



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر

فصلنامه علمی فضای جغرافیایی

دوره بیست و ششم، شماره ۹۳

بهار ۱۴۰۵، صفحات ۱۵۵-۱۳۴

فروزان ناصری^۱

شهرام بهرامی^{۲*}

علیرضا صالحی پور میلانی^۳

محسن احتشامی معین آبادی^۴

تحلیل ارتباط زمین لغزش‌ها با شاخص‌های شبکه زهکشی (مطالعه موردی: شش حوضه آبخیز در زاگرس چین خورده)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

چکیده

شبکه زهکشی یکی از عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش‌ها است و از طریق کنترل تمرکز رواناب و فرسایش سطحی، تأثیر بسزایی در پایداری دامنه‌ها و بروز زمین لغزش‌ها دارد. پژوهش حاضر با هدف تحلیل ارتباط مکانی میان شاخص‌های شبکه زهکشی و ویژگی‌های مورفومتری حوضه‌های آبخیز و رخداد زمین لغزش‌ها در حوضه‌هایی از گستره ایلام - کرمانشاه در کمربند چین خورده زاگرس در غرب ایران انجام شد. بدین منظور، با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر و نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، حوضه‌های آبخیز و شبکه آبراه‌های در نرم‌افزارهای Google Earth, Global Mapper و Arc Hydro ترسیم شد. همچنین، به منظور استخراج و موقعیت‌یابی ۳۲۲ زمین لغزش، از تصاویر ماهواره‌ای موجود در سامانه Google Earth، تحلیل‌های مکانی در محیط Arc GIS و مشاهدات میدانی استفاده گردید. سپس ارتباط بین شاخص‌های ناهنجاری سلسله مراتبی شبکه زهکشی (Δa)، تراکم زهکشی

^۱ دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

^{۲*} گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی (نویسنده مسئول) (sh_bahrami@sbu.ac.ir)

^۳ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

^۴ گروه حوضه‌های رسوبی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

(Dd)، تراکم زهکشی آبره‌های درجه ۱ (Dd1)، فرکانس شبکه زهکشی (Df)، نسبت تعداد آبراهه‌های درجه ۱ به تعداد کل آبراهه‌ها (N1/N)، نسبت انشعاب (Rb) و شاخص انشعابات (R)، نسبت مساحت زمین‌لغزش به مساحت حوضه (LA) و تراکم زمین‌لغزش (LD)، حوضه‌ها محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که پراکندگی زمین‌لغزش‌ها تابع تعامل پیچیده‌ای میان ساختار زمین‌ساختی، هندسه شبکه زهکشی و ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه‌ها است. ناهنجاری سلسله مراتبی شبکه زهکشی (Δa)، تراکم زهکشی (Dd) و نسبت انشعاب (Rb) بیشترین همبستگی را با تراکم زمین‌لغزش‌ها داشتند، در حالی که تراکم زهکشی آبراهه‌های درجه ۱ (Dd1) و فرکانس شبکه زهکشی (Df) نیز در افزایش ناپایداری دامنه‌ها مؤثر هستند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که تحلیل شاخص‌های مورفومتری شبکه زهکشی می‌تواند به‌عنوان رویکردی مؤثر برای تبیین و ارزیابی مناطق مستعد زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: زمین‌لغزش، شاخص‌های مورفومتری شبکه زهکشی، ناهنجاری سلسله مراتبی، ایلام، زاگرس

مقدمه

زمین‌لغزش‌ها یکی از فرایندهای مهم ژئومورفولوژی هستند که در دامنه‌های کوهستانی تا تپه‌های ملایم گسترش دارند (Gruber et al., 2008) و موجب تغییرات عمده در شکل زمین و ناهمواری‌های سطحی آن می‌شوند. تأثیر زمین‌لغزش‌ها نه تنها در دامنه‌های پرشیب، بلکه در جایی که با حرکت به کانال‌های رودخانه‌ای نفوذ می‌کند و شرایط بالادست و پایین‌دست را تغییر می‌دهد، احساس می‌شود. در واقع زمین‌لغزش‌ها اثرات بسیار متنوعی بر شبکه‌های زهکشی دارند و می‌توانند عرض کف دره و کانال رودخانه را کاهش داده و ارتفاع بستر رودخانه را افزایش دهند (Swanson et al., 1985). رودخانه‌ها و شاخه‌های فرعی آن‌ها از عناصر کلیدی در هر حوضه زهکشی به شمار می‌آیند (Bahrami, 2013) و به‌عنوان مسیرهای اصلی انتقال آب در پوسته زمین، تحت تأثیر نیروی جاذبه شکل گرفته و گسترش می‌یابند. شبکه‌های زهکشی به تغییرات ژئومورفولوژیکی و زمین‌ساختی بسیار حساس بوده و از نخستین عناصری هستند که به دگرریختی‌ها و ناپیوستگی‌های زمین واکنش نشان می‌دهند (Bull, 2007). در واقع، تحلیل شبکه‌های زهکشی ابزاری کارآمد برای تفسیر تکامل توپوگرافی به‌شمار می‌رود و پیکربندی و تحول شبکه‌های زهکشی بازتابی مستقیم از پویایی‌های زمین‌شناسی، فعالیت‌های درونی زمین و تغییرات اقلیمی است (Anish et al., 2019). براین اساس، بررسی کمی ارتباط زمین‌لغزش‌ها و شبکه‌های زهکشی، می‌تواند درک عمیق‌تری از پویایی‌های درونی حوضه و رفتار ناپایداری دامنه‌ها فراهم آورد؛ به‌ویژه ناهنجاری‌های شبکه زهکشی که می‌توانند بازتابی از رخداد ناپایداری‌های دامنه‌ای و تمرکز فرایندهای زمین‌لغزشی باشند.

در زمینه ارتباط وقوع زمین‌لغزش و شبکه زهکشی تاکنون مطالعات مختلفی در ایران و جهان صورت گرفته است. بیاتی خطیبی (۱۳۸۶)، نقش تراکم زهکشی و اختلاف ارتفاع بر وقوع لغزش‌های دره‌ای در کوهستان‌های نیمه خشک دامنه‌های شمال غربی سبلان را با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، عکس‌های هوایی، نمونه‌برداری‌ها و

بازدیدهای میدانی بررسی نمود. نتایج تحقیق او نشان داد که میزان گسیختگی‌ها و لغزش‌های دره‌ای، تابع میزان تراکم زهکشی، به‌ویژه تراکم آبراهه‌های عمیق، تغییرات نسبت‌های Ds/Dd و همچنین تغییرات R می‌باشد. همچنین تا ارتفاع معینی از ناهمواری منطقه که متشکل از سازنده‌های سست و منفصل می‌باشد، هر چه بر میزان اختلاف ارتفاع افزوده می‌شود، احتمال وقوع لغزش‌های دره‌ای نیز افزایش پیدا می‌کند. موسوی و همکاران (۱۳۸۸)، عوامل مؤثر اولیه بر وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه آبخیز سجارود شامل ارتفاع از سطح دریا، درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، بارندگی، فاصله از گسل، فاصله از شبکه زهکشی، فاصله از جاده، کاربری اراضی و سنگ‌شناسی را با استفاده از مدل آماری رگرسیون لجستیک و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که عامل نزدیکی به جاده با ضریب بزرگتر و مثبت، تأثیر دخالت انسان و جاده سازی غیر اصولی در محیط‌های جنگلی را در بروز زمین‌لغزش‌های منطقه روشن‌تر می‌سازد. پس از آن عوامل جهت شیب، واحدهای سنگ‌شناسی شامل مارن، مارن سیلت دار، سیلت سنگ و گل‌سنگ و فاصله از شبکه زهکشی نیز با ضرایب مثبت، نقش مهمی در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه ایفا کرده‌اند. پیروان و همکاران (۱۳۹۶)، تأثیر زمین‌لغزش‌ها بر بار رسوبی رودخانه جاجرود را به کمک تصاویر ماهواره ای +ETM و Google Earth و با مقایسه داده‌های رسوب مشاهده‌ای با داده‌های برآورد مدل MPSIAC در دو زیرحوضه لواسانات و کند-افجه بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که بر اساس رسوب‌دهی برآوردی به کمک مدل MPSIAC، متوسط وزنی تولید رسوب ویژه دو زیرحوضه کند-افجه با درصد مساحت لغزش ۰/۷ و گرمابدر با درصد مساحت لغزش ۲/۴ است که نشان می‌دهد با افزایش درصد نسبی مساحت زمین‌لغزش‌ها، رسوب‌دهی ویژه حوضه زیادتر شده است. در نهایت افزایش بار رسوبی نه تنها ناشی از افزایش دبی جریان نبوده بلکه کاهش ۳۰ درصدی دبی جریان می‌توانسته در کاهش بار رسوبی نیز تأثیرگذار بوده باشد. بنابراین با در نظر گرفتن مساحت زمین‌لغزش‌های منطقه، هر هکتار زمین لغزش موجب افزایش بیش از هشت درصد بار رسوبی رودخانه شده است. لجم اورک و پیری (۱۴۰۲)، به پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و GIS در شهرستان باغملک پرداختند و بیان داشتند که بیشترین زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه در ارتباط با شیب و جنس زمین بوده؛ چراکه این عوامل با دخالت فعالیت‌های شبکه آب‌های سطحی، بارندگی و دیگر عوامل یادشده، باعث سست شدن پیوند بین رسوبات و حرکت آن‌ها شده است.

