

شناسایی دامنه‌های مستعد زمین لغزش و طبقه‌بندی انواع آن با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و منطق فازی (مطالعه موردی: حوضه قهرمانلو استان خراسان شمالی)

شیوا گلی پور- کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

سید رضا حسین زاده* - دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
ملیحه پورعلی - مدرس مدعو گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴ تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۰۹/۱۲

چکیده

زمین لغزش فرآیندی است شامل حرکات تند و یا کند مواد سنگی و خاک بر روی دامنه‌ها در جهت شیب که منجر به از بین رفتن شرایط طبیعی زمین شده و خطرات جانی و مالی زیادی را به وجود می‌آورد. در حوضه قهرمانلو به علت شرایط خاص خاک‌شناسی، آب وهوایی و تکتونیکی زمین لغزش‌های زیادی رخ داده است که خسارت‌های زیادی به زمین‌های کشاورزی، خطوط ارتباطی و نواحی روستایی وارد کرده است. در این پژوهش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و منطق فازی نقشه شدت خطر زمین لغزش‌های منطقه تهیه گردید و انواع آن بدست آمد. بدین صورت که با استفاده از ۱۲ معیار شامل شیب، جهت‌شیب، ارتفاع، تراکم شبکه‌آبراهه، فاصله از شبکه‌آبراهه، خطوط ارتباطی، زمین‌شناسی، شاخص رطوبت، بارش، کاربری اراضی، تراکم پوشش گیاهی و شاخص توپوگرافی زمین به عنوان متغیر مستقل و موقعیت زمین لغزش‌های منطقه که با استفاده از مطالعات میدانی و دورسنجی مجموعاً ۲۸ مورد شناسایی شده است، به عنوان متغیر وابسته به مدل معرفی گردید. نتایج مدل با دقت Pseudo R2 برابر با ۰/۲۳۱۱ و شاخص ROC برابر با ۰/۹۱۳۴، بیانگر این است که متغیرهای فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، بارندگی و فاصله از جاده در بروز زمین لغزش در حوضه قهرمانلو موثر می‌باشند و همچنین از کل مساحت ۱۰۲۴۱ هکتاری حوضه، میزان ۳۱۰ هکتار یعنی ۳ درصد و ۲۱۶/۳ هکتار به میزان ۲/۱۱ درصد، به ترتیب دارای پتانسیل زمین لغزش خیلی بالا و بالا می‌باشند، همچنین ۶۶/۵ درصد از حوضه به علت قرارگیری در ارتفاعات زیاد و شیب‌های تند و قرارگیری در موقعیت جهات غربی (غرب و شمال‌غربی و جنوب‌غربی) دارای دامنه‌هایی با پتانسیل خیلی کم برای زمین لغزش می‌باشند، همچنین ۱۱ مورد از زمین لغزش‌ها از نوع انتقالی، ۲ مورد زمین لغزش انتقالی کم عمق و ۱۵ مورد از پهنه‌های پیش‌بینی شده به صورت زمین لغزش چرخشی شناخته شدند.

واژگان کلیدی: تکوین، خراسان شمالی، غار، کارست، مورفوزنتیک.

مقدمه

زمین لغزش یکی از گسترده ترین و پرتکرارترین مخاطرات طبیعی است که منجر به تلفات جانی و خسارات اجتماعی-اقتصادی در سطح جهانی می‌گردد (تورنر^۱، ۲۰۱۸). این پدیده طبیعی نقش اساسی در تغییر و تکامل چشم‌انداز زمین داشته است (متراززی و همکاران^۲، ۲۰۲۱) که عوامل زمین‌شناسی، کاربری زمین، آب و هوا و عوامل انسانی در وقوع آن تاثیرگذار می‌باشند، همچنین عواملی مانند بارندگی شدید و زلزله باعث تشدید آن می‌شود (زوو و همکاران^۳، ۲۰۲۰). براساس تحقیقات وارنس^۴ (۱۹۷۸) و کرودن^۵ (۱۹۹۱)، لغزش زمین را می‌توان به عنوان حرکت توده ای از سنگ یا زمین به سمت پایین و خارج از یک شیب تحت تاثیر گرانش تعریف کرد که در نتیجه تغییر نیروی مقاومت برشی خاک بر روی دامنه، به وقوع می‌پیوندد (میکاددی و همکاران^۶، ۲۰۲۲). در ایران در یک دوره ۲۵ ساله (۱۳۸۹ - ۱۳۹۱) ۱۸۷ نفر توسط زمین‌لغزش جان خود را از دست دادند و به برخی از زیرساخت‌ها مانند جاده‌های جنگلی (۳ کیلومتر)، راه‌آهن (۹ کیلومتر)، جاده‌های اصلی (۲۵۲/۶۷) و جاده‌های روستایی (۴۶ کیلومتر) آسیب وارد شده است (یانسری و همکاران، ۱۳۹۷). با توجه به اهمیت زمین لغزش و مخاطرات آن محققانی در ایران و خارج از ایران به مطالعه آن پرداخته‌اند، افرادی مانند: یالچین^۷ و همکاران (۲۰۱۱)، طی تحقیقی در منطقه ترابزون^۸ واقع در شمال شرقی ترکیه با استفاده از GIS^۹ و RS^{۱۰} و مدل‌های رگرسیون لجستیک، تحلیل سلسله مراتبی و نسبت فراوانی به شناسایی و پهنه بندی زمین لغزش پرداختند، طبق نتایج بدست آمده از تحقیقات آن‌ها، شاخص آماری نسبت فراوانی، ۸۴/۹ درصد از منطقه، دارای خطرپذیری خیلی پایین و ۹۵/۱۹ درصد در محدوده پایین، ۳۶/۴۶ درصد در محدوده متوسط، ۵۸/۳۲ درصد در محدوده خطر زیاد و فقط ۱۸/۱ درصد در محدوده خطر خیلی زیاد بدست آمد. ونگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۶) زمین لغزش واقع در شهرستان گوانگ‌ژو در کشور چین را با استفاده از شاخص‌های آماری و مدل آنتروپی^{۱۲} مورد ارزیابی قرار دادند که در این پژوهش از پارامترهای جهت شیب، ارتفاع، انحنای نیمرخ عمومی و سطحی، فاصله از جاده، شاخص حمل رسوب، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده، بارش سالانه، سنگ‌شناسی و درجه شیب، استفاده نمودند. نتایج بدست آمده نشان داد که که مدل رگرسیون لجستیک با سطح زیرمنحنی ۸۲،۸ درصد دقت بالاتری نسبت به مدل شاخص آماری با سطح زیر منحنی ۸۲،۵۱ درصد دارد. اسپوزیتو و همکاران^{۱۳} در سال ۲۰۲۱ در تحقیقی در ایتالیا مرکزی به بررسی رابطه بین عوامل زمین‌شناسی، فیزیوگرافی و زمین‌ساختاری با وقوع زمین‌لغزش پرداخته‌اند، آن‌ها پس از بررسی عکس‌های هوایی و نقشه‌برداری میدانی و وضعیت اقلیم منطقه و با استفاده از مدل‌های آماری، زمین‌لغزش‌های منطقه را شناسایی کردند. نتایج آماری رگرسیون خطی تحقیق آن‌ها نشان داد که عامل زمین‌شناسی مهمترین عامل در وقوع زمین‌لغزش‌ها می‌باشد. کریمی و همکاران در سال ۱۳۹۱ در تحقیقی خطر زمین لغزش را با استفاده از مدل AHP-FUZZY در راستای توسعه امنیت کلانشهر تهران در منطقه یک با استفاده از پارامترهای شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی، کابری‌اراضی، رودخانه، گسل و موقعیت زمین‌لغزش‌های قدیمی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که از بالادست و شمال حوضه‌ها به سمت پایین‌دست و جنوب آبخیزهای منطقه یک،

