۶) بررسی عوامل موثر و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل تراکم سطح، تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و رگرسیون لجیستیک در حوضه آبخیز عشوند. پژوهش‌های فرسایش محیطی، شماره ۷، دوره ۲۸، ص ۲۳-۱.

ایلانلو، م، و ابراهیمی، ل (۱۳۹۵) پهنه‌بندی خطر وقوع حرکات توده‌ای با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعاتی، تراکم سطح و LNRF در حوضه آبخیز زهره، مدیریت مخاطرات محیطی، دوره ۳، شماره ۲، ص ۱۵۳-۱۴۱.

بهاروند، س، سوری، س، رهنماد، ج، و جودکی، م (۱۳۹۷) تحلیل فعالیت زمین‌ساختی و ارتباط خطواره‌ها با خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه وارک، لرستان). نشریه زمین‌شناسی مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۲، ص ۲۵۸-۲۳۸. پرتابیان، ع، فتوحی، ص، و ریگی، ح (۱۳۹۶) مقادیر کارایی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعات و تراکم سطح در استان سیستان و بلوچستان. زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۲۴، ص ۱۱-۱.

پورهاشمی، س، امیراحمدی، ا، اکبری، ا (۱۳۹۳) انتخاب مدل مناسب از بین روش‌های آماری دومتغیره جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در محیط GIS. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، جلد ۴، شماره ۱۵، ص ۸۹-۷۱.

روستایی، ش، مختاری‌کشکی، د، اشرفی‌فینی، ز (۱۳۹۹) پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز طالقان با استفاده از شاخص آنترپوی شانون، جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۲۴، شماره ۷۱، ص ۱۵۰-۱۲۵.

روستایی، ش، جانانه، ک (۱۳۹۸) پهنه‌بندی خطر وقوع ناپایداری دامنه‌ای در حوضه آبریز بالقلو چای اردبیل با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی، جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۲۳، شماره ۷۰، ص ۱۸۸-۱۶۹.

زارع، م، شعبانی، م، سلیمان‌پور، م، پ، و راوری رستمی، ا (۱۳۹۷) ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ال. ان. آ. اف و دلی و آی. ان. اف در حوضه آبخیز خارستان، استان فارس. پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، شماره ۱۱۸، ص ۳۶-۲۳.

جباری، ن، حسین‌زاده، م، و ثروتی، م (۱۳۹۱) مطالعه مورفوتکتونیک فعال حوضه آبخیز حصارک (شمال‌غرب تهران) با استفاده از شاخص‌های مورفومتریک. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱، شماره ۲، ص ۳۴-۱۷.

جمال‌آبادی، ج، زنگنه اسدی، م، و امیراحمدی، ا (۱۳۹۶) بررسی عوامل موثر در پیدایش و تکامل مخروط‌افکنه‌های دامنه‌های جنوبی ارتفاعات جغتای با تاکید بر نقش تکتونیک (در محدوده غرب سبزواری) نشریه جغرافیا و توسعه، دوره ۱۵، شماره ۴۷، ص ۸۸-۶۹.

