

تأثیرات مورفوژنتیکی تکتونیک فعال بر زمین لغزش در حوضه جاجرود

امیر صفاری* - دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
مجتبی یمانی^۱ - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
امیر کرم - دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
پریوش کرمی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی تهران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۰۴ تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۱۱/۱۹

چکیده

زمین لغزش به عنوان یک مخاطره طبیعی، همواره خسارات فراوانی را به همراه داشته است. شناسایی عوامل موثر در وقوع این پدیده و بهینه بندی خطر آن، یکی از روش‌های اساسی و کاربردی جهت دستیابی به راهکارهای کنترل و پایش آن می باشد. در این پژوهش هدف بررسی ارتباط تکتونیک فعال و پتانسیل وقوع زمین لغزش در حوضه ابریز جاجرود به عنوان یکی از حوضه های کوهستانی کشور می باشد. ابزارهای اصلی پژوهش را شاخص های مورفو تکتونیک تشکیل داده اند. این شاخص ها به تفکیک در ۳۹ زیر حوضه جاجرود مورد بررسی قرار گرفته اند. نسبت تعداد زمین لغزش ها به تعداد زیر حوضه ها برای هر طبقه از IAT به دست آمد. پس از آن درجه سطح خطر احتمالی از کلاس های IAT شناسایی شد. در نهایت، خطر زمین لغزش برای هر زیر حوضه بر اساس اثر ترکیبی از سطح خطر احتمالی و فرکانس وقوع زمین لغزش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که تطابق خوبی بین کلاس IAT و نسبت تعداد زمین لغزش ها به تعداد زیر حوضه ها وجود دارد. حدود ۸۵٪ از زیر حوضه ها که زمین لغزش در آنها رخ داده در سطح زیاد و بسیار زیاد خطر قرار دارند، در حالی که از ۲۷ زیر حوضه بدون زمین لغزش، حدود ۳۳ درصد در سطوح بالا و بسیار بالای خطر قرار دارند. به منظور صحت سنجی و ارزیابی دقت مدل از دوشاخه به نام های مجموع کیفیت (QS) و دقت روش (P) استفاده شد. مقدار مجموع کیفیت (QS) ۰/۹۷ و دقت روش (P) برای کلاس های خطر زیاد و خیلی زیاد ۰/۷۹ + بدست آمد. مجموع کیفیت و دقت روش نشان دهنده صحت یا مطلوبیت عملکرد روش در پیش بینی خطر زمین لغزش است. یافته ها نشان دادند که حوضه جاجرود از نظر تکتونیک بسیار فعال بوده و این موضوع استعداد روانگرایی دامنه ای و زمین لغزش را به نسبت افزایش داده است.

واژگان کلیدی: زمین لغزش، مورفوژنتیک، تکتونیک فعال، حوضه جاجرود.

مقدمه

زمین لغزش‌ها بلایای طبیعی ناگهانی هستند که اغلب در نواحی کوهستانی پدید می‌آیند. ارتفاع بیشتر کوهستان‌ها باعث افزایش ریزش‌ها، زمین لغزش‌ها، سیلاب‌های کوهستانی و جریان‌های آواری می‌شود (آنبالاگان و همکاران^۱، ۱۹۹۶). زمین لغزش از پدیده‌هایی است که گاهی همزمان با زلزله اتفاق می‌افتد و موجب بالا رفتن خسارات زلزله می‌شود. با استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیک می‌توان نقشه‌هایی تهیه کرد که در پیش‌بینی مکان‌هایی که در اثر زلزله‌های آتی دچار ناپایداری می‌شوند، برنامه ریزان را یاری داد. در قرن حاضر با توسعه و پیشرفت سریع دانش بشری و نزدیکی علوم و تخصص‌ها به یکدیگر، مسأله ناپایداری دامنه‌ها و زمین لغزش‌ها به یکی از کانون‌های اصلی مورد توجه دانشمندان علوم ژئومورفولوژی، مهندسی زمین‌شناسی و ژئوتکتونیک و رشته‌های مرتبط دیگر چون آبخیزداری و منابع طبیعی، برنامه ریزی محیط و آمایش سرزمین، تبدیل شده است. در این زمینه شاخص‌های ژئومورفیک ابزار سودمندی برای مطالعه فعالیت‌های تکتونیک در نواحی مختلف محسوب شده و به وسیله آنها می‌توان اطلاعاتی در مورد نواحی خاصی از یک منطقه که در معرض فعالیت تکتونیک نسبتاً سریع یا حتی خیلی کم قرار دارند، به دست آورد (کیلر و همکاران^۲، ۲۰۰۲). در این مطالعه، منطقه کوهستانی حوضه جاجرود واقع در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعات ارزنده‌ای، به ویژه در سال‌های اخیر با روش‌های مختلفی، به منظور مطالعه زمین لغزش‌ها در نواحی مختلف ایران و جهان، صورت گرفته است. برای مثال در ایران، بهنیاfer و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از مدل AHP و منطق فازی در حوضه آبریز فریزی در دامنه‌ی کوه‌های بینالود به پهنه بندی زمین لغزش پرداختند، طبق این مطالعه ۶۸ درصد از حوضه در معرض خطر بحرانی و متوسط زمین لغزش قرار گرفته است. فرداد و همکاران (۱۳۸۹) از روش منطق فازی و شبکه عصبی و GIS در پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه مال خلیفه در استان چهارمحال و بختیاری استفاده کردند، کریمی سنگ چینی و همکاران (۱۳۹۰)، در حوضه چهل چای استان گلستان، از روش‌های AHP، WLC و رگرسیون لجستیک و روش آماری چند متغیره، به منظور پهنه بندی ریسک پذیری زمین لغزش استفاده کرده‌اند، نتایج نشان داد که مدل ترکیب خطی وزنی بعد از روش آماری از مطلوبیت بالایی برخوردار می‌باشد. قنوتی (۱۳۹۰)، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی حوضه جاجرود را پهنه بندی نمود. او در این پهنه بندی عوامل شیب، جهت شیب، مدل ارتفاعی رقومی، زمین‌شناسی، فاصله از گسل و بارندگی را به عنوان عوامل موثر در خطر زمین لغزش مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل نشان داد که بیش از ۶۲٪ از مساحت حوضه جاجرود در پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد لغزش واقع شده‌اند. یمانی و همکاران (۱۳۹۰)، به پهنه بندی ناپایداری‌های دامنه‌ای جاده جدید سنندج-مریوان پرداخته و نتایج به دست آمده از مقایسه مدل‌ها و تطبیق آن با لغزش‌های روی داده در مسیر راه ضمن معرفی برتری روش تحلیل سلسله مراتبی، بیانگر آن است که احداث جاده وقوع لغزش‌ها را تشدید نموده است. بیدار (۱۳۹۱)، در مطالعه‌ای با به کارگیری روش AHP در مسیر ارتباطی مشکین شهر - موئیل، پهنه بندی زمین لغزش را انجام داده است. بر اساس نتایج این مطالعه، مناطق با خطر بسیار زیاد و زیاد در اطراف جاده، در امتداد رودخانه و در محدوده‌ی کوهستانی قرار دارند. پیروزی و همکاران (۱۳۹۱)، با استفاده از مدل هم پوشانی وزنی، پهنه بندی زمین لغزش را در حوضه‌ی آبخیز آق لاقان چای انجام دادند. طبق نتایج به دست آمده دو عامل شیب، کاربری اراضی به ترتیب مهم‌ترین عامل در وقوع زمین لغزش منطقه مورد مطالعه می‌باشند. یمانی و همکاران (۱۳۹۱) با کارگیری الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار به پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش در حوضه آبریز درکه به این نتیجه دست یافت که در بین توابع اجرا شده، تابع حلقوی به خاطر انطباق بیشتر با واقعیت، بهترین

1. Anbalagan and Singh

2. Pinter Keller

عملکرد و تابع خطی از نظر عملکرد، پایین ترین دقت را نشان داد. کرم و همکاران (۱۳۹۱)، پهنه بندی استعداد اراضی نسبت به وقوع لغزش را با استفاده از روش های رگرسیون خطی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی محور هراز از رودهن تا رینه انجام دادند، نتایج نشان داد که روش تحلیل سلسله مراتبی روش مناسب تری برای پهنه بندی خطر زمین لغزش در این محدوده است. صفاری و همکاران (۱۳۹۲)، با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره MR عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش حوضه رودخانه ماربر را شناسایی کرده و آن را به لحاظ خطر رخداد زمین لغزش پهنه بندی کردند. پیروزی و همکاران (۱۳۹۲)، در مطالعه ای پهنه بندی خطر زمین لغزش را در حوضه ی آبخیز آق لاقان چای با استفاده از روش ترکیب خطی وزنی به عنوان یکی از روش های تحلیل چند معیاری، انجام دادند. با توجه به نتایج مطالعه، طبقه با خطر زیاد و بسیار زیاد به ترتیب 36 و 8 درصد از کل مساحت حوضه را شامل می شوند. همچنین طبق نتایج حاصل از این مطالعه، مناطق بسیار پرخطر، از لحاظ لیتولوژی دارای سازندهای سست و نامقاوم آبرفتی کواترنری می باشند و اغلب کاربری های نواحی پرخطر زراعی، مسکونی و مرتع می باشد. عابدینی و فتحی (۱۳۹۳)، با استفاده از مدل های فازی و AHP پهنه بندی زمین لغزش را در حوضه آبخیز خلخال چای انجام داده اند، یافته های این پژوهش نشان داد، 21/82 درصد از زمین لغزش ها با مساحتی در حدود 46/30 در زمره مناطق با لرزه خیزی زیاد در مناطق شرق و شمال شرق حوضه واقع شده اند. قنوتی و همکاران (۱۳۹۳)، با استفاده از منطق فازی در شناسایی و پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز طالقان با استفاده از عملگر های منطق فازی نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش را تهیه کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که عملگر گامای 0/7 در مقایسه با دیگر عملگرهای فازی مناسب تر است. شریفی و همکاران (۲۰۱۳)، با بررسی ارتباط تکتونیک فعال و پهنه های لغزشی در قالب شاخص - های VF و SMF نقشه پهنه بندی تکتونیک را در سه طبقه: ۱) پهنه فعال تکتونیک، ۲) پهنه با فعالیت متوسط و ۳) پهنه غیرفعال تکتونیک تهیه نموده اند. آنها همچنین، نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش را در پنج طبقه تهیه نمودند. مقایسه و انطباق نقشه پهنه بندی تکتونیک فعال حاصل از شاخص های Smf و Vf به ترتیب نشان می دهند که حدود 68 و 53 درصد از پهنه های خطر بالای تکتونیک فعال حاصل از ارزیابی دو شاخص مذکور با پهنه های حساسیت بالا (IV) و خیلی بالا (V) حاصل از نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش منطقه انطباق دارند.

