

## بررسی ارتباط فراوانی زمین لغزش با تکتونیک فعال بر مبنای شاخص‌های مورفوتکتونیک در محدوده حوزه آبخیز رودخانه فهلیان

حمید بابلی مؤخر<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> دکترای ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۱

### چکیده

زمین لغزش‌ها از جمله مخاطرات طبیعی در حوزه‌های آبخیز هستند که هر ساله خسارات فراوانی را در پی دارند. فعالیت‌های نئوتکتونیک نقش مهمی در افزایش رخداد زمین لغزش دارد. هدف از این پژوهش، بررسی ارتباط زمین ساخت فعال و پهنه‌های لغزشی با بهره‌گیری از شاخص‌های مورفوتکتونیک در حوزه آبخیز رودخانه فهلیان می‌باشد. به همین منظور، ابتدا زمین لغزش‌های منطقه به کمک تصاویر گوگل ارث، تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8، عکس‌های هوایی و بازدیدهای میدانی شناسایی، برداشت و ذخیره شد. سپس، نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها تهیه شد. در ادامه، نسبت به استخراج و محاسبه چهار شاخص مورفوتکتونیک حجم به سطح حوضه (V/A)، شاخص انشعاب پذیری (BR)، شاخص تراکم سطحی آبراهه‌ها (P) و شاخص برجستگی نسبی (Bh) اقدام شد. شاخص‌های مورفوتکتونیک در هر زیرحوضه اندازه‌گیری شد. محاسبه این شاخص‌ها با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی و با بهره‌گیری از اصول هندسی و ریاضی و به کمک امکانات موجود در نرم‌افزار ArcGis10.4 انجام گرفت. هر شاخص به سه رده به لحاظ فعالیت زمین ساختی تقسیم و در نهایت، بر اساس تقسیم‌بندی هر شاخص، سطح فعالیت زمین ساختی کل بر مبنای شاخص زمین ساخت فعال نسبی (Iat) منطقه تعیین شد. در ادامه، با انطباق نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها با نقشه پهنه‌بندی زمین ساخت فعال نسبی، درصد زمین لغزش‌های رخ داده در هر پهنه تکتونیکی مشخص شد. نتایج نشان داد که ۶۷/۳۴ درصد (۴۲۸/۳۴ هکتار) از زمین لغزش‌ها در مناطق دارای فعالیت تکتونیکی بالا که تنها ۴۵/۷۳ درصد از کل وسعت حوضه مورد مطالعه را شامل می‌شود، به وقوع پیوسته است. این نتیجه نشان‌دهنده نقش تکتونیک فعال در افزایش رخداد زمین لغزش می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** تراکم آبراهه، حرکات توده‌ای، مخاطرات ژئومورفیک، مدل رقومی ارتفاع، نئوتکتونیک

### مقدمه

زمین لغزش‌های بزرگ و فاجعه‌آمیز در مقیاس جهانی در مناطق کوهستانی و کمربندهای زلزله‌خیز که دارای گسل‌های فعال هستند، رخ داده است. به عبارتی، اغلب ناپایداری زمین، ناشی از حضور گسل در آن‌ها و یا نزدیکی آن‌ها است (Mokhtari و Hemmati، ۲۰۱۸).

همچنین، بیشترین فراوانی زمین لغزش‌ها مربوط به

بسیاری از حرکات توده‌ای و زمین لغزش‌ها در برابر فعالیت‌های تکتونیکی از حساسیت بالایی برخوردار هستند. در مناطق تکتونیکی فعال، ناپایداری دامنه‌ها به صورت انواع اشکال مختلف زمین لغزش مشاهده می‌شود (Ghasemyan و همکاران، ۲۰۱۵). عمده

سنگ‌افت‌ها عمدتاً در شیب‌های بیش از ۳۰ درجه اتفاق افتاده‌اند. Cheng و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی تکتونیک فعال نسبی و خطرات روانه‌ها بر اساس شاخص ژئومورفولوژی مشتق شده از DEM و همچنین، تجزیه و تحلیل شبکه زهکشی پرداختند. نتایج نشان داد که منطقه مورد نظر دارای تکتونیک فعال و تحت خطر حرکات دامنه‌ای قرار دارد. Sharifi و همکاران (۲۰۱۲) به مقایسه نواحی لغزش با روش نیلسون و نواحی تکتونیک فعال حاصل از شاخص Smf پرداختند. نقشه تکتونیک فعال را بر اساس شاخص Smf در سه طبقه A، B و C و نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را در پنج طبقه تهیه کردند. مقایسه و انطباق نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با پهنه‌های تکتونیکی بر اساس شاخص Smf نشان داد که حدود ۷۱ درصد منطقه نسبتاً ناپایدار و مستعد روانگرایی در منطقه A و از ۲۹ درصد باقی‌مانده ۱۸ درصد در منطقه B و ۱۱ درصد در منطقه C پهنه‌بندی تکتونیک فعال حاصل از شاخص Smf قرار دارند. ایراد پژوهش مذکور ارزیابی تکتونیک فعال حوضه بر اساس تنها یک شاخص می‌باشد. EL Hamdouni و همکاران (۲۰۰۶)، در پژوهشی به این نتیجه رسیدند که بیشترین فراوانی زمین‌لغزش‌ها مربوط به نواحی با بالاترین شاخص تکتونیکی فعال و کمترین فراوانی در نواحی با مقادیر پایین تکتونیک فعال است. Afshari و همکاران (۲۰۱۹) به کاربرد شاخص‌های مورفوتکتونیکی در تحلیل مخاطرات زمین‌لغزش در راه‌آهن ناحیه لرستان پرداختند. نتایج نشان داد، بیش از ۸۰ درصد زمین‌لغزش‌های منطقه بین ایستگاه درود تا تنگ هفت، در محدوده فعالیت تکتونیکی زیاد تا بسیار زیاد قرار دارد. Saffari و همکاران (۲۰۱۸) پس از بررسی تاثیرات مورفوتکتونیکی تکتونیک فعال بر زمین‌لغزش در حوضه جاجرود به این نتیجه رسیدند که منطقه از نظر تکتونیکی بسیار فعال و این موضوع استعداد ناپایداری دامنه‌ای و زمین لغزش را به نسبت افزایش داده است. یکی از ضعف‌های این پژوهش، تعداد کم زمین‌لغزش‌ها بود، به‌طوری‌که در حوضه‌ای با وسعت ۹۴۹ کیلومترمربع تنها ۲۰ و چند مورد زمین‌لغزش نشان داده شد. Habibi (۲۰۱۵) در پژوهشی به بررسی میزان

نواحی با بالاترین شاخص تکتونیکی فعال می‌باشد (EL Hamdouni و همکاران، ۲۰۰۶).

ایران با توپوگرافی عمدتاً کوهستانی، فعالیت‌های زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی عمده شرایط طبیعی برای ایجاد طیف وسیعی از زمین‌لغزش‌ها را داراست (Abedini و همکاران، ۲۰۱۶). وضعیت ساختمانی فعال ایران یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار در ایجاد و تشدید زمین‌لغزش می‌باشد. فلات ایران که یک منطقه چین‌خورده آلیپی است، در حال حاضر از هر طرف تحت فشار بوده و حرکات زمین‌ساختی هنوز در آن ادامه دارد (Jedari Eivazi، ۲۰۰۲). وقوع زمین‌لرزه‌های مکرر در ایران یکی از پیامدهای فعال بودن جنبش‌های زمین‌ساختی در حال حاضر می‌باشد. آثار سطحی امواج کشسان یک زمین‌لرزه می‌تواند به‌صورت مختلف از جمله؛ زمین‌لغزش، گسیختگی دامنه‌ای و روانگرایی نمود یابد (Yousefi، ۲۰۱۰).

همبستگی بین تراکم زمین‌لغزش‌ها و شدت تکتونیک فعال، بیانگر آن است که شاخص‌های ژئومورفیک نگرشی سودمند در ادغام تکتونیک فعال در بین عوامل تعیین‌کننده حساسیت زمین‌لغزش می‌باشد (ELHamdouni و همکاران ۲۰۰۶). از طرفی، شاخص‌های ژئومورفولوژیک یکی از ابزارهای اساسی برای پی بردن به وضعیت و میزان تأثیر فعالیت‌های نئوتکتونیکی در سطح زمین می‌باشند (Andreani و همکاران، ۲۰۱۴). تغییرات ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی از تغییرات مهم در چشم‌اندازها است که با توجه به شواهد ژئومورفولوژیکی قابل پی‌گیری است (Anderson و همکاران، ۲۰۰۰). این تغییرات بر روی سطح زمین، یا از نوع مستقیم است، مانند ترک‌های زمین‌لرزه‌ای و پدیده‌های مربوط به لغزش زمین و یا از نوع غیرمستقیم است، مانند پرتگاه‌ها، دره‌های نامتقارن و خمیدگی‌های رودخانه‌ای (Barjesteh، ۲۰۰۵).

از جمله پژوهش‌های مرتبط با پژوهش حاضر، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. Rao و همکاران (۲۰۱۷) ارتباط بین زمین‌لغزش‌ها و گسل فعال نرمال را در چین مرکزی بررسی و به این نتیجه رسیدند که

عوامل مرسوم و متداول، بر وقوع زمین لغزش می‌باشد. لذا، ارزیابی تکتونیک فعال می‌تواند ما را در تشخیص دقیق‌تر مناطق درگیر با خطر زمین لغزش و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی که از صحت بیشتری برخوردار باشند یاری کند.