1 - Turner

2 - Materazzi et al

3 - Zhou et al

4 - Varnes

5 - Cruden

6 - Miccadei et al

7 - Yalcheen

8 - Trabzon

9 - Geographic Information System

10 - Remote Sensing

11 - Wang

12 - Entropy

13 - Esposito et al

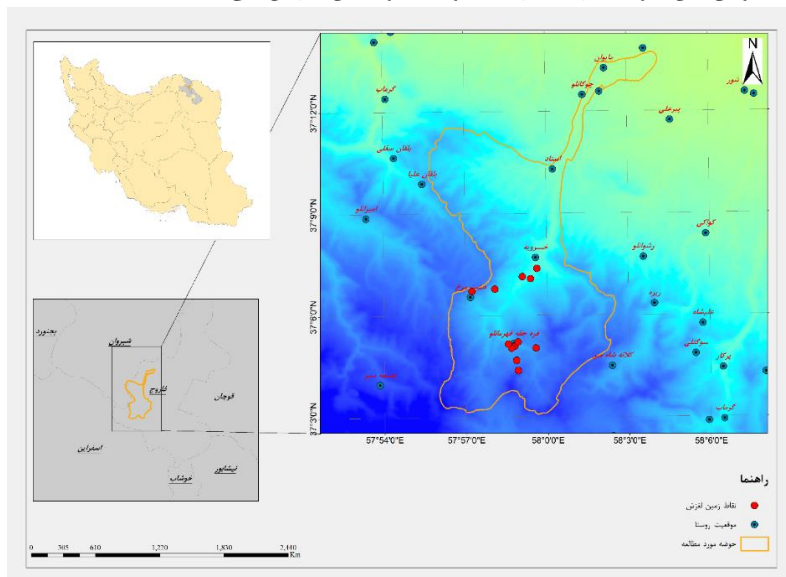
میزان خطر زمین لغزش کم می شود. با توجه به نقشه نهایی به دست آمده از پهنه بندی خطر زمین لغزش و در راستای توسعه و امنیت شهری نتیجه گرفته شد که باید از ساخت و ساز در محدوده با خطر بسیار زیاد و آبخیزهای دارای دامنه های پرشیب و دارای پتانسیل زمین لغزش و همچنین حریم رودها در منطقه یک ممانعت به عمل آید و بایستی همه کاربری های مختلف شهری از جمله کاربری های مسکونی با استفاده از روش ها و تکنیک های مهندسی پایدار شوند. یانسری و همکاران در سال ۱۳۹۷ در تحقیقی حساسیت به وقوع زمین لغزش را در حوزه آبخیز چهاردانگه مازندران با استفاده از رگرسیون لجستیک، مدل عمومی تجمیع یافته و شاخص آنتروپی شانون مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج بدست آمده از این تحقیق، معیارهای ارتفاع، درجه شیب، انحنا سطح و کاربری اراضی بیشترین تاثیر را بر وقوع زمین لغزش های منطقه داشته اند و پس از پهنه بندی و طبقه بندی آن به این نتیجه رسیده اند که ۵۱/۰۵ درصد منطقه مورد مطالعه در طبقه حساسیت زیاد و خیلی زیاد نسبت به وقوع زمین لغزش قرار دارد. همچنین با مقایسه سه روش شاخص آنتروپی، شانون، رگرسیون لجستیک و مدل عمومی تجمیع یافته با یکدیگر به وسیله مدل ROC به این نتیجه رسیده اند که، عمومی تجمیع یافته با سطح زیر منحنی ۴/۸۲ درصد بیشترین دقت را در حوضه آبخیز چارندانگه داشته است. اشرفی و همکاران در سال ۱۳۹۹ در تحقیقی پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از شاخص آنتروپی شانون به بررسی وضعیت زمین لغزش در حوضه آبریز طالقان پرداخته اند. آنان از لایه های شیب، جهت شیب، هیپسومتری، نسبت مساحت سطح، شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص طول شیب، شاخص رطوبت، زمین شناسی، کاربری اراضی، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه و فاصله از جاده استفاده نمودند و نتایج مدل نشان داد که عوامل جهت شیب، کاربری اراضی، ارتفاع، شیب، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و فاصله از رودخانه بیشترین تاثیر را بر وقوع زمین لغزش حوضه و عوامل شاخص رطوبت، زمین شناسی و شاخص موقعیت توپوگرافی کمترین تاثیر را داشته اند. در ایران استان های خراسان رضوی و شمالی، کهگیلویه و بویراحمد، اردبیل، مرکزی، چهارمحال و بختیاری، مازندران، آذربایجان شرقی و غربی، کردستان و ... جز مناطقی می باشند که هر ساله خسارات زیادی را از این پدیده طبیعی متحمل می شوند. در حوضه آبریز قهرمانلو واقع در استان خراسان شمالی، به علت شرایط خاص خاک شناسی، آب و هوایی، تکتونیکی و انسانی، زمین لغزش های زیادی رخ داده است که منجر به خسارت های زیادی به زمین های کشاورزی، خطوط ارتباطی، سکونتگاه های روستایی گردیده است که ضرورت بررسی وضعیت زمین لغزش در این حوضه را موجب می شود. هدف از این تحقیق نیز پهنه بندی انواع زمین لغزش و تهیه نقشه شدت خطر با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و منطق فازی در حوضه قهرمانلو واقع در استان خراسان شمالی می باشد تا عوامل موثر بر زمین لغزش در این حوضه بررسی و انواع زمین لغزش نیز در پهنه های شناسایی شده برای اولین بار مشخص گردد.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه واقع در حوضه رودخانه قهرمانلو واقع در جنوب غربی شهرستان فاروج می باشد که بین طول های جغرافیایی ۵۷ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۴ دقیقه شرقی و بین عرض های جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۳ دقیقه قرار گرفته است. روستاهای مایوان، چوکانلو، استاد، خسرویه، هشت سرخ و قهرمانلو در داخل این حوضه واقع شده اند (شکل ۱). این محدوده در بین تشکیلات کپه داغ در شمال و آلا داغ در جنوب قرار دارد، دارای سنگ های ماسه سنگ، گرانیت، شپست می باشد و دامنه های آن از آهک های اوربیتولین دار مربوط به دوره زمین شناسی کرتاسه (با سازند تیرگان) و مارن های قرمز و ماسه سنگ نئوژن تشکیل یافته است (سازمان زمین شناسی کشور، ۱۳۹۰). از دیدگاه چینه - شناسی تشکیلات منطقه مورد نظر شامل سنگ آهک توده ای - نازک لایه خاکستری روشن، سنگ آهک آرژیلی، مارن، ماسه سنگ و کنگلومرا، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ، کنگلومرا و شیل آمونیت دار با میان لایه های سنگ آهک و اربیتولین دار

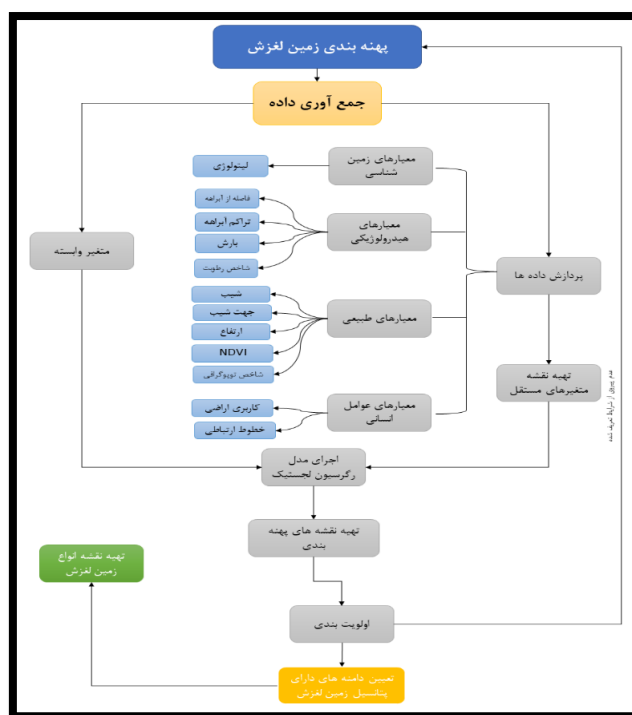
می‌باشد (سازمان زمین شناسی کشور، ۱۳۹۰). براساس آمار ثبت شده در سازمان زمین شناسی کشور، تعداد ۱۲ زمین لغزش در منطقه رخ داده است که ۷ مورد آن در اطراف ارتفاعات و دامنه‌های روستای قهرمانلو و سه مورد آن در اطراف روستای خسرویه و همچنین دو مورد از آن‌ها در اطراف روستای هشت سرخ رخ داده است. لذا این تعداد از زمین لغزش در این حوضه نشان از مستعد بودن این حوضه برای حرکات توده‌ای و زمین لغزش می‌باشد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان خراسان شمالی

مراحل انجام تحقیق

مراحل کلی پهنه‌بندی مناطق حساس به وقوع زمین لغزش در حوضه قهرمانلو با استفاده از روش آماری و رگرسیون لجستیک و منطق فازی در شکل ۲ به صورت فلوجارت نمایش داده شده است.



شکل ۲: دیاگرام مراحل پهنه‌بندی زمین لغزش در حوضه قهرمانلو

داده‌ها و معیارهای مورد استفاده

درجه شیب و جهت شیب

از جمله پارامترهای موثر در بررسی پایداری دامنه‌ها، درجه شیب است که وقوع زمین لغزش با آن رابطه مستقیمی دارد، لذا معیار مهم و اصلی در پهنه‌بندی زمین لغزش محسوب می‌گردد (لی و همکاران^۱، ۲۰۱۲). جهت شیب به علت تاثیر مستقیم بر عواملی همانند وزش باد، میزان دریافت نور خورشید و بارندگی (درجه اشباع) که مستقیماً بر وقوع زمین لغزش موثر است، (کلارستاقی، ۱۳۸۶، ۵۳) از پارامترهای بسیار مهم در پهنه‌بندی زمین لغزش می‌باشد (کوماک^۲، ۲۰۰۶) به طوری که به علت دریافت بیشتر میزان انرژی خورشیدی، وجود پوشش گیاهی، بارندگی، نگهداشت رطوبت باد و در نهایت ایجاد شرایط هوازدگی مکانیکی و تخریب سنگ‌ها نقش خود را ایفا می‌کند (لی و همکاران^۳، ۲۰۰۷). در پژوهش حاضر با استفاده از مدل رقومی زمین سنجنده SRTM^۴ تصحیح شده سال ۲۰۰۵، نقشه شیب و جهت شیب در منطقه محاسبه گردید که شیب بین ۳ تا ۵۲.۷۶ درجه می‌باشد که در شکل ۳ و جهت شیب در شکل ۴ نشان داده شده است.

ارتفاع

اثر ارتفاع به طور مستقیم بر حرکت توده‌های هوا و به صورت غیرمستقیم از طریق تبدیل نوع بارش به برف و انبساط حجمی آب در حدود ۹ درصد در هنگام یخ‌زدگی اعمال می‌گردد (مدنی، ۱۳۸۴، ۶۴)، افزایش بارش به شکل برف و نفوذ آن، موجب افزایش رطوبت دامنه شده که این نیز بر وقوع زمین لغزش تاثیر مستقیم می‌گذارد. در شکل ۵ خصوصیات ارتفاعی حوضه قهرمانلو نمایش داده شده است که با توجه به موقعیت قرارگیری این حوضه و کوهستانی بودن آن، ۷/۳ درصد از مساحت حوضه کمتر از ۱۵۰۰ متر ارتفاع دارد و ۹/۹ درصد از مساحت حوضه بیشتر از ۲۲۵۰ متر ارتفاع دارد.

شبکه آبراهه

تاثیر منفی آبراهه‌ها بر روی دامنه‌ها با انجام فرآیندهای فرسایش و شستشوی دامنه‌ها، تاثیر مستقیمی بر وقوع زمین لغزش دارد، بنابراین در پهنه‌های اطراف شبکه زهکشی میزان خطر زمین لغزش بیشتر می‌باشد (دای و لی^۵، ۲۰۰۲). لذا با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متری سنجنده SRTM نقشه شبکه هیدروگرافی، تهیه شده است. در شکل ۶ نقشه تراکم آبراهه بدست آمده از تابع Density نشان داده شده است. که میزان تراکم متراژ رودخانه در واحد یک کیلومتر مربع از سطح محدوده را بیان می‌دارد.

خطوط ارتباطی

خطوط ارتباطی به علت ایجاد شوک و لرزش در جاده‌های کوهستانی و همچنین ایجاد شکاف در دامنه در نتیجه فعالیت‌های خاک برداری، باعث ناپایداری مواد سطحی دامنه‌ها می‌گردد (یاماگیشی^۶، ۲۰۰۵). بنابراین تاثیر منفی بر رخداد زمین لغزش دارد به این دلیل که دامنه‌های نزدیک به خطوط ارتباطی بیشتر می‌تواند تحت تاثیر رخدادهای زمین لغزش قرارگیرد (باردینونی^۷ و همکاران^۷، ۲۰۰۳). نقشه شبکه جاده با رقومی کردن خطوط جاده اصلی و راه‌های فرعی در منطقه مورد

1 - Lee et al

2 - Komac

3 - Lee et al

4 - Shuttle Radar Topography Mission

5 - Dai and Lee

6 - Yamagishi

7 - Bradinoni

مطالعه از روی داده‌های OSM^۱ و گوگل ارث تهیه گردید و در شکل ۷ و ۱۴ موقعیت خطوط ارتباطی در حوضه قهرمانلو را نشان داده است.