همچنین در خارج از ایران، لی (۲۰۰۷)، در کره؛ از روش فازی و تصاویر ماهواره ای به منظور پهنه بندی زمین لغزش استفاده کرد و در نهایت مناسب بودن روش فازی جهت مطالعه زمین لغزش ها نسبت به سایر روش ها مورد تأیید قرار گرفت. ال همدونی و همکاران (۲۰۰۸)، با استفاده از شاخص ژئومورفولوژی به بررسی علت و وقوع مخاطرات پرداخت و با محاسبه تکتونیک نسبی در امتداد مرز جنوب غربی سیرا نوادا در جنوب اسپانیا IAT را به چهار کلاس طبقه بندی کرد. این محققان نتیجه گرفتند که پتانسیل نسبتا بالایی از تکتونیک فعال با مقادیر IAT در ارتباط است. کولی و همکاران (۲۰۱۰)، در حوضه ریتمو جزیره ایسلند، پهنه بندی خطر زمین لغزش را با استفاده از مدل WLC انجام دادند، و به این نتیجه رسیدند که روش ترکیب خطی وزنی روش مناسبی جهت مطالعه و پهنه بندی زمین لغزش ها می باشد. یالکین و همکاران (۲۰۱۱)، در ترازون ترکیه از مدل آماری رگرسیون لجستیک و AHP استفاده کرده اند، نتایج حاصله نشان داد که عوامل زمین شناسی، ارتفاع، فاصله از جاده و تغییر کاربری به ترتیب

1. lee

2. El Hamdouni et al

3. Kouli et al

4. Yalcin et al

بیشترین نقش را در وقوع لغزش منطقه داشته اند. چاینگ هی و همکاران^۱ (۲۰۱۳)، در کشمیر هیمالیا در هند، با استفاده از روش AHP و معیارهای زمین شناسی، کاربری اراضی و پوشش زمین، طبقات ارتفاعی، خاک و خطوط گسلی، پهنه بندی خطر زمین لغزش را انجام داده اند. در نتیجه، نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش در شش کلاس بسیار بالا، بالا، متوسط، کم و بسیار کم به دست آمد و نتایج مطالعه نشان داد که استفاده از روش AHP در منطقه مورد مطالعه از دقت نسبی خوبی برخوردار است. شاخص های ژئومورفیک در بررسی فعالیت های تکنونیکي ابزار مفید و قابل اطمینانی هستند، زیرا با استفاده از آنها می توان مناطقی را که در گذشته فعالیت های سریع و یا کند تکنونیکي را تجربه کرده اند، به راحتی شناسایی نمود (رامی رز^۲ ° هیه را، ۱۹۹۸، ۳۱۷). چونگ و همکاران^۳ (2016) در تحقیقی به بررسی تکنونیک نسبی و خطرات روانه ها بر اساس شاخص ژئومورفولوژی مشتق شده از DEM و همچنین تجزیه و تحلیل شبکه زهکشی پرداختند. نتایج حاصل از استخراج این شاخص ها نشان داد که منطقه مورد مطالعه از نظر تکنونیکي فعال بوده و تحت خطر حرکات دامنه ای قرار دارد. تیری ایت و همکاران^۴ (2007) تحقیقی را در مورد ارزیابی حساسیت به زمین لغزش با استفاده از روش های چند متغیره به انجام رساندند. آن ها در تحقیقشان روش جدیدی را برای تعیین متغیرهای مؤثر بر آسیب پذیری زمین لغزش ها ارائه کردند.

در این مطالعه منطقه کوه ستانی حوضه جاجرود واقع در دامنه های جنوبی البرز مرکزی مورد بررسی قرار گرفته است. این حوضه به دلیل ویژگی های تکنونیکي و ژئومورفولوژی حوضه جاجرود، مانند وجود گسل ها و سازند های حساس به زمین لغزش و پراکندگی زمین لغزش به نظر می رسد این منطقه مستعد برای وقوع زمین لغزش باشد. سوال اساسی در این پژوهش این است که آیا استعداد وقوع خطر زمین لغزش را می توان با پارامترهای مورد استفاده برای ارزیابی تکنونیک فعال مورد بررسی قرارداد؟

موقعیت منطقه مورد مطالعه

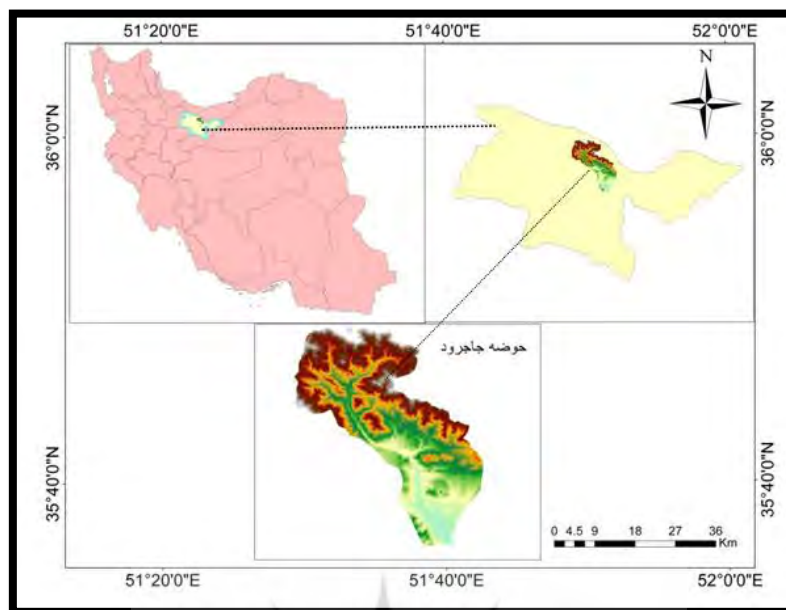
حوضه جاجرود تا محل سد لتیان محدوده ای است با مساحت ۹۴۹ کیلومترمربع که بین طول های جغرافیایی ۲۲°، ۵۱° تا ۵۱°، ۵۱° شرقی و عرض های جغرافیایی ۴۵°، ۳۵° تا ۳۵°، ۵۰°، ۳۶° شمالی واقع شده است. این حوضه با بیش از ۶۰ روستا و سکنه دائم متشکل از دهستان های بخش رودبار قصران و بخش لوسانات که جزء فرمانداری شهرستان شمیرانات می باشد. در حدود ۱۰ کیلومتری شمال شرق تهران واقع شده است. این حوضه از شمال به حوضه سد لار، از غرب به حوضه کرج از جنوب به حوضه شمال تهران محدود می شود. رودخانه اصلی این حوضه جاجرود نام دارد (شکل ۱).

^۱. Chingkhei et al

8. Ramirrez-Herrera

9. Cheng et al.

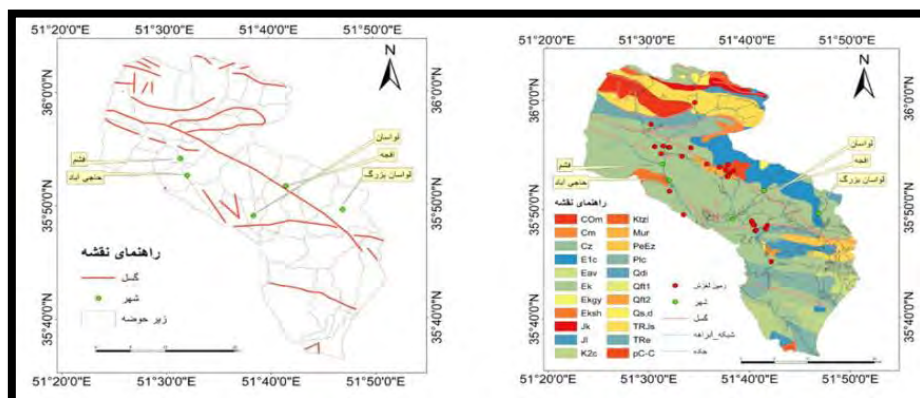
10. Theiry et al.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه

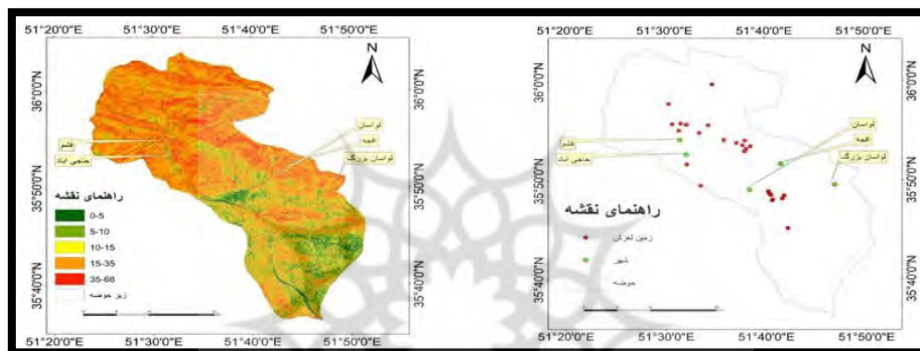
از نظر لیتولوژی، حوضه مورد مطالعه دارای ۲۶ سازند متفاوت زمین شناسی است که بخش اعظم مساحت آن را سازندهای کرج، فجن، شمشک، الیکا و هزار دره تشکیل می دهند که عمدتاً از توف، سنگ های آذرآوری، شیل، آهک، کنگلومرا، ماسه سنگ و سیلت استون می باشد (شکل ۲). سن قدیمی ترین رسوب های حوضه، به پره کامبرین و سن جدید تر بین نهشته ها به کواترنر باز می گردد. این نهشته عمدتاً شامل آبرفت های کانال رودخانه ای، پادگانه های آبرفتی قدیمی و جدید، مخروط افکنه ها، واریزه ها و آبرفت های عهد حاضرند که حدود ۸ درصد مساحت حوضه را به خود داده اند (کرم و همکاران، ۱۳۸۹: ۵۶). ویژگی های زمین شناسی و لیتولوژیکی حوضه جاجرود و سیستم های گسلی مهمی چون گسل مشاء، فشم و گسل شمال تهران در این محدوده، به عنوان بخشی از سیستم تکتونیک پیچیده یال جنوبی البرز، باعث گردیده تا حوضه مورد نظر مکان مناسبی برای ارزیابی شاخص های تکتونیک فعال باشد (شکل ۳). با توجه به بررسی های انجام گرفته ۲۸ زمین لغزش در این حوضه شناسایی شده است (شکل ۴).

بخش وسیعی از منطقه مورد مطالعه در طبقه ارتفاعی ۱۶۵۰ تا ۱۷۵۰ متر، با شیب ۱۰ تا ۲۵ درصد در تیپ کوهستان و تپه ماهوری همراه با سازندهای حساس واقع شده است (شکل ۵). حوضه در اقلیم نیمه خشک سرد واقع شده است. میانگین بارندگی سالانه در منطقه در حدود ۲۶۵/۴ میلیمتر است که رژیم مدیترانه ای را تداعی می کند. حداقل و حداکثر دما در منطقه ۱۳- تا ۴۳ می باشد. سرعت باد غالب ۰/۸ متر بر ثانیه در ایستگاه لتیان و جهت باد غالب غربی می باشد. کوه های واقع در منطقه به صورت نوارهایی در شمال و بخش هایی در میانه منطقه مورد مطالعه واقع شده است. کوه ها عمدتاً از نظر پوشش خاکی فقیر می باشند. کوه های واقع در نیمه شمالی دارای رخنمون های سنگی زیاد به صورت توده سنگی و رشته کوه های بخش میانی علیرغم عدم وجود رخنمون های سنگی زیاد به دلیل وجود لایه های مارنی، نمکی و گچی از پوشش گیاهی بسیار کمی برخوردار هستند.



شکل ۲: نقشه سازند های حوضه جاجرود

شکل ۳: نقشه گسل های حوضه جاجرود



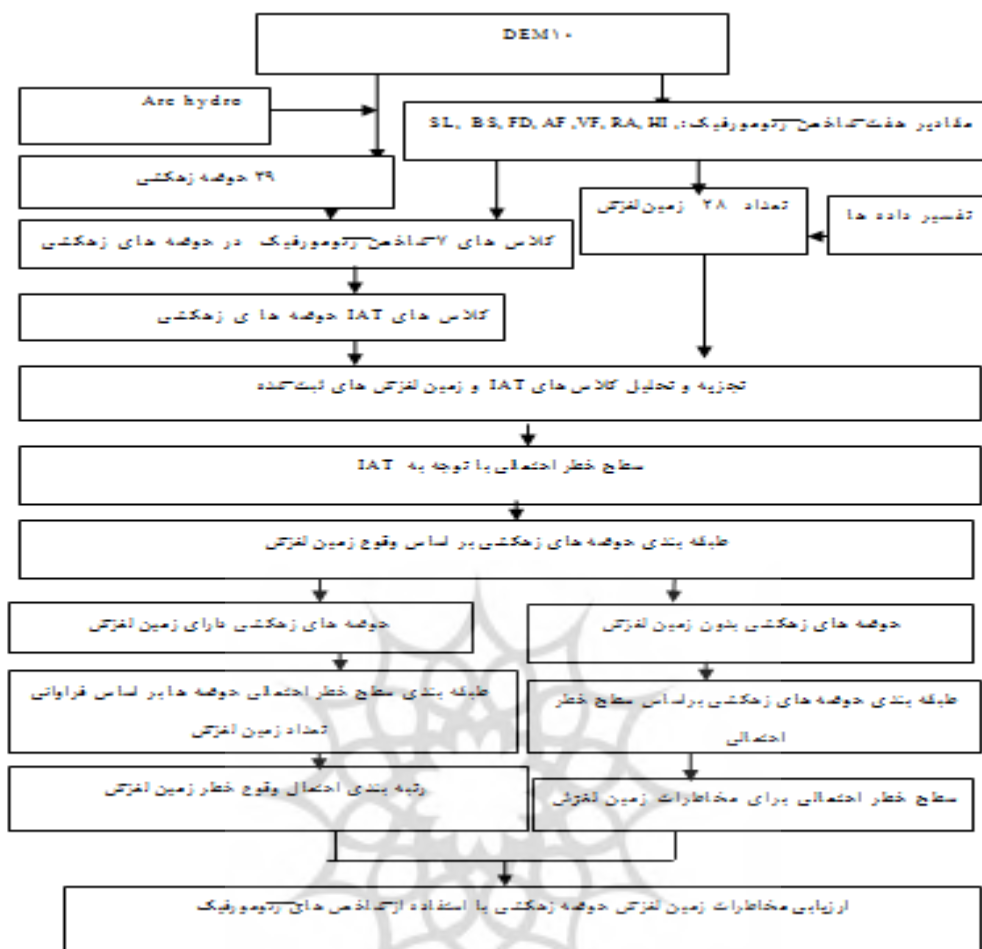
شکل ۴: نقشه زمین لغزش های حوضه جاجرود

شکل ۵: نقشه شیب حوضه جاجرود

داده ها و روش ها

الف) داده ها و مراحل انجام پژوهش

در این مطالعه، ارزیابی خطر زمین لغزش بر اساس زیرحوضه ها انجام شده است. زیرحوضه ها با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۰ متری و ابزار ArcHydro استخراج شد. در این تحقیق از نقشه های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ (۱) و نقشه های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و افزونه X-TOOLS استفاده شده است. در مجموع، ۳۹ زیرحوضه استخراج شد. برای هر زیرحوضه، هفت شاخص ژئومورفولوژی از جمله شاخص مورفولوژی (RA) و انتگرال هیپسومتریک (HI)، شاخص طول - شیب رود (SL)، بعد فرکتال زیر حوضه های زهکشی (FD)، شکل حوضه (BS)، عامل عدم تقارن (AF)، و نسبت نامتقارنی حوضه زهکشی (VF) محاسبه شد. سپس با استفاده از شاخص IAT^۱ و داده های کمی به دست آمده از شاخص های ژئومورفیک میزان فعالیت نوزمین ساختی منطقه به دست آمد. تعداد زمین لغزش ها در هر زیرحوضه، مشخص شد و رابطه بین کلاس IAT و نسبت تعداد این زمین لغزش ها به تعداد زیرحوضه به دست آمد و سطح خطر احتمالی شناسایی شد. در نهایت، زیرحوضه ها به دو دسته بر اساس رخداد زمین لغزش تقسیم شدند. سطح خطر احتمالی و فراوانی وقوع زمین لغزش برای زیرحوضه های دارای زمین لغزش و زیرحوضه های بدون زمین لغزش بدست آمد. نمودار گردش مربوط به مراحل مختلف کار در (شکل ۶) آمده است.



شکل ۶: فلوجارت ارزیابی خطر زمین لغزش

ب) محاسبه شاخص های تکتونیک فعال

شاخص ژئومورفیک یک روش کمی برای استخراج ویژگی های مختلف ژئومورفولوژی مانند کانال رودخانه، نیمرخ طولی، مورفولوژی دره، و لندفرم تکتونیک بکار می رود (همدونی و همکاران، ۱، ۲۰۰۸). هفت شاخص ژئومورفیک که در بالا به آنها اشاره شد در منطقه مورد مطالعه تحلیل شد و با توجه به ویژگی این شاخص ها، در چهار گروه طبقه بندی شد: (۱) شاخص مورفولوژی (RA) (۲) شاخص های بالآمدگی تکتونیک (HI, SL) (۳) شاخص شکل، (FD و BS) (۴) شاخص شیب حوضه (AF, VF)

RA شاخص مورفولوژی: اختلاف بین حداکثر و حداقل ارتفاعات در یک حوضه زهکشی را نشان می دهد.

$$RA = hmax - hmin \quad (۱) \text{ رابطه}$$

که در آن hmax و hmin حداکثر و حداقل ارتفاع (متر) در یک حوضه زهکشی می باشند. RA عمق برش و درجه برهنه سازی سطح را بیان می کند که می تواند برای توصیف شدت فعالیت زمین ساختی مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس طبقه بندی ژئومورفیک (چینگ و همکاران، ۲، ۲۰۱۱) این شاخص به پنج دسته بر اساس (جدول شماره ۱) رده بندی شده است.