### مواد و روش‌ها

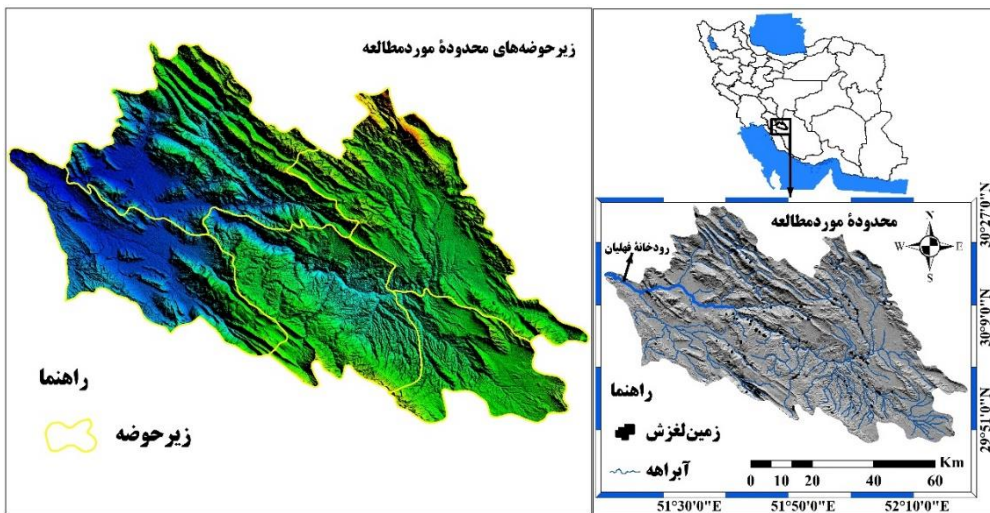
**موقعیت جغرافیایی منطقه:** حوزه آبخیز رودخانه فهلیان با مساحت  $4030/90$  کیلومتر مربع در شمال غرب استان فارس و در طول جغرافیایی  $14' 15''$  تا  $51' 18'' 50''$  شرقی و عرض جغرافیایی  $53' 28'' 30''$  شمالی واقع شده است. شهرستان‌های نورآباد ممسنی، رستم (مصیری)، سپیدان (اردکان) و همچنین، بخش‌ها و روستاهای زیادی در این حوضه واقع شده‌اند. این محدوده از نظر تقسیمات درجه یک و دو حوزه‌های آبخیز به ترتیب در حوزه آبخیز خلیج فارس و دریای عمان و حوزه آبخیز جراحی-زهره قرار دارد و بر اساس تقسیمات تماب شامل زیرحوضه‌های اردکان-چشمه سفید، کودیان-سرگاه، سرانجیلک، فهلیان و نورآباد ممسنی است. کمینه و بیشینه ارتفاعی حوضه به ترتیب از کمینه  $681$  متر در نقطه خروجی تا  $3650$  متر در قله برم فیروز از ارتفاعات کوه رنج در شمال حوضه می‌باشد. بخش وسیعی از منطقه کوهستانی با دیواره‌های بلند و دره‌های ژرف است و سطوح هموار و تپه‌ماهوری با وسعت کمتر در غرب حوضه گسترش دارد (شکل ۱). به لحاظ ژئومورفولوژی بخش کوچکی از منطقه جزو زاگرس مرتفع است که در اثر فرورانش صفحه عربستان دچار گسلس شدیدی شده و بخش عمده منطقه دربرگیرنده زاگرس چین‌خورده می‌باشد. بخش اعظم حوضه در زیرپهنه ساختاری فروافتادگی فارس و بخش کمی از غرب آن در زیرپهنه ایذه واقع شده است.

**ویژگی سنگ‌شناسی و جایگاه زمین‌ساخت حوضه:** با توجه به تأثیرپذیری واحدهای سنگی از فعالیت‌های نئوتکتونیک و در نتیجه شکل‌گیری لندفرم‌های مختلف و از طرفی، تأثیر آن‌ها بر وقوع زمین لغزش به تشریح آن‌ها پرداخته می‌شود. بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی  $1/100000$  شیت‌های فهلیان،

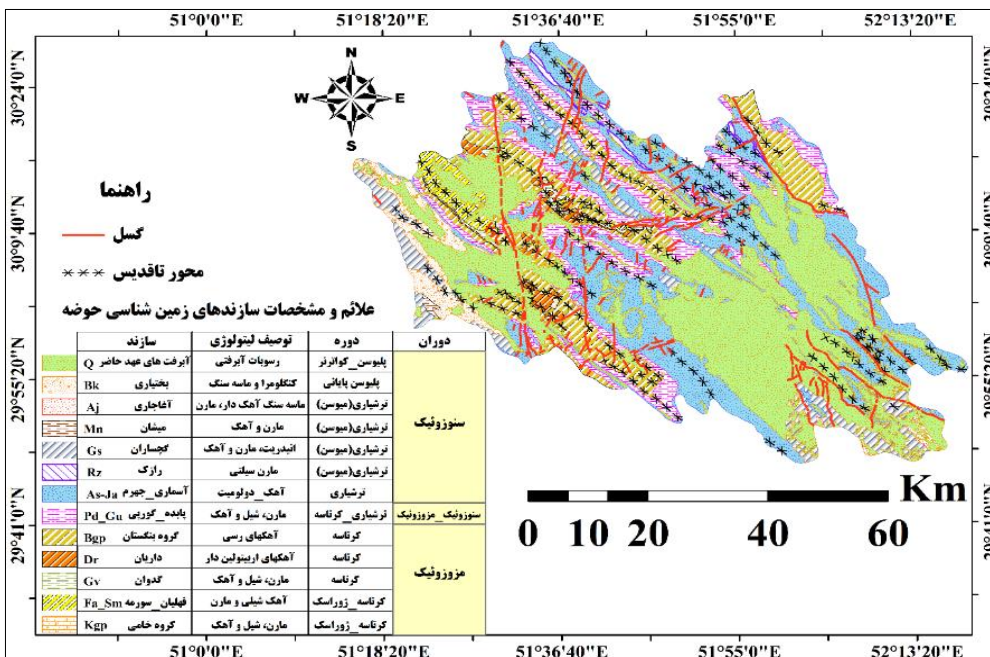
همبستگی زمین لغزش‌ها با مورفوتکتونیک پرداخته و به این نتیجه دست یافت که  $8/88$  درصد لغزش‌ها در مناطق شدید و بسیار شدید تکتونیک واقع شده و فقط  $2/11$  درصد در طبقه متوسط قرار گرفته‌اند. بعضی از زیرحوضه‌های انتخاب شده در این پژوهش (بهبهان و جایزان)، با توجه به فرارگیری در محدوده دشتی دارای توپوگرافی هموار بوده، از این‌رو، یا از فعالیت‌های نئوتکتونیک تأثیرپذیری آنچنانی نداشته‌اند و یا فاقد زمین لغزش هستند. بر همین اساس، ارزیابی فعالیت نئوتکتونیک و زمین لغزش در چنین مناطقی موضوعیت ندارد. Wang و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی از شاخص‌های مورفومتری شکل دامنه برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، Mokarram و Shayegan (۲۰۱۸) به ارزیابی خطر زمین لغزش و ارتباط آن با نوع لندفرم و Ahmadabadi و Rahmati (۲۰۱۵) با استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتری به شناسایی سطوح مستعد زمین لغزش اقدام کرده‌اند. در ارتباط با ارزیابی تکتونیک فعال با استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیک می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. Nik و همکاران (۲۰۱۷) با به‌کارگیری پنج شاخص و تبدیل هر کدام در سه طبقه فعالیت (یک تا سه) به ارزیابی فعالیت‌های زمین‌ساختی حوزه آبخیز گاوکشک پرداختند. پژوهش‌های Argyrioua و همکاران (۲۰۱۷)، Biswas (۲۰۱۶) و EL Hamdouni و همکاران (۲۰۰۸) از دیگر موارد در این زمینه هستند. تداوم فرورانش صفحه عربستان و عبور گسل‌های بزرگ و فعال کازرون و زاگرس، گسل فهلیان-اردکان (سپیدان)، امتداد گسل‌های کره‌بس و میشان از این محدود، منجر به فعالیت تکتونیک بالا، شکستگی، لرزه‌خیزی و افزایش ناهمواری (زبری) توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه شده است. این مسئله نقش مهمی در افزایش رخداد انواع زمین لغزش‌ها دارد. بر همین اساس و با توجه به جایگاه زمین‌ساخت منطقه، فرضیه اصلی پژوهش این است که فراوانی و تراکم زمین لغزش ارتباط مستقیمی با شدت تکتونیک فعال دارد. در نتیجه، در زیرحوضه‌هایی که بر اساس شاخص‌های مورفوتکتونیک فعالیت تکتونیک بیشتر باشد، فراوانی زمین لغزش نیز بیشتر است. بنابراین، هدف از این پژوهش، توجه به نقش تکتونیک فعال در کنار سایر

فارس شامل، واحد مارنی همراه با ترکیبات گچی ژپیس، نمک یا انیدریت دار سازند گچساران و ماسه-سنگ همراه با مارن آجاجاری (ترشیاری) در حوضه گسترش دارند (Darvishzadeh, ۲۰۱۰) (شکل ۲). درصد مساحت هر یک از واحدهای سنگی (سازندهای زمین شناسی) در شکل ۳ نشان داده شده است. سازندهای جوان تر حوضه نیز شامل کنگلومرای بختیاری (ترشیاری) و رسوبات آبرفتی کواترن (عهد حاضر) هستند.

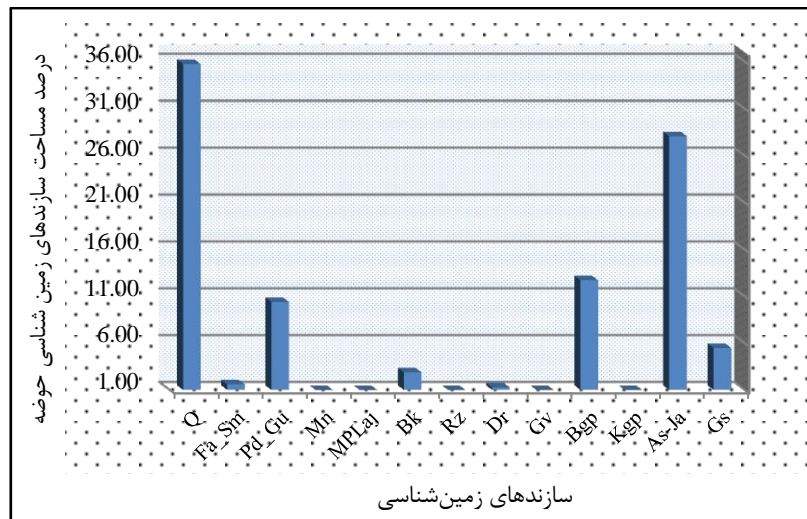
اردکان، درودزن، کازرون، کلستان و مال شیخ رخنمون‌هایی از سنگ‌های ژوراسیک تا کواترن در این حوضه گسترش دارد که از قدیم به جدید شامل گروه آهک دولومیتی سورمه (ژوراسیک)، آهک آلیتی فهلپیان، شیلی-مارنی گدوان، آهکی داریان (کرتاسه زیرین)، همچنین، سازند مارنی-آهکی گورپی و گروه بنگستان شامل سازندهای شیلی-آهکی سورگاه، شیلی کژدمی، آهکی سروک و ایلام (کرتاسه) می‌باشند. علاوه بر آن، آهک دولومیتی جهرم، شیل و آهک‌های رسی پابده، آهک آسماری و سازند مارنی رازک و گروه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲- سازندهای زمین شناسی حوضه