پیارت^۱ و همکاران (۲۰۰۵)، به بررسی رانش زمین و انتقال رسوب به سیستم زهکشی به صورت موردی در برخی مناطق هنگ کنگ پرداختند. آن‌ها بیان داشتند که به طور کلی، در زمین‌های توسعه نیافته در هنگ کنگ، کمتر از نیمی از رانش‌های زمین، واریزه را به سیستم کانال منتقل می‌کنند و احیای پوشش گیاهی مسیرهای واریزه رانش زمین، ممکن است بسیار سریع باشد که این امر زمان عمل رودخانه‌ای بر روی مواد در معرض رانش را محدود می‌کند. ان‌جی^۲ (۲۰۰۶)، ارتباط میان توسعه شبکه زهکشی و مکان زمین‌لغزش‌ها را در هشت حوضه زهکشی کوچک، در منطقه

¹ Peart

² Ng

کوهستانی هنگ کنگ بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مکان‌های رانش زمین با پیشرفت رو به جلوی ادغام شبکه زهکشی، از جریان اصلی (رتبه پنج) تا شاخه‌های فرعی (رتبه یک)، مرتبط هستند که با تغییرات سیستماتیک بین پارامترهای مورفومتریک و تراکم رانش زمین، نشان داده شده است. لین^۱ و همکاران (۲۰۱۶)، کارایی سیستم‌های زهکشی زیرزمینی شامل چاه‌های زهکشی و گالری‌های زهکشی برای تثبیت شیب، در رانش زمین لی‌شان در تایوان را ارزیابی نمودند. نتایج عددی و پایش داده‌ها نشان می‌دهند که سطح آب زیرزمینی در ایستگاه پایش B5 با اصلاح زهکشی‌های زیرزمینی در طول طوفان توراجی (۲۰۰۱) حدود ۴۰ متر پایین‌تر از سطح بدون اصلاح در طول طوفان امبر (۱۹۹۷) است و ضریب اطمینان FS سطح لغزشی بالقوه اول به دلیل عملکرد سیستم‌های زهکشی زیرزمینی به‌طور همزمان از ۱/۰۹۶ به ۱/۲۲۸ افزایش یافته است. علاوه بر این، مقادیر فرکانس سه سطح لغزشی بالقوه (PSS) اول، دوم و PSS سوم که توسط سیستم‌های زهکشی زیرزمینی تثبیت شده‌اند، در طول بارندگی‌هایی با دوره بازگشت از ۲۵ به ۵۰ و ۱۰۰ سال، به‌طور مداوم بیشتر از واحد ($FS \geq 1.0$ یا $FS \geq 1.217$) حفظ می‌شوند. این نشان می‌دهد که سیستم‌های زهکشی زیرسطحی در زمین‌لغزش لی‌شان کاربردی هستند و قادر به تسریع زهکشی آب باران نفوذی ناشی از بارندگی‌های شدید و طولانی‌مدت و محافظت از شیب زمین‌لغزش در برابر تخریب بیشتر می‌باشند. کورلا^۲ (۲۰۱۹)، در مطالعه‌ای با اشاره به انواع مختلف سیستم‌های زهکشی و طرح‌های مختلف زهکشی که در چند مکان در امتداد بزرگراه ملی ۵۸ در اوتاراکنند به‌عنوان بخشی از اقدامات کاهش خطر رانش زمین پیشنهاد شده است، اهمیت اقدامات زهکشی در اقدامات کاهش خطر رانش زمین را بررسی می‌کند. او بیان داشت که پیشگیری از رانش زمین تابعی از کاهش نیروهای محرک یا افزایش نیروهای مقاوم است. هر اقدام کاهش خطر رانش زمین که استفاده می‌شود باید یک یا هر دو پارامتر فوق را داشته باشد. در واقع زهکشی نامناسب مهم‌ترین عامل مؤثر در شروع رانش زمین است. زهکشی کافی آب، مهم‌ترین عنصر اقدامات کاهش خطر رانش زمین برای رانش‌های موجود و بالقوه است. وانگ^۳ و همکاران (۲۰۲۰)، تأثیر تونل زهکشی بر ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی زمین‌لغزش را بر اساس پایش لحظه‌ای بارندگی، سطح آب زیرزمینی و جابه‌جایی سطح زمین با استفاده از تحلیل‌های آماری آزمون من-کنندال در شهرستان چانگشان در چین بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با ایجاد تونل‌های زهکشی سطح آب زیرزمینی از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۷ روند نزولی داشته است و از طرفی همبستگی قوی بین سطح آب‌های زیرزمینی و حرکت زمین‌لغزش مشاهده شد. تونل زهکشی به‌طور مؤثر سطح آب‌های زیرزمینی را در زمین‌لغزش کنترل کرده و پایداری زمین‌لغزش را تضمین کرده است. چن و چوی^۴ (۲۰۲۵)، به بررسی اثربخشی، خطرات و استراتژی‌های اجرای سیستم‌های زهکشی پایدار در یک حوضه آبریز مستعد زمین‌لغزش در ساحل شمال شرقی شهر موکیتو در واشنگتن پرداختند. آن‌ها استراتژی‌هایی را پیشنهاد کردند که حول توزیع مکانی شیوه‌های سیستم زهکشی پایدار (SuDS)، یعنی توزیع یکنواخت

¹ Lin

² Korulla

³ Wang

⁴ Chen and Chui

و دور از شیب (به ترتیب UD، SDD و SRD) با نسبت‌های اجرایی ۱/۲۵، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد متمرکز بودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که اجرای سیستم زهکشی پایدار (SuDS)، به‌طور مؤثر رواناب را کاهش داده و ذخیره آب‌های زیرزمینی را افزایش داده است. استراتژی UD بالاترین ظرفیت کاهش حجم رواناب را نشان داد، در حالی که استراتژی SDD بالاترین ذخیره آب‌های زیرزمینی را تسهیل کرد. در نسبت اجرایی پایین، پایداری شیب صرف نظر از استراتژی‌های توزیع، به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. در نسبت اجرایی بالاتر، مناطق بیشتری هنگام اعمال استراتژی UD ناپایدار می‌شوند. به‌طور کلی در سه استراتژی بیان شده، SDD بیشتر برای دستیابی به تعادل بین کاهش رواناب، ذخیره آب‌های زیرزمینی و پایداری شیب در کنترل زمین لغزش، توصیه می‌شود. ژانگ^۱ (۲۰۲۵)، در مطالعه‌ای با عنوان محاسبه مکانیکی پایداری زمین لغزش با در نظر گرفتن اثر کوپلینگ نشت و تنش و بهینه‌سازی کاهش بلایای زهکشی در چین، با تکیه بر قانون داری و اصل پایداری جرم، معادلات دیفرانسیل حاکم را برای شرایط نشت پایدار و ناپایدار، بررسی نمود. نتایج تحقیق او نشان می‌دهد که در اثر بارندگی شدید، فشار آب منفذی در خاک نزدیک به سطح زمین در عرض ۱۵ ساعت به شدت افزایش می‌یابد و به حالت اشباع نزدیک می‌شود که منجر به کاهش بیش از ۳۰ درصد تنش مؤثر و شروع تغییر شکل قابل توجه خاک می‌شود و حداکثر جابه‌جایی عمودی به ۱۲ سانتی‌متر می‌رسد، در حالی که حداکثر سرعت رشد جابه‌جایی افقی ۰/۵ میلی‌متر در ساعت است که خطر قابل توجهی را برای پایداری شیب ایجاد می‌کند.

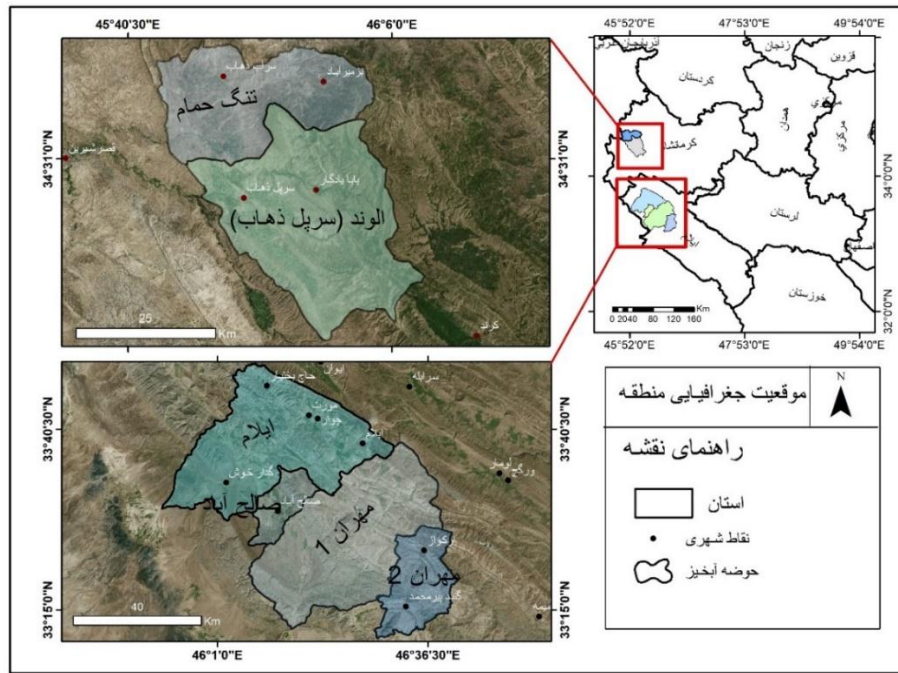
با توجه به نتایج مطالعات پیشین در ارتباط با زمین لغزش و اهمیت نقش عوامل متعدد، از جمله ویژگی‌های سیستم زهکشی در وقوع و گسترش آن، در این پژوهش ارتباط شاخص‌های شبکه زهکشی و زمین لغزش در شش حوضه آبخیز در زاگرس چین خورده در غرب ایران، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه بخشی از زاگرس چین خورده در غرب ایران واقع در استان کرمانشاه و استان ایلام، شامل زیرحوضه‌های تنگ حمام، الوند (سرپل ذهاب)، ایلام، صالح آباد و دو زیرحوضه از مهران می‌باشد. این حوضه‌ها از نظر تقسیمات سیاسی در بخش‌های غربی استان کرمانشاه در شهرستان سرپل ذهاب و بخش‌های شمال غرب استان ایلام در شهرستان‌های ایلام و مهران (از طول جغرافیایی $32^{\circ} 47' 45''$ تا $57^{\circ} 39' 46''$ شرقی و عرض جغرافیایی 33° تا $34^{\circ} 40' 04''$ شمالی) واقع شده‌اند. با توجه به موقعیت هیدروگرافی نیز زیرحوضه‌های محدوده سرپل ذهاب در حوضه آبریز رودخانه‌های مرزی غرب کشور و زیرحوضه‌های ایلام در محدوده حوضه آبریز کرخه قرار دارند (شکل ۱). از نظر زمین‌شناسی، منطقه در کمربند چین خورده - رانده زاگرس قرار دارد و واحدهای سنگی منطقه شامل توالی ستبری از سنگ‌های رسوبی پرکامبرین تا پلیوسن و کواترنری است. مجموعه سنگ‌های رسوبی منطقه از پالئوزیک