انتگرال هیپسومتریک H_i : انتگرال هیپسومتریک بیانگر مساحت زیر منحنی هیپسومتریک است انتگرال هیپسومتریک بدین وسیله برآورد می شود (رودیجر، ۲۰۰۹). رابطه (۲)

$$H_i = H_{\text{mean}} \cdot H_{\text{min}} \div H_{\text{max}} \cdot H_{\text{min}}$$

در معادله ی فوق الذکر H_i = انتگرال هیپسومتریک؛ H_{mean} = ارتفاع متوسط حوضه H_{min} = حداقل ارتفاع حوضه و H_{max} = حداکثر ارتفاع حوضه است. مقادیر بالای انتگرال هیپسومتریک بالا آمدگی ها و شکل گیری توپوگرافی جدید، مقادیر متوسط وضعیت زمین ساختی نسبتاً فعال و مقادیر پایین حوضه های پست با فعالیت های زمین ساختی کم را بیان می کنند. به پنج دسته بر اساس (جدول شماره ۱) رده بندی شده است.

شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL) : شاخص (SL) یک روش عملی برای اندازه گیری تغییرات ناگهانی شیب در مسیر طولی بستر رودخانه می باشد. زیرا جریان آب نسبت به تغییرات به وقوع پیوسته در شیب بستر حساسیت نشان میدهد. این شاخص با استفاده از رابطه زیر به دست می آید: رابطه (۳)

$$SL = \frac{H}{L}$$

در این رابطه SL : شاخص شیب رودخانه، H : اختلاف ارتفاع در یک مقطع خاص از رودخانه، L : فاصله افقی همان محل و یا (L/H) شیب بخشی از مجرا است و L : طول رودخانه از نقطه مرکزی همان محل تا سرچشمه رودخانه می باشد. این شاخص برای ارزیابی زمین ساخت فعال نسبی مفید است. آستانه های این شاخص در پنج کلاس بر اساس (هک، ۱۹۷۳، ۲) طبقه بندی می گردد در (جدول شماره ۱) رده بندی شده است.

بعد فرکتال (FD): مبنای روش مطالعه در فرکتال، محاسبه ابعاد فرکتالی برای عناصر هندسی است. بر اساس مفاهیم هندسی اقلیدسی ابعاد عناصر هندسی اعداد صحیح ۳، ۲، ۱، ۰ برای نقطه، خط، صفحه و حجم هستند، که هر کدام از اینها بیانگر عناصر هندسی نامحدود می باشند، ابعاد فرکتالی اعداد اعشاری بوده، و می تواند بدون محدودیتی فرآیندهای طبیعی را اندازه گیری کند (خطیب و همکاران، ۱۳۸۸).

روش به کار گرفته شده روش مربع شمار می باشد. در این روش منطقه مورد مطالعه شبکه بندی شده است. تحلیل ها بر اساس نمودار \log/\log از تعداد مربع های ساختار (Ns) بر حسب اندازه شبکه به کار گرفته شده (S) و یا عکس آن $1/S$ صورت گرفته است. دیاگرام های ترسیم شده، تغییرات ابعاد فرکتالی منطقه را نشان می دهد. برای به دست آوردن بعد فرکتالی رابطه زیر تعریف شده است: رابطه ی (۴)

$$FD = \lim [\log N(s) / \log (1/s)]$$

برای محاسبه بعد فرکتالی از منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار GIS و افزونه X-tools و نرم افزار Excel استفاده شده است. که در آن (S) تعداد جعبه و S طول جعبه (متر) است. ارزش FD به پنج طبقه بر اساس (گوپلموت و همکاران، ۲۰۰۴) تقسیم شدند در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

شاخص نسبت شکل حوضه (B_s): فعالیت های زمین ساختی معمولاً منجر به کشیدگی شکل حوضه ها خواهند شد. حوضه های زهکشی نسبتاً جوان در مناطق فعال زمین ساختی به شکل های طبیعی وجود دارند. شکل این حوضه ها معمولاً با تداوم کم و بیش فرآیندهای زمین ساختی فعال، به صورت کشیده شده در می آید. کاهش این فعالیت ها باعث گردشگری بیشتر حوضه ها می شود این شاخص توسط، کنون (۱۹۹۸) و رمزی (۱۹۷۶) به صورت زیر

$$B_s = B_l/B_w \quad \text{رابطه ی (۵)}$$

14. Rüdiger

15. Hack

16. Guillemot al

17. Cannon

18. Ramirez

در این رابطه BS، شاخص شکل حوضه BI طول حوضه اندازه گیری شده از سرچشمه تا دهانه (فاصله افقی بین بالاترین و پایین ترین ارتفاع حوضه)، و BW پهنای حوضه است که در وسیع ترین نقطه آن اندازه گیری می شود. مقادیر بالای شاخص BS مربوط به حوضه های کشیده در نواحی با فعالیت های زمین ساختی فعال می باشد، در حالی که مقادیر پایین این شاخص بیشتر حوضه های دایره ای شکل نواحی با فعالیت های زمی ن ساختی کم (غیر فعال) را نشان می دهد (رمزی، ۱۹۹۸). بر اساس روش (رمزی و هریرا، ۱۹۹۸) شاخص شکل حوضه (BS) به پنج دسته بر اساس (جدول شماره ۱) رده بندی شده است.

شاخص عدم تقارن حوضه آبریز (Af): شاخص عدم تقارن روشی، برای تشخیص وجود کج شدگی ناشی از فعالیت های تکتونیکی در حوضه های زهکشی است (همدونی و همکاران، 2008: ۱۵۶). این شاخص به صورت رابطه تعریف می گردد: رابطه (۶)

$$Af = (Ar/At) \cdot 100$$

در این رابطه Af عدم تقارن زهکشی، Ar مساحت قسمت راست مسیر رود اصلی، At مساحت کل حوضه زهکشی. این شاخص به تغییر میزان کج شدگی در راستای عمود بر روند مجرا حساس است. اگر حوضه ای در شرایط پایدار، بدون کج شدگی یا با مقدار کم باشد، شاخص Af برابر ۵۰ است. مقادیر بیشتر یا کمتر از ۵۰ بیانگر کج شدگی حوضه است، که می تواند در نتیجه فعالیت زمین ساختی یا ساختارهای حاصل از خصوصیات سنگ شناسی باشد. بر اساس روش (هری و گاردنر، ۱۹۸۵) شاخص نامتقارنی حوضه زهکشی (Af) به پنج دسته بر اساس (جدول شماره ۱) رده بندی شده است.

نسبت عرض کف دره به ارتفاع آن (Vf): این شاخص به عنوان نسبت پهنای کف دره به میانگین ارتفاع آن تعریف شده و از طریق رابطه (۷) محاسبه می شود:

$$Vf = 2 Vfw / [(Eld \cdot Esc) + (Erd \cdot Esc)] \quad \text{رابطه ی (۷)}$$

Vfw عرض کف دره، Eld و Erd به ترتیب ارتفاع دیواره سمت چپ دره و ارتفاع دیواره سمت راست دره و Esc ارتفاع میانگین کف دره است. مقدار این شاخص برای دره های U شکل بالا و برای دره های باریک و تند V شکل پایین است. مقدار کم Vf بیانگر دره عمیق با رودخانه ای که به طور فعال در حال کندن کف دره است و به طور عادی منطقه در حال بالا آمدگی می باشد. اما دره پهن نشان دهنده ی منطقه ی نسبتاً پایدار تکتونیکی بوده و مقدار زیاد Vf نشاندهنده سرعت کم بالا آمدگی در منطقه است (کیلر و پیتر، ۱۹۹۶). بر اساس روش (بول و مک فادن، ۱۹۷۷)، شاخص Vf به پنج دسته بر اساس (جدول شماره ۱) رده بندی شده است.

جدول ۱: معیار طبقه بندی شاخص های ژئومورفیک نشان دهنده تکتونیک فعال (ژونگ و همکاران ۲۰۰۴)

class	RA	HI	SL	FD	BS	AF	VF
۱	<۷۰	<۰/۳	<۲۵	≥۱/۱۵	<۰/۲	<۱	≥۵
۲	۷۰-۲۰۰	۰/۳-۰/۴	۲۵-۷۵	۱/۱-۱/۱۵	۰/۲-۰/۴	۱-۷/۵	۲/۵-۵
۳	۲۰۰-۵۰۰	۰/۴-۰/۵	۷۵-۲۰۰	۱/۰.۸-۱/۱	۰/۴-۰/۸	۷/۵-۱۵	۱-۲/۵
۴	۵۰۰-۱۰۰۰	۰/۵-۰/۶	۲۰۰-۴۰۰	۱/۰.۶-۱/۰.۸	۰/۸-۱/۲	۱۵-۳۰	۰/۵-۱
۵	≥۱۰۰۰	≥۰/۶	≥۴۰۰	<۱/۰.۶	≥۱/۲	≥۳۰	<۰/۵

شاخص ارزیابی نسبی فعالیت های زمین ساختی IAT

شاخص IAT در تجزیه و تحلیل شاخص های ژئومورفولوژیک و جمع بندی نتایج آن ها مورد استفاده قرار می گیرد تا وضعیت نسبی فعالیت های زمین ساختی در منطقه مشخص گردد. شاخص فعالیت نسبی زمین ساخت (Iat) از تقسیم مجموع کلاس های شاخص های ژئومورفولوژیک محاسبه شده (S) بر تعداد شاخص های محاسبه شده (N) دست می آید.

$$Iat = S / N$$

برای دست آوردن نتایج دقیق تر، هفت شاخص به پنج طبقه تقسیم شدند، و به هر طبقه یک مقدار وزن اختصاص داده شد. این کلاس ها جمع شده و برای بدست آوردن IAT میانگین آنها حساب شد. این میانگین حسابی در شناسایی مناطق تکتونیکی فعال مفید شناخته شده است.

$$IAT = \gamma \quad \text{رابطه ی (۸)}$$

$$(RA+HI+SL+FD+BS+AF+VF)/$$

یافته ها و بحث

ارزش RA در محدوده مورد مطالعه شرایط ارتفاعی را نشان می دهد که از ۳۳۰ تا ۲۱۹۰ متر، با میانگین ارتفاعی ۱۳۵۹ متر می باشد. تعداد زیرحوضه ها برای هر کلاس RA در جدول (۲) نشان داده شده است. کلاس پنج بزرگترین منطقه که شامل ۲۹ زیرحوضه و ۷۴/۳۶ درصد از کل حوضه و پس از آن کلاس چهار با ۸ زیرحوضه و (۲۱/۵۱ %) و کلاس سه شامل ۲ زیرحوضه و (۴/۱۳ %) را پوشش می دهد. توزیع طبقات RA در منطقه مورد مطالعه در (شکل ۷. الف) نشان داده شده است. کلاس ۵ که عمدتاً در منطقه پرشیب کوهستان که با پوشش گیاهی کمتر مشخص شده توزیع شده است. کلاس ۴ که عمدتاً در منطقه داخلی کوهستان با پوشش گیاهی متراکم توزیع شده است. کلاس ۳ به طور عمده در مناطق کوهپایه و پست توزیع شده است.