زمین شناسی

استحکام و مقاومت خاک‌ها و سنگ‌ها و متفاوت بودن در نفوذپذیری آب در ارتباط با عامل زمین‌شناسی منطقه می‌باشد. همچنین میزان نمک و املاح موجود در کانی‌ها، بافت متفاوت مواد سطحی، نقش سنگ‌شناسی را بر وقوع زمین‌لغزش‌ها، نمایان می‌سازد (سوچلمایی، ۱۳۹۳). در شکل ۸ نقشه سنگ‌شناسی منطقه بیان شده است.

بارش

با افزایش حجم آب موجود در بافت خاک به علت وقوع بارندگی، ناپایداری خاک در دامنه افزایش می‌یابد و با افزایش فشار استاتیکی آب بر درز و شکاف‌های دامنه، موجب ریزش دامنه‌های ناپایدار گردیده و منجر به وقوع زمین لغزش می‌شود، لذا از پارامترهای مهم در بررسی پهنه‌های زمین‌لغزش محسوب می‌باشد (سیفی، ۱۳۹۵، ۳۸). نقشه میانگین بارندگی سالیانه برگرفته از داده‌های هواشناسی استان خراسان شمالی استخراج گردیده و براساس مدل درونیابی IDW^۲ نقشه آن تهیه شده است، در شکل ۹ نقشه میانگین بارندگی سالیانه نشان داده شده است.

پوشش گیاهی و کاربری اراضی

گیاهان موجب تراکم خاک و استحکام دامنه‌ها می‌گردند و پوشش گیاهی رابطه‌ی معکوسی با زمین‌لغزش دارد، بنابراین دامنه‌های دارای پوشش گیاهی کم تراکم، از اهمیت بالایی در شناسایی پهنه‌های مستعد زمین لغزش می‌باشد که در این پژوهش از این عامل استفاده گردیده است. برای رسیدن به این هدف، از الگوریتم شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی^۳ استفاده گردید (هارپ^۴ و همکاران، ۱۹۹۵ و گوپتا^۵، ۲۰۰۳). در اشکال ۱۰ و ۱۱ شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی و کاربری اراضی بدست آمده از سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ برای سال ۱۳۹۹ حوضه قهرمانلو نشان داده شده است.

شاخص توپوگرافی

تأثیر شکل شیب بر روی فرایند تخریب خاک، حرکات توده‌ای، همگرایی یا واگرایی آب‌ها در طی جاری شدن از دامنه‌ها می‌باشد (کن^۶ و همکاران ۲۰۰۵) همچنین در محل وقوع زمین‌لغزش این فاکتور مهمترین عامل کنترل‌کننده حرکات توده‌ای سطحی است (لی و سمبات^۷، ۲۰۰۶). شکل ۱۲ موقعیت توپوگرافی حوضه قهرمانلو را به صورت دامنه‌های مقعر، محدب و مسطح که از داده‌های مدل رقومی ارتفاعی زمین منطقه بدست آمده است، نشان می‌دهد.

1 - Open Street Map

2 - Inverse distance weighting

3 - NDVI

4 - Harp

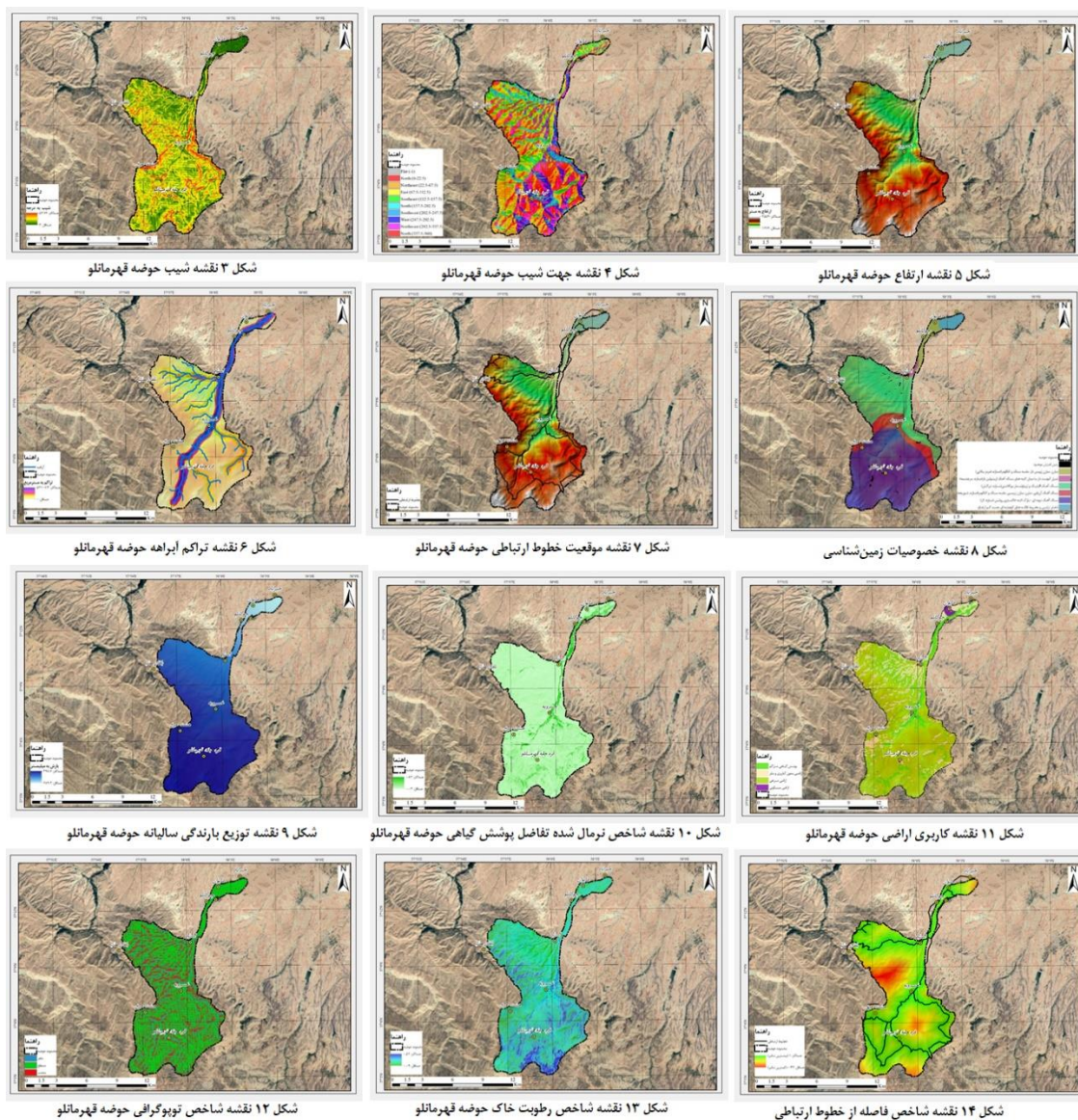
5 - Gupta

6 - Can, J.E

7 - Lee, S., Sambath, T

شاخص رطوبت توپوگرافی

اهمیت رطوبت خاک در میزان جذب آب و پتانسیل نگهداری آب اضافی در خاک، در ارتباط است. از آنجایی که با افزایش رطوبت خاک اشباع آن بعد از هر بارندگی و آب سطحی، احتمال لغزش و حرکات توده‌ای خاک به سمت پایین دامنه زیاد می‌باشد، لذا این عامل، یکی از عوامل مهم در بررسی وضعیت زمین لغزش به حساب می‌آید (شهبازی، ۲۰۱۵). در این تحقیق، با استفاده از شاخص 1TWI از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI شاخص رطوبت حوضه قهرمانلو محاسبه گردید و در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



مدل رگرسیون لجستیک جهت تشخیص پهنه‌های مستعد زمین لغزش در حوضه قهرمانلو

در این روش متغیر وابسته حتماً یک متغیر کیفی دو حالتی بوده که تعیین احتمال وقوع هر یک از سطوح متغیر کیفی دو حالتی بر اساس متغیرهای مستقل می‌باشد (کالدول^۲ و همکاران، ۱۹۹۹). معادله احتمال وقوع زمین لغزش جهت

¹ - Topographic Wetness Index

² - Caldwell

تشخیص پهنه‌های مستعد زمین لغزش منطقه مورد مطالعه بر اساس رابطه زیر، فرموله شده و نقشه نهایی پهنه‌بندی زمین لغزش حوضه قهرمانلو براساس معادله ۱ تعیین گردید.

معادله (۱)

$$p(y = 1|X) = \frac{\exp(\sum BX)}{1 + \exp(\sum BX)}$$

که فرمول فوق:

p احتمال وقوع زمین لغزش می‌باشد،

X متغیرهای مستقل را تشکیل می‌دهد و B پارامترهای برآورد شده می‌باشند (معادله ۲ و ۳).

معادله (۲)

$$X = (x_0, x_1, x_2 \dots x_k), x_0 = 1$$

معادله (۳)

$$B = (b_0, b_1, b_2 \dots b_k)$$

برای خطی کردن معادله فوق، از رابطه ۴ استفاده می‌شود.

معادله (۴)

$$p^i = \ln \left(\frac{P}{1-P} \right)$$

منطق فازی

به منظور تعیین نحوه تاثیرگذاری هر یک از پارامترها و معیارهای موثر در زمین لغزش، از تئوری فازی (رگمی)^۱ (۲۰۱۰) استفاده شده است. در این تئوری مقادیر در دامنه بین صفر و یک قرار دارند. تئوری فازی براساس معادله ۵ تعریف می‌گردد که عضویت (تمامی اعضای آن) برخلاف منطق‌های دوگانه و سه گانه کاملاً سریع و روشن نیست و عناصر آن به طور نسبی به مجموعه‌ای متعلق هستند که بین صفر و یک قرار دارد (پورطاهری، ۱۳۸۹).