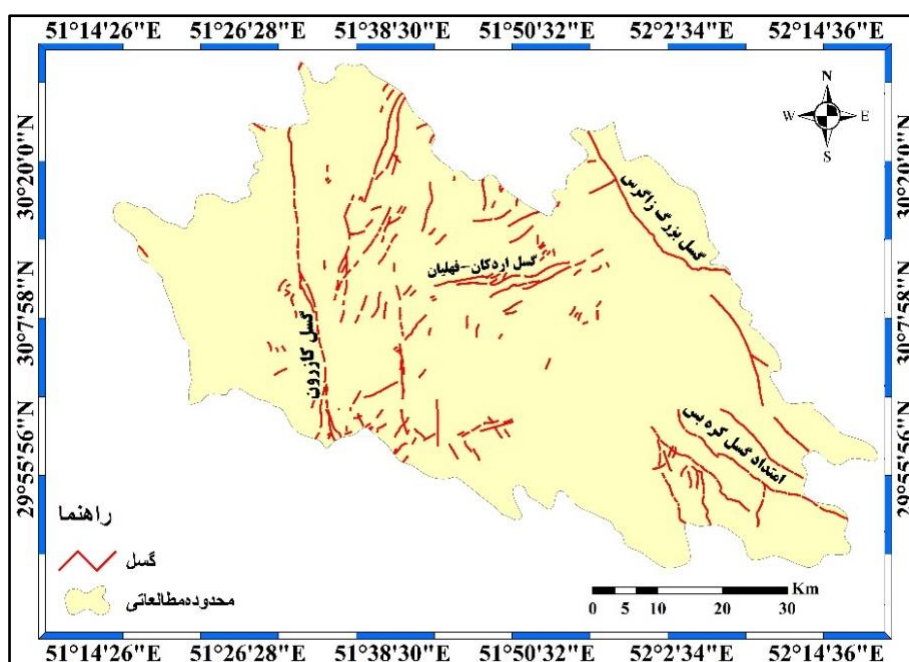
شکل ۳- درصد مساحت واحدی سنگی در سطح حوضه

مورد مطالعه (شکل ۴)، منجر به فعالیت تکتونیکی و لرزه‌خیزی منطقه شده است. در این محدوده، شواهد نوزمین‌ساختی فراوانی از جمله، ناودیس‌های به‌وجود آمده در راستای گسل‌ها (مانند دشت سپیدان)، حضور روندهای خطی شاخص و ممتد بر روی نگاره‌های ماهواره‌ای، حضور چشمه‌های آب گرم در زون‌های گسلی و هسته تاقدیس‌ها، تغییر در مورفولوژی رودخانه‌ها و مسیل‌ها، وجود پرتگاه‌های گسلی با شیب زیاد و ایجاد انواع زمین‌لغزش‌ها در سطح آن‌ها دال بر فعالیت پوسته و پوشش رسوبی روی آن دارد. در سده اخیر تعداد ۷۱۹ زمین‌لرزه در منطقه اردکان و نورآباد ممسنی رخ داده است. در این بین، تعداد ۱۸ زمین‌لرزه تاریخی مخرب و چهار زمین‌لرزه دستگاهی با بزرگی بیش از شش در منطقه اردکان و نورآباد (ممسنی) روی داده است (Ash'ari و Eslami، ۲۰۱۰). همچنین، زلزله‌های زیادی طی سال‌های گذشته سطح این منطقه را متأثر ساخته است. رویداد زمین‌لرزه‌ها در این منطقه به‌صورت فوج گونه است. زمین‌لرزه‌های ۱۵ و ۱۸ دی‌ماه ۱۳۸۹ به‌ترتیب اردکان (مرکز شهرستان سپیدان) و نورآباد (ممسنی) از مهمترین این زمین‌لرزه‌ها می‌باشند. زلزله‌های که در این تاریخ به‌طور گسترده منطقه نورآباد و اردکان را لرزاندند، به‌صورت مکرر به‌وقوع پیوسته‌اند که بزرگی برخی از آن‌ها ۵/۴ در مقیاس امواج محلی ( $M_L$ ) بوده است. در این دو روز، بیش از ۲۰ زمین‌لرزه در منطقه اردکان و نورآباد ممسنی روی داده است. در مورد زمین‌لرزه

بررسی سایزمو تکتونیک و لرزه‌خیزی منطقه: یکی از روش‌هایی که می‌توان به‌منظور بررسی وضعیت فعالیت زمین‌ساختی حوضه‌های مختلف به‌کار برد، مطالعه شاخص‌های لرزه‌خیزی است (Mohammadi و همکاران، ۲۰۱۷). منطقه مورد پژوهش در کمربند پرخطر کشور و استان فارس قرار دارد. استان فارس در ایالت زمین‌ساختی زاگرس واقع شده و یکی از لرزه‌خیزترین نواحی این ایالت است. ایالت زمین‌ساختی زاگرس به‌وسیله گسل پی سنگی قطر-کازرون به دو استان زمین‌ساختی شمال باختر زاگرس و جنوب خاور زاگرس تقسیم می‌شود که هر استان از خصوصیات زمین‌ساختی و پارامترهای لرزه‌خیزی متفاوتی تشکیل شده است. با توجه به عبور این گسل از محدوده مطالعاتی، بنابراین، این محدوده در هر دو استان زمین‌ساخت زاگرس و بخش اعظم آن در استان جنوب خاور زاگرس واقع شده است. بر اساس نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه که به‌وسیله Shayan و Zareei (۲۰۱۴) تهیه شده، بخش‌های زیادی از منطقه مطالعاتی در پهنه‌های خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد واقع شده است. همچنین، در نقشه پهنه‌بندی زمین‌لرزه که حاصل پژوهش Panah Imani و Hatef (۲۰۰۳) می‌باشد، منطقه مورد مطالعه جزو پهنه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد به‌شمار می‌آید و عبور گسل‌های بزرگ و فعال کازرون و زاگرس، گسل فهلیان-اردکان (سپیدان)، امتداد گسل‌های کره‌بس و گسل میشان و بازوهای منشعب از آن‌ها از محدوده

ممسنی ایجاد کرده است. توان لرزه‌ای این گسل ۶/۲ ریشتر برآورد شده است (Yousefi, ۲۰۱۰). جدیدترین مورد، زمین‌لرزه‌ای به بزرگی پنج ریشتر بوده که در بامداد شنبه ۱۴۰۰/۰۳/۰۸ در حوالی دهستان بامامیر و در عمق ۱۰ کیلومتری زمین اتفاق افتاده و منطقه را لرزانده است. موارد مذکور نشان‌دهنده لرزه‌خیزی و فعالیت‌های تکتونیکی شدید در منطقه است. شکل ۵، آینه گسل و شکل ۶، جابه‌جایی محور تاقدیس در نتیجه گسل و در زیرحوضه فهلیان را نشان می‌دهد.

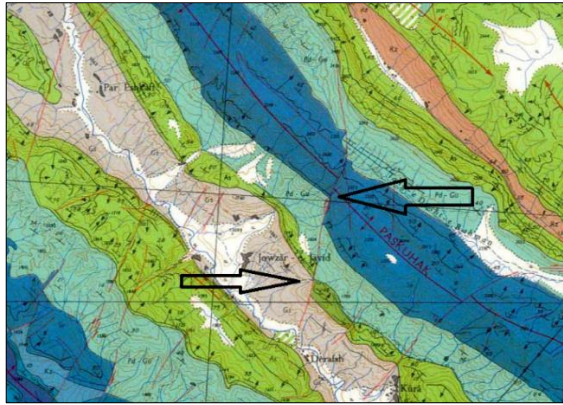
اردکان، این زمین‌لرزه را می‌توان به گسل زاگرس مرتفع یا گسل کازرون و در مورد زمین‌لرزه نورآباد ممسنی آن را می‌توان به گسل کازرون نسبت داد. گسل عامل زلزله‌های دی‌ماه ۸۹ نورآباد ممسنی، گسل فهلیان-اردکان (سپیدان) است که از مرکز محدوده مطالعاتی عبور می‌کند. راستای این گسل با آزیموت ۸۵ درجه از فهلیان در شمال نورآباد تا اردکان (شمال خاوری نورآباد) قابل ردیابی است. طول گسیختگی فهلیان-اردکان ۴۵ کیلومتر است. این دسته گسلی در بخش خاوری اردکان نیز تداوم یافته، اما بیشترین تغییر شکل ساختاری در سطح را در منطقه نورآباد



شکل ۴- نقشه گسل‌های محدوده مورد مطالعه و بازوهای منشعب از آن‌ها



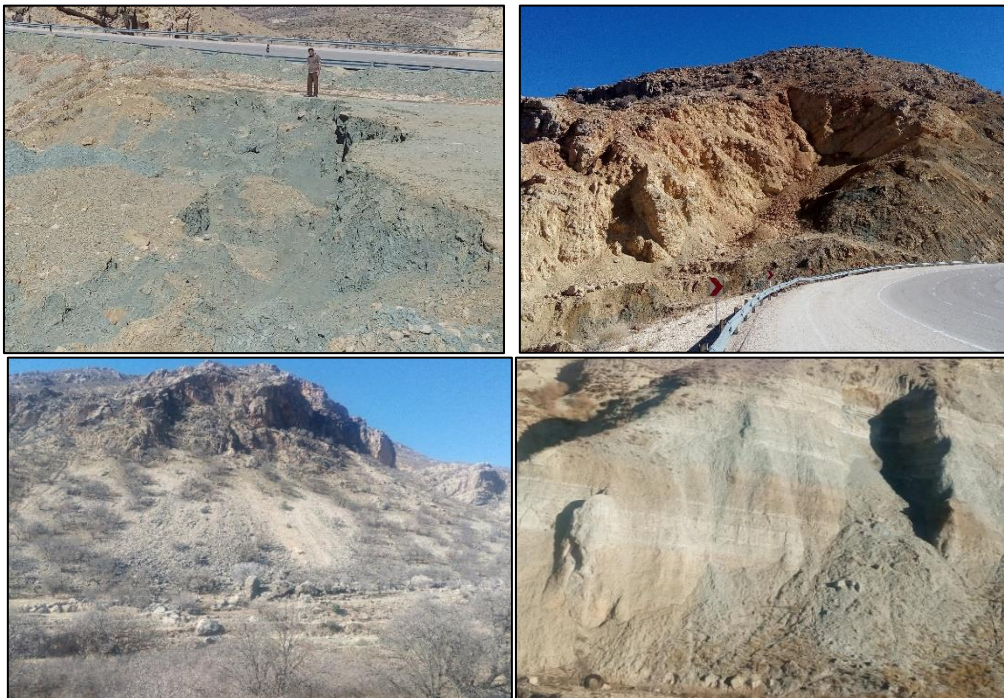
شکل ۵- آینه گسل در حاشیه رودخانه مهرانجان



شکل ۶- جابه‌جایی محور تاقدیس در اثر گسل (نقشه اردکان)

تهیه شد. با توجه به مشخصات زمین‌لغزش‌های مشاهده شده (شکل ۷)، تعریف ارائه شده به وسیله Terzaghi (۱۹۵۰) در این پژوهش ملاک قرار گرفته است، با این توضیح که این تعریف انواع حرکات توده‌ای از قبیل ریزش، لغزش، افتان‌ها، واژگونی‌ها و سیلاب واریزه‌ای را شامل می‌شود.