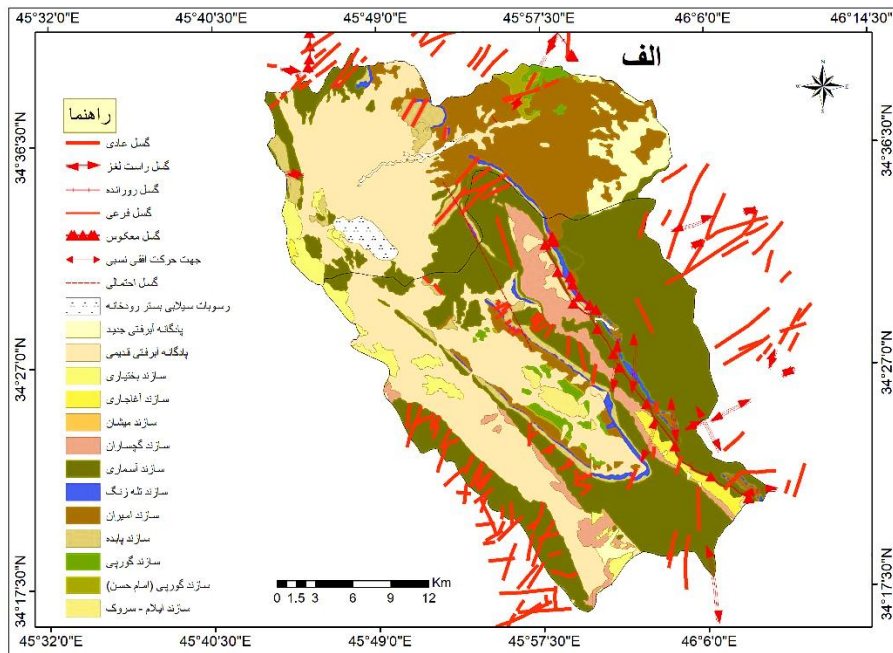
^۱ Zhang

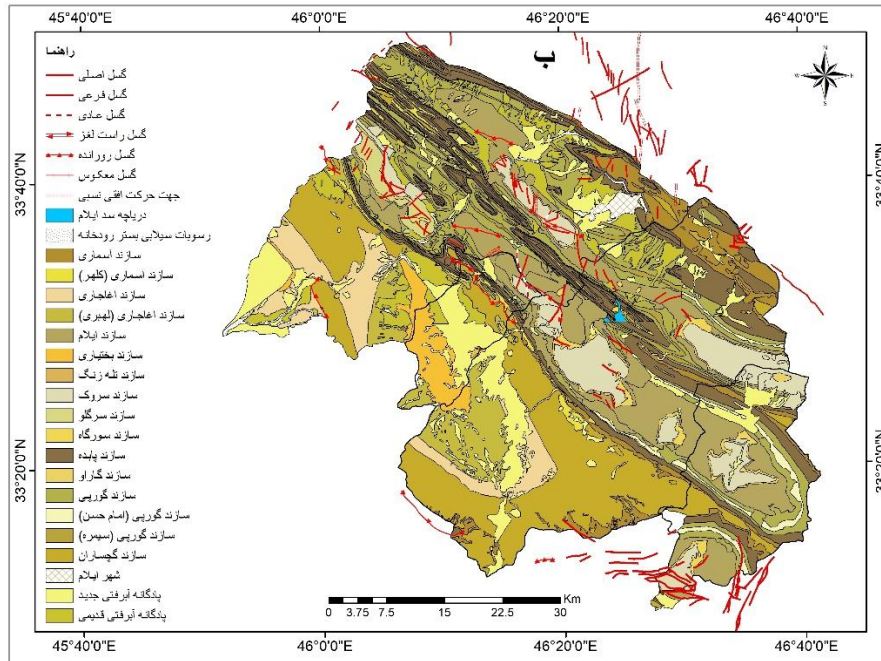
تا نتوژن چین خورده‌اند و به صورت مجموعه‌ای از تاقدیس‌ها و ناودیس‌های بزرگ دیده می‌شوند که محور آن‌ها شمال غربی-جنوب شرقی است. ناهمواری‌های این منطقه عموماً از سنگ آهک می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Geographical location of the study area





شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه. الف: حوضه‌های تنگ حمام و سرپل ذهاب. ب: حوضه‌های ایلام، مهران ۱، صالح آباد و مهران ۲.

Figure 2- Geological map of the study area. A: Tang Hamam and Sarpol Zahab basins. B: Ilam, Mehran 1, Saleh Abad and Mehran 2 basins.

روش شناسی

در این مطالعه، ابتدا حوضه‌های آبخیز و شبکه آبراهه‌ای با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی^۱ با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر و نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، در نرم‌افزارهای Global Mapper، Google Earth و Arc Hydro ترسیم شدند. همچنین، به منظور استخراج و موقعیت‌یابی زمین لغزش‌ها، از تصاویر ماهواره‌ای موجود در سامانه Google Earth و تحلیل‌های مکانی در محیط Arc GIS استفاده گردید. سپس از طریق بازبینی میدانی از محدوده مطالعاتی، نمونه‌هایی از زمین لغزش‌ها به صورت موردی مطالعه شده و لغزش‌های برداشت شده از تصاویر ماهواره‌ای، صحت‌سنجی گردیدند. در ادامه جهت ارزیابی روابط رخداد زمین لغزش‌ها با زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها از نرم افزار SPSS استفاده گردید. سپس نسبت مساحت زمین لغزش به مساحت حوضه (LA) و تراکم زمین لغزش (LD) با استفاده از روابط زیر به دست آمد:

$$LA = \frac{L}{A} \times 100 \quad \text{رابطه ۱:}$$

در این رابطه L مساحت زمین لغزش و A مساحت حوضه می‌باشد.

$$LD = \frac{N}{A} \times 100 \quad \text{رابطه ۲:}$$

در این رابطه N تعداد زمین لغزش و A مساحت حوضه می‌باشد.

^۱ DEM

شاخص‌های مربوط به مورفومتری شبکه زهکشی

همچنین جهت برآورد شاخص‌های مربوط به مورفومتری شبکه زهکشی، ابتدا آبراهه‌های استخراج شده براساس روش استراهلر رده‌بندی شدند. در این روش، بخشی از آبراهه که هیچ سرشاخه‌ای ندارد به‌عنوان آبراهه درجه ۱ در نظر گرفته می‌شود. با اتصال دو آبراهه درجه ۱، آبراهه درجه ۲، و با اتصال دو آبراهه درجه ۲، آبراهه درجه ۳ تشکیل می‌شود. به‌طور کلی در این سیستم رده‌بندی، با اتصال دو آبراهه با درجه مشابه، آبراهه‌ای با یک درجه بالاتر تشکیل می‌شود. در هر حوضه، تعدادی اتصالات یا مسیرهای آبراهه‌ای وجود دارد (به‌عنوان مثال اتصال ۱ به ۲، ۲ به ۳، ۳ به ۲ و ۴ و غیره). تعدادی از اتصالات آبراهه‌ای در هر حوضه ممکن است هنجار و تعدادی ناهنجار باشند. در الگوی شبکه درختی، اتصالات آبراهه‌ای اغلب دارای نظم سلسله‌مراتبی هستند، به‌طوریکه در بیشتر موارد آبراهه‌ها به یک درجه بالاتر از خود وارد می‌شوند (۱→۲، ۲→۳، ۳→۴، ۴→۵، ۵→۶ و غیره). در حوضه‌های با الگوی شبکه درختی، ورود آبراهه رده ۱ به رده‌های ۳ یا بالاتر کمتر دیده می‌شود. بنابراین در حوضه‌های معمولی، اتصالات ($i \rightarrow j$) از یک رده خاص به یک رده بالاتر (۱→۲، ۲→۳، ۳→۴، ۴→۵ و غیره) دارای نظم سلسله‌مراتبی است اما اگر آبراهه‌ای به آبراهه با ۲ درجه بالاتر یا بیشتر وارد شود (۱→۳، ۱→۴، ۲→۴، ۲→۵، ۳→۵، ۳→۶ و غیره)، اتصال مذکور دارای ناهنجاری سلسله‌مراتبی است. اگر به اتصالات ناهنجار در یک حوضه زهکشی، به صورت فرضی آبراهه‌هایی اضافه شود، شبکه زهکشی دارای نظم سلسله‌مراتبی می‌شود. به‌عنوان مثال اگر به اتصال ناهنجار ۱ به ۳ (۱→۳) فقط یک آبراهه درجه ۱ اضافه کنیم، نظم سلسله‌مراتبی شبکه زهکشی در اتصال مذکور ایجاد می‌شود. یا اگر به اتصال ناهنجار ۱ به ۵ تعداد ۷ آبراهه درجه ۱ به‌طور فرضی اضافه شود، اتصال فوق دارای نظم سلسله‌مراتبی می‌شود (Bahrami, 2013). آونا^۱ و همکاران (۱۹۶۷)، شاخصی به‌نام Ha (تعداد ناهنجاری سلسله‌مراتبی آبراهه) را تعریف کردند. به‌نظر آونا و همکاران، Ha عبارت است از حداقل تعداد آبراهه‌های درجه یک، که باید به‌طور فرضی به شبکه زهکشی اضافه شوند تا اتصالات دارای نظم سلسله‌مراتبی شوند (به نقل از گارنیری و پیروتا، ۲۰۰۸: ۲۶۷). با توجه به اینکه محاسبه دستی Ha کار مشکلی است، بهرامی (۲۰۱۳) رابطه‌ای جهت محاسبه تعداد ناهنجاری سلسله‌مراتبی هر اتصال آبراهه ($Ha_{i \rightarrow j}$) ارائه کرد که بر اساس آن تعداد ناهنجاری سلسله‌مراتبی آبراهه در کل حوضه (Ha_i) به‌دست می‌آید. در حالتی که یک آبراهه مبدأ (به‌عنوان مثال درجه ۱) به آبراهه بالاتر یا مقصد (به‌عنوان مثال درجه ۳) متصل شود، اگر آبراهه مبدأ را i و آبراهه مقصد را j بنامیم، تعداد ناهنجاری سلسله‌مراتبی هر اتصال آبراهه ($Ha_{i \rightarrow j}$) از رابطه ۳ به‌دست می‌آید:

$$Ha_{i \rightarrow j} = 2^{(j-2)} - 2^{(i-1)} \quad \text{رابطه ۳:}$$

به‌عنوان مثال تعداد ناهنجاری سلسله‌مراتبی آبراهه برای اتصال ۱ به ۶ (۱→۶) عدد ۱۵ به‌دست می‌آید:

^۱ Avena

$$Ha_{1 \rightarrow 6} = 2^{(6-2)} - 2^{(1-1)} = 16 - 1 = 15 \quad \text{رابطه ۴:}$$

بعد از محاسبه $Ha_{i \rightarrow j}$ ، تعداد آبراهه‌ها در هر اتصال ($Ns_{i \rightarrow j}$) به دست می‌آید. سپس از مجموع حاصل ضرب $Ha_{i \rightarrow j}$ و $Ns_{i \rightarrow j}$ ، تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی آبراهه برای کل حوضه (Ha_t) به دست می‌آید:

$$Ha_t = \sum (Ha_{i \rightarrow j} \times Ns_{i \rightarrow j}) \quad \text{رابطه ۵:}$$

بعد از محاسبه Ha_t ، شاخص Δa (شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی شبکه زهکشی) از تقسیم Ha_t بر تعداد واقعی آبراهه‌های درجه یک حوضه به دست می‌آید (Bahrami, 2013).

نسبت انشعاب (Rb): نسبت انشعاب برای هر رده از آبراهه، از تقسیم کل آبراهه‌های آن درجه، بر تعداد کل آبراهه‌های یک درجه بالاتر به دست می‌آید. در نهایت نسبت انشعاب (Rb)، از میانگین کل درجه‌ها محاسبه می‌شود (بیاتی خطیی، ۱۳۸۸).

$$Rb(u-u+1) = Nu/Nu+1 \quad \text{رابطه ۶:}$$

در این رابطه: Rb نسبت انشعاب، Nu تعداد آبراهه‌های رتبه ویژه و Nu+1 تعداد آبراهه‌های رتبه بالاتر است.

شاخص انشعابات (R): شاخص انشعابات از عدد نسبت انشعاب حوضه (Rb) منهای نسبت مستقیم انشعاب (Rbd) حوضه به دست می‌آید. مقدار این شاخص به وجود ناهنجاری‌های سلسله مراتبی در شبکه زهکشی بستگی دارد و می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد نوع شناسی فرایندهای فرسایشی فعال و درجه تکامل یک حوضه ارائه دهد. گارنیری و پیروتا^۱ (۲۰۰۸)، محاسبه و روابط این شاخص‌ها به صورت زیر بیان داشته‌اند:

$$R = Rb - Rbd \quad \text{رابطه ۷:}$$

$$Rbd = Ndu/Nu+1 \quad \text{رابطه ۸:}$$

که در آن Ndu تعداد آبراهه‌های یک رتبه معین را نشان می‌دهد که مستقیماً به یک رده بالاتر (U+1) وارد می‌شوند و Nu+1 تعداد آبراهه‌های یک رتبه بالاتر است.

فرکانس شبکه زهکشی (Df): فرکانس شبکه زهکشی از جمله پارامترهای کمی مربوط به مورفومتری شبکه زهکشی است که از رابطه زیر به دست می‌آید (Devi et al., 2011).

$$Df = NU / A \quad \text{رابطه ۹:}$$

¹ Guarnieri and Pirrotta

که در آن Nu تعداد آبراهه‌های همه درجات و A مساحت حوضه به کیلومتر مربع است. مقدار پارامتر Df به عواملی مانند زمین‌شناسی، اقلیم، پوشش گیاهی، جنس خاک و سنگ و توپوگرافی بستگی دارد. در مناطق تکتونیکی فعال به‌ویژه در تاقدیس‌های جوان، تعداد آبراهه‌های درجه ۱ بیشتر است (Bahrami et al., 2020).

شاخص‌های تراکم زهکشی (Dd) و تراکم زهکشی آبراهه‌های درجه ۱ ($Dd1$): تراکم زهکشی (Dd)، نسبت طول تمام رتبه‌های آبراهه‌ها به مساحت، در یک منطقه مشخص است. شاخص $Dd1$ از رابطه زیر به دست می‌آید (Tucker et al., 2001).

$$Dd1 = L_1 / A \quad \text{رابطه ۱۰:}$$

که در آن L_1 مجموع طول آبراهه‌های درجه ۱ کل حوضه به کیلومتر و A مساحت منطقه برحسب کیلومتر مربع است (Bahrami et al, 2024).

نسبت تعداد آبراهه‌های درجه ۱ به تعداد کل آبراهه‌ها ($N1/N$): این شاخص از تقسیم تعداد آبراهه درجه ۱ به تعداد کل آبراهه‌های با درجات مختلف در یک حوضه به دست می‌آید. شاخص مذکور نیز می‌تواند بیانگر فعالیت‌های تکتونیکی باشد. مقدار این شاخص در مناطق جوان تکتونیکی بیشتر است (Bahrami et al., 2020).

یافته‌های پژوهش

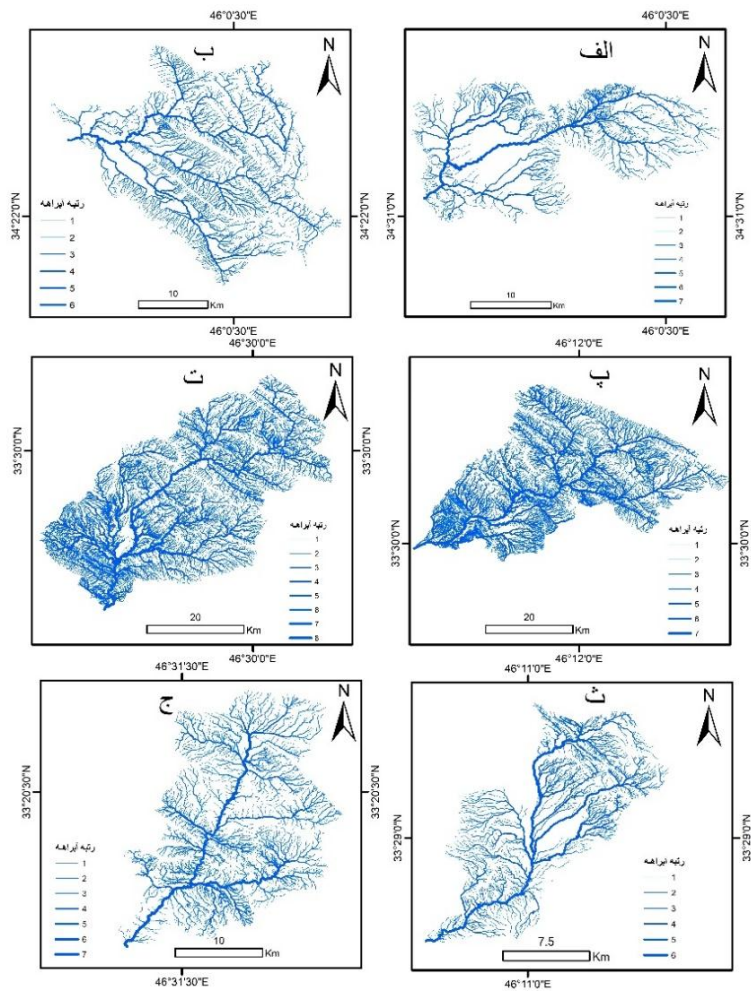
در منطقه مورد مطالعه، بالاترین رده آبراهه‌ها میان حوضه‌های مورد مطالعه مربوط به حوضه مهران ۱ بوده و تا رتبه ۸ ادامه دارد، در حالی که پایین‌ترین رده در حوضه‌های الوند و صالح‌آباد مشاهده می‌شود که آبراهه‌های آن‌ها حداکثر تا رتبه ۵ گسترش یافته‌اند. این اختلاف در رده‌بندی آبراهه‌ها بیانگر تفاوت‌های ساختاری، مساحتی و شرایط توپوگرافی میان حوضه‌هاست، که می‌تواند در میزان تمرکز جریان، الگوی زهکشی و در نهایت در پراکنش زمین‌لغزش‌ها تأثیرگذار باشد. در شکل (۳)، رتبه‌های تعیین‌شده برای هر حوضه نمایش داده شده است. جدول (۱)، مساحت زمین‌لغزش‌ها، تعداد زیرحوضه‌ها و شاخص‌های مورفومتری شبکه زهکشی را نشان می‌دهند. میزان ناهنجاری سلسله مراتبی شبکه زهکشی (Δa) در حوضه تنگ حمام دارای بیشترین مقدار (۲/۱۵) و در حوضه الوند کمترین مقدار (۱/۱۶) را دارا است. تغییرپذیری و ناهنجاری در الگوی زهکشی تنگ حمام نسبت به سایر حوضه‌ها بیشتر بوده که بیانگر ناپایداری‌های سطحی شدیدتر در این ناحیه است. بیشترین مقدار تراکم زهکشی آبراهه‌ها (Dd) به ترتیب در حوضه‌های صالح‌آباد (۴/۴۰) و مهران ۱ (۴/۰۴) و کمترین مقدار در حوضه تنگ حمام (۲/۴۹) مشاهده می‌شود. تراکم بالای زهکشی در صالح‌آباد و مهران ۱ نشان‌دهنده نفوذپذیری کم، شیب زیاد و تمرکز رواناب در سطح حوضه است. میزان تراکم زهکشی آبراهه‌های درجه ۱ ($Dd1$) در حوضه صالح‌آباد (۲/۵) و مهران ۲ (۲/۰۶) دارای بیشترین مقدار، در حوضه‌های تنگ حمام (۱/۳۶) و الوند (۱/۱۵۱) دارای حد متوسط و در حوضه‌های ایلام (۰/۷۴) و مهران ۱ (۰/۷۶) کمترین مقدار است. تفاوت مقادیر تراکم زهکشی آبراهه‌های درجه ۱ نشان می‌دهد که در حوضه‌های صالح‌آباد و مهران ۲ تعداد آبراهه‌های