معادله (۵)

$$A = \left\{ \frac{M_A(x_1)}{n}, \frac{M_A(x_2)}{n}, \frac{M_A(x_3)}{n}, \dots \dots \dots \frac{M_A(x_n)}{n} \right\}$$

روش درونیابی معکوس فاصله وزندار^۲

روش درونیابی IDW یکی از روش‌های درونیابی می‌باشد که هدف از آن تعیین میزان یک بارش یا هر پارامتر دیگر در مناطقی است که در آنجا عمل نمونه‌برداری صورت نگرفته است. این روش درونیابی با توجه به نقاط همسایه و با میانگین‌گیری از نقاط نمونه که در همسایگی هر نقطه مجهول قرار دارند انجام داده می‌شود. در این روش فرض بر آن است که تأثیر پدیده مورد نظر با افزایش مسافت کاهش می‌یابد به بیانی دیگر پدیده پیوسته در نقاط اندازه‌گیری نشده، بیشترین شباهت را به نزدیکترین نقاط برداشت شده دارد، لذا برای تخمین نقاط مجهول، نمونه‌های اطراف باید مشارکت بیشتری نسبت به آنهایی که در فاصله دورتر قرار دارند، داشته باشند. در این مدل از فاصله به عنوان وزن متغیر معلوم در پیش‌بینی نقاط اندازه‌گیری نشده استفاده می‌شود زیرا نقش متغیر پیوسته در تأثیرگذاری با فاصله از مکان نقطه مجهول کاهش می‌یابد. بنابراین هر چه فاصله داده معلوم از نقطه مجهول افزایش یابد، لازم است وزن‌ها براساس فاصله کاهش یابد، بنابراین فاصله‌ها معکوس می‌شود.

¹ - Regmi

² - Inverse distance weighting

شاخص رطوبت توپوگرافی

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) یک مدل مفید برای تخمین محل تجمع آب در منطقه‌ای با اختلاف ارتفاع است. تابعی از شیب و پوشش گیاهی منطقه می‌باشد و با استفاده از باند سبز و مادون قرمز تصاویر سنجش از دور که حاوی اطلاعات پوشش گیاهی است، محاسبه می‌گردد (کوپسکی و همکاران^۱، ۲۰۲۱).

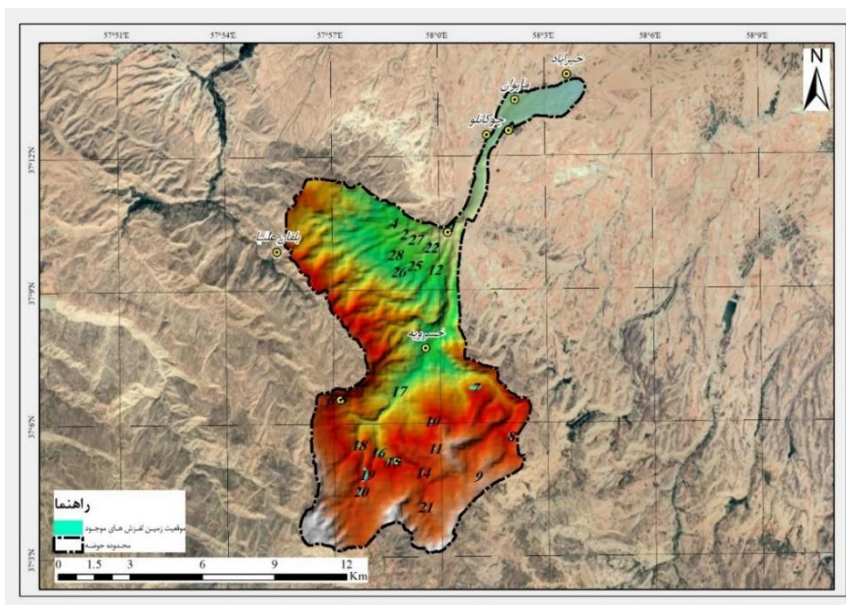
بحث و یافته‌ها

موقعیت پراکنش زمین لغزش‌های حوضه قهرمانلو

در این پژوهش ۲۸ دامنه‌ای که در آن زمین لغزش به وقوع پیوسته است، پس از بررسی‌های میدانی و تفاسیر بصری تصاویر ماهواره‌ای شناسایی گردید (شکل ۱۵). موقعیت زمین لغزش‌ها در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۵: نمونه‌ای از زمین لغزش منطقه مورد مطالعه در روستای تیتکانلو حوضه قهرمانلو، (مجرد و همکاران، ۱۳۹۸)



شکل ۱۶: موقعیت زمین لغزش‌های رخ داده شده در منطقه

آماده‌سازی متغیرهای مستقل برای ورود به مدل رگرسیون لجستیک

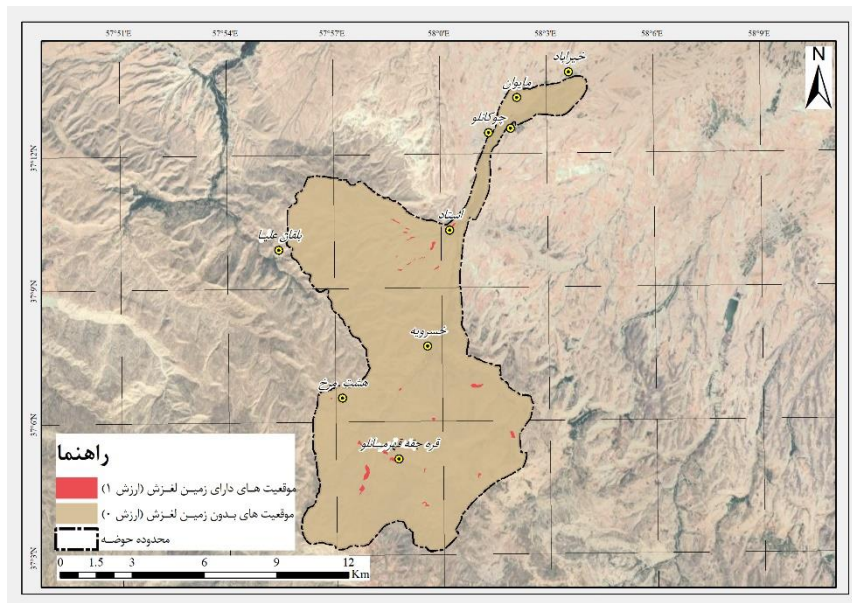
در این پژوهش از ۱۲ متغیر مستقل بدست آمده استفاده شده است (اشکال ۲ تا ۱۲). این متغیرها پس از آماده‌سازی با استفاده از مدل منطق فازی توابع نرمال‌سازی خطی (مستقیم و معکوس)، (نورم و گوسین بین صفر و یک) براساس جدول ۳، وارد مدل رگرسیون لجستیک شدند.

جدول ۱: فرآیند و روش‌های آماده‌سازی متغیرهای مستقل

نام متغیر	روش نرمال‌سازی	تابع نرمال‌سازی	فرآیند تهیه	رفرنس متغیرها
تراکم رودخانه	بیشترین تراکم، مناسب‌ترین موقعیت برای وقوع زمین لغزش	خطی معکوس	Deisity Tools	آبراهه‌های بدست آمده از DEM
ارتفاع	بیشترین ارتفاع، مناسب‌ترین موقعیت برای وقوع زمین لغزش	خطی مستقیم	-	DEM SRTM 30m
شاخص رطوبت	بیشترین رطوبت، مناسب‌ترین موقعیت برای وقوع زمین لغزش	خطی مستقیم	Wetness Index	سنجش از دور
زمین‌شناسی	سست‌ترین کانی، مناسب‌ترین موقعیت برای وقوع زمین لغزش	نورم	-	سازمان زمین‌شناسی
شاخص تراکم پوشش گیاهی	کمترین پوشش گیاهی و بیشتر اراضی لخت، مناسب‌ترین محل برای وقوع زمین لغزش	گوسین	NDVI	سنجش از دور
کاربری اراضی	مراعات و بیشتر اراضی بدون کاربری، مناسب‌ترین محل برای وقوع زمین لغزش	نورم	SVM Algorithm	سنجش از دور
فاصله از جاده	کمترین فاصله، مناسب‌ترین موقعیت برای وقوع زمین لغزش	خطی معکوس	Euclidean Distance	فایل خطوط ارتباطی OSM
فاصله از آبراهه	کمترین فاصله، مناسب‌ترین موقعیت برای وقوع زمین لغزش	خطی معکوس	Euclidean Distance	آبراهه‌های بدست آمده از DEM
شاخص توپوگرافی زمین	دامنه‌های مقعر و محدب مناسب‌ترین محل برای وقوع زمین لغزش	نورم	Curvature	DEM SRTM 30m
بارندگی	بیشترین بارندگی، مناسب‌ترین موقعیت برای وقوع زمین لغزش	خطی مستقیم	IDW Interpolation	سازمان هواشناسی استان
شیب	بیشترین شیب، مناسب‌ترین موقعیت برای وقوع زمین لغزش	خطی مستقیم	Slope Tools	DEM SRTM 30m
جهت شیب	دامنه‌های شرقی، مناسب‌ترین محل برای وقوع زمین لغزش	گوسین	Aspect Tools	DEM SRTM 30m

آماده‌سازی متغیر وابسته برای ورود به مدل رگرسیون لجستیک

موقعیت زمین لغزش‌های رخ داده شده در منطقه (شکل ۱۷) به عنوان متغیر وابسته، می‌باشد که به صورت صفر یا یک (بولین) آماده‌سازی گردیده است و وارد مدل رگرسیون لجستیک شد.