**روش پژوهش:** زمین‌لغزش عبارت است از حرکت مواد دامنه شامل صخره‌های طبیعی، خاک، انباشته‌های مصنوعی و یا مخلوطی از آن‌ها که به وسیله نیروی ثقل به سمت پایین جابه‌جا می‌شوند. در این پژوهش، ابتدا نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه به کمک تصاویر گوگل‌ارث، تصاویر ماهواره‌ای LANDSAT-8، عکس‌های هوایی و بازدیدهای میدانی



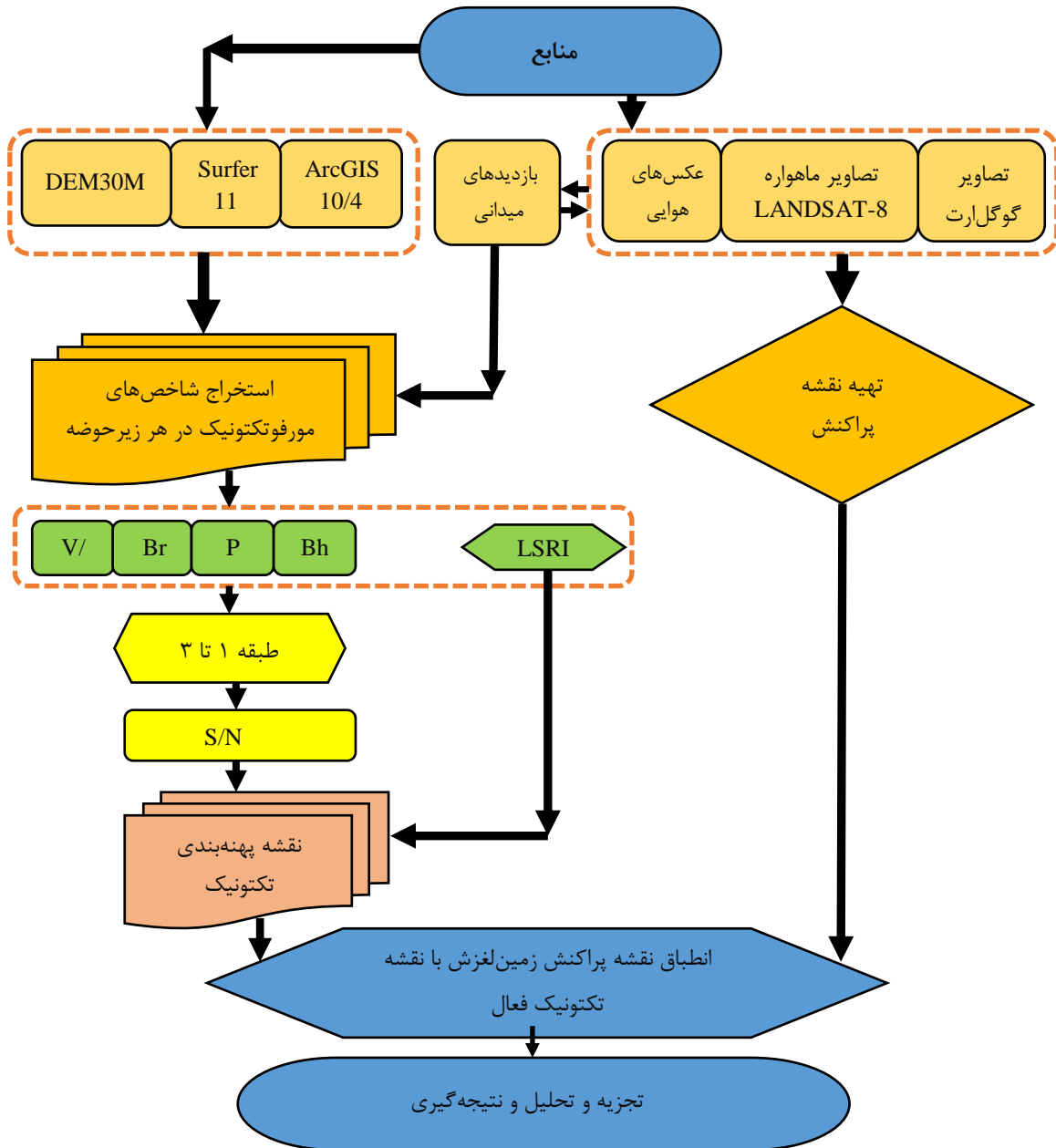
شکل ۷- نمونه‌ای از زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه

آن‌ها، از مدل رقومی ارتفاع (DEM) ۳۰ متر و نرم‌افزار ArcGIS10/4 استفاده شد. لایه مربوط به رودخانه‌ها و آبراهه‌های حوضه با استفاده از این نرم‌افزار و در محیط ArcHydro تهیه شد. هر شاخص به سه رده به لحاظ

در ادامه، چهار شاخص مورفوتکتونیک؛ V/A، BR، P و Bh در هر زیرحوضه پس از بازدیدهای میدانی اندازه‌گیری، محاسبه و استخراج شدند. به منظور تهیه لایه‌ها و استخراج شاخص‌ها و محاسبات مربوط به

متوسط و پایین تقسیم شد. در نهایت، نسبت به انطباق نقشه پراکنش زمین لغزش با نقشه پهنه‌بندی سطح فعالیت زمین‌ساختی اقدام و درصد زمین لغزش رخ داده در هر پهنه مشخص شد. در شکل ۸، فرایند روش پژوهش نشان داده شده است.

فعالیت زمین‌ساختی (بالا یک)، متوسط (دو) و پایین (سه) تقسیم و بر اساس تقسیم‌بندی هر شاخص، سطح فعالیت زمین‌ساختی کل بر مبنای شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) منطقه تعیین و محدوده مورد مطالعه به سه رده فعالیت زمین‌ساختی بالا،



شکل ۸- فلوچارت روش پژوهش

که در آن،  $V/A$  مقدار عددی شاخص حجم به سطح،  $V_i$  حجم حوضه و  $A_i$  مساحت حوضه است. حجم کل حوضه، حاصل جمع حجم‌های بین منحنی‌های میزان می‌باشد (Sharifi و همکاران،

نتایج و بحث

شاخص حجم به سطح حوضه ( $V/A$ ): شاخص حجم به سطح حوضه از (رابطه ۱) محاسبه می‌شود.

$$V/A = \frac{V_i}{A_i} \tag{1}$$



(Harkins, 2005). برای محاسبه حجم حوضه از امکانات موجود در ArcMap از گزینه Search و از ابزار Surface Volume می‌توان مساحت و حجم یک لایه رستری، TIN یا Terrain را در بالا یا پائین ارتفاع مورد نظر حساب کرد که از این طریق حجم زیرحوضه‌های مختلف محدوده مورد مطالعه به دست آمد. نتایج حاصل از محاسبه این شاخص در جدول ۱ نشان داده شده است.

(2013). مقدار عددی زیاد برای این شاخص نشان دهنده پستی و بلندی زیاد و فعالیت شدید زمین ساختی در منطقه است (Khabbazi و Shahbazi, 2015). هیسومتری حوضه و نسبت‌های حجم به سطح (V/A) شکل سه‌بعدی یک حوضه را توصیف می‌کند و منعکس‌کننده درجه نسبی برش کانال در کل حوزه آبخیز است. نسبت‌های V/A منعکس‌کننده عمق متوسط حوضه نسبت به سطح حوضه است

جدول ۱- مقادیر شاخص V/A در زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه

نام زیرحوضه	بیشینه ارتفاع (m)	کمینه ارتفاع (m)	حجم حوضه (m <sup>3</sup> )	مساحت حوضه (m <sup>2</sup> )	شاخص حجم به سطح	طبقه فعالیت
اردکان-چشمه سفید	۳۶۵۰	۱۴۸۹	۷۵۵۴۶۴۱۶۳۳۲۴/۵۱	۹۶۱۶۸۰۵۰۴/۱۲۶	۷۸۵/۵۶۶	۳
سرانجیلک	۳۰۲۵	۹۶۸	۷۳۴۹۱۵۸۶۱۷۹۷/۲۸	۸۰۰۱۴۶۳۳۱/۴۰۴۴	۹۱۸/۴۷۶	۱
نورآباد ممسنی	۲۶۵۴	۶۸۱	۴۲۴۶۱۱۶۹۳۵۰۴/۸۶	۷۴۰۰۳۶۲۴۷/۱۱۳۰	۵۷۳/۷۷۱	۳
کودیان-سرگاه	۲۹۱۸	۱۴۹۳	۳۰۶۸۲۹۰۰۳۶۵۲/۰۷	۴۷۷۴۵۶۷۱۲/۰۱۰۲	۶۴۲/۶۳۲	۳
فهلپان	۲۹۰۲	۷۶۱	۸۹۹۵۶۶۳۱۶۴۳۷/۰۳	۱۰۳۷۲۲۳۲۰۷/۲۳۰	۸۶۷/۲۸۳	۱

هنوز تکامل نیافته‌اند که این امر باعث می‌شود نسبت انشعاب در این گونه تاقدیس‌ها بالا باشد (Parhizgar و همکاران، ۲۰۱۸). نسبت انشعاب پایین از خصوصیات حوضه‌هایی است که آشفتگی‌های ساختاری کمتری دارند و الگوی زهکشی در آن‌ها غیرطبیعی نیست. شاخص مورد بحث از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$BR = \left[ \frac{N1}{N2} + \frac{N2}{N3} + \dots + \frac{Nn-1}{Nn} \right] \left[ \frac{1}{N-1} \right]$$

که در آن،  $N1$  تعداد شاخه‌های رده یکم،  $N2$  تعداد شاخه‌های رده دوم،  $N3$  تعداد شاخه‌های رده سوم و  $n$  تعداد شاخه‌های رده  $n$ ام است (Yamani و Elmizadeh, 2014). استخراج این شاخص و تهیه نقشه‌های مربوط به پنج زیرحوضه مورد مطالعه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) و با بهره‌گیری از افزونه ArcHydro در نرم‌افزار ArcGIS 10.4 انجام گرفته است (شکل ۹). جدول ۲، مقدار شاخص انشعاب‌پذیری را در زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج حاصل از شاخص BR، زیرحوضه اردکان-چشمه نسبت انشعاب معادل ۵/۴۳ به‌عنوان فعال‌ترین زیرحوضه و زیرحوضه سرانجیلک با نسبت انشعاب ۱/۶۵ کمترین فعالیت تکتونیکی را دارند. البته

نتایج حاصل از محاسبه V/A در جدول ۱ نشان می‌دهد که بر اساس نتایج حاصل از این شاخص، زیرحوضه‌های سرانجیلک و فهلپان به ترتیب دارای بیشترین فعال نئوتکتونیک هستند.