مقادیر بالاتر شاخص HI، بیانگر توپوگرافی جوان و وجود پستی و بلندی زیاد نسبت به میانگین شبکه ی زهکشی است و با برش های عمیق، برجستگی های ناهموار، سطوح بالآمده و بریده شده توسط شبکه زهکشی مشخص می شود. مقادیر پایین تر شاخص، تعادل در فرآیندهای ژئومورفیک و گذر از مرحله بلوغ به پیری را بیان می کند که برجستگی های نسبی هموار از ویژگی های آن است. ارتباط بین شاخص HI و درجهی بریدگی، سبب شده تا به عنوان معیاری برای تشخیص چرخه ی مرحله فرسایش چشم انداز، مورد استفاده قرار گیرد. در اینجا محاسبه شاخص انتگرال هیپسومتری نتایج حاصل از مورفولوژی زیرحوضه ها به صورت خلاصه (ژونگ و همکاران ۲۰۰۴)، به ۵ کلاس تقسیم شده است. مقادیر به دست آمده انتگرال هیپسومتری یک بین (۰/۴۹۱ ° ۰/۵۰۱) است که بیانگر توپوگرافی جوان می باشد را نشان می دهد. تعداد زیرحوضه ها برای هر کلاس HI (جدول ۲) نشان می دهد که ۳۶ زیرحوضه HI بین ۰/۴ و ۰/۵ که در کلاس ۳ که تقریباً ۹۲/۳ زیرحوضه ها را شامل می شود، بیانگر توپوگرافی جوان و وجود پستی و بلندی زیاد نسبت به میانگین شبکه ی زهکشی می باشد. زیرحوضه های با HI بین ۰/۵ و ۰/۶ شامل ۳ زیرحوضه و ۷/۷ درصد، از کل منطقه را پوشش می دهد. توزیع طبقات HI در شکل نشان داده شده است. (شکل ۷ ب).

مقادیر عددی شاخص گرادیان رودخانه زمانی که سنگ های بستر رودخانه مقاوم باشند و یا در مناطقی که حرکات در سنگ های SL تکتونیکی فعال در تغییر شکل قائم پوسته زمین مؤثر باشد، زیاد می باشد. بر این اساس مقادیر بالای دارای مقاومت کم و یا در سنگ های از لحاظ مقاومتی یکسان هستند، می تواند بیانگر حرکات تکتونیکی فعال و جوان می باشد. مقادیر به دست آمده برای شاخص گرادیان طولی رودخانه تعداد زیرحوضه های با ارزش مقادیر بالاتر از ۴۰۰ برای کلاس ۵ با ۱۶ زیرحوضه که ۴۴/۴ درصد از مساحت کل و مقادیر بین ۴۰۰ - ۲۰۰ در کلاس ۴ با ۱۹ زیرحوضه و ۴۸/۷ از مساحت و مقادیر بین ۲۰۰ - ۷۵ در کلاس ۳ با سه زیرحوضه ۶/۹ و یک زیرحوضه نیز در کلاس ۲ بدست آمد. براساس مقادیر به دست آمده از این شاخص بخش میانی حوضه دارای بیشترین فعالیت نوزمین

ساختی می باشد و قسمت های شمال و بخش جنوبی در کلاس ۴ یعنی در فعالیت نوزمین ساختی زیاد می باشند. بنابراین زیرحوضه های این بخش حدود ۹۳٪ فعالیت نوزمین ساختی زیاد و خیلی زیاد می باشد. تعداد زیرحوضه ها برای هر کلاس SL در جدول (۲) ذکر شده است.

با توجه به نتایج بعد فرکتالی محاسبه شده، مشاهده می شود که این اعداد دارای تفاوت های می باشد، در حالی که ۳۸ زیرحوضه دارای بعد فرکتالی کمتری و در کلاس ۵ با $۹۷/۴$ مساحت می باشد. این تفاوت با تغییرات توپوگرافی قابل توجه است، به این ترتیب که هر چه توپوگرافی بلند تر باشد، در این صورت بعد فرکتالی، کاهش یافته و به عدد یک نزدیک تر می شود و پس از آن کلاس ۱ با یک زیرحوضه ($۲/۶$) مساحت را پوشش می دهد. از ابعاد فرکتالی آبراهه ها نتیجه می شود که فعالیت تکتونیک موجود در منطقه در قسمت های شمالی بیشتر از قسمت های جنوبی منطقه می باشد که باعث افزایش ارتفاع در شمال منطقه شده است. شکل ۷ د توزیع کلاس FD در منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.

حوضه های فعال تکتونیک، شکل کشیده ای دارند. شکل حوضه در طول زمان با توقف میزان بالآمدگی، به تدریج دایره ای می شود (بوربانک و آندرسون، ۲۰۰۱: ۲۰۳). مقادیر بالای این شاخص مشخص کننده مناطق فعال زمین ساختی است در حالی که مقادیر کوچک آن در حوضه های دایره ای شکل، نواحی غیرفعال را نشان می دهد. زمانی که فعالیت زمین ساختی کم یا متوقف می شود عریض شدگی رخ می دهد و زمانی که پیشانی کوهستان سریع بالا می آیند، حوضه های کشیده و تند را ایجاد می کنند. مقادیر به دست آمده برای شاخص شکل حوضه با حداقل $۰/۶۹$ تا $۳/۵۸$ می باشد. تعداد ۲۷ زیرحوضه در کلاس ۵ با $۶۹/۲$ مساحت و پس از آن کلاس ۴ با ۹ زیرحوضه و ۲٪ مساحت و کلاس ۳ با سه زیرحوضه و $۷/۸$ مساحت است. توزیع طبقات BS در منطقه مورد مطالعه نشان دهنده تکتونیک بالا در زیرحوضه ها می باشد. در جدول ۲ نشان داده شده است.

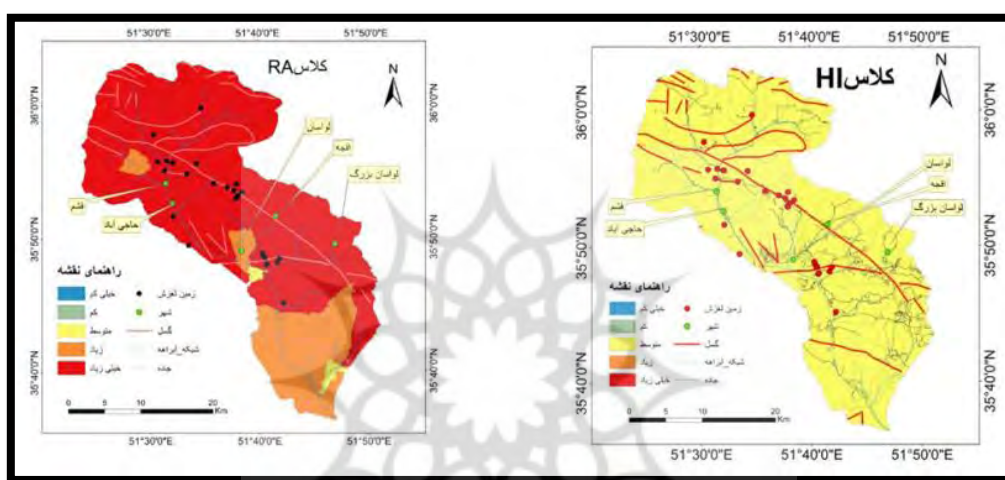
مقادیر عددی بیشتر و یا کمتر از 50 شاخص عدم تقارن رودخانه (AF) بیانگر وجود کج شدگی حوضه بر اثر عملکرد فرسایش در ساحل راست یا چپ آبراهه اصلی و یا ناشی از کنترل نوع سنگ بر فرسایش تفریقی بوده و هرگاه این مقادیر در حدود 50 باشد بیانگر وجود تقارن زهکش های فرعی نسبت به آبراهه اصلی و در نتیجه عدم وجود کج شدگی ناشی از تأثیر فعالیت زمین ساختی می باشد. در بین زیر حوضه های منطقه مورد مطالعه تعداد زیرحوضه ها برای هر کلاس در جدول ۲ ذکر شده است در ابتدا تعداد زیرحوضه ها در کلاس AF کلاس ۳ ($۴۰/۱$) و پس از آن کلاس ۴ ($۲۵/۶$) و کلاس ۲ ($۲۰/۵$) و کلاس ۵ ($۱۳/۸$) می باشد. توزیع طبقات AF در شکل ۷ f نشان داده شده است. کلاس ۳ به طور گسترده ای توزیع شده، نشان می دهد که زیرحوضه ها شکل تقریباً شکل متقارن دارد.