درجه ۱ زیاد و احتمال نفوذ رواناب کمتر بوده و در نتیجه فرسایش سطحی در آن‌ها بیشتر است. فرکانس شبکه زهکشی (Df) در حوضه صالح‌آباد با مقدار ۸/۹۸ در بیشترین سطح و در حوضه‌های الوند (۳/۲۶) و تنگ حمام (۳/۷۲) در کمترین میزان قرار دارد. این وضعیت نشان می‌دهد که حوضه صالح‌آباد دارای تعداد بیشتری آبراهه در واحد سطح بوده و از نظر زهکشی فعال‌تر است. نسبت تعداد آبراهه‌های درجه ۱ به کل آبراهه‌ها (N1/N) در حوضه‌های تنگ حمام، الوند، ایلام و مهران ۲ برابر با ۰/۷۴ است، در حالی که در مهران ۱ مقدار ۰/۷۶ و در صالح‌آباد مقدار ۰/۷۳ مشاهده می‌شود. این شاخص نشان می‌دهد که در مجموع در تمامی حوضه‌ها، درصد بیشتر شبکه آبراهه‌ای را شاخه‌های درجه ۱ تشکیل دادند و بیانگر سیستم زهکشی جوان و در حال توسعه می‌باشد که می‌تواند رواناب بالا و لغزش‌های سطحی را محتمل‌تر کند. نسبت انشعاب (Rb) در حوضه‌های الوند، ایلام و مهران ۲، مهران ۱، تنگ حمام و صالح‌آباد به ترتیب مقادیر ۴/۴۱، ۴/۲۵، ۴/۰۴، ۳/۶۱، ۳/۲۸ و ۲/۷۸ را دارا هستند که نشان دهنده شبکه زهکشی جوان و وجود شکستگی‌ها و کنترل تکتونیکی قوی در تمامی حوضه‌ها به استثنای صالح‌آباد می‌باشد. مقدار شاخص انشعابات (R) در حوضه‌های مورد مطالعه از ۰/۶ تا ۰/۹ متغیر است. مقادیر به دست آمده بیانگر انحراف نسبتاً زیاد الگوی زهکشی از حالت متعادل می‌باشد و این امر می‌تواند نشان دهنده کنترل ساختاری و فعالیت تکتونیکی در تکامل شبکه زهکشی باشد که معمولاً با ناپایداری بیشتر دامنه‌ها و تمرکز بالاتر زمین لغزش‌ها در ارتباط است.

جدول ۱- شاخص‌های مورفومتری و شاخص‌های شبکه زهکشی حوضه‌های آبخیز

Table 1- Morphometric indicators and drainage network indicators of watersheds

حوضه	Δa	Dd	Dd1	Df	N1/N	Rb	R
تنگ حمام	۲/۱۵	۲/۴۹	۱/۳۶	۳/۷۲	۰/۷۴	۳/۲۸	۰/۶
الوند	۱/۱۶	۲/۶۴	۱/۵۱	۳/۲۶	۰/۷۴	۴/۴۱	۰/۷۶
ایلام	۱/۸۶	۳/۹۶	۰/۷۴	۶/۲۲	۰/۷۴	۴/۲۵	۰/۸۹
مهران ۱	۱/۸۱	۴/۰۴	۰/۷۶	۶/۷۲	۰/۷۶	۳/۶۱	۰/۹۰
صالح‌آباد	۱/۳۸	۴/۴۰	۲/۵۰	۸/۹۸	۰/۷۶	۴/۲۴	۰/۷۹
مهران ۲	۱/۷۲	۳/۶۱	۲/۰۶	۶/۵۸	۰/۷۴	۴/۰۴	۰/۶۳



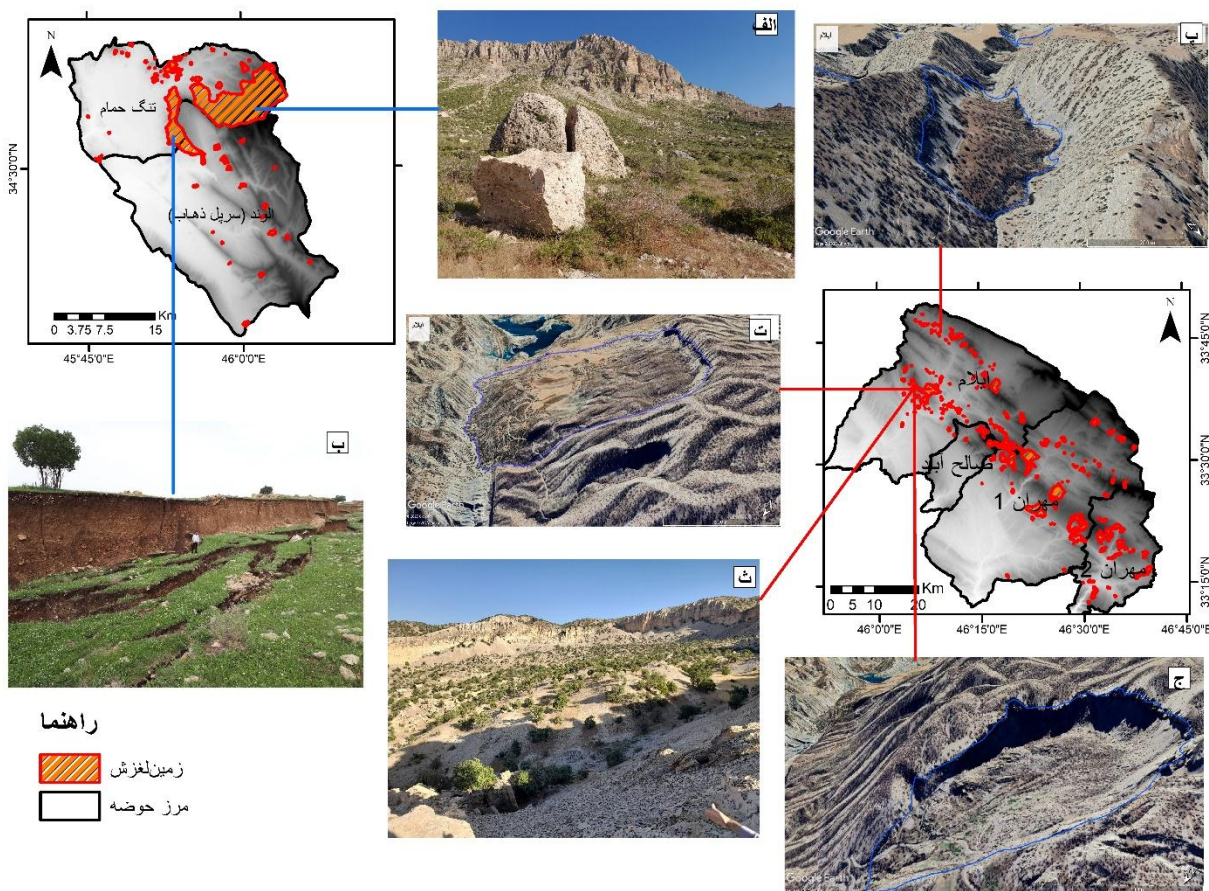
شکل ۳- نقشه رتبه بندی شبکه‌های زهکشی حوضه‌ها منطقه مورد مطالعه.

الف: تنگ حمام. ب: الوند. پ: ایلام. ت: مهران ۱. ث: صالح آباد. ج: مهران ۲.

Figure 3- Drainage ordering map of the basins of the study area. A: Tang Hamam. B: Alvand. C: Ilam. D: Mehran 1. E: Saleh Abad. C: Mehran 2.