شکل ۱۷: نقشه متغیر وابسته "زمین لغزش های رخ داده شده در منطقه"

شناسایی پهنه های دارای پتانسیل زمین لغزش در حوضه قهرمانلو

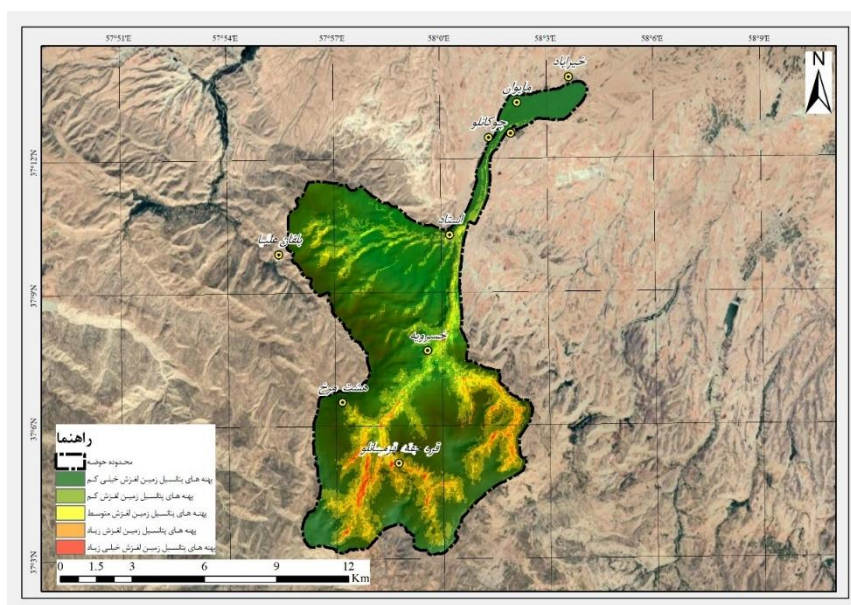
پس از معرفی متغیرهای مستقل و وابسته به مدل رگرسیون لجستیک، ۷۰ درصد از پیکسل های دارای زمین لغزش (در ۲۸ موقعیت شناسایی شده) به عنوان نمونه آموزشی به مدل معرفی گردید و ۳۰ درصد از آن به عنوان بررسی دقت مدل در شاخص Pseudo R2 و ROC مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از شناسایی پهنه های دارای پتانسیل زمین لغزش که با استفاده از تابع Natural Breaks و با در نظر گرفتن واریانس و پراکندگی یکسان داده در هر طبقه بدست آمده است، در شکل ۱۸ نشان داده شده است. این نتایج، نشان می دهد که موثرترین عامل وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه، به ترتیب، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، بارندگی و فاصله از جاده می باشد. با این توضیحات که دامنه هایی که به متغیرهای فوق نزدیک تر هستند پتانسیل بیشتری برای وقوع زمین لغزش دارند. این نتایج نشان می دهد که آبراهه ها اثر منفی بر وقوع زمین لغزش دارند و با فاصله از آنها تعداد زمین لغزش ها کاهش می یابد. همچنین هراندازه که از خطوط ارتباطی فاصله بیشتری داشته باشند زمین لغزش ها کمتر می شوند. همچنین در متغیر کاربری اراضی (باتوجه به نحوه نرمال سازی آن) اراضی بایر اثر کمتری نسبت به اراضی مرتعی دارد و همچنین افزایش باندگی تأثیر مثبتی در وقوع زمین لغزش این حوضه دارد به نحوی که با افزایش میزان بارندگی، وقوع زمین لغزش نیز بیشتر می گردد (جدول ۲ و معادله ۶).

معادله (۶)

$$\text{Precipitation Aspect} + 5.571780 * \text{logit (Current Landslide)} = 69.5116 + 0.929826 \\ \text{Curvature} + 1.893931 * \text{DEM} + 2.749771 * \text{Density of River} - + 0.561675 * \\ 10.606257 * \text{Distance of River} + 4.057233 * \text{Distance of Road} - 0.058821 * \text{NDVI} - \\ 1.772682 * \text{Slope} - 2.047500 * \text{Wetness} - 1.035859 * \text{Lithology} - 5.98484 * \text{Land use}$$

جدول ۲: متغیرهای مستقل موثر در زمین لغزش‌های حوضه قهرمانلو و ضرایب آن ه

رتبه بندی	ضرایب	متغیرهای مستقل
-	۶۹.۵۱۱۶۴۷۲۸	عرض از مبدا
۱۰	-۰.۹۳۹۸۲۶۰۵	جهت شیب
۳	۵.۵۷۱۷۸۰۲۴	بارندگی
۱۱	-۰.۵۶۱۶۴۳۷۷	شاخص توپوگرافی زمین
۷	۱.۸۹۳۳۰۹۵۳	ارتفاع
۵	۲.۲۴۹۷۷۰۹۵	تراکم رودخانه
۴	۴.۰۵۷۳۳۲۷۴	فاصله از جاده
۱	-۱.۰۶۰۶۲۵۷۳۶	فاصله از آبراهه
۱۲	-۰.۰۵۸۸۲۰۲۳	شاخص تراکم پوشش گیاهی
۸	-۱.۷۷۲۶۸۱۳۳	شیب
۶	-۲.۰۴۷۵۰۴۳	شاخص رطوبت
۹	-۱.۰۳۵۸۹۴۵	زمین شناسی
۲	-۵.۹۸۴۸۴۵۸	کاربری اراضی



شکل ۱۸: نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه قهرمانلو

ارزیابی دقت مدل مورد استفاده

برای بررسی دقت مدل رگرسیون از پارامترهای Pseudo R2 و ROC استفاده شده است که در پارامتر Pseudo R2 مقدار یک نشان دهنده برازش کامل مدل و مقدار صفر عدم وجود رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته می باشد و در مطالعات و پژوهش‌های علوم مکانی، مقدار بیش از ۰,۲ حاکی از برازش نسبی مطلوب است (چن^۱، ۲۰۱۳). همچنین ROC که نیز یکی دیگر از آماره‌های برازش رگرسیونی است با مقدار ۱ نشان دهنده برازش کامل و مقدار ۰,۵ نشان دهنده یک برازش تصادفی است. در این تحقیق مقدار Pseudo R2 برابر با ۰,۲۳۱۱ و ROC برابر با ۰,۹۱۳۴ نشان از برازش خوب رگرسیون لجستیک و قابلیت تشریحی مناسب آن دارد.

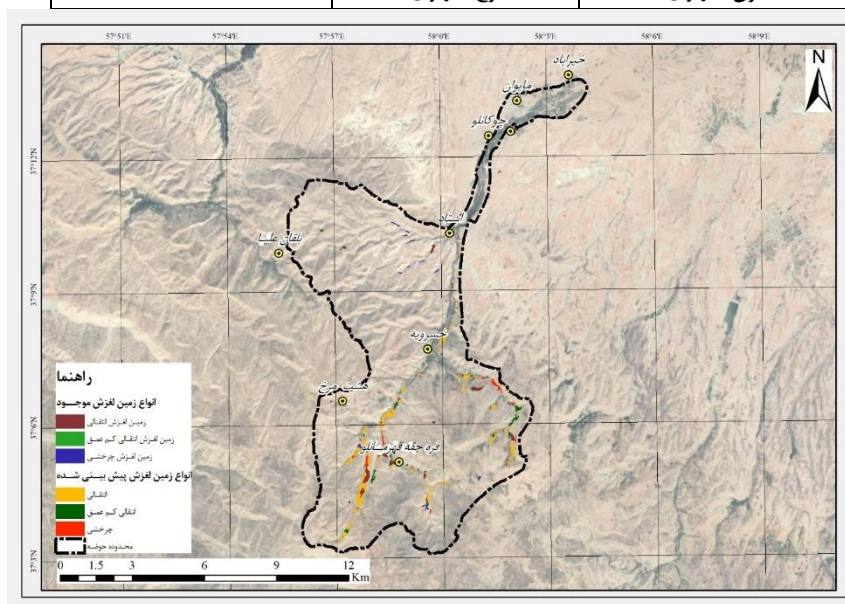
^۱ - Chen

طبقه بندی انواع زمین لغزش در حوضه قهرمانلو

پس از شناسایی دامنه‌هایی که زمین لغزش در آن‌ها رخ داده است و همچنین دامنه‌هایی که براساس مدل رگرسیون لجستیک، دارای پتانسیل زمین لغزش تشخیص داده شدند بر اساس مدل طبقه بندی انواع زمین لغزش که توسط کرودن و وارنز^۱، معرفی گردیده است (با استفاده از پارامترهای شیب، نوع کاربری زمین و شاخص توپوگرافی زمین)، انواع زمین لغزش ها در منطقه براساس جدول ۳ طبقه بندی شدند. بر همین اساس زمین لغزش های پیش بینی شده و موجود در حوضه قهرمانلو به انواع چرخشی (۱۵ مورد موجود و ۳۱۰ مورد پیش بینی شده)، انتقالی (۱۱ مورد موجود و ۸۴ مورد پیش بینی شده) و انتقالی کم عمق (۲ مورد موجود و ۹۶ مورد پیش بینی شده) طبقه بندی شدند. نتایج حاصل از طبقه بندی انواع زمین لغزش به تفکیک زمین لغزش های موجود و پیش بینی شده حوضه قهرمانلو در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

جدول ۳: شرایط و پارامترهای طبقه بندی انواع زمین لغزش

نوع زمین لغزش	متغیر	شرایط
انتقالی	شیب	بیشتر از ۲۸ درجه
	انحنای زمین	مقعر
	نوع کاربری	بدون کاربری
چرخشی	شیب	کمتر از ۲۸ درجه
	انحنای زمین	مسطح
	نوع کاربری	پوشش گیاهی مرتعی
انتقالی کم عمق	انحنای زمین	محدب
	شیب	بیشتر از ۲۸ درجه
	نوع کاربری	بدون کاربری



شکل ۱۹: انواع زمین لغزش های حوضه قهرمانلو (به تفکیک رخ داده شده و پیش بینی شده)

¹ - Cruden, D.M., Varnes, D.J

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی زمین لغزش‌های حوضه قهرمانلو با ۱۲ معیار مورد استفاده (شامل: شیب، جهت شیب، ارتفاع، تراکم شبکه آبراهه، فاصله از شبکه آبراهه، خطوط ارتباطی، زمین‌شناسی، شاخص رطوبت، بارش، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و شاخص توپوگرافی زمین)، به شرح ذیل می‌باشد (جداول ۴ و ۵ و ۶):

