

ارزیابی ریسک زمین لغزش با رویکرد ژئومورفولوژی در حوضه کالپوش

مهديه غيور بلورفروشان - دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد.
سید رضا حسین زاده * - استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد.
غلامرضا لشکری پور - استاد زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد.
مسعود مینائی - دانشیار علوم اطلاعات جغرافیایی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد.
حکیمه مربی هروی - استادیار گروه آمار، دانشگاه بجنورد.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲ تأیید نهایی: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶

چکیده

زمین لغزش‌ها تأثیرات منفی زیادی بر زندگی اجتماعی و اقتصادی مردم جهان دارند. هر ساله در بسیاری از کشورهای جهان، زمین لغزش‌ها خسارات زیادی را به روستاها و شهرهای کوهستانی و سازه‌های انسانی مانند ساختمان‌ها، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و ... وارد می‌نمایند. در این پژوهش، ریسک زمین لغزش با رویکرد ژئومورفولوژی پیشنهادی در جهت کاهش آسیب پذیری عناصر در معرض خطر برای حوضه بحرانی کالپوش سمنان مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده تلفیقی از داده‌های عکس‌های هوایی قدیمی، تصاویر ماهواره‌ای و نقشه برداری میدانی، زمین لغزش‌های گذشته و حال و تغییرات مورفولوژیکی آنها در یک دوره زمانی ۵۴ ساله شناسایی شد و در نهایت نقشه موجودی زمین لغزش چندزمانه تهیه گردید. سپس ویژگی‌های مورفومتریک، نوع، سرعت، شدت، فراوانی، مناطق خطر، عناصر در معرض آسیب پذیری و ریسک زمین لغزش، شناسایی و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این روش نشان می‌دهد که ۱۰۹ زمین لغزش با زمان وقوع نسبی متفاوت (قبل از سال ۱۳۴۷ تا ۱۴۰۱) در حوضه کالپوش وجود دارد. قدیمی‌ترین آنها (قبل از سال ۱۳۴۷) دارای مساحت، عمق، حجم و شدت بیشتری بوده، بنابراین در صورت فعالیت مجدد خطر زیادی برای منطقه خواهند داشت. ۹ منطقه با ریسک لغزشی بالا به صورت متمرکز در جنوب و غرب حوضه کالپوش شناسایی گردید. روستای پرجمعیت حسین آباد نیز به طور کامل در پهنه ریسک لغزش بالا با شدت و فراوانی زیاد و احتمال آسیب پذیری ساختاری و عملکردی زیاد سازه‌ها (ساختمان‌ها و جاده) قرار دارد. بنابراین توسعه و ساخت و ساز مجدد روی این پهنه، با احتمال فعالیت مجدد آن در آینده، این منطقه را مخاطره آمیز می‌کند.

واژگان کلیدی: زمین لغزش، نقشه موجودی زمین لغزش، ریسک، کالپوش.

مقدمه

در چند دهه اخیر با توجه به افزایش بارش‌های شدید و فصلی، زمین لرزه، تغییرات سطح آب مخازن، فعالیت‌های انسانی و ... رخداد زمین‌لغزش‌ها و فعالیت مجدد لغزش‌های قدیمی در سطح جهان افزایش یافته است (سیدل و اوچیای^۱، ۲۰۰۶، هو^۲ و همکاران، ۲۰۲۱) این پدیده خسارت جانی و مالی زیادی بر روستاها و شهرها مانند روستای آبکارلبد کوه‌رنگ ایران (۱۳۷۷) با ۵۴ کشته، روستای فتلک البرز (۱۳۶۹) با ۱۳۰ کشته، ایالت بدخشان افغانستان (۱۳۹۳) با ۲۷۰۰ کشته، بیش از ۵۰۰۰ زمین‌لغزش در منطقه سه دره چین (TGR) (۲۰۰۳-۲۰۲۰) با تخریب نیروگاه و منازل شهری و ... به بار آورده است (شعاعی و همکاران، ۲۰۲۱، رجبی و همکاران، ۲۰۰۹، ساسسا^۳ و همکاران، ۲۰۱۵ و لو و هوانگ^۴، ۲۰۲۰).