جهت بررسی ارتباط ویژگی‌های ژئومورفومتری با زمین‌لغزش‌ها، ابتدا از طریق روش‌های فوق‌الذکر تعداد ۳۲۲ زمین‌لغزش شناسایی و تعیین موقعیت شدند. سپس نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه تهیه گردید. مشاهدات میدانی در محل زمین‌لغزش‌های قدیمی و جدید، وجود نشانه‌هایی همچون آشفستگی در پوشش گیاهی، گسیختگی‌ها و درز و شکاف‌ها، قطعه سنگ‌های بزرگ، انحراف و کج شدگی درختان و تغییر مسیر آبراهه‌ها را نشان می‌دهد. افزون بر این، بررسی نقشه‌های توپوگرافی بزرگ مقیاس و تغییرات منحنی میزان (به صورت چاله‌ها و پرتگاه‌های متعدد) نیز در شناسایی زمین‌لغزش‌ها نقش مؤثری دارد (شکل‌های ۴). پراکنش زمین‌لغزش‌ها در بخش‌های مختلف حوضه‌ها متفاوت بوده و از نظر تراکم، تفاوت‌های محسوسی میان آن‌ها وجود دارد. در حوضه تنگ حمام تعداد ۴۴، الوند ۲۱، ایلام ۱۳۶، مهران ۱ تعداد ۸۲، صالح آباد ۷ و مهران ۲ تعداد ۳۲ زمین‌لغزش، به ترتیب با مساحت‌های ۸۳/۸۵، ۹/۶۹، ۲۸/۵۸، ۴۹/۵۹، ۴/۲۶ و ۱۸/۰۱ کیلومتر به وقوع پیوسته است. براساس داده‌ها، بیشترین مقدار نسبت مساحت زمین‌لغزش به مساحت

حوضه (LA) نیز به ترتیب در حوضه‌های تنگ حمام (۲۲/۰۸ درصد)، مهران ۲ (۴/۶۶ درصد)، مهران ۱ (۳/۸۶ درصد)، ایلام (۲/۳۶ درصد)، صالح‌آباد (۲/۳۵ درصد) و الوند (۱/۵۳ درصد) مشاهده می‌شود (جدول ۲).



شکل ۴- تصاویری از زمین لغزش‌های بررسی شده در محدوده مطالعاتی. الف و ب: شواهدی دال بر وقوع زمین لغزش شامل قطعه سنگ‌های بزرگ (زمین لغزش روستای بزمیرآباد، سرپل ذهاب) و درزو شکاف‌ها و گسیختگی‌ها (زمین لغزش مله کبود، دامنه کوه شاهنشین، سرپل ذهاب). پ و ت: تغییر مسیر آبراهه‌ها توسط زمین لغزش‌ها (زمین لغزش‌های غرب و جنوب شهرستان ایلام). ث و ج: نمایی از زمین لغزش قدیمی در بخش جنوبی استان ایلام، روستای ماربره.

Figure 4- Images of landslides investigated in the study area. A and B: Evidence of landslide occurrence including large rock fragments (Bazmirabad village landslide, Sarpol Zahab) and fissures and ruptures (Melleh Kabud landslide, Shahneshin mountain slope, Sarpol Zahab). P and T: Redirection of waterways by landslides (west and south Ilam county landslides). C and J: View of an old landslide in the southern part of Ilam province, Marboreh village.

جدول ۲- شاخص‌های مربوط به مساحت حوضه آبخیز و زمین لغزش

Table 2- Indices of the watershed area and landslides

LD	LA	تعداد زمین لغزش	مساحت زمین لغزش (km ²)	مساحت حوضه (km ²)	حوضه
۱۱/۵۹	۲۲/۰۸	۴۴	۸۳/۸۵	۳۷۹/۶۱	تنگ حمام
۳/۳۱	۱/۵۳	۲۱	۹/۶۹	۶۳۳/۱۹	الوند
۱۱/۲۴	۲/۳۶	۱۳۶	۲۸/۵۸	۱۲۰۹/۳۵	ایلام

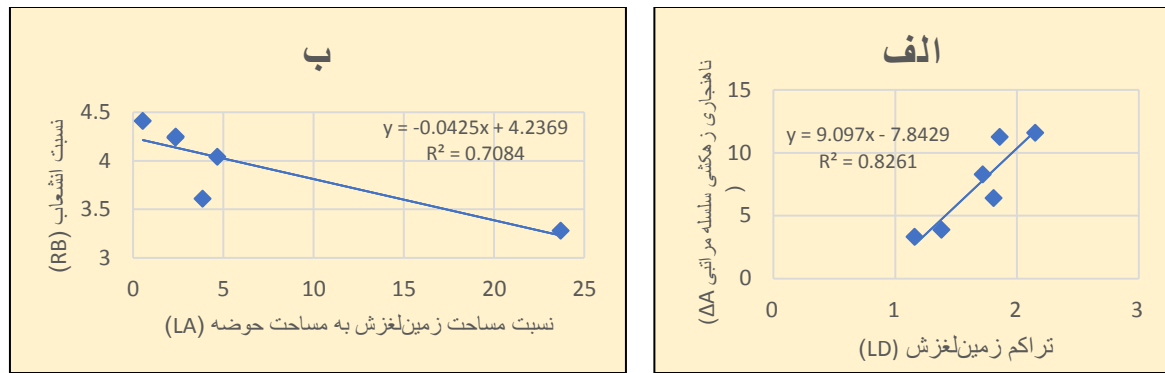
۶/۳۸	۳/۵۶	۸۲	۴۹/۵۹	۱۲۸۳/۷۲	مهران ۱
۳/۸۶	۲/۳۵	۷	۴/۲۶	۱۸۱/۲۷	صالح آباد
۸/۲۶	۴/۶۶	۳۲	۱۸/۰۱	۳۸۷/۳۵	مهران ۲

به منظور ارزیابی ارتباط میان شاخص‌های شبکه زهکشی، مساحت حوضه‌ها با زمین‌لغزش‌ها، از ضریب همبستگی رتبه‌ای پیرسون استفاده شد. براساس جدول (۳)، نتایج حاصل از ضریب پیرسون نشان می‌دهد که بین شاخص‌های زهکشی و زمین‌لغزش ارتباط معنی‌داری وجود دارد. به این صورت که، بین مساحت حوضه (A) و تراکم زهکشی آبراهه‌های درجه ۱ (Dd1) رابطه منفی معنی‌داری (۰/۹۰۶-) وجود دارد. این موضوع نشان دهنده آن است که در حوضه‌های بزرگ‌تر، تراکم آبراهه‌های درجه ۱ کاهش یافته است. همچنین نسبت مساحت زمین‌لغزش به مساحت حوضه (LA) با نسبت انشعاب (Rb) رابطه منفی معنی‌داری (۰/۸۴۲-) دارد. این امر بیانگر این است شبکه زهکشی پیچیده‌تر، موجب پراکندگی جریان سطحی و کاهش تمرکز انرژی بر دامنه‌ها می‌شود و در نتیجه احتمال وقوع زمین‌لغزش کاهش می‌یابد. تراکم زمین‌لغزش (LD) با ناهنجاری سلسله مراتبی شبکه زهکشی (Δa) رابطه مثبت معنی‌داری (۰/۹۰۹) دارد. این امر نشان می‌دهد که در مناطقی که تمرکز زمین‌لغزش‌ها بیشتر است، الگو شبکه زهکشی نیز ناهنجارتر بوده و از وضعیت یکنواخت و متعادل خود فاصله گرفته است. به عبارت دیگر، وقوع زمین‌لغزش‌ها، معمولاً با آشفتگی و بی‌نظمی در ساختار شبکه زهکشی همراه است. تراکم زهکشی (Dd) با فرکانس شبکه زهکشی (Df) رابطه مثبت معنی‌داری (۰/۹۵۱) دارد. این رابطه نشان می‌دهد که توسعه شبکه زهکشی با افزایش رواناب سطحی و تمرکز جریان‌ها همراه است که می‌تواند پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را افزایش دهد. در واقع این الگو نشان دهنده هماهنگی بین توسعه شبکه زهکشی و فرایندهای زمین‌لغزش است (شکل ۶).

جدول ۳- روابط میان خصوصیات کمی شبکه‌های زهکشی و زمین‌لغزش‌ها

Table 3 - Relationships between quantitative characteristics of drainage networks and landslides

	A	S	LA	LD	Δa	Dd	Dd1	Df	N1/N	Rb	R
A	1										
S	0.462	1									
LA	-0.3	-0.501	1								
LD	0.231	-0.087	0.625	1							
Δa	0.243	-0.144	0.731	.909*	1						
Dd	0.243	0.036	-0.572	-0.186	-0.1	1					
Dd1	-.906*	-0.292	-0.084	-0.469	-0.467	0.126	1				
Df	-0.054	-0.123	-0.427	-0.219	-0.102	.951**	0.389	1			
N1/N	0.092	-0.235	-0.281	-0.505	-0.185	0.687	0.157	0.708	1		
Rb	-0.041	0.244	-.842*	-0.533	-0.808	0.293	0.303	0.219	-0.083	1	
R	0.767	0.16	-0.647	-0.237	-0.213	0.624	-0.503	0.38	0.511	0.345	1



شکل ۶- نمودار روابط میان خصوصیات کمی شبکه‌های زهکشی و زمین لغزش‌ها. الف: رابطه میان تراکم زمین لغزش (LD) با ناهنجاری سلسله مراتبی شبکه زهکشی (Δa). ب: رابطه میان نسبت مساحت زمین لغزش به مساحت حوضه (LA) با نسبت انشعاب (Rb).