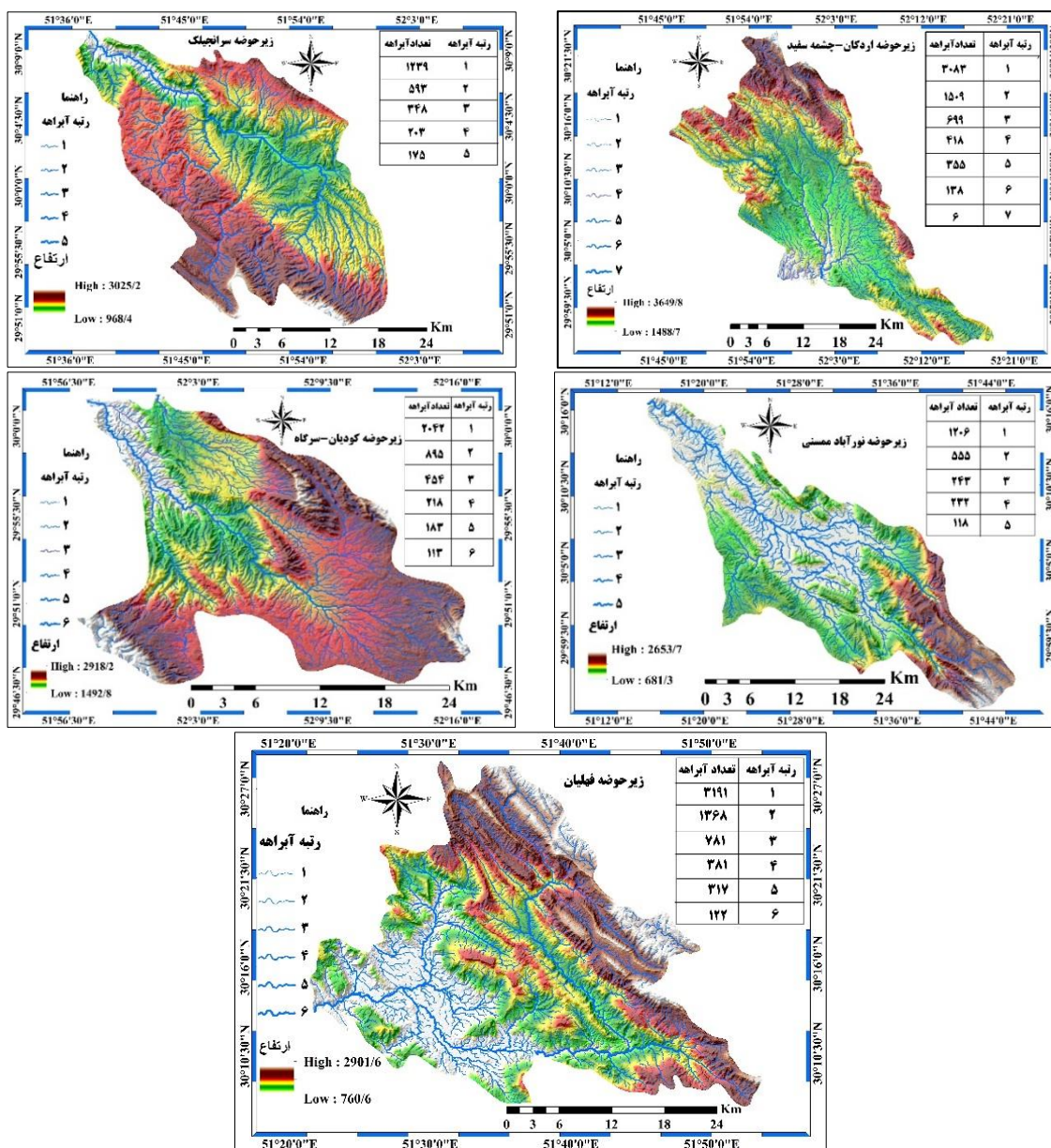
**شاخص انشعاب‌پذیری (BR):** با استفاده از پارامترهای رتبه‌ای شبکه‌های زهکشی می‌توان، تکتونیک (فعال) یک منطقه را بررسی کرد (Guarnieri و Pirrotta, 2008). انشعاب‌پذیری به نسبت تعداد قطعات یک رده به تعداد قطعات مرتبه بالاتر گفته می‌شود. این شاخص به علت تغییرات تصادفی در هندسه حوزه آبخیز از مرتبه‌ای به مرتبه دیگر یکسان نخواهد بود، اما تمایل دارد که در تمام سری‌ها ثابت باشد (Yamani و Elmizadeh, 2014). هر قدر نسبت انشعاب بزرگ‌تر باشد، بیانگر فعالیت تکتونیکی بیشتر و جوان بودن حوضه است. این شرایط باعث افزایش آبراهه‌های رتبه پایین‌تر می‌شود. تکتونیک نقش مهمی در تعداد آبراهه‌های با درجات مختلف داشته، بنابراین نسبت انشعاب‌ها در تاقدیس‌های جوان بسیار بالاتر از تاقدیس‌های فرسایش یافته و قدیمی می‌باشد. به‌عبارتی، در تاقدیس‌های جوان‌تر، تعداد آبراهه‌های درجه پایین بالا بوده و شبکه آبراهه‌ها با درجه بالاتر،

آمده از مجموع شاخص‌ها به صورت متعادل و میانگین، همراه با داده‌ها و بررسی‌های میدانی از پدیده‌های مورفوتکتونیک ادغام شده و مورد ارزیابی و نتیجه‌گیری کلی قرار گیرد.

باید در نظر داشت که خروجی یک شاخص نمی‌تواند دال بر فعالیت تکتونیک یک حوضه باشد، بلکه پارامترها و عوامل دیگر نیز در اثبات این مدعا از اهمیت بسزایی برخوردارند. بنابراین، باید نتایج به دست

جدول ۲- مقادیر شاخص BR در زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه

طبقه فعالیت	شاخص انشعاب پذیری	رده ۱	رده ۲	رده ۳	رده ۴	رده ۵	رده ۶	رده ۷	شاخص انشعاب پذیری
۱	۵/۴۳	۳۰۸۳	۱۵۰۹	۶۹۹	۴۱۸	۳۵۵	۱۳۸	۶	۵/۴۳
۳	۱/۶۵	۱۲۳۹	۵۹۳	۳۴۸	۲۰۳	۱۷۵	۰	۰	۱/۶۵
۲	۱/۸۶	۱۲۰۶	۵۵۵	۲۴۳	۲۳۲	۱۱۸	۰	۰	۱/۸۶
۳	۱/۷۷	۲۰۴۲	۸۹۵	۴۵۴	۲۱۸	۱۸۳	۱۱۳	۰	۱/۷۷
۲	۱/۹۸	۳۱۹۱	۱۳۶۸	۷۸۱	۳۸۱	۳۱۷	۱۲۲	۰	۱/۹۸



شکل ۹- شبکه زهکشی و رده‌های مختلف آبراهه در زیرحوضه‌های محدوده

حوضه است. همچنین، نشان از جوان بودن و نرسیدن به مرحله تعادل حوضه زهکشی دارد (Dehbozorgi و همکاران، ۲۰۱۰). این شاخص از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$P = \frac{\sum Li}{A} \quad (3)$$

که در آن،  $P$  تراکم زهکشی،  $\sum Li$  مجموع طول آبراهه‌ها به کیلومتر و  $A$  مساحت حوضه به کیلومتر مربع (Alizadeh و Yamani، ۲۰۱۶). نتایج حاصل از محاسبه این شاخص در جدول ۳ نشان داده شده است.

**شاخص تراکم سطحی آبراهه‌ها (P):** شبکه‌های زهکشی فعال‌ترین و حساس‌ترین عناصری هستند که می‌توانند به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای درک فعالیت‌های نئوتکتونیک در یک منطقه مورد استفاده قرار گیرند (Ilanloo، ۲۰۲۰). این عامل از تقسیم طول شبکه هیدروگرافی حوضه (شامل شبکه‌های اصلی و فرعی) به مساحت حوضه به دست می‌آید و شاخص مفیدی برای ارزیابی و شناسایی نئوتکتونیک در حوضه‌های زهکشی محسوب می‌شود. در این شاخص، هرچه ضریب تراکم بیشتر باشد، بیانگر تکتونیک فعال و حساسیت زیاد سازندهای زمین‌شناسی موجود در

جدول ۳- مقادیر شاخص P در زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه

نام زیرحوضه	مجموع طول آبراهه‌ها (km)	مساحت حوضه (km <sup>2</sup> )	شاخص تراکم زهکشی	طبقه فعالیت
اردکان-چشمه سفید	۲۷۱/۵۷۸	۹۶۵/۲۲۵	۰/۲۸۱	۳
سرانجیلک	۲۶۹/۵۰۴	۸۰۹/۹۱۶	۰/۳۳۵	۱
نورآباد ممسنی	۲۱۲/۵۸۳	۷۴۳/۰۱۴	۰/۲۸۶	۳
کودیان-سرگاه	۱۹۰/۶۳۷	۴۷۹/۶۸۵	۰/۳۹۷	۱
فهلپان	۲۳۹/۹۱۶	۱۰۴۰/۸۶۱۴	۰/۲۳۰	۳

همچنین، باید اشاره شود که مقدار تراکم زهکشی در حوضه‌هایی که دارای فعالیت زمین‌ساختی اخیر هستند، کمتر است (Keller و Pinter، ۲۰۰۲)، که این نکته در ارتباط با زیرحوضه فهلپان که از فعالیت نئوتکتونیک بالای برخوردار می‌باشد، صدق کند. به همین دلیل، بر خلاف سایر پژوهش‌ها، در برخی موارد مقدار پایین این شاخص نشان‌دهنده فعالیت تکتونیک بالا در نظر گرفته شده است که در این ارتباط می‌توان به پژوهش‌های Khalaj (۱۴۰۰) و Babaei و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد.