- Davis, L. (2015) A Hybrid physical and Maximum-Entropy Landslide Susceptibility Model. *Entropy Journal*, 17: 4271-4292
- Della Seta, M., Del-Monte, M., Fredi, M., Miccadei, E., Troiani, F (2008) Morphotectonic evolution of the Adriatic piedmont of the Apennines: advancement in the knowledge of the Marche–Abruzzo border area. *Geomorphology*, 102: 119–129.
- Hong, H., B., Pradhan, M., N., Jebur, D., Bui, T., Xu, C., Akgun, A (2015) Spatial prediction of landslide hazard at the Luxi area (China) using support vector machines. *Environ Earth Sci*, 75(40): 245-256.
- Hong, H., W., Chen, C. Xu, A. M., Youssef, B., Pradhan, Tien Bui, D (2016) Rainfall-induced landslide susceptibility assessment at the Chongren area (China) using frequency ratio, certainty factor, and index of entropy. *Geocarto Int*, 23(4): 223-2464.
- Hong, H., Pradhan, B., Xu, C., Tien Bui, D (2015) Spatial prediction of landslide hazard at the Yihuang area (China) using two-class kernel logistic regression, alternating decision tree and support vector machines. *Catena*, 133: 266-281.
- Hong, H., Haghghi, S. A. Pourghasemi, H. R (2016) GIS-based landslide spatial modeling in Ganzhou City, China, *Arab J Geosci Journal*, 9:112-120.
- Keller, E. A., & Pinter, N (2002) *Active tectonic, Earthquakes, Uplift and Landscape*, Prentice Hall P. 362.
- Khan, H., Shafique, M., Khan, A., Mian, A., Bacha, Safer, U., Shah, Chiara, C (2018) Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 10. December 2018.
- Rao, G., Cheng, Y., Lin, A., Yan, B (2017) Relationship between Landslides and Active Normal Faulting in the Epicentral Area of the AD 1556 M~8.5 Huaxian Earthquake, SE Weihe Graben (Central China). *Journal of Earth Science*, 28 (3): 545–554.
- Ramirez Herrera, M. T (1988) Geomorphic assessment of active tectonic in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt, *Earth Surface and Landforms*, 23:317–322
- Sharma, S., Sarma, N. J (2017) Application of drainage basin morphotectonic analysis for assessment of tectonic activities over two regional structures of the northeast India. *Journal of the Geological Society of India*, 89 (3): 271-280.
- Topal, S., Keller, E., Bufe, A., Koçyiğit, A (2016) Tectonic geomorphology of a large normal fault: Akşehir fault, SW Turkey. *Geomorphology*, 259: 55-69.
- پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۴، شماره ۴، ص ۱۱۹-۲۰۷.
- مقصودی، م، امامی، ک، رسولی، ع، درخشان، ی، جلالی، س، و مرادی‌پور، فاطمه (۱۳۹۷) برآورد دامنه فعالیت تکتونیکی بخش جنوبی گسل میناب و سیستم گسلی شرق آن از طریق داده‌های مورفومتری به منظور تعیین میزان پایداری منطقه (شرق تنگه هرمز). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، سال ۷، شماره ۲، ص ۸۲-۹۶.
- مصفايي، ج، اونق، م، مصداقي، م، و شريعت‌جعفري، م (۱۳۸۸) مقایسه کارایی مدل‌های تجربی و آماری پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: آب‌خیز الموت‌رود). *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)*، دوره ۱۶، شماره ۴، ص ۴۳-۶۱.
- نیازی، ی، اختصاصی، م، طالبی، ع، آرخی، ص، و مختاری، م (۱۳۸۹) ارزیابی کارایی مدل آماری دومتغیره، در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش (مطالعه‌ی موردی: حوضه سد ایلام). *نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، جلد ۴، شماره ۱۰، ص ۹-۲۰.
- Basu, T., Swades, p (2019) RS-GIS based morphometrical and geological multi- criteria approach to the landslide susceptibility mapping in Gish River Basin, West Bengal, India. *Advances in Space Research*, 3: 1253-1269.
- Bera, S., Guru, B., Ramesh, V (2019) Evaluation of landslide susceptibility models: a comparative study on the part of Western Ghat Region, India, *Remote Sensing Applications. Society and Environment*, S2352-9385(17)30309-9, p:39-52, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.10.010>.
- Broeckx, J., Vanmarcke, M., Duchateau, R., Poesen, J (2018) A data-based landslide susceptibility map of Africa. *Earth-Science Reviews*, 102-121.
- Bull, W. B., Mcfadden, L. D (1977) Tectonic geomorphology of the north and south of the Garlock fault, Slope, Baghro Dagh, *Geographic Researches*, 48: 123–138.
- Chousianitis, K. V., Del Gaudio, N., Sabatakakis, K., Kavoura, G., Drakatos, G. D., Bathrellos, H., Skilodimou, D (2016) Assessment of earthquake-induced landslide hazard in Greece: from Arias intensity to spatial distribution of slope resistance demand.
- Costanzo, D. E., Rotigliano, C., Irigaray, J., Jimenez-Pervarez, D., Chacon, J (2012) Factor selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the gis matrix method: application to the river Beiro basin (Spain). *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 12: 327-340.

- Wang, Q., D., Wang, Y., Huang, Z., Wang, L., Zhang, Q., Guo, W., Chen, W., Chen, Sang, M (2015) Landslide susceptibility mapping based on selected optimal combination of landslide predisposing factors in a large catchment. *Sustainability*, 7: 16653-16669.
- Wang, Q., Li, W., Wu, Y., Pei, Y., Xing, M., Yang, D (2016) A comparative study on the landslide susceptibility mapping using evidential belief function and weight of evidence models. *J. Earth Syst. Sci*, 125(3): 646-662.
- Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., El-Hadad, B. A., Dhahry, B. K (2016) Landslide susceptibility maps using different probabilistic and bivariate statistical models and comparison of their performance at Wadi Itwad Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Bull Eng Geol Environ*, 75: 63-87.
- Zhou, S., G., Chen, L., Fang, Nie, Y (2016) GIS-Based Integration of Subjective and Objective Weighting Methods for Regional Landslides Susceptibility Mapping, *Sustainability*, 8: 334-343.
- Zhou, S., Fang, L (2015) Support vector machine modeling of earthquake-induced landslides susceptibility in central part of Sichuan province, China. *Geoenviron .Disasters*, 2(2): 234-245.

Analysis of tectonic activity and the relationship between fault and landslide hazard in Kurdistan dam basin

A. R. Ildoromi

Assoc. Prof., Dept., of Natural Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

* a.ildoromi@malayeru.ac.ir

Received: 2021/3/11 Accepted: 2021/7/2

Abstract

Kurdistan dam watershed with an area of 120.15 km² is located in the northeast of Saez city. The purpose of this study is to analyze the tectonic activity of the basin and the relationship between faults and landslide risk using the information value model. First, the region is divided into 15 sub-basins using ArcHydro software and morphotectonic indexes including Stream Length Gradient Index (SL), Asymmetric Factor (AF), Hypsometric Integra (Hi), Transverse Topographic Symmetry Factor (T) and basin shape ratio (Bs) are calculated and the results are calculated. Their evaluation was evaluated with active tectonics index (IAT). In order to evaluate the relationship between faults and landslide risk, first a map of faults and maps of factors affecting landslides were prepared by processing satellite images of Landsat 8 sensor and ENVI software and field observations. Then, using the information value model, landslide hazard map of the basin was prepared and combined with the fault map and the relationship between faults and landslide risk in ArcGIS. 10.3 environment was reviewed. The results of calculating the relative active tectonics indices show that 77.77% of the basin is tectonically active in the active class and in the information value model 55.55% of the occurrence of landslides is in the range of high instability risk. Distance coefficients from faults in both positive models and most landslides occurred at a distance of less than 1000 meters and due to active tectonics there is a significant relationship between faults and areas with high landslide risk in the basin. The results showed that the information value model has better performance for landslide risk zoning. In general, diversity of lithology, topography, abundant national and local faults and climatic conditions can be mentioned as the most important factors in the occurrence and distribution of landslides.

Keywords: Landslide, Morphotectonics, Fault, IRAT Index, Kurdistan