در حوضه قهرمانلو شیب بین صفر تا ۸۹ درجه می‌باشد، ۳ مورد از زمین لغزش‌های موجود در کمتر از ۱۵ درجه رخ داده است که ۱۰۷ درصد از کل زمین لغزش‌های موجود را شامل می‌شود و ۲۵ مورد از زمین لغزش‌ها بین ۱۵ تا ۵۰ درجه به وقوع پیوسته است و در شیب‌های بیشتر از ۵۰ درجه، به علت وجود صخره و عدم وجود تراکم خاک بر روی دامنه‌ها، زمین لغزشی رخ نداده است، همچنین تعداد ۳ مورد از زمین لغزش‌های موجود به وقوع پیوسته (۱۰،۷۱ درصد) در دامنه‌هایی با جهت شمال شرقی رخ داده است و در دامنه‌های جنوب شرقی و شرقی تعداد ۱۰ (۳۵،۷۱ درصد) زمین لغزش وجود دارد. در دامنه جنوبی با ۴ زمین لغزش (۱۴،۲۹ درصد)، کمترین تعداد زمین لغزش‌ها رخ داده است. با توجه به وضعیت اقلیمی منطقه و وجود رطوبت در دامنه‌های شمالی و شمال شرقی و شرقی (نسبت به دامنه‌های غربی)، بیشترین تعداد زمین لغزش‌ها در این دامنه‌ها رخ داده است. تعداد ۵ مورد از زمین لغزش‌های به وقوع پیوسته، در محلی که تراکم آبراهه به میزان ۳۰۰۰ متر در کیلومتر مربع (۱۷،۸۶ درصد)، ۱۰ مورد در تراکم‌های بین ۳۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ متر در کیلومتر مربع (۳۵،۷۱ درصد)، ۴ مورد در تراکم‌های بین ۹۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ متر در کیلومتر مربع (۱۴،۲۹) و ۹ مورد دیگر از زمین لغزش‌ها (۳۲،۱۴ درصد) در تراکم‌های بیشتر از ۱۸۰۰۰ متر در کیلومتر مربع رخ داده است. نتیجه بررسی وضعیت زمین لغزش‌های موجود در ارتباط با تراکم رودخانه، نشان می‌دهد هر اندازه که تراکم شبکه آبراهه بیشتر باشد، میزان تعداد زمین لغزش‌ها افزایش می‌یابد، که نشان از ارتباط و همبستگی مستقیم بین تعداد زمین لغزش‌ها و افزایش شبکه آبراهه دارد. حوضه قهرمانلو براساس یافته‌های DEM SRTM 30 متری، بین دامنه ارتفاعی ۱۲۷۹ تا ۲۵۵۶ متری قرار گرفته است و تا ارتفاع ۱۴۸۰ متری، زمین لغزشی وجود ندارد و از ارتفاع ۱۴۸۰ تا ۲۰۰۰ متری میزان ۱۹ زمین لغزش (۶۷،۸۶ درصد) رخ داده است و ۹ زمین لغزش دیگر تا ارتفاع ۲۲۵۰ متری رخ داده است. بررسی وضعیت ارتفاعی منطقه و زمین لغزش‌های موجود بیانگر این است که تمامی زمین لغزش‌ها در ارتفاعات بالا رخ داده است و با افزایش ارتفاع در این حوضه، تعداد زمین لغزش‌ها کاهش یافته است. میانگین بارندگی سالانه حوضه قهرمانلو برگرفته از داده‌های سازمان هواشناسی خراسانی شمالی، بین ۱۸۵/۶ تا ۴۱۵/۹ میلی‌متر می‌باشد و زمین لغزش‌های موجود در دامنه بارندگی بین ۳۴۶ تا ۳۹۵ میلی‌متر رخ داده‌اند بنابراین بررسی‌ها نشان می‌دهد که تمامی زمین لغزش‌ها در بخش‌هایی با بارندگی زیاد رخ داده است و بارندگی عامل مهمی در وقوع آن در این منطقه محسوب می‌شود به طوری که ۱۵ مورد از آن‌ها در بخش‌هایی با بارش بیشتر از ۳۸۰ میلی‌متر رخ داده‌اند، همچنین نتیجه بررسی شاخص رطوبت نشان می‌دهد که این شاخص در حوضه قهرمانلو بین ۰/۲۶ تا ۰/۴۱ درصد می‌باشد. میزان ۵ زمین لغزش‌های موجود در دامنه رطوبتی بین ۰/۲۶ تا ۰/۳ درصد رخ داده است و ۲۳ مورد (۸۲،۱۴ درصد) مابقی دامنه‌های شاخص رطوبتی اتفاق افتاده است. از این مقدار زمین لغزش رخ داده شده، ۱۷ مورد در دامنه‌های شمال شرقی و شرق و جنوب شرقی می‌باشد که دارای میزان شاخص رطوبتی بیشتر از ۰/۳۲ درصد می‌باشد. بنابراین بین میزان زمین لغزش و شاخص رطوبتی ارتباط معنادار و مستقیم وجود دارد که با افزایش رطوبت، تعداد زمین لغزش‌های به وقوع پیوسته نیز افزایش می‌یابد.

تعداد ۴ مورد از زمین لغزش‌های موجود در سازندهای دارای ذخایر تراسی و مخروط افکنه‌های کوهپایه‌ای جدید کم ارتفاع رخ داده است، تعداد ۱۱ مورد در سازند شوربچه که دارای سنگ آهک آرژیلی، مارن، مارن ژیبسی، ماسه سنگ و کنگلومرا است و همچنین تعداد ۱۳ مورد (۳۹،۲۹ درصد) از زمین لغزش‌ها در محدوده‌هایی با سازند قرمز بالایی با مارن، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا اتفاق افتاده است. بررسی زمین لغزش‌های موجود در ارتباط با لیتولوژی منطقه نشان می‌دهد که ماسه سنگ، کنگلومرا، ژیبس و مارن دارای بیشترین پتانسیل در وقوع زمین لغزش می‌باشند.

ارتباط بین کاربری اراضی و زمین لغزش های منطقه نشان می دهد که در کلاس کاربری مراتع و پوشش گیاهی ضعیف ۱۷ مورد (۶۰,۷۱ درصد) و در کلاس کاربری بایر ۱۱ مورد زمین لغزش رخ داده است. این میزان را شاخص پوشش گیاهی نرمال شده نیز تأیید می کند، با توجه به تعدد زمین لغزش ها و رطوبت در دامنه های شرقی و رشد پوشش گیاهی هر چند ضعیف، باعث شده است میزان رخداد زمین لغزش بیشتر شود.

پس از بررسی میانگین فاصله هر یک از زمین لغزش های موجود منطقه با خطوط ارتباطی، نتایج نشان می دهد که زمین لغزش ها در فاصله ۵۵۰ متری از خطوط ارتباطی به وقوع پیوسته اند که از این میزان ۲۷ زمین لغزش در فاصله ۵۰۰ متری جاده ها رخ داده است. در ارتباط با شاخص توپوگرافی که با شکل زمین در ارتباط است، بررسی های میدانی و تحلیل ها در نرم افزار GIS نشان می دهد که ۱۹ مورد (۶۷,۸۶ درصد) از ۲۸ مورد زمین لغزش های موجود در منطقه در دامنه های محدب رخ داده اند و تنها سه مورد از این زمین لغزش ها در بخش مسطح و کم شیب اتفاق افتاده است و مابقی آن یعنی تعداد ۶ مورد از آن ها در دامنه های مقعر به وقوع پیوسته اند.

جدول ۴: وضعیت زمین لغزش های موجود با پارامترهای مورد مطالعه

شماره زمین لغزش	جهت شیب	شیب	بارندگی	شاخص توپوگرافی زمین	فاصله از رودخانه	فاصله از جاده	کاربری اراضی	شاخص تراکم پوشش گیاهی
۱	Southeast	۴۶.۳۴	۳۴۶.۲۷	مقعر	۱۵۴.۶۵	۵۴.۹۵	اراضی بدون کاربری	۰.۱۸
۲	Southeast	۴۸.۱۵	۳۵۴.۴۴	مقعر	۲۷.۱۵	۲۰۵.۱۰	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۱۶
۳	Northeast	۴۴.۵۱	۳۵۲.۳۳	محدب	۳۰.۲۵	۳۸.۵۷	اراضی بدون کاربری	۰.۱۶
۴	Southeast	۱۱.۷۹	۳۵۲.۷۲	مقعر	۲۸.۹۲	۱۷۶.۷۷	اراضی بدون کاربری	۰.۱۶
۵	South	۴۰.۵۵	۳۸۷.۲۰	مقعر	۴۳.۲۸	۳۹۹.۳۷	اراضی بدون کاربری	۰.۱۶
۶	Southeast	۳۶.۶۱	۳۸۷.۷۴	مقعر	۸۵.۲۷	۴۲۲.۵۳	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۲۵
۷	Northwest	۴۳.۹۳	۳۷۸.۹۷	محدب	۴۶۷.۲۱	۴۲۳.۴۴	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۲۵
۸	West	۳۸.۷۲	۳۸۴.۰۳	مسطح	۱۲۹.۰۰	۴۴۰.۵۸	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۱۹
۹	South	۱۸.۵۹	۳۹۰.۲۵	مسطح	۵۰۷.۸۵	۲۷.۹۸	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۲۲
۱۰	West	۴۱.۰۵	۳۸۵.۸۹	مقعر	۵۶۱.۱۰	۱۷۱.۱۲	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۲۷
۱۱	West	۴۴.۸۷	۳۸۸.۹۷	مقعر	۸۶.۷۹	۱۵۵.۶۱	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۲۱
۱۲	West	۱۹.۱۲	۳۵۹.۵۹	مقعر	۳۲.۷۵	۱۶۸.۶۶	اراضی بدون کاربری	۰.۱۹
۱۳	West	۲۱.۵۷	۳۹۱.۶۵	مقعر	۴۵.۴۰	۴۳۵.۷۰	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۲۳
۱۴	South	۲۱.۱۴	۳۹۱.۹۳	مقعر	۱۵۹.۶۶	۳۳۹.۰۴	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۲۰
۱۵	South	۵۰.۰۷	۳۹۱.۸۶	مسطح	۸۹.۷۲	۷۰.۵۹	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۲۳
۱۶	Northeast	۳۶.۳۷	۳۹۱.۳۹	مقعر	۴۷.۸۸	۸۸.۵۱	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۲۴
۱۷	Northwest	۲۳.۷۰	۳۸۳.۷۶	مقعر	۳۵.۷۴	۱۸۹.۴۹	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۲۵
۱۸	Northeast	۲۷.۴۶	۳۹۱.۳۵	مقعر	۳۷.۶۶	۲۵۷.۸۰	اراضی بدون کاربری	۰.۲۲
۱۹	Northwest	۳۳.۹۷	۳۹۳.۷۱	محدب	۹۱.۲۰	۱۰۲.۹۲	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۲۲
۲۰	Northwest	۳۹.۵۵	۳۹۵.۰۵	مقعر	۱۰۸.۹۳	۹۱.۱۵	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۲۴
۲۱	Southeast	۱۶.۸۲	۳۹۴.۶۰	مقعر	۵۰.۷۱	۵۴۲.۰۱	اراضی بدون کاربری	۰.۱۷
۲۲	West	۳۰.۸۲	۳۵۴.۷۸	محدب	۶۲.۷۸	۴۲۶.۴۳	اراضی بدون کاربری	۰.۱۶
۲۳	Southeast	۹.۶۶	۳۶۰.۲۱	محدب	۳۸.۰۱	۱۳۹.۸۲	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۱۹
۲۴	Southeast	۱۳.۰۷	۳۵۸.۸۷	مقعر	۲۸.۷۰	۱۰۱.۱۹	اراضی بدون کاربری	۰.۱۸
۲۵	Southeast	۴۷.۹۰	۳۶۱.۷۶	مقعر	۱۶.۷۰	۱۷۹.۱۲	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۱۷
۲۶	East	۴۷.۱۹	۳۶۳.۹۲	مقعر	۱۲۳.۲۸	۱۲۶.۰۷	مراتع و پوشش گیاهی ضعیف	۰.۱۹
۲۷	East	۴۷.۹۲	۳۵۵.۳۳	مقعر	۱۰.۷۲	۳۹۵.۳۷	اراضی بدون کاربری	۰.۱۷
۲۸	North	۴۴.۰۸	۳۶۱.۴۴	محدب	۴۵.۵۰	۱۱۷.۶۸	اراضی بدون کاربری	۰.۱۵