**شاخص برجستگی نسبی (Bh):** شاخص برجستگی نسبی اختلاف میان مرتفع‌ترین و پست‌ترین نقطه در یک حوضه زهکشی را نشان می‌دهد. این شاخص با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$Bh = h_{max} - h_{min} \quad (4)$$

برجستگی نسبی، نقش مهمی در توسعه شبکه زهکشی، حرکت آب‌های سطحی و زیرزمینی، توسعه اشکال سطحی زمین و ویژگی‌های فرسایشی عوارض زمینی دارد و مقدار بالای آن نشان‌دهنده شدت جریان

بر اساس نتایج حاصل از جدول ۳ و مقادیر حاصل از شاخص P زیرحوضه‌های کودیان-سرگاه و سرانجیلک به ترتیب با P برابر با ۰/۳۹۷ و ۰/۳۳۵ از تکتونیک فعال برخوردار هستند. ذکر این نکته ضروریست که میزان تراکم شبکه زهکشی می‌تواند متأثر از جنس سازندها، میزان شیب و برخی خصوصیات خاک نظیر آهک، درصد سیلت، کربن آلی و نفوذپذیری نهشته‌ها و سازندها باشد. بنابراین، مقدار بالای این شاخص برای زیرحوضه اردکان-چشمه و نورآباد ممسنی که دیگر شاخص‌های تکتونیک در آن مقدار پایین را نشان می‌دهد را می‌توان به عواملی دیگری مانند؛ سازندهای کواترنر، مارن ژئوپس‌دار و ضعف پوشش گیاهی نسبت داد. بر همین اساس، در نقشه پهنه‌بندی تکتونیک منطقه، زیرحوضه‌های مذکور در طبقه متوسط و پایین به لحاظ فعالیت تکتونیک قرار دارند. لازم به ذکر است که شبکه زهکشی در چشم‌اندازهای قدیمی که در زمان طولانی در سطح زمین قرار دارند، گسترش بیشتری یافته، در نتیجه، دارای مقدار تراکم زهکشی بیشتری است.

زمین‌ساختی، مقادیر بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر ( $2000 < Bh < 1000$ ) رده دو فعالیت زمین‌ساختی و مقادیر کمتر از ۱۰۰۰ ( $Bh > 1000$ ) رده سه فعالیت زمین‌ساختی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از محاسبه این شاخص در جدول ۴ نشان داده شده است. بر این اساس، بیشترین مقدار این شاخص ۲۱۶۱ متر برای زیرحوضه اردکان-چشمه می‌باشد. میزان این شاخص برای زیرحوضه‌های فهلیان و سرانجیلک نیز بیش از دو هزار متر است که نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی بالا در زیرحوضه‌های مذکور می‌باشد.

آب، نفوذ پایین و مقدار بالای رواناب است. این شاخص، نشان‌دهنده ارتفاع نسبی یک حوضه است و مقدار بالای برجستگی نسبی، بیانگر نرخ بالآآمدگی بیشتر است که به دلیل فعالیت زمین‌ساختی بیشتر می‌باشد (Keller و Pinter، ۲۰۰۲). مرتفع‌ترین و پست‌ترین نقطه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی برای هر زیرحوضه محاسبه شد (شکل ۹). برای بررسی بهتر، شاخص برجستگی نسبی در سه رده به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی طبقه‌بندی شد: مقادیر بیش از ۲۰۰۰ متر ( $Bh < 2000$ ) رده یک فعالیت

جدول ۴- مقادیر شاخص Bh در زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه

زیرحوضه	حداکثر ارتفاع (m)	حداقل ارتفاع (m)	شاخص برجستگی نسبی	طبقه فعالیت
اردکان-چشمه سفید	۳۶۵۰	۱۴۸۹	۲۱۶۱	۱
سرانجیلک	۳۰۲۵	۹۶۸	۲۰۵۷	۱
نورآباد ممسنی	۲۶۵۴	۶۸۱	۱۹۷۳	۲
کودیان-سرگاه	۲۹۱۸	۱۴۹۳	۱۴۲۵	۲
فهلیان	۲۹۰۲	۷۶۱	۲۱۴۱	۱

لحاظ میزان فعالیت نفوختکتونیک طبقه‌بندی شد. با توجه به این رده‌بندی و بر اساس مقادیر حاصل از شاخص  $Iat$ ، نقشه پهنه‌بندی سطح فعالیت زمین‌ساختی برای منطقه تهیه شد. بر این اساس، زیرحوضه نورآباد ممسنی دارای فعالیت تکتونیکی پایین، زیرحوضه کودیان-سرگاه دارای فعالیت تکتونیکی متوسط و زیرحوضه‌های اردکان-چشمه سفید، سرانجیلک و فهلیان دارای فعالیت تکتونیکی بالا می‌باشند (جدول ۵).

**شاخص زبری سطح زمین<sup>۱</sup> (LSRI):** شاخص زبری سطح زمین در موارد زیادی از جمله برای مدل‌های شبیه‌سازی و یا مدیریت پایدار حوزه آبخیز در مقیاس‌های مختلف و همچنین، برای مدل‌سازی از مخاطرات طبیعی مثل سیل و انواع زمین لغزش‌ها به کار می‌رود (Oliaye و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین، شاخص زبری سطح می‌تواند به عنوان معیاری برای ارزیابی میزان فعالیت تکتونیکی باشد. این شاخص بر این فرض استوار است که زبری تابعی از طول کل خطوط تراز

**ارزیابی نسبی فعالیت‌های تکتونیکی:** شاخص ارزیابی نسبی فعالیت‌های تکتونیک ( $Iat$ ) از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$Iat = S / N \quad (5)$$

که در آن،  $S$  مجموع طبقات شاخص‌های ژئومورفیک محاسبه شده و  $N$  تعداد شاخص‌های محاسبه شده می‌باشد. پس از محاسبه میانگین رده طبقه شاخص‌ها ( $S/n$ ) در هر حوضه و ارزیابی آن بنا بر روش ELHamdouni و همکاران (۲۰۰۸) شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی ( $Iat$ ) به چهار رده به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شود.

$$1 \leq Iat < 1/5$$

$$2 \leq Iat < 2/5$$

$$2/5 \leq Iat$$

فعالیت‌های پایین.

با این توضیح که هر کدام از شاخص‌های اجرا شده از نظر فعالیت تکتونیکی به سه رده؛ بالا (یک)، متوسط (دو) و پایین (سه) تقسیم شدند و بر همین اساس، منطقه مورد مطالعه نیز به سه محدوده به

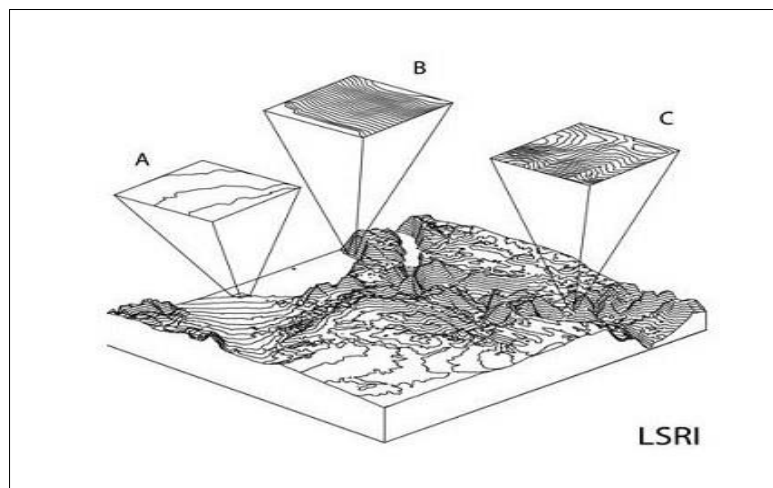
<sup>1</sup> Land Surface Ruggedness Index

نشان از تکتونیک فعال در یک منطقه دارد، بنابراین، مقایسه و انطباق نقشه خطوط تراز با نقشه پهنه‌بندی تکتونیک فعال حاصل از شاخص‌های مورفوتکتونیک نیز نشان‌دهنده انطباق بخش‌های دارای تکتونیک بیشتر (زیرحوضه سرانجیلک و به‌خصوص فهلیان) با مناطق دارای خطوط تراز مترکم‌تر و با چگالی بیشتر است (شکل ۱۱). با این توضیح و بر اساس شاخص مذکور می‌توان نقشه پهنه‌بندی تکتونیک فعال حاصل از شاخص‌های  $V/A$ ،  $BR$ ،  $P$  و  $Bh$  را با واقعیت تکتونیکی منطقه مطابقت دارد.

می‌باشد. بنابراین، با استفاده از چگالی خطوط کانتور در یک منطقه شاخص زبری زمین به‌دست می‌آید (Sappington و همکاران، ۲۰۰۷). در شکل ۱۰، شاخص زبری سطح زمین با استفاده از تراکم خطوط کانتور در یک منطقه نشان داده شده است. بر این اساس، هر جا چگالی خطوط تراز زیاد باشد، مقدار این شاخص نیز بیشتر است و هر جا که این شاخص زیاد باشد، ناحیه شیب‌دار و زمین ناهموار می‌باشد. مقدار این شاخص در نواحی مسطح، پایین است. از طرفی، مناطق دارای زبری زیاد از فعالیت نئوتکتونیک بیشتری برخوردار هستند و مقدار بالای این شاخص

جدول ۵- محاسبه شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) برای منطقه مورد مطالعه