Figure 6- Diagram of the relationships between quantitative characteristics of drainage networks and landslides. A: Relationship between landslide density (LD) and drainage network hierarchical anomaly (Δa). B: Relationship between landslide area to basin area ratio (LA) and branching ratio (Rb).

بحث

تحلیل شاخص‌های شبکه زهکشی و ویژگی‌های مورفومتری حوضه‌ها در منطقه مورد مطالعه نشان داد که الگوی توزیع زمین لغزش‌ها بیش از آنکه تابع یک عامل خاص باشد، حاصل تعامل میان ساختار زمین‌ساختی، هندسه شبکه زهکشی و ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه‌ها است. ناهنجاری‌های شبکه زهکشی و تفاوت در تراکم آبراهه‌ها بیانگر آن است که حوضه‌های مورد بررسی از نظر پویایی در شرایط متفاوتی قرار دارند. ارزیابی شاخص‌های مورفومتری شبکه زهکشی شامل ناهنجاری سلسله مراتبی شبکه زهکشی (Δa)، تراکم زهکشی (Dd) و تراکم زهکشی آبراهه‌های درجه ۱ (Dd1)، نشان می‌دهند که به‌طور نسبی نواحی با ناهنجاری شبکه زهکشی بالاتر و تراکم زهکشی پایین‌تر (حوضه تنگ حمام با بیشترین مقدار شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی ۲/۱۵ و کمترین مقدار تراکم زهکشی ۲/۴۹)، رواناب سطحی بیشتری را متمرکز می‌کنند و بیشتر مستعد وقوع زمین لغزش (بیشترین مقدار شاخص نسبت مساحت زمین لغزش به مساحت حوضه در تنگ حمام ۲۳/۶۹ درصد) هستند. همچنین بررسی شاخص‌های فرکانس شبکه زهکشی (Df) و نسبت آبراهه‌های درجه ۱ به کل آبراهه‌ها (NI/N) نشان دهنده جوان و فعال بودن شبکه زهکشی در تمامی حوضه‌ها است. این ویژگی می‌تواند موجب افزایش فرسایش سطحی در طول دامنه‌ها و در نتیجه فراهم شدن شرایط مناسب برای بروز زمین لغزش‌ها شود. شاخص انشعابات (R) و نسبت انشعاب (Rb) نیز نشان می‌دهند که فعالیت تکتونیکی در شکل‌گیری شبکه زهکشی نقش مهمی دارد، به‌طوری که انحراف شبکه از حالت متعادل، معمولاً با تمرکز وقوع زمین لغزش‌ها و افزایش ناپایداری دامنه‌ها همراه است. به‌طور کلی، ترکیب جوانی و فعال بودن شبکه زهکشی، تراکم آبراهه، ناهنجاری سلسله مراتبی، فعالیت تکتونیک و ساختار زمین، عوامل اصلی تعیین‌کننده در پراکنش و شدت زمین لغزش‌ها هستند. نتایج تحلیل متغیرها نیز نشان می‌دهد که ویژگی‌های مورفومتری حوضه‌ها و شبکه زهکشی آن‌ها نقش قابل توجهی در توزیع و تراکم زمین لغزش‌ها دارند. رابطه منفی میان مساحت حوضه (A) و تراکم زهکشی آبراهه‌های درجه ۱ (Dd1)، بیانگر این است که در حوضه‌های بزرگ‌تر، شبکه آبراهه‌ای تراکم کمتری دارد و این موضوع می‌تواند با افزایش نفوذپذیری سطح و کاهش تمرکز جریان سطحی مرتبط باشد. در واقع، در مناطق دارای سطح لغزشی زیاد، تراکم

زهکشی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده رابطه منفی بین نسبت مساحت زمین لغزش به مساحت حوضه (LA) و نسبت انشعاب (Rb)، بیانگر این است که پیچیدگی بیشتر شبکه زهکشی می‌تواند باعث پراکندگی رواناب و کاهش تمرکز نیروها بر دامنه‌ها شود. به عبارت دیگر، ساختار شبکه زهکشی خود به‌عنوان عاملی کنترل‌کننده بر پایداری دامنه‌ها عمل می‌کند. رابطه مثبت میان تراکم زمین لغزش (LD) و ناهنجاری سلسله مراتبی شبکه زهکشی (Δa)، نشان می‌دهد که مناطق دارای زمین لغزش با بی‌نظمی و آشفتگی در شبکه زهکشی همراه بوده و الگوی شبکه زهکشی از وضعیت یکنواخت و متعادل خود فاصله گرفته است. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که تحلیل شبکه زهکشی نه تنها بازتاب‌دهنده فرایندهای هیدرولوژیکی، بلکه بازتاب‌دهنده تاثیر عوامل زمین‌ساختی و فرم و فرایندهای ژئومورفولوژی مانند زمین لغزش در دامنه‌ها نیز می‌باشد. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهند که ویژگی‌های شبکه زهکشی و ساختار حوضه‌ها می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های کمی برای ارزیابی حساسیت دامنه‌ها به زمین لغزش مورد استفاده قرار گیرند و تحلیل آماری آن‌ها، دیدگاه روشن‌تری از نقش ارتباطات هیدرولوژیکی و مورفولوژیکی در کنترل ناپایداری‌ها فراهم می‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که توزیع زمین لغزش‌ها نتیجه تعامل پیچیده‌ای میان ساختار زمین‌ساختی، هندسه شبکه زهکشی و ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه‌ها در منطقه مورد مطالعه است. یافته‌ها تأکید می‌کنند که ناهنجاری سلسله مراتبی شبکه زهکشی (Δa)، تراکم زهکشی (Dd)، تراکم زهکشی آبراهه‌های درجه ۱ (Dd1)، نسبت انشعاب (Rb) و فرکانس شبکه زهکشی (Df)، از شاخص‌های کلیدی و اصلی هستند که بیشترین ارتباط را با پراکندگی و فراوانی زمین لغزش‌ها دارند. رابطه‌های مثبت و منفی شناسایی شده میان این شاخص‌ها و تراکم زمین لغزش‌ها نشان می‌دهد که شبکه زهکشی نه تنها مسیرهای جریان سطحی را هدایت می‌کند، بلکه نقش مهمی در کنترل ناپایداری دامنه‌ها ایفا می‌کند. همچنین شاخص‌هایی مانند ناهنجاری سلسله مراتبی شبکه زهکشی (Δa) و نسبت انشعاب (Rb)، می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های حساس برای ارزیابی مناطق مستعد زمین لغزش و تحلیل ریسک مورد استفاده قرار گیرند، در حالی که تراکم زهکشی و تراکم آبراهه‌ها نشانگر میزان تمرکز رواناب و شدت فعالیت هیدرولوژیکی حوضه‌ها هستند. به‌طور کلی، نتایج مطالعه نشان می‌دهد که ارزیابی جامع شاخص‌های مورفومتری و شبکه زهکشی حوضه‌ها می‌تواند در درک بهتر فرایندهای زمین لغزش، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و برنامه‌ریزی مدیریت خطر زمین لغزش نقش مؤثری داشته باشد.

* این پژوهش تحت حمایت مادی بنیاد علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۲۷۹۱۱ انجام شده است.

References

- Anish, A. U., Baiju, K. R., Midhun, E. V., & Krishnakumar, K. N. (2019). Hierarchical anomaly and denudation index of Karuvannur River Basin, Thrissur District, Kerala India. *Eco Chronicle*, 14, 60-65. <https://doi.org/10.1007/s41324-018-00232-2>
- Bahrami, S. (2013). Analyzing the drainage system anomaly of Zagros basins: Implications for active tectonics. *Tectonophysics*, 608, 914-928. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.026>.
- Bahrami, S., Capolongo, D., Rahdan Mofrad, M., 2020. Morphometry of drainage basins and stream networks as an indicator of active fold growth (Gorm anticline, Fars Province, Iran). *Geomorphology*, 355, 107086. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107086>.
- Bahrami, S., Ehteshami-Moinabadi, M., & Tuyserkani, M. S. (2024). Quantitative evaluation of morphometric parameters of drainage system in the forelimb and backlimb of the Asmari Anticline, Zagros, Iran. *Journal of Structural Geology*, 184, 105151. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2024.105151>.
- Bayati Khatibi, M. (2007). The role of drainage density and elevation difference on the occurrence of valley landslides in the semi-arid mountains of the northwestern slopes of Sabalan. *Journal of Humanities*, 10(2 (45th issue), Special Issue on Geography), 59-82. [In Persian].
- Bayati Khatibi, M. (2009). Detection of neotectonic activities in the Qarnquchay watershed using geomorphic and morphotectonic indices, *Journal of Geographical Space*, 25, 23-50. [In Persian].
- Bull, W. B. (2008). Tectonic geomorphology of mountains: a new approach to paleoseismology. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1017/S0016756809006086>
- Chen, B., & Chui, T. F. M. (2025). Exploring the effectiveness, risks and strategies for implementing sustainable drainage systems in a landslide-prone catchment. *Journal of Hydrology*, 652, 132645. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.jhydrol.2024.132645>
- Devi, R. M., Bhakuni, S. S., & Bora, P. K. (2011). Tectonic implication of drainage set-up in the Sub-Himalaya: a case study of Papumpare district, Arunachal Himalaya, *India. Geomorphology*, 127(1-2), 14-31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.11.010>
- Gruber, S., Huggel, C., & Pike, R. (2009). Modelling mass movements and landslide susceptibility. *Developments in Soil Science*, 33, 527-550. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00023-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00023-8)
- Guarnieri, P., & Pirrotta, C. (2008). The response of drainage basins to the late Quaternary tectonics in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily). *Geomorphology*, 95(3-4), 260-273. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.013>
- Korulla, M. (2019). Significance of drainage measures on landslide mitigation measures. In *Geotechnics for Natural Disaster Mitigation and Management* (pp. 97-107). *Singapore: Springer Singapore*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8828-6_9
- Lajmorak, M., & Piri, Z. (2023). Landslide hazard zoning using Hierarchical Analysis Process (AHP) Model and GIS technology (Case study: Baghmalek County). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(3), 193-215. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.77009.1239>