جدول ۵: وضعیت زمین لغزش‌های موجود با پارامترهای مورد مطالعه

شماره زمین لغزش	زمین شناسی	شاخص رطوبت	ارتفاع	تراکم رودخانه	مساحت به هکتار
۱	ذخایر تراسی و مخروط افکنه های کوهپایه ای جدید کم ارتفاع	۰.۴۱	۱۴۸۰.۵۶	۳۹۹۹۱.۲۸	۱.۳۷
۲	ذخایر تراسی و مخروط افکنه های کوهپایه ای جدید کم ارتفاع	۰.۳۵	۱۵۴۳.۸۰	۲۰۷۸۲.۱۶	۰.۸۵
۳	ذخایر تراسی و مخروط افکنه های کوهپایه ای جدید کم ارتفاع	۰.۳۶	۱۵۵۳.۵۵	۱۸۷۹۲.۳۳	۰.۷۲
۴	ذخایر تراسی و مخروط افکنه های کوهپایه ای جدید کم ارتفاع	۰.۳۷	۱۵۷۴.۰۵	۱۳۵۷۵.۷۲	۱.۴۵
۵	مارن، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند قرمز بالایی)	۰.۳۶	۱۹۴۰.۸۸	۵۵.۳۱	۱.۱۸
۶	سنگ آهک آرژیلی، مارن، مارن ژیبسی، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند شوربچه)	۰.۳۵	۲۰۵۳.۴۰	۲۵۴۵۶.۲۷	۰.۳۴
۷	سنگ آهک آرژیلی، مارن، مارن ژیبسی، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند شوربچه)	۰.۲۹	۱۹۳۳.۲۵	۱۵۸۸۱	۶.۰۳
۸	سنگ آهک آرژیلی، مارن، مارن ژیبسی، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند شوربچه)	۰.۳۱	۲۰۵۷.۸۵	۳۱۶۹.۸۴	۳.۷۹
۹	مارن، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند قرمز بالایی)	۰.۳۳	۲۲۴۷.۰۹	۳۵۶۵۵.۳۳	۱.۳۴
۱۰	مارن، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند قرمز بالایی)	۰.۳۴	۱۹۸۰.۰۷	۱۲۵۴۳.۳۶	۱.۱۱
۱۱	مارن، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند قرمز بالایی)	۰.۳۰	۲۱۲۹.۱۰	۲۵۴۵۶.۲۴	۰.۷۹
۱۲	سنگ آهک آرژیلی، مارن، مارن ژیبسی، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند شوربچه)	۰.۳۶	۱۵۶۰.۰۰	۹۳۶۹.۲۵	۱.۰۵
۱۳	مارن، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند قرمز بالایی)	۰.۲۸	۲۰۲۵.۱۷	۹۱۱۷.۶۸	۰.۳۷
۱۴	مارن، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند قرمز بالایی)	۰.۲۷	۲۰۲۱.۲۵	۹۹۱۲.۷۵	۰.۴۴
۱۵	مارن، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند قرمز بالایی)	۰.۳۰	۱۹۵۱.۴۱	۹۹۳۵.۷۶	۴.۷۰
۱۶	مارن، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند قرمز بالایی)	۰.۳۱	۱۸۵۷.۹۳	۱۱۰۷۴.۶۲	۴.۴۵
۱۷	مارن، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند قرمز بالایی)	۰.۳۱	۱۶۸۲.۱۰	۴۱۳۳.۵۰	۰.۸۲
۱۸	مارن، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند قرمز بالایی)	۰.۳۳	۱۸۵۴.۰۰	۳۹۷۲۱.۵۲	۲.۵۳
۱۹	مارن، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند قرمز بالایی)	۰.۲۸	۲۰۱۲.۲۳	۳۸۴۴۵.۷۹	۹.۲۱
۲۰	مارن، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند قرمز بالایی)	۰.۲۸	۲۱۱۲.۵۳	۳۹۱۸۳.۱۷	۴.۲۷
۲۱	مارن، مارن ژیبس دار، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند قرمز بالایی)	۰.۳۵	۳۱۱۶.۳۵	۹۶۰۴.۳۹	۲.۰۶
۲۲	سنگ آهک آرژیلی، مارن، مارن ژیبسی، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند شوربچه)	۰.۳۶	۱۵۴۳.۱۳	۵۶۰۳.۰۸	۳.۵۸
۲۳	سنگ آهک آرژیلی، مارن، مارن ژیبسی، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند شوربچه)	۰.۳۲	۱۵۸۶.۰۰	۴۶۰۸.۹۳	۰.۱۴
۲۴	سنگ آهک آرژیلی، مارن، مارن ژیبسی، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند شوربچه)	۰.۳۵	۱۵۵۱.۲۲	۴۲۷۸.۴۰	۰.۵۳
۲۵	سنگ آهک آرژیلی، مارن، مارن ژیبسی، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند شوربچه)	۰.۳۲	۱۶۰۱.۲۵	۳۸۱۱.۲۷	۰.۶۳
۲۶	سنگ آهک آرژیلی، مارن، مارن ژیبسی، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند شوربچه)	۰.۳۴	۱۶۲۱.۶۴	۱۵۹۸.۸۴	۰.۶۸
۲۷	سنگ آهک آرژیلی، مارن، مارن ژیبسی، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند شوربچه)	۰.۳۱	۱۵۴۶.۴۲	۱۴۳۹۴.۱۲	۱.۳۹
۲۸	سنگ آهک آرژیلی، مارن، مارن ژیبسی، ماسه سنگ و کنگلومرا(سازند شوربچه)	۰.۳۴	۱۶۰۵.۵۰	۶۵۰۷.۵۷	۰.۱۷

جدول ۶: تعداد و درصد وقوع زمین لغزش های موجود در هر یک از طبقات

درصد وقوع	مساحت	تعداد زمین لغزش	فاصله از جاده	درصد وقوع	مساحت	تعداد زمین لغزش	تراکم رودخانه
۹۶.۴۳	۵۳.۹۰	۳۷	کمتر از ۵۰۰ متر	۷.۱۴	۷.۲۰	۳	کمتر از ۱۰۰۰ کیلومتر مربع
۳.۵۷	۲.۰۶	۱	بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر	۱۰.۷۱	۵.۱۰	۳	بین ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلومتر مربع
درصد وقوع	مساحت	تعداد زمین لغزش	شاخص توپوگرافی زمین	درصد وقوع	مساحت	تعداد زمین لغزش	تراکم رودخانه
۲۱.۴۳	۱۹.۸۴	۶	مقر	۲۵.۰۰	۱۳.۲۴	۷	بین ۶۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ کیلومتر مربع
۱۰.۷۱	۹.۸۳	۳	مسطح	۱۰.۷۱	۳.۹۵	۳	بین ۱۲۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ کیلومتر مربع
۶۷.۸۶	۲۶.۲۹	۱۹	محدب	۳.۵۷	۰.۷۲	۱	بین ۱۵۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ کیلومتر مربع
-	-	-	-	۳۲.۱۴	۲۱.۵۰	۹	بیشتر از ۱۸۰۰۰ کیلومتر مربع
درصد وقوع	مساحت	تعداد زمین لغزش	فاصله از رودخانه	درصد وقوع	مساحت	تعداد زمین لغزش	ارتفاع
۸۵.۷۱	۴۶.۳۱	۲۴	کمتر از ۳۰۰ متر	۳.۵۷	۱.۳۷	۱	کمتر از ۱۵۰۰ متر
۱۴.۲۹	۹.۶۵	۴	بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ متر	۴۲.۸۶	۱۲.۰۰	۱۲	بین ۱۵۰۰ تا ۱۸۰۰ متر
درصد وقوع	مساحت	تعداد زمین لغزش	بارش	درصد وقوع	مساحت	تعداد زمین لغزش	ارتفاع
۳.۵۷	۱.۳۷	۱	بین ۳۳۰ تا ۳۵۰ میلیمتر	۲۱.۴۳	۲۰.۰۰	۶	بین ۱۸۰۰ تا ۲۰۰۰ متر
۹۶.۴۳	۵۴.۵۹	۳۷	بیشتر از ۳۵۰ میلیمتر	۲۸.۵۷	۲۱.۲۵	۸	بین ۲۰۰۰ تا ۲۲۰۰ متر
درصد وقوع	مساحت	تعداد زمین لغزش	شیب	درصد وقوع	مساحت	تعداد زمین لغزش	شیب
۱۰.۷۱	۲.۱۲	۳	کمتر از ۱۵ درصد	۳.۵۷	۱.۳۴	۱	بیشتر از ۲۳۰۰
۲۵.۰۰	۴۵.۲۴	۷	بین ۱۵ تا ۳۰ درصد	۱۷.۸۶	۴۲.۸۴	۵	بین ۰.۲۶ تا ۰.۳۵
۶۴.۲۹	۸.۶۰	۱۸	بین ۳۰ تا ۶۰ درصد	۱۱.۷۵	۶۴.۲۹	۱۸	بین ۰.۳۵ تا ۰.۴
درصد وقوع	مساحت	تعداد زمین لغزش	جهت شیب	درصد وقوع	مساحت	تعداد زمین لغزش	شیب
۷.۱۴	۲.۰۷	۲	East	۱۷.۸۶	۱۷.۸۶	۵	بین ۰.۴ تا ۰.۴۵
۳.۵۷	۰.۱۷	۱	North	۴۳.۳۹	۴۳.۳۹	۴	زمین شناسی
۱۰.۷۱	۷.۶۹	۳	Northeast	۱۴.۲۹	۱۴.۲۹	۴	ذخایر تراسی و مخروط افکنه های کوهپایه ای جدید کم ارتفاع
۱۴.۲۹	۲۰.۳۲	۴	Northwest	۳۹.۲۹	۱۸.۳۲	۱۱	سنگ آهک آرزلی، مارن، مارن، مارن، ماسه سنگ و کنگلومرا (سازند شوربچه)
۱۴.۲۹	۷.۶۵	۴	South	۴۶.۴۳	۳۳.۲۵	۱۳	مارن، مارن، مارن، ماسه سنگ و کنگلومرا (سازند قرمز بالایی)
۲۸.۵۷	۷.۲۷	۸	Southeast	درصد وقوع	مساحت	تعداد زمین لغزش	تراکم پوشش گیاهی
۲۱.۴۳	۱۰.۶۹	۶	West	۱۰.۰۰۰	۵۵.۹۶	۲۸	بین ۰.۱ تا ۰.۵
				درصد وقوع	مساحت	تعداد زمین لغزش	کاربری اراضی
				۳۹.۲۹	۱۶.۰۲	۱۱	اراضی بدون کاربری
				۶۰.۷۱	۳۹.۹۴	۱۷	مراعات و پوشش گیاهی ضعیف

نتایج حاصل از بررسی دامنه های دارای پتانسیل زمین لغزش نشان می دهد که از مجموع مساحت ۱۰۲۴۱ هکتاری حوضه قهرمانلو، میزان ۳۱۰ هکتار یعنی ۳ درصد و ۲۱۶/۳ هکتار یعنی ۲/۱۱ درصد، به ترتیب دارای پتانسیل زمین لغزش خیلی زیاد و زیاد می باشد، و ۹۵۰،۵۰ هکتار از منطقه یعنی ۹،۲۸ درصد دارای پتانسیل زمین لغزش متوسط می باشد، از طرفی ۶۶،۵ درصد از حوضه به علت قرارگیری در ارتفاعات زیاد و شیب های تند و قرارگیری در موقعیت جهات غربی (غرب و شمال غربی و جنوب غربی)، دارای پتانسیل خیلی کم برای زمین لغزش می باشند (جدول ۷).