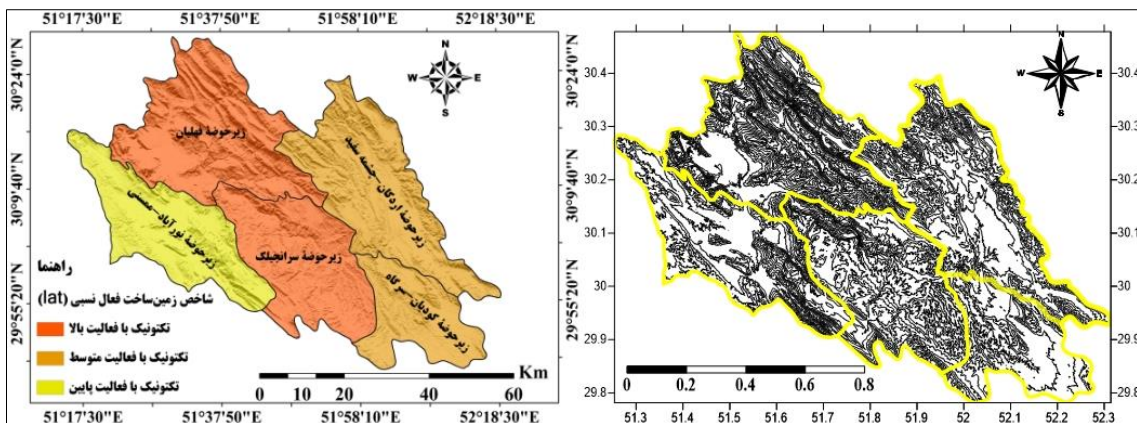
زیرحوضه	شاخص حجم به سطح	شاخص انشعاب‌پذیری	شاخص تراکم زهکشی	شاخص برجستگی نسبی	Iat	طبقه فعالیت
اردکان-چشمه‌سفید	۳	۱	۳	۱	۲	فعالیت تکتونیک متوسط
سرانجیلک	۱	۳	۱	۱	۱/۵	فعالیت تکتونیک بالا
نورآباد ممسنی	۳	۲	۳	۲	۲/۵	فعالیت تکتونیک پایین
کودیان-سرگاه	۳	۳	۱	۲	۲/۲۵	فعالیت تکتونیک متوسط
فهلیان	۱	۲	۳	۱	۱/۷۵	فعالیت تکتونیک بالا



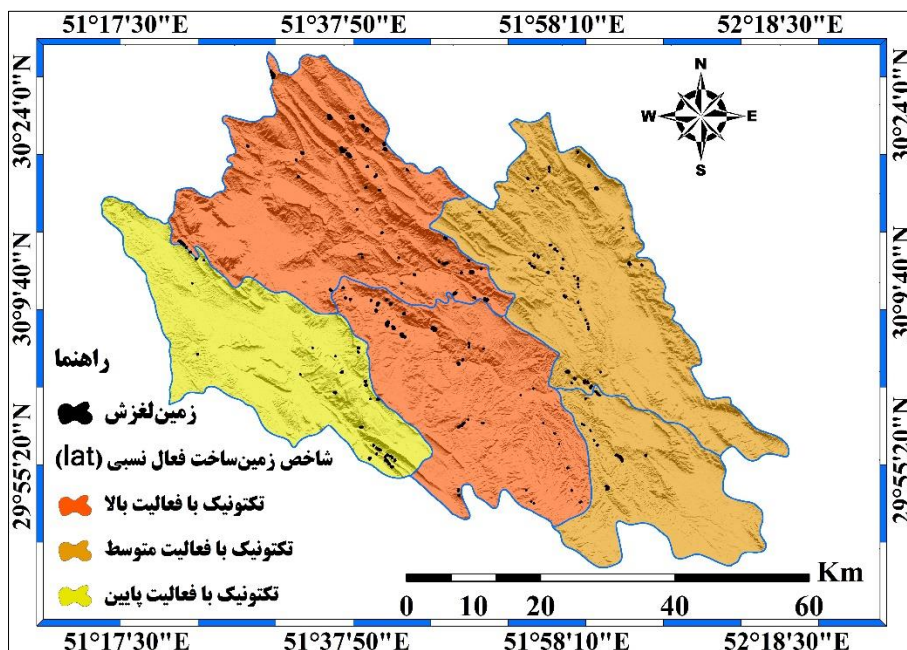
شکل ۱۰- نمایش گرافیکی از قابلیت محاسبه ناهمواری با استفاده از تراکم خطوط تراز (Sappington و همکاران، ۲۰۰۷)

افزایش می‌یابد، به طوری که ۶۷/۳۴ درصد از زمین‌لغزش‌ها در پهنه‌های تکتونیکی بالا و تنها ۳۲/۶۶ درصد آن‌ها در پهنه‌های تکتونیکی متوسط و پایین به‌وقوع پیوسته است (جدول ۶ و شکل ۱۳). این نتیجه نشان‌دهنده همبستگی فراوانی زمین‌لغزش‌ها با تکتونیک فعال و نقش فعالیت‌های نئوتکتونیک در افزایش رخداد زمین‌لغزش است.

در نهایت، نسبت به تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها اقدام شد. با انطباق و هم‌پوشانی نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها با نقشه پهنه‌بندی میزان فعالیت تکتونیک بر اساس شاخص Iat نحوه توزیع و درصد زمین‌لغزش‌ها در پهنه‌های مختلف تکتونیکی مشخص شد (شکل ۱۲). نتایج نشان داد که با افزایش میزان تکتونیک فعال نسبی درصد زمین‌لغزش‌ها نیز



شکل ۱۱- مقایسه نقشه تراکم خطوط تراز با نقشه پهنه‌بندی تکتونیک فعال



شکل ۱۲- نقشه توزیع سطح فعالیت زمین‌ساخت‌نسی و پراکنش زمین‌لغزش‌ها در آن‌ها

جدول ۶- توزیع زمین‌لغزش‌ها در رده‌های مختلف فعالیت تکتونیک در حوضه

طبقه فعالیت تکتونیک	مساحت هر رده (km <sup>2</sup> )	درصد مساحت هر رده	مساحت زمین‌لغزش‌های رخ داده (در هر رده (ha)	درصد زمین‌لغزش در هر رده
فعالیت تکتونیک بالا	۱۸۴۴	۴۵/۷۳	۴۲۸/۳۴	۶۷/۳۴
فعالیت تکتونیک متوسط	۱۴۴۵	۳۶	۱۳۸	۲۱/۶۶
فعالیت تکتونیک پایین	۷۴۳	۱۸/۴۲	۶۹/۴۲	۱۱

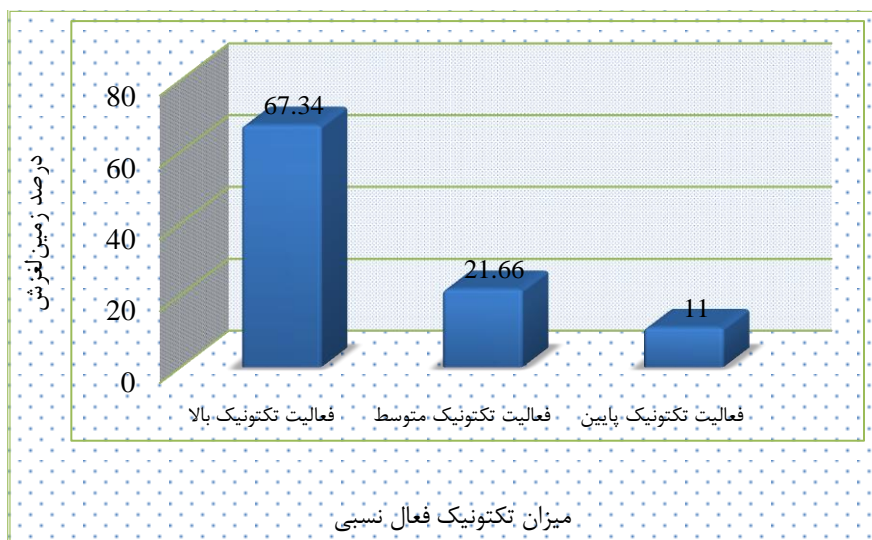
### نتیجه‌گیری

زمین‌لغزش‌ها از جمله مخاطرات محیطی هستند که متأثر از تغییرات ناشی از فعالیت‌های نوزمین‌ساخت بر روی سطح زمین هستند. از طرفی، شاخص‌های مورفوتکتونیک به‌عنوان یکی از ابزارهای اساسی برای پی بردن به وضعیت و میزان تأثیر فعالیت‌های

تئوتکتونیکی در سطح زمین می‌باشد. بر همین اساس، شاخص‌های مورفوتکتونیک می‌توانند در بررسی زمین‌لغزش‌ها مورد استفاده قرار گیرند. در این پژوهش، نسبت به تهیه نقشه پهنه‌بندی تکتونیک فعال بر پایه چهار شاخص مورفوتکتونیک؛ حجم به سطح حوضه (V/A)، شاخص انشعاب‌پذیری

نشان‌دهنده وضعیت فعالیت نئوتکتونیک است، استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده، زیرحوضه نورآباد ممسنی دارای فعالیت تکتونیکی پایین، زیرحوضه کودیان-سرگاه و اردکان-چشمه سفید، دارای فعالیت تکتونیکی متوسط و زیرحوضه‌های سرانجیلک و فهلیان دارای فعالیت تکتونیکی بالا هستند. در ادامه، با انطباق و هم‌پوشانی نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها با نقشه پهنه‌بندی زمین‌ساخت فعال نسبی، نحوه توزیع مکانی و درصد زمین‌لغزش‌های رخ داده در هر پهنه تکتونیکی مشخص شد.

(BR)، شاخص تراکم سطحی آبراهه‌ها (P) و شاخص برجستگی نسبی (Bh) اقدام شد. شاخص‌های مورفوتکتونیک در هر زیرحوضه اندازه‌گیری و محاسبه شد. هر شاخص به سه رده به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی تقسیم و در نهایت، بر اساس تقسیم‌بندی هر شاخص، سطح فعالیت زمین‌ساختی کل بر مبنای شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) در سه طبقه با میزان فعالیت تکتونیک بالا، متوسط و پایین برای منطقه تعیین شد. همچنین، از شاخص زبری سطح زمین (LSRI) که مبنای آن تعیین میزان تراکم (چگالی) خطوط کانتور (تراز) می‌باشد و میزان تراکم



شکل ۱۳- نمودار درصد تراکم زمین‌لغزش‌ها در رده‌های مختلف فعالیت تکتونیک

سدسازی و همچنین، برنامه‌های مربوط به آمایش سرزمین از جمله مکان‌گزینی، احداث و توسعه مسیرهای مواصلاتی، جاگذاری خطوط انتقال حامل‌ها، انتخاب مکان‌های مناسب اکتشاف معادن و ... مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، با توجه به نتایج حاصل از ارزیابی فعالیت نئوتکتونیک در محدوده مورد مطالعه و نظر به تعدد و پراکندگی روستاهای کوچک در منطقه، هشدار و مقاوم‌سازی به منظور افزایش ضریب ایمنی واحدهای مسکونی و اجرای موفق طرح‌های خدماتی را می‌توان از این پژوهش مستفاد کرد.