- Lin, D. G., Hung, S. H., Ku, C. Y., & Chan, H. C. (2016). Evaluating the efficiency of subsurface drainages for Li-Shan landslide in Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2016, 1-22. <https://doi.org/10.5194/nhess-2015-309>
- Mousavi, Z; Soleimani, K; Klar-e-Staghi, A; Mousavi, S R; Shirzadi, A. (2009). Analysis of causative factors on landslide occurrence in Sajarood basin using logistic regression and GIS. *National Conference on Watershed Science and Engineering of Iran* (Sustainable Management of Natural Disasters). [In Persian].
- Ng, K. Y. (2006). Landslide locations and drainage network development: a case study of Hong Kong. *Geomorphology*, 76(1-2), 229-239. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.10.008>
- Peart, M. R., Ng, K. Y., & Zhang, D. D. (2005). Landslides and sediment delivery to a drainage system: some observations from Hong Kong. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(5), 821-836. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.08.004>
- Pirvan, H R; Shariat Jafari, M; Lotfollah Zadeh, D. (2017). The effect of landslides on the sediment load of the Jajrood River. *Watershed Engineering and Management*, 9(2), 179-189. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109724>
- Swanson, F. J., Graham, R. L., & Grant, G. E. (1985, September). Some effects of slope movements on river channels. In International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention. *Tsukuba, Japan* (pp. 273-278).
- Tucker, G. E., Catani, F., Rinaldo, A., Bras, R. L., (2001) Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. *Geomorphology*, 36, 187-202. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00056-8)
- Wang, D. F., Xu, H. D., Wang, L., Wu, X., & Sun, H. Y. (2020). Statistical analyses of the effect of a drainage tunnel on landslide hydrogeological characteristics. *Hydrological Processes*, 34(11), 2418-2432. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01769-z>
- Zhang, D. (2025). Mechanical Calculation of Landslide Stability Considering the Coupling Effect of Seepage and Stress and Optimization of Drainage Disaster Reduction. *European Journal of Computational Mechanics*, 169-194. <https://doi.org/10.13052/ejcm2642-2085.3424>.

Analysis of the relationship between landslides and drainage network indices (Case study: six drainage basins in the Folded Zagros)

Forouzan Naseri¹, Shahram Bahrami², Alireza Salehipour Milani³, Mohsen Ehteshami-Moinabadi⁴

Abstract

The drainage network is one of the factors affecting the occurrence of landslides and, by controlling the concentration of runoff and surface erosion, has a significant impact on the stability of slopes and the occurrence of landslides. This study aimed to analyze the spatial relationship between drainage network indices and morphometric characteristics of watersheds and the occurrence of landslides in basins from the Ilam-Kermanshah area in the Zagros Folded belt in western Iran. For this purpose, using a digital elevation model with a resolution of 12.5 meters and 1:50,000 topographic maps, watersheds and drainage networks were extracted in Global Mapper, Google Earth, and Arc Hydro software. Also, in order to extract and locate 322 landslides, satellite images available in Google Earth, spatial analyses in ArcGIS, and field observations were used. Then, the relationship between the drainage network hierarchical anomaly index (Δa), drainage density (Dd), drainage density of 1st-order streams (Dd1), drainage network frequency (Df), ratio of the number of first-order stream's to the total number of stream's (N1/N), stream's bifurcation ratio (Rb) and bifurcation index (R), ratio of landslide area to basin area (LA), and landslide density (LD) of the basins were calculated and analyzed. The results showed that the distribution of landslides is a function of a complex interaction between the tectonic structure, the geometry of the drainage network, and the hydrological characteristics of the basins. The drainage network hierarchical anomaly (Δa), drainage density (Dd), and stream's bifurcation ratio (Rb) had the highest correlation with the density of landslides, while the drainage density of 1st-order streams (Dd1) and drainage network frequency (Df) were also effective in increasing the instability of slopes. These findings indicate that the analysis of drainage network morphometric indices can be used as an effective approach to define and evaluate landslide-prone areas.

Keywords: Landslide, Drainage Network Morphometric Indexes, Hierarchical Anomaly, Ilam, Zagros

Introduction

Landslides are one of the important geomorphological processes that extend from mountain slopes to low-sloping hills, as an erosional process, they cause major changes in the shape of the land and its surface roughness. The impact of landslides is felt not only on steep slopes, but also where movement penetrates river channels and changes conditions upstream and downstream. In

¹ PhD Student of Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. f_naseri@sbu.ac.ir

² Associate Professor of Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. sh_bahrami@sbu.ac.ir

³ Assistant Professor of Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. ar.salehipour@gmail.com

⁴ Associate Professor of the Sedimentary Basins and Petroleum Department, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. ehteshami58@gmail.com

fact, landslides have a wide variety of effects on drainage networks and can reduce the width of valley floors and river channels and increase the height of the riverbed. Rivers and their tributaries are the key features of a drainage basin. Drainage networks are very sensitive to geomorphological and tectonic changes and are among the first elements to react to deformations and discontinuities in the ground. In fact, analysis of drainage networks is an efficient tool for interpreting topographic evolution, and the configuration and evolution of drainage networks is a direct reflection of geological dynamics, internal earth activities, and climate changes. Accordingly, quantitative investigation of the relationship between landslides and drainage networks can provide a deeper understanding of the internal dynamics of the basin and the instability behavior of slopes; especially drainage network anomalies can reflect the occurrence of slope instabilities and the concentration of landslide processes. Therefore, in this study, the relationship between drainage network indices and landslides in six watersheds in the Folded Zagros belt in western Iran has been evaluated.

Materials and Methods

In this study, watersheds and drainage networks were first mapped using a digital elevation model with a resolution of 12.5 meter and topographic maps at a scale of 1:50,000, in Global Mapper, Google Earth, and Arc Hydro software. Also, in order to extract and locate landslides, satellite images available in Google Earth and spatial analyses in the ArcGIS environment were used. Then, through field visits to the study area, examples of landslides were studied on a case-by-case basis, and landslides taken from satellite images were verified. Next, SPSS software was used to evaluate the relationship between landslide occurrence and sub-basins and streams. Then, the relationship between the drainage network hierarchical anomaly index (Δa), drainage density (Dd), drainage density of 1st-order streams (Dd1), drainage network frequency (Df), ratio of the number of first-order stream's to the total number of stream's (N1/N), stream's bifurcation ratio (Rb) and bifurcation index (R), ratio of landslide area to basin area (LA), and landslide density (LD) of the basins were calculated and analyzed.

Discussion

Analysis of drainage network indices and morphometric characteristics of basins in the study area showed that the landslide distribution pattern is the result of the interaction between the tectonic structure, drainage network geometry, and hydrological characteristics of the basins, rather than being a function of a single factor. The anomalies in the drainage network and the differences in the density of watercourses indicate that the studied basins have different conditions in terms of dynamics. Evaluation of drainage network morphometric indices, including the Δa , Dd, Dd1, show that areas with higher drainage network anomaly and lower drainage density (Tang Hamam basin with the highest value of hierarchical anomaly index 2.15 and the lowest value of drainage density 2.49) concentrate more surface runoff and are more prone to landslides (the highest value of LA in Tang Hamam is 23.69 percent). Also, examining the Df and N1/N indicates that the drainage network is young and active in all basins. This tectonic activity increase surface erosion along the slopes, thereby providing suitable conditions for landslides. The R and Rb also indicate that tectonic activity plays an important role in the formation of the drainage network. So that the deviation of the network from the balanced state is usually accompanied by the concentration of landslide occurrence and increased slope instability. In general, the combination of youth and activity of the drainage network, drainage density, hierarchical anomaly, tectonic activity, and terrain structure are the main determining factors in the distribution and intensity of landslides. The negative relationship between basin area (A) and Dd1 indicates that in larger basins, drainage networks have lower density, and this

can be related to increased surface permeability and reduced surface flow concentration. Also, the negative relationship between the LA and Rb indicates that greater complexity of the drainage network can cause runoff dispersion and reduce the concentration of forces on the slopes. In other words, the structure of the drainage network itself acts as a controlling factor on the stability of slopes. The positive relationship between LD and Δa indicates that landslide areas are associated with anomalous drainage networks. This study indicates the coordination between the development of watercourse networks and landslide processes and highlights the importance of combining hydrological and morphometric indicators in landslide risk analysis.

Conclusion

The results of this study showed that the distribution of landslides is the result of a complex interaction between the tectonic structure, the geometry of the drainage network, and the hydrological characteristics of the basins in the study area. The findings emphasize that the drainage network hierarchical anomaly (Δa), drainage density (Dd), and drainage density of 1st-order streams (Dd1), stream's bifurcation ratio (Rb), and drainage network frequency (Df) are the key and main indicators that are most closely related to the distribution and frequency of landslides. The positive and negative relationships identified between these indices and landslide density indicate that the drainage network not only directs surface flow paths, but also plays an important role in controlling slope instability. Also, indices such the drainage network hierarchical anomaly (Δa) and the stream's bifurcation ratio (Rb) can be used as sensitive indices for assessing landslide-prone areas and risk analysis, while drainage density and stream density indicate the degree of runoff concentration and the intensity of hydrological activity of basins. Overall, the results of the study show that a comprehensive assessment of morphometric indicators and drainage network of basins can play an effective role in better understanding landslide processes, identifying vulnerable areas, and planning landslide risk management.