با توجه به خصوصیات ریخت شناسی و لیتولوژی منطقه مورد مطالعه، که دارای شیب های تند و سنگ های حساس به فرسایش شامل شیل و مارن می باشد، نفوذ آب بارندگی در این توده خاکی منجر به کاهش مقاومت برشی در نتیجه اشباع خاک می گردد که زمین لغزش را باعث می شود. بنابراین ایجاد عملیات آبخیزداری مناسب و تثبیت خاک، کمک شایانی به مدیریت این حرکت توده ای می گردد. همچنین به علت وجود سکونتگاه های روستایی با تراکم جمعیت بالا (سکونت ۸۳۰۰ نفر در این حوضه) که غالباً به کشاورزی و دامداری اشتغال دارند، با فعالیت های خود منجر به تغییر کاربری زمین از مراعات دارای قدرت تثبیت دامنه به باغات جهت انجام فعالیت های اقتصادی شده است. علاوه بر آن با چرای مفرط دام، منجر به افزایش فرسایش پذیری خاک شده است. جهت کاهش مخاطره زمین لغزش، نیازمند به مدیریت فعالیت های کشاورزی و دامداری منطقه می باشد.

جدول ۷: درصد و مساحت هر یک از طبقات پتانسیل زمین لغزش

طبقات پتانسیل زمین لغزش	درصد مساحت	مساحت به هکتار
پهنه های پتانسیل زمین لغزش خیلی کم	۶۶.۵۳	۶۸۱۳.۷۲
پهنه های پتانسیل زمین لغزش کم	۱۹.۰۵	۱۹۵۰.۴۸
پهنه های پتانسیل زمین لغزش متوسط	۹.۲۸	۹۵۰.۵۰
پهنه های پتانسیل زمین لغزش زیاد	۲.۱۱	۲۱۶.۳۱
پهنه های پتانسیل زمین لغزش خیلی زیاد	۳.۰۳	۳۱۰.۰۶

سیاسگزاری

این مقاله بخشی از پایان نامه کارشناسی ارشد با عنوان پهنه بندی انواع زمین لغزش و تهیه نقشه شدت خطر در حوضه قهرمانلو استان خراسان شمالی و تحت حمایت معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد با کد ۵۶۰۹۹ - ۳ می باشد. نگارندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد بخاطر حمایت‌های مالی قدردانی می‌کنند.

منابع

- اشرفی فیلی، ز.، روستایی، ش.، مختاری کشکی، د.، ۱۳۹۹، پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبریز طالقان با استفاده از شاخص آنتروپی شانون، جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۲۴، شماره ۷۱، صص ۱۵۰-۱۲۵.
- پورطاهری، م.، ۱۳۸۹، کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه در جغرافیا، انتشارات سمت.
- سوچلمایی، ف.، ۱۳۹۳، پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بی‌زین و منطق‌فازی (مطالعه موردی: بخش مرکزی حوزه آبخیز نکارود)، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده منابع طبیعی، پایان نامه کارشناسی ارشد.
- سیفی، س.، ۱۳۹۵، ارزیابی عوامل مؤثر در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک در محیط GIS (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز قوشقوان)، دانشگاه تبریز، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، پایان-نامه کارشناسی ارشد.
- کریمی، م.، نجفی، ا.، ۱۳۹۱، ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل ترکیبی *AHP-FUZZY* در راستای توسعه و امنیت شهری (مطالعه موردی: منطقه یک کلان‌شهر تهران). پژوهش‌های فرسایش محیطی، دوره ۲، صص: ۹۷-۹۵.
- کلارستاقی، ع.، گرابی، پ.، ۱۳۸۶، مدل سازی خطر وقوع زمین لغزش ها با استفاده از سیستم تصمیم‌گیری چند معیاره در حوضه آبخیز واستان-استان مازندران، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۸۷ (۴)، صص: ۴۹-۶۸.
- مدنی، ح.، شفیعی، س.، ۱۳۸۴، زمین‌شناسی عمومی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. چاپ بیست و دوم.
- مجرد، ز.، جمال‌آبادی، ج.، شفیعی، ن.، زنگنه‌اسدی، م.ع.، ۱۳۹۸، پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش‌های وزن دهی اطلاعاتی و تراکم سطح در حوضه آبخیز قوچان - شیروان، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال هفتم، شماره ۳.
- یانسری، ز.، حسین زاده، ر.، کاویان، ع.، پورقاسمی، ح.، ۱۳۹۷، مطالعه حساسیت به وقوع زمین‌لغزش درحوضه آبخیز چهاردانگه با تأکید بر مقایسه تطبیقی روش‌های ارزیابی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، گروه جغرافیا.

- Bradinoni, F., Slaymaker, O., Hassan, M.A., 2003. Landslide inventory in a rugged forested watershed: a comparison between air-photo and field survey data. *Geomorphology*, 54 (3-4), 179-196.
- Can, J.E., Chau, K. T., Chan, J.E., 2005. Regional bias of landslide data in generating susceptibility maps using logistic regression for Hong Kong Island. *Landslides*, 280-290.
- Chen H., Pontius Jr, R.G., 2013. Diagnostic tools to evaluate a spatial land change projection along a gradient of an explanatory variable. *Landscape Ecology*, 25 (9), 1319-1331.

- Caldwell, J., and Ram, Y. M., 1999. *Mathematical modelling: concepts and case studies*. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers., 173
- Cruden, D.M., 1991. *A simple definition of a landslide*. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.—Bull. l'Association Int. Géologie l'Ingénieur, 43, 27–29.
- Dai, F.C., Lee, C.F., 2002. *Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS Lantau Island, Hong Kong*. Geomorphology, 42, 213-238.
- Esposito, G.; Carabella C.; Paglia G.; Miccadei E. 2021. *Relationships between morphostructural/geological framework and landslide types: Historical landslides in the hilly piedmont area of Abruzzo Region (Central Italy)*, Land, 10, 287.
- Gupta, N., Stark, C.P., Hao-Tsu, C., Jiun-chuan., 2003. *Supply and removal of sediment in a landslide-dominated mountain belt: Central Rang, Taiwan*. Geology, 108.
- Harp, E.L., Jibson, R.L., 1995. *Inventory of Landslides Tiggered by the 1994 Northridge, California Earthquake*. U.S. Geological Survey Open File Report, 95- 213.
- Hong, H., Pourghasemi, H. R., & Pourtaghi, Z. S., 2016. *Landslide susceptibility assessment in Lianhua County (China): a comparison between a random forest data mining technique and bivariate and multivariate statistical models*. Geomorphology, 259, 105-118.
- Lee, S., Ryu, J. H., Kim, L. S., 2007, *Landslide susceptibility analysis and its verification using likelihood ratio, logistic regression, and artificial neural network models: case study of Youngin, Korea*, Landslide, 4:327-338.
- Lee, H., Choi, J., Oh, H., Lee, C., Lee, S., 2012. *Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS*. Engineering Geology, 124, 12-23.
- Wang, Q., Li, W., Wu, Y., Pei, Y., & Xie, P., 2016. *Application of statistical index and index of entropy methods to landslide susceptibility assessment in Gongliu (Xinjiang, China)*. Environmental Earth Sciences, 75(7), 599.
- Komac, M., 2006, *A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia*. Geological Survey of Lovenia, Geomorphology, 74, 17–28.
- Kopecký, M., Macek, M., Wild, J., 2021. *Topographic Wetness Index calculation guidelines, Institute of Botany of the Czech Academy of Sciences, Průhonice, Czech Republic based on measured soil moisture and plant species composition, Zámek 1, CZ-252 43*.
- Lee, S., Sambath, T., 2006. *Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models*. The journal of Environmental Geology, 50, 847-855.
- Miccadei, E.; Carabella, C.; Paglia, G., 2022, *Landslide Hazard and Environment Risk Assessment*, Land, 11, 428. <https://doi.org/10.3390/land11030428>
- Materazzi, M.; Bufalini, M.; Gentilucci, M.; Pambianchi, G.; Aringoli, D.; Farabollini, P., 2021, *Landslide hazard assessment in a monoclin setting (Central Italy): Numerical vs. geomorphological approach*. Land, 10, 624.
- Regmi, N. R et al., 2010. *Assessing susceptibility to landslides: Using models to understand observed changes in slopes*. Geomorphology, 122, pp.25–38.
- Turner, A.K. 2018. *Social and environmental impacts of landslides*. Innov. Infrastruct. Solut, 3, 70.
- Shahabi, H., Hashim, M., & Ahmad , B. B., 2015. *Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, and fuzzy logic*.
- Varnes, D.J., 1978. *Slope movement types and processes*. In *Landslides, Analysis and Control*; Schuster, R.L., Krizek, R.J., Eds.; National Academy of Sciences: Washington, DC, USA, Volume Special Re, pp. 11–33, ISBN 0360859X.

- *Yalcheen, A., 2011. "GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations," Catena, 72: pp. 1–12.*
- *Zhou, S.; Zhou, S.; Tan, X., 2020. Nationwide susceptibility mapping of landslides in Kenya using the fuzzy analytic hierarchy process model. Land, 9, 535.*