در پایان باید اشاره کرد، ماحصل این پژوهش آن است که ارزیابی تکتونیک فعال می‌تواند محققین را در تشخیص دقیق‌تر مناطق درگیر با خطر زمین‌لغزش و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی که از صحت بیشتری

نتایج نشان داد که ۶۷/۳۴ درصد (۴۲۸/۳۴ هکتار) از زمین‌لغزش‌ها در مناطق دارای فعالیت تکتونیکی بالا که تنها ۴۵/۷۳ درصد از کل وسعت حوضه مورد مطالعه را شامل می‌شود، به وقوع پیوسته است. بر همین اساس، ۲۱/۶۶ درصد (۱۳۸ هکتار) و ۱۱ درصد (۶۹/۴۲ هکتار) از زمین‌لغزش‌ها به ترتیب در مناطق دارای فعالیت تکتونیکی متوسط و پایین که بخش بیشتری از وسعت کل حوزه آبخیز رودخانه فهلیان را در بر می‌گیرد، حادث شده است. این نتیجه نشان‌دهنده همبستگی مستقیم فراوانی زمین‌لغزش‌ها با تکتونیک فعال و نقش فعالیت‌های نئوتکتونیک در افزایش رخداد زمین‌لغزش می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش، می‌تواند در زمینه مدیریت و پایداری دامنه‌ها، اجرای موفق طرح‌ها و سازه‌های آبخیزداری و

برخوردار باشند، یاری دهد. به همین خاطر پیشنهاد می‌شود، در پژوهش‌های آتی از شاخص‌های مورفوتکتونیک که از دقت بیشتری برخوردار باشند، در کنار سایر پارامترهای مرسوم، به‌منظور شناسایی مناطق درگیر و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش استفاده شود.

#### منابع مورد استفاده

1. Abedini, M., Sh. Roustaei and M. Fathi. 2016. Landslide susceptibility zoning using the Bayesian-ANP theorem hybrid model, case study: south shore of Aharchai Catchment from Nasirabad Village to Sattarkhan Dam. *Quantitative Geomorphological Research*, 5(1): 142-159 (in Persian).
2. Afshari, A., M. Ghahroudi, H. Sadough, M. Ehteshami and M. Moinabadi. 2019. Application of morphotectonic indices in landslide hazard analysis in Lorestan railway. *Natural Hazard Management (former Hazard Knowledge)*, 6(1): 66-51 (in Persian).
3. Ahmadabadi, A. and M. Rahmati. 2015. Application of quantitative geomorphometric indices in identifying landslide prone areas using SVM model, case study: Khorramabad-Zal Bridge freeway. *Quantitative Geomorphological Research*, 4(3): 213-197(in Persian).
4. Anderson, J.G., J.N. Brune, R. Anooshehpour and S.D. Ni. 2000. New ground motion data and Concepts in seismic hazard analysis. *Current Science*, 79: 1278-1290.
5. Andreyani, L.P., K. Stanek, R. Gloaguen, O. Krentz and G.L. Domínguez. 2014. DEM based analysis of interactions between tectonics and landscapes in the Ore Mountains and Eger Rift, East Germany and NW Czech Republic. *Remote Sensing*, 6: 7971-8001.
6. Argyriou, A.V., R.M. Teeuwa, P. Soupios and S. Apostolos. 2017. Neotectonic control on drainage systems: GIS-based geomorphometric and morphotectonic assessment for Crete, Greece. *Journal of Structural Geology*, 104: 93-111.
7. Babaei, Sh., M. Dehbozorgi, S. Hakimi and A. Hoseiniasl. 2017. Investigation of active tectonics using geomorphological indicators in Central Alborz. *Quantitative Geomorphological Research*, 6(1): 40-56.
8. Barjesteh, A. 2005. Investigation of the relationship between hydrographic network and fracture system in Gachsaran Formation in Ramhormoz region. Office of Water Engineering Research and Standards, Khuzestan Water and Electricity Organization, 137 pages (in Persian).
9. Biswas, S. 2016. Analysis of GIS based morphometric parameters and hydrological changes in Parbati River Basin, Himachal Pradesh, India. *Journal of Geography and Natural Disasters*, 6(2): 1-8.
10. Cheng, W., N. Wang, M. Zhao and S. Zhao. 2016. Relative tectonics and debris flow hazards in the Beijing mountain area from DEM-derived geomorphic indices and drainage analysis. *Geomorphology*, 257: 134-142.
11. Darvishzadeh, A. 2010. *Geology of Iran*. Amirkabir Publications, 434 pages (in Persian).
12. Dehbozorgi, M., M. Pourkermani, M. Arian, A.A. Matkan, H. Motamedi and A. Hosseiniasl. 2010. Quantitative analysis of relative tectonic activity in the Sarvestan area, central Zagros, Iran. *Geomorphology*, 121(3-4): 329-341.
13. El Hamdouni, R., C. Irigaray, T. Fernández, P. Fernández, J. Jiménez and J. Chacón. 2006. Active tectonics as determinant factor in GIS landslides susceptibility mapping: application to the SW border of Sierra Nevada, Granada, Spain. *Geophysical Research Abstracts*, 8: 1607-1625.
14. El Hamdouni, R., C. Irigaray, T. Fernández, P. Fernández, J. Jiménez, J. Chacón and E.A. Keller. 2008. Assessment of relative active tectonic, southwest border of Sierra Nevada, Southern Spain. *Geomorphology*, 96: 150-173.
15. Ghasemyan, B., M. Abedini, Sh. Roustaei and A. Shirzadi. 2018. Comparative study of vector support machine models and tree logistics to assess landslide sensitivity, case study: Kamyaran City, Kurdistan Province. *Quarterly Journal of Natural Geography*, 6(3): 68-47 (in Persian).
16. Guarnieri, P. and C. Pirrotta. 2008. The response of drainage basins to the late quaternary tectonics in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily). *Geomorphology*, 95: 260-273.
17. Habibi, A. 2015. Land slide survey by using indicators of morphotectonic. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 7(1): 108-98 (in Persian).
18. Harkins, N.W., D.J. Anastasia and F.J. Frank. 2005. Tectonic geomorphology of the Red Rock Fault, insights into segmentation and landscape evolution of a developing range front normal fault. *Journal of Structural Geology*, 27: 1925-1939.
19. Hemmati, F. and D. Mokhtari. 2018. Evaluation of the risk of amplitude instabilities of Banarvan Fault using artificial neural network model (MLP). *Quantitative Geomorphological Research*, 7(1): 89-74 (in Persian).
20. Ilanlou, M. 2020. Investigation of active tectonics of Dalaki Catchment using geomorphic indices and



- geomorphological evidences. *Geography (Iranian Journal of Geographical Association)*, 18(66): 185-168 (in Persian).
21. Jedari Eivazi, J. 2002. *Geomorphology of Iran*. Payame Noor University Press, 106 pages (in Persian).
  22. Khalaj, M. 2021. Evaluation of tectonic activity of Qorveh-Dehgolan Catchment using geomorphic indicators. *Quarterly Journal of Geography and Development*, 19(62): 133-156.
  23. Khabbazi, M. and M. Shahbazi. 2016. Investigation and analysis of geomorphic indicators and its relationship with active morphotectonics in dry regions, Ardestan Playa. *Journal of Geography and Regional Development*, 13(2): 45-65 (in Persian).
  24. Mohammadi, S.D., S.H. Jalali and B. Saedi. 2017. Assessment of relative active tectonics in the Hamadan Abshineh Watershed using geomorphic and seismic characteristics of the region. *Quantitative Geomorphological Research*, 5(4): 190-207 (in Persian).
  25. Mokarram, M. and M. Shaygan. 2018. Landslide risk assessment and its relationship with landform type in GIS. *Quantitative Geomorphological Research*, 6(4): 31-17 (in Persian).
  26. Nik, Z., K. Yazdjerdi and H. Abdolazimi. 2018. Quantitative analysis of tectonic activity in the Gavkoshak of Kazeroun Watershed by morphometric indices. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 9(4): 371-382 (in Persian).
  27. Panah Imani, A. and N. Hatef. 2003. *Relative Earthquake Hazard Zoning in Fars Province*. 4th Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Tehran (in Persian).
  28. Parhizgar, F., A. Hejazi and L. Kodayeigheshlagh. 2018. Morphometric analysis of Baba Koohi and Kaftarak anticlines and its relationship with active tectonics. *Physical Geography Quarterly*, 11(41): 79-97 (in Persian).
  29. Rao, G., Y. Cheng, A. Lin and B. Yan. 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.
  30. Saffari, A., M. Yamani, A. Karam and P. Karami. 2019. Morphogenetic effects of active tectonics on landslides in Jajroud Basin. *Quantitative Geomorphology*, 7(3): 135-117 (in Persian).
  31. Sappington, J.M., K.M. Longshore and D.B. Thompson. 2007. Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: a case study using bighorn sheep in the Mojave Desert. *The Journal of Wildlife Management*, 71: 1419-1426.
  32. Shayan, S. and Gh. Zareei. 2014. Zoning of earthquakes that occurred in Fars Province during 1900 to 2010 AD and comparing it with other research findings. *Geographical Research Quarterly*, 29(1): 89-104 (in Persian).
  33. Sharifi, R., M. Pourkermani and A. Solgi. 2013. Investigation of the relationship between active tectonics and landslide zones based on active tectonic indices. *National Conference on Tectonics of Iran*, Tehran (in Persian).
  34. Sharifi, R., M. Pourkermani and A. Solgi. 2012. Comparison slide zones by Nilsen method with active tectonic zones produce of Smf index. *International Journal of Fundamental physical Sciences*, 2(2): 24-29.
  35. Sharifi, R., M. Moayyeri, H. Ghayour, H. Safayi and A. Seif. 2013. Investigate and matching of geomorphological and seismic evidence of active tectonics in Central Zagros area. *Geography and Environmental Planning*, 24(2): 175-192 (in Persian).
  36. Terzaghi, K. 1950. *Mechanisms of landslides*. Geotechnical Society of America, Berkeley, 83-125.
  37. Topal, S., E. Keller, A. Bufe and A. Koçyiğit. 2016. Tectonic geomorphology of a large normal fault: Akşehir fault, SW Turkey. *Geomorphology*, 259: 55-69.
  38. Wang, Q., L. Wenping, W. Yanli, P. Yabing, X. Maolin and Y. Dongdong. 2016. A comparative study on the landslide susceptibility mapping using evidential belief function and weight of evidence models. *Journal of Earth System Science*, 3(125): 645-662.
  39. Yamani, M. and Sh. Alizadeh. 2016. Investigation of new tectonic activities in Karaj Watershed through geomorphic indices. *Quarterly Journal of Natural Geography*, 9(31): 1-18 (in Persian).
  40. Yamani, M. and H. Elmizadeh. 2014. The effect of neonatal construction on the morphology of the drainage network of Nachi Watershed using geomorphic and morphometric indices. *Quarterly Journal of Geographical Research*, 29(1): 9-22 (in Persian).