اطلاعات سیستماتیک کاملی در مورد سن، نوع، فراوانی و توزیع لغزش‌های موجود در ایران وجود ندارد، فقدان این دانش، پیامدهای منفی را به ویژه در مناطق شهری و روستایی سبب خواهد شد. لذا تهیه نقشه موجودی زمین لغزش، ارزیابی ریسک لغزش برای مناطق با تمرکز بالای زمین لغزش و تراکم جمعیت، جهت پیش‌بینی و پیش‌گیری از خطر در آینده حائز اهمیت می‌باشد.

تهیه نقشه موجودی و یا فهرست زمین لغزش^۵ به منظور بررسی پراکندگی، نوع حرکت، تعیین حساسیت به زمین لغزش، خطر، آسیب‌پذیری و مطالعه تکامل مناظر، برای ثبت وسعت لغزش در یک منطقه دارای اهمیت می‌باشد (گوزتی^۶ و همکاران، ۲۰۱۲). نقشه‌های موجودی لغزش، مکان آنها را ثبت می‌کند و در صورت وجود داده‌های زمانی، تاریخ وقوع آنها را نیز مشخص می‌کند (هانسن^۷، ۱۹۸۴ و گوزتی و همکاران، ۲۰۰۱). زمین لغزش‌ها براساس زمان وقوع به چهار گروه تقسیم می‌شوند: باستانی^۸ (قبل از هولوسن)، قدیمی^۹ (اوایل هولوسن)، اخیر^{۱۰} (اواخر هولوسن) و امروزی^{۱۱} (کیاو و لی^{۱۲}، ۱۹۹۰؛ وانگ^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۱) و معمولاً تاریخ وقوع لغزش با تاریخ یا دوره رویداد آغازگر (بارش، زلزله و...) مطابقت دارد (گالی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۰۸).

ژئومورفولوژیست‌ها برای مطالعه زمین‌لغزش، از اصل یونیفرمیتارانیسم (گذشته و حال کلید آینده است) پیروی می‌کنند (وارنس^{۱۵} و IAG^{۱۶}، ۱۹۸۴). براین اساس، زمین لغزش اغلب در جایی اتفاق می‌افتد که در گذشته رخ داده باشد، بنابراین برای پیش‌بینی خطرات احتمالی لغزش در آینده، شناسایی لغزش‌های قدیمی و دامنه‌های ناپایدار بسیار مهم می‌باشد (غیور بلورفروشان و همکاران، ۱۴۰۲) سن لغزش، میزان فعالیت، نوع حرکت و مورفولوژی لغزش از تصاویر و نقشه‌های

^۱ Sidle & Ochiai

^۲ Hu

^۳ Sassa

^۴ Luo & Huang

^۵ Landslide inventory maps

^۶ Guzzetti

^۷ Hansen

^۸ Ancient (Before Holocene)

^۹ Old (Early Holocene)

^{۱۰} Recent (Late Holocene)

^{۱۱} Present-day

^{۱۲} Qiao and Li

^{۱۳} Wang

^{۱۴} Galli

^{۱۵} Varnes

^{۱۶} International Association for Engineering Geology

ژئومورفولوژی استنباط می‌شود (آنتونینی^۱ و همکاران، ۲۰۰۱). لغزش‌ها علائم قابل تشخیصی از خود به جای می‌گذارند. بیشتر نشانه‌های به‌جامانده از یک لغزش مورفولوژیکی است، یعنی به تغییرات در شکل، موقعیت یا ظاهر توپوگرافی اشاره دارد و به صورت برجستگی‌های سایه‌دار در تصاویر مشاهده می‌شود. بنابراین نقشه‌های ژئومورفولوژی نیز با توجه به نوع اشکال به تهیه فهرست لغزش کمک می‌کند (کاردینالی و همکاران، ۲۰۰۲).