ارزش VF در یک سنگ یکسان، شکل دره ها در مناطق فعال و غیرفعال نوزمین ساختی دارای تفاوت زیادی است. در مناطق فعال به دلیل بالا رفتن شیب و پایین رفتن سریع، بستر دره ها عموماً باریک بوده و نسبت عمق به پهنای دره ها بیشتر از مناطق با فعالیت کم و یا غیرفعال است. دره های U شکل دارای مقادیر بالا و دره های V شکل دارای مقادیر پایین شاخص VF هستند. نوع سنگ بستر نیز در شکل دره دارای نقش اساسی است. بر این اساس مقادیر شاخص VF با توجه به اندازه حوضه و نیز دبی رود یا دره و نوع سنگ متفاوت می باشد. میزان این شاخص بین $۹/۹۸$ و $۰/۰۵$ در منطقه نوسان دارد که میزان این اختلاف را می توان به لیتولوژی متفاوت دره ها نسبت داد. ۶۷% از زیرحوضه در کلاس ۵ و ۱۰% در کلاس ۴ بنابراین ۷۷% زیرحوضه ها در منطقه فعال و خیلی فعال قرار دارد. تعداد زیرحوضه ها برای هر کلاس VF در جدول ۲ نشان داده شده است، و توزیع طبقات VF در شکل ۷ g نشان داده شده است.

جدول ۲: تعداد زیر حوضه‌ها برای هر کلاس از شاخص ژئومورفیک (RA, HI, SL, FD, BS, AF, VF)

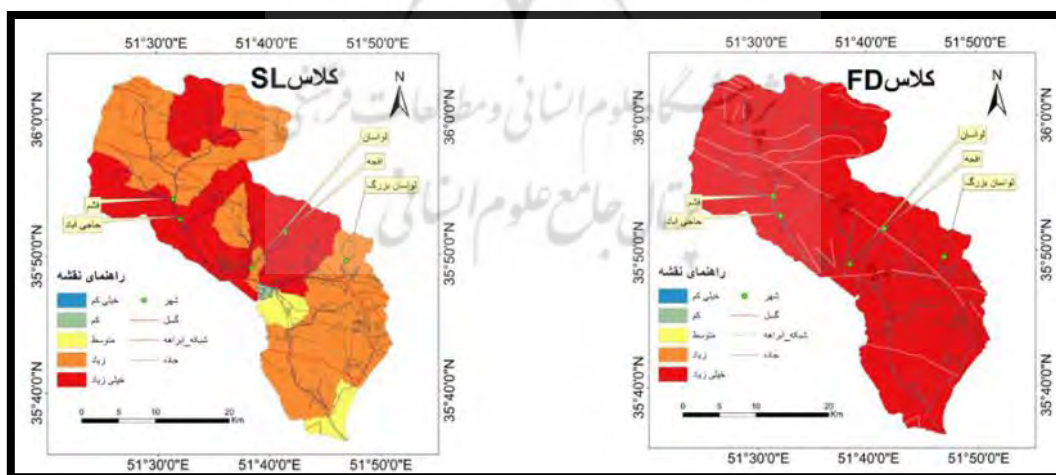
class	RA	HI	SL	FD	BS	AF	vf
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۲	۰	۰	۱	۰	۰	۸	۰
۳	۲	۲۶	۳	۰	۳	۱۸	۸
۴	۸	۳	۱۹	۰	۹	۱۰	۴
۵	۱۹	۰	۱۶	۱۹	۱۷	۳	۲۶

ماخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶



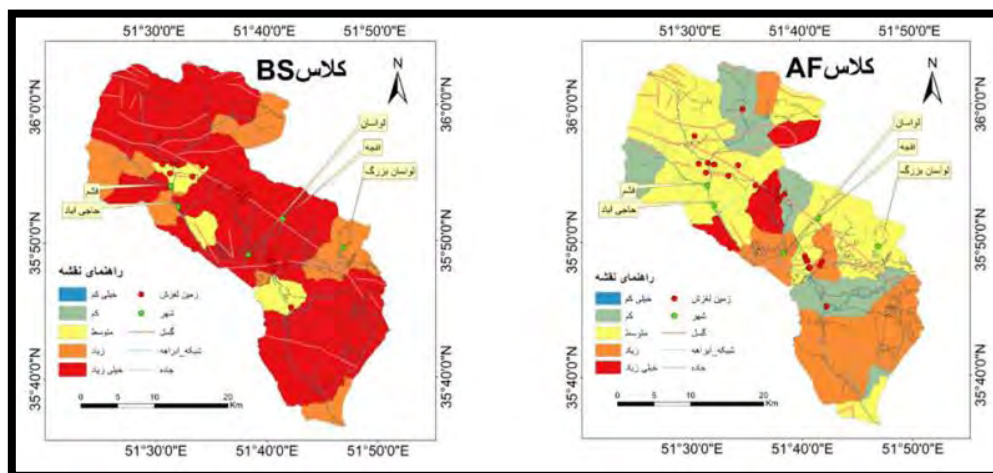
(a)

(b)



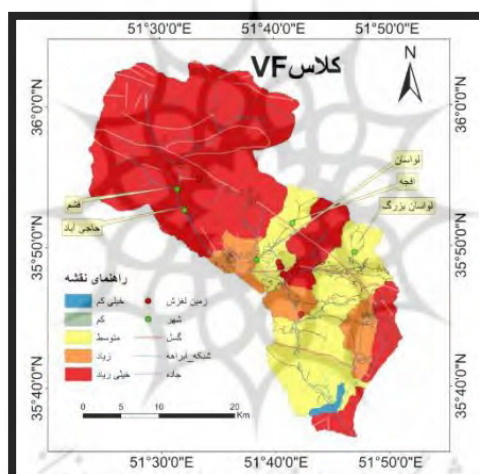
(c)

(d)



(e)

(f)



(g)

شکل (۷) پراکندگی تعداد کلاس های هفت شاخص ژئومورفولوژی برای زیرحوضه های زهکشی

a) RA; b) HI; c) SL; d) FD; e) Bs; f) AF; g) Vf

طبق محاسبات انجام شده منطقه مورد مطالعه به لحاظ فعالیت های نوزمین ساختی ترکیبی از سه کلاس ۲،۳ و ۴ است که نشان دهنده فعالیت زمین ساختی شدید، متوسط و کم است (شکل ۸، ۹). نسبت تعداد زمین لغزش ها به زیرحوضه ها برای هر شاخص ژئومورفولوژی (جدول ۳) که همراه با افزایش کلاس افزایش نسبت نشان می دهد. برای استفاده از شاخص های ژئومورفیک جامع، ارزش IAT بر اساس از معادله Eq محاسبه شد (شکل ۴). این میانگین نشان می دهد که منطقه مورد مطالعه یک فرایند نوزمین ساختی نسبتاً قوی در طول کوتاه تر داشته است. مقادیر IAT در محدوده ۵/۷۹-۰/۶۴ با میانگین ۲/۶۳ و انحراف معیار ۱/۰۷ نشان تکتونیک نسبتاً فعال است. انحراف از معیار نسبتاً کم نشان می دهد که فعالیت های تکتونیک در منطقه مورد مطالعه کمتر تغییر می کند.

بر اساس IAT، ۳۹ زیرحوضه در منطقه مورد مطالعه به پنج کلاس با استفاده از روش natural breaks در نرم افزار ArcGIS طبقه بندی شدند: کلاس یک با ۱/۴۵ °، کلاس دو با ۲/۲۴ °، کلاس سه با

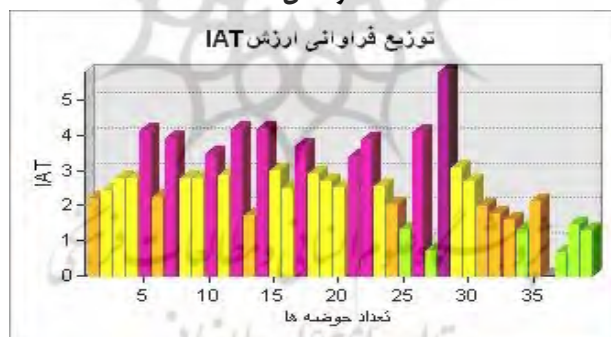
۳/۰۷-۲/۲۵، کلاس چهارم با ۴/۱۵-۳/۰۸، و کلاس پنجم با ۵/۷۹-۴/۱۶ (جدول ۴، شکل ۵). کلاس ۱ با ۶ زیرحوضه و بدون زمین لغزش و کلاس ۲ با ۹ زیرحوضه و یک زمین لغزش و کلاس ۳ دارای ۱۴ زیرحوضه و ۸ زمین لغزش، و کلاس ۴ دارای ۹ زیرحوضه و ۱۷ زمین لغزش و در نهایت کلاس ۵ با یک زیرحوضه و ۲ زمین لغزش می باشد. نسبت زمین لغزش به حوضه های زهکشی برای طبقات ۴ و ۵ بطور آشکاری از فراوانی نسبی بالایی برخوردار می باشد.

در نیمه شمالی منطقه کوهستانی با داشتن دامنه های پر شیب، ارتفاع متوسط به بالا، فرسایش شدید، و تراکم گسل مقادیر IAT بالا می باشد. کلاس متوسط آن بیشتر در حاشیه مناطق کوهستانی با داشتن ارتفاع کمتر، شیب کمتر، پوشش گیاهی پراکنده و فعالیت شدید انسان توزیع شده است. طبقه پایین تر در درجه اول در اطراف سد لتیان، قرار دارد که در مرز میان کوه و دشت، و شیب ملایم، ارتفاع پایین، و گسل های کمتر توزیع شده است.

جدول ۳: نسبت تعداد زمین لغزش ها به تعداد زیرحوضه ها برای هر طبقه از شاخص های ژئومورفولوژی

کلاس	RA	HI	SL	FD	BS	AF	VF
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵	۰
۳	۰	۰/۷۵	۰/۳۳	۰	۱/۳۳	۰/۸۹	۰/۷۵
۴	۰	۰/۳۳	۰/۶۸	۰	۰/۱۱	۰/۲	۰/۲۵
۵	۰/۹۷	۰	۰/۸۸	۰/۷۲	۰/۸۵	۲	۰/۸۱

ماخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۸: توزیع فراوانی ارزش های IAT

ارزیابی احتمال خطر زمین لغزش

کلاس های IAT ارتباط نزدیکی با احتمال وقوع زمین لغزش دارد (جدول ۴). در منطقه مورد مطالعه، از ۳۹ زیرحوضه در ۱۲ زیرحوضه دارای زمین لغزش می باشد. بنابراین، زیرحوضه ها را می توان به دو نوع تقسیم می شوند: زیرحوضه های دارای زمین لغزش و زیرحوضه های بدون زمین لغزش و هر دو نوع از زیرحوضه ها را مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۴: تعداد و نسبت زیرحوضه ها و زمین لغزش ها برای کلاس های متفاوت IAT

طبقات	ارزش	زیرحوضه ها	زمین لغزش	نسبت زمین لغزش به زیرحوضه ها
۱	۰.۶۴-۱.۴۷	۶	۰	۰
۲	۱.۴۸-۲.۲۴	۹	۱	۰/۱۱
۳	۲.۲۵-۳.۰۷	۱۴	۸	۰/۵۷
۴	۳.۰۸-۴.۱۵	۹	۱۷	۱/۸۹
۵	۴.۱۶-۵.۸	۱	۲	۲

ماخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

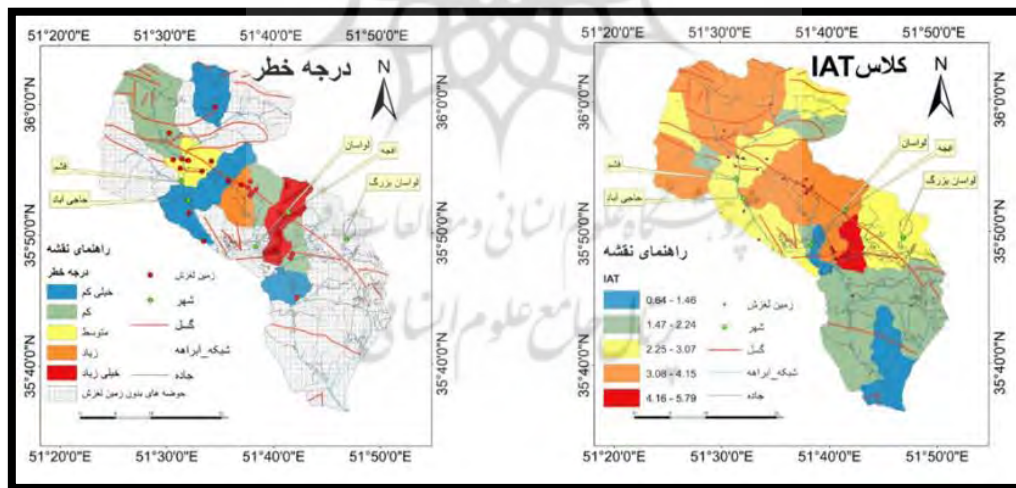
بررسی زمین لغزش زیرحوضه ها

زیرحوضه هایی که در آن ها زمین لغزش رخ داده است به چهار طبقه بر اساس فراوانی زمین لغزش تقسیم شدند: فراوانی بالا (۶ ع)، متوسط (۵-۳)، کم (۲)، و بسیار کم (۱)، (جدول ۵). در جدول ۵، در میان ۱۹ زمین لغزش در زیرحوضه های آبریز در حدود ۸۵% در درجه بالا و بسیار بالا از سطح خطر احتمالی توزیع شده است. درجه ای احتمال وقوع خطر زمین لغزش همراه با افزایش سطح خطر احتمالی افزایش می یابد. توزیع درجه احتمال وقوع خطر زمین لغزش در شکل (۱۰) نشان داده شده است. درجه ای احتمال وقوع خطر زمین لغزش به طور کلی در سراسر زیرحوضه ها بالا است. مناطق با درجه احتمال بسیار بالاتر در درجه اول در شمال منطقه و منطقه مرکزی توزیع شده است.

جدول ۵: تعداد زیرحوضه های دارای زمین لغزش (طرف چپ /) و درجه احتمال وقوع خطر (سمت راست /) در فرکانس های مختلف و سطوح خطر احتمالی.

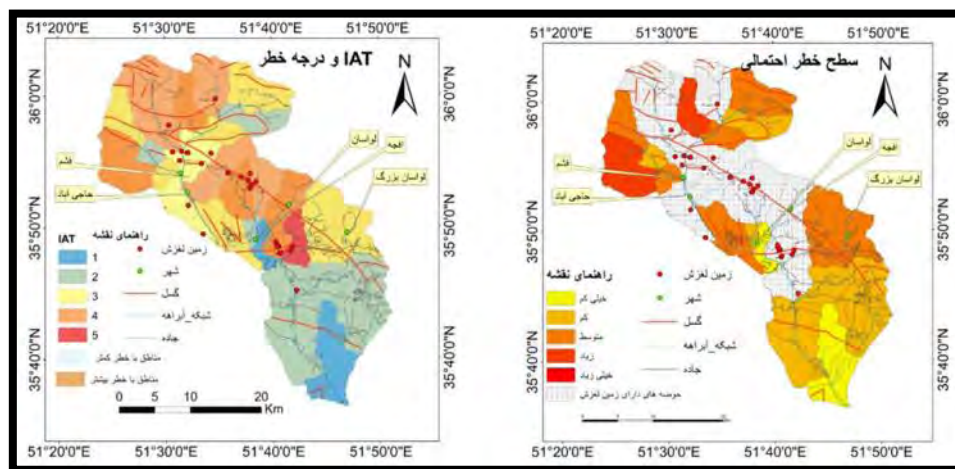
سطح خطر احتمالی					
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	فراوانی
۰	۱/۴	۰	۰	۰	>۶
۰	۰	۱/۴	۲/۳	۰	۳-۵
۱/۵	۱/۴	۰	۰	۰	۲
۰	۴/۱	۲/۴	۲/۳	۱/۲	۱

ماخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۹: توزیع کلاس IAT برای زیرحوضه ها.

شکل ۱۰: درجه احتمال وقوع خطر زمین لغزش برای زیرحوضه ها.



شکل ۱۱: توزیع سطح خطر احتمالی برای زیرحوضه های لغزش
 شکل ۱۲: مقایسه بین طبقات IAT و طبقه بندی بدون زمین درجه خطر، بر اساس (ژونگ و همکاران ۲۰۰۴)

بررسی زیرحوضه های بدون زمین لغزش

زیرحوضه هایی که در آن زمین لغزش رخ نداده است به پنج طبقه بر اساس سطح خطر احتمالی تقسیم شد. تعداد زیرحوضه های بدون زمین لغزش با سطح خطر احتمالی از خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد است. از ۲۷ زیرحوضه ها ی بدون زمین لغزش، حدود ۳۳٪ در سطوح بالا و بسیار بالا خطر قرار دارند. پراکندگی زیرحوضه های بدون زمین لغزش در سطوح مختلف خطر احتمالی در شکل (11) نشان داده شده است. سطح خطر بالا که عمدتاً در شمال و شمال غرب، بخش مرکزی حوضه توزیع شده است، و منطقه سطح پایین که عمدتاً در جنوب و منطقه جنوب شرقی در اطراف سد توزیع شده است.

بر اساس ارزش این شاخص ها، (ژونگ و همکاران، ۲۰۰۴) درجات مختلف خطر زمین لغزش شناسایی شده در حوضه جاجرود: مناطق خطر زیاد، مناطق کم خطر و مناطق بدون خطر است. کلاس های ۴ و ۵، IAT شامل ۱۹ زمین لغزش از ۲۸ زمین لغزش می باشد. درجه انطباق زمین لغزش های رخ داده با شاخص تکتونیک نسبی زیاد است. این تطابق بالا تایید می کند که IAT به خوبی می تواند سطوح خطر زمین لغزش را نشان دهد.

وقوع خطر زمین لغزش تحت تأثیر عوامل زیادی است. بنابراین، نه تنها توپوگرافی بلکه تحت تأثیر عواملی چون بارش و سنگ شناسی و... قرار می گیرد (ژونگ و همکاران، ۲۰۰۴). با این حال، تحلیل ژئومورفولوژی یک پایه اساسی برای ارزیابی وقوع مخاطرات زمین لغزش است.

نتیجه گیری

به دلیل موقعیت جغرافیایی و ویژگی های طبیعی و زمین شناختی، حوضه رودخانه جاجرود یکی از مناطق مستعد کشور نسبت به وقوع زمین لغزش، سنگ ریزش و روانه های گلی و سایر پدیده های مرتبط با لغزش دامنه ها می باشد. این حوضه به دلیل قرار گیری در یال جنوبی البرز مرکزی یکی از فعال ترین حوضه های کشور به لحاظ تکتونیکی می باشد. بررسی سابقه زلزله خیزی منطقه حاکی از وقوع زلزله های قابل توجه در طول تاریخ و قرون اخیر در این منطقه است. آثار فعالیت های تکتونیکی همچون شکستگی ها، گسل های معروفی چون گسل مشاء ° فشم، گسل تلو، گسل لشکرگ، وجود درزها و چین خوردگی ها در واحدهای سنگی مختلف حوضه، فعال بودن سیستم های گسلی اصلی و فرعی، وجود تراس های آبرفتی متعدد در حاشیه رود جاجرود و سرشاخه های فرعی آن، تندآب ها، پهن و

باریک شدن بستر کانال، تغییر مسیر و تغییر در نیمرخ طولی و عرضی رود، تایید کننده این وقایع تاریخی و وقوع رخدادهای زمین شناسی و ژئومورفولوژیکی است. حضور چنین آثاری نه تنها نشان دهنده وضعیت طبیعی گذشته، بلکه نشان دهنده بخش های بالقوه فعال از نظر تکتونیک این منطقه است. شاخص های ژئومورفولوژیکی در ارزیابی فعالیت های تکتونیک بسیار با اهمیت می باشند، چرا که با استفاده از این شاخص ها می توان مناطقی که در گذشته فعالیت های سریع یا کند تکتونیکی را تجربه کرده اند به راحتی شناسایی کرد. در این مقاله با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۰ متر و افزونه Archydro، تعداد ۳۹ زیرحوضه در حوضه جاجرود استخراج شد و هفت شاخص برای زیرحوضه محاسبه شد. ارزش IAT به عنوان میانگین حسابی از هفت شاخص محاسبه شد. همچنین زیرحوضه هایی که زمین لغزش رخ داده بود را شناسایی شدند و تعداد زمین لغزش ها را نسبت به تعداد زیرحوضه ها در طبقات مختلف IAT مقایسه گردید. با توجه به جدول (۴)، حدود ۸۵ درصد از حوضه جاجرود در محدوده شدت خطر بالا و بسیار بالای زمین لغزش قرار دارد. زیرحوضه های با مقادیر بیشتر تکتونیک فعال (IAT)، به خوبی با مناطق خطر دارای زمین لغزش مطابقت دارد. در ادامه مطالعه، به منظور صحت سنجی و ارزیابی دقت مدل از دو شاخص به نام های مجموع کیفیت (QS) و دقت روش (P) استفاده شد. به این منظور ابتدا نقشه فهرست زمین لغزش های محدوده مورد مطالعه با نقشه های پهنه بندی بدست آمده مطابقت داده شد. سپس با استفاده از روابط مربوط به هر یک از روش ذکر شده، مقادیر دو پارامتر QS و P ارزیابی شدند. مقدار مجموع کیفیت (QS) ۰/۹۷ و دقت روش (P) برای کلاس های خطر زیاد و خیلی زیاد ۰/۷۹ بدست آمد. مجموع کیفیت و دقت روش نشان دهنده صحت یا مطلوبیت عملکرد روش در پیش بینی خطر زمین لغزش است. این نتایج نشان می دهد که شرایط ژئومورفولوژی بوسیله تکتونیک فعال اساس مهمی برای مطالعه مخاطرات زمین لغزش فراهم می کند، اگر چه عوامل دیگری نیز بر وقوع زمین لغزش تاثیر می گذارد.

فشرده گی بیشتر چین ها در بخش های شمالی حوضه و متراکم تر شدن امواج موجود در لایه های سنگی و کاهش فشارها با کاهش شدت امواج و تبدیل آنها به چین های ملایم به طرف جنوب حوضه، ارتفاع بیشتر رشته کوه های شمالی حوضه نسبت به جنوب حوضه، دره های تنگ و باریک همراه با پرتگاه های دیواره ای در بخش شمالی در مقایسه با دره های بازتر با شیب دامنه های کم تر در بخش های جنوبی حوضه خود تأییدی بر میزان فعالیت بیشتر حرکات تکتونیک در مناطق بالادست حوضه مورد مطالعه این پژوهش می باشد.

منابع

- بهنیا، ابوالفضل. منصور، دانشور، محمدرضا. کهربائیان، پروین، ۱۳۸۹، کاربرد مدل AHP و منطق فازی در منطقه بندی خطرات زمین لغزش حوضه آبریز فریزی، فصل نامه جغرافیای طبیعی، سال سوم، شماره ۹، صص ۸۹-۱۰۰.
- بیدار، زینب، ۱۳۹۱، ارزیابی و پهنه بندی حرکات دامنه ای در مسیر ارتباطی مشکین شهر - موئیل با استفاده از AHP، استاد راهنما: فریبا اسفندیاری، پایان نامه ی کارشناسی ارشد دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده ی علوم انسانی، صفحه ۱۳۶.
- پیروزی، الناز. مددی، عقیل. غفاری گیلانده، عطا، ۱۳۹۱، بررسی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و ارائه راهکارهای حفاظتی در راستای دستیابی به توسعه پایدار در حوضه آبخیز آق لاقان چای، اولین کنفرانس ملی راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار در بخشهای کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست، تهران، صص ۸-۱.
- پیروزی، الناز. مددی، عقیل. غفاری گیلانده، عطا، ۱۳۹۲، پهنه بندی زمین لغزش با استفاده از روش ترکیب خطی وزنی در راستای حفاظت از محیط زیست (مطالعه موردی: حوضه آبخیز آق لاقان چای)، هفتمین کنفرانس ملی روز جهانی محیط زیست، تهران، صص ۱۱-۱.
- صفاری، ا.، علیمردادی، م.، حاتمی فردر، ۱۳۹۲، پهنه بندی خطر رخداد زمین لغزش به روش رگرسیون چندمتغیره با استفاده از داده های گسسته در حوضه رودخانه ماربر، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال دوم، شماره ۳، صص ۷۴-۵۹.

- عابدینی، موسی و محمدحسین فتحی، ۱۳۹۳، پهنه بندی حساسیت خطر وقوع زمین لغزش در حوضه ی آبخیز خلخال چای با استفاده از مدل های چند معیاره، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال دوم، شماره ۴، صص ۷۱-۸۵ .
- فرداد، مهدی. آل شیخ، علی اصغر. وفایی نژاد، علیرضا، ۱۳۸۹، پهنه بندی خطر زمین لغزش با روش های منطق فازی و شبکه عصبی در GIS مطالعه موردی منطقه مال خلیفه، (مجموعه مقالات پانزدهمین همایش) زمین شناسی ایران قناتی، ع.، ۱۳۹۰، پهنه بندی خطر لغزش در حوضه جاجرود با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی سال هفدهم، شماره ۲۰، بهار ۹۰، ص ۵۳.
- کرم، امیر، تورانی، مریم، ۱۳۹۲، پهنه بندی استعداد اراضی نسبت به وقوع لغزش با استفاده از روش های رگرسیون خطی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی محور هراز از رودهن تا رینه -نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی سال سیزدهم، شماره ۲۸.
- کرم، امیر، عبدالهی فوزی، حسین و محمودی، مهران، ۱۳۸۹، ارزیابی و پهنه بندی حساسیت به زمین لغزش، با استفاده از مدل شبکه های عصبی مصنوعی مطالعه موردی: حوضه آبریز جاجرود -شمال شرق تهران. محیط جغرافیایی. شماره ۱، ص ۴۹-۶۶.
- کریمی سنگچینی، ابراهیم. اونق، مجید. سعدالدین، امیر، ۱۳۹۰، مقایسه کارایی ۴ مدل کمی و نیمه کیفی در پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز چهل چای استان گلستان، پژوهش های حفاظت آب و خاک، جلد نوزدهم، شماره اول، صص ۱۸۳-۱۹۶.
- مظفرخواه، محمد، خطیب، محمد مهدی، چرچی، عباس، برجسته، آرش، ۱۳۸۸، تحلیل فعالیت منطقه لالی با استفاده از ابعاد فرکتالی آبراهه ها، سومین همایش تخصصی زمین شناسی دانشگاه پیام نوراصفهان
- یمانی مجتبی، شیرزادی، هیوا، باخویشی، کاوه، ۱۳۹۰، ژئومورفولوژی جاده جدید سنندج -مریوان و پهنه بندی ناپایداری های دامنه ای، فصلنامه جغرافیا و آمایش،
- Anbalagan, R., Singh, B., 1996. Landslide hazard and risk assessment mapping of mountainous terrains: a case study from Kumaun Himalaya India. *Eng. Geol.* 43, 237-246 .
- Burbank, D. W. , Anderson, R. S. , 2001. *Tectonic Geomorphology*, Blackwell Science, 274 pages.
- Bull, W.B., Mcfadden, L.D.(1977). *Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California; In: Doehring, D.O. (Ed.), Geomorphology in arid regions. Proceedings of the 8th annual geomorphology symposium. State University of New York, Binghamton, pp:138-115.*
- Cannon, P. J., 1976- Generation of explicit parameters for a quantitative geomorphic study of Mill Creek drainage basin. *Oklahoma Gology Notes* 36(1), 3-16.
- Cheng, W., Wang, N., Zhao, M., & Zhao, S. (2016). Relative tectonics and debris flow hazards in the Beijing mountain area from DEM-derived geomorphic indices and drainage analysis. *Geomorphology*, 257, 134-142.
- Cheng, W.M., Zhou, C.H., Li, B.Y., Zhang, B.P., 2011. Structure and contents of layered classification system of digital geomorphology for China. *J. Geogr. Sci.* 21, 771-790.
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacón, J., & Keller, E. A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1), 150-173.
- Guillermo, R.A., Gerardo, M.E.P., Piccoloa, M.C., Pierini, J., 2004. Fractal analysis of tidal channels in the Bahia Blanca Estuary (Argentina). *Geomorphology* 57, 263-274.
- Hack, J.T., 1973. Stream-profiles analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the U.S. Geophys. Surv.* 1, 421-429.

- Hare, P.H., Gardner, T.W., 1985. *Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica*. In: Morisawa, M., Hack, J.T. (Eds.), *Tectonic Geomorphology*. Allen and Unwin, Boston, pp. 75–104
- Keller Edward, A. & Pinter, N. (2002). *Active tectonics earthquake, uplift, and landscape*. Prentice Hall Publisher, New Jersey.
- Keller, Edward and A., Pinter, Nicholas (1996). *Active tectonics*; Prentice Hall publisher, New Jersey.
- Kouli, M., Loupasakis, C., Soupios, P., Vallianatos, F., 2010, *Landslide hazard zonation in high risk areas of Rethymno Prefecture, Crete Island, Greece*. *Nat Hazards*, 52: 599-621.
- Lei, Z., Jing-feng, H. (2007). *GIS-based logistic regression method for landslide susceptibility mapping in regional scale*. *Zhu et al. / J Zhejiang Univ SCIENCE A (2017-2007:)*12.
- Ramirez-Herrera, M.A., 1998. *Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 317-332.
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglo, AA., Yomraliglu, T., 2011, *A GIS- based comparative study of fequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics metids for land slide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey*. *Geomorfology*, Vol 85. PP 274-287.