در گذر زمان روش‌های تهیه نقشه موجودی زمین لغزش توسعه یافت. به طوریکه برونسدن^۲ (۱۹۸۵)، با نقشه‌برداری میدانی ژئومورفولوژیکی، ریب و لیانگ^۳ (۱۹۷۸)، کاررارا^۴ و همکاران (۱۹۹۱) ون وستن^۵ و همکاران (۱۹۹۹)، براردینونی^۶ و همکاران (۲۰۰۳) و مثر^۷ و همکاران (۲۰۰۳) با تفسیر بصری عکس‌های هوایی استریوسکوپ، فرتتی^۸ و همکاران (۲۰۰۰)، براردینونی^۹ و همکاران (۲۰۰۲)، هوپر^{۱۰} و همکاران (۲۰۰۷)، کاسینی^{۱۱} و همکاران (۲۰۰۹)، سیگنا^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۱)، با تفسیر و تجزیه تحلیل تصاویر ماهواره‌ای اپتیک (تصاویر گوگل ارث) و راداری (InSAR) با دقت سانتی‌متر تا میلی‌متر و فیوروچی^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۱)، منگ^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۱)، ما^{۱۵} و همکاران (۲۰۲۱) و کریمی نژاد و همکاران (۱۴۰۳) با ابزارهای جدید نقشه‌برداری میدانی مانند پهپاد، سیستم‌های (GNSS)، DEM LIDAR و ... نقشه فهرست زمین لغزش و تغییرات آنها را تهیه نمودند.

تهیه نقشه موجودی زمین لغزش در مطالعات ریسک لغزش کاربرد مهمی دارد. ارزیابی ریسک زمین لغزش یک عملیات پیچیده است که مستلزم ترکیب تکنیک‌های مختلف ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی می‌باشد (هانگر^{۱۶}، ۲۰۱۸). هنگامی که زمان وقوع لغزش به طور کامل مشخص نباشد از نقشه‌های حساسیت^{۱۷} برای تجزیه و تحلیل خطر لغزش استفاده می‌گردد (فل^{۱۸} و همکاران، ۲۰۰۸). مطالعه حساسیت به زمین لغزش، بیشترین پتانسیل مکانی وقوع لغزش را از منظر زمین‌شناسی، ژئومورفولوژیکی، توپوگرافی و ...، به نمایش می‌گذارد (براب^{۱۹}، ۱۹۸۴) و فوکس^{۲۰} و همکاران (۲۰۰۵). بنابراین نقشه‌های حساسیت برای نشان دادن مکان مستعد وقوع لغزش در آینده (بدون در نظر گرفتن احتمال وقوع) مناسب است. برای

^۱ Antonini

^۲ Brunsden

^۳ Rib and Liang

^۴ Carrara

^۵ Van Westen

^۶ Brardinoni

^۷ Mather

^۸ Ferretti

^۹ Bernardino

^{۱۰} Hooper

^{۱۱} Cascini

^{۱۲} Cigna

^{۱۳} Fiorucci

^{۱۴} Meng

^{۱۵} Ma

^{۱۶} Hungr

^{۱۷} Susceptibility

^{۱۸} Fell

^{۱۹} Brabb

^{۲۰} Fookes

بررسی احتمال وقوع لغزش باید فراوانی و سابقه وقوع تاریخی لغزش در یک منطقه را ارزیابی نمود و مطالعات خطر^۱ لغزش را بررسی کرد. خطر زمین لغزش به شرایط طبیعی محیطی که به طور بالقوه در معرض حرکات دامنه‌ای قرار دارند اشاره دارد یا به عبارتی احتمال وقوع لغزش با شدت معین در یک منطقه معین و در یک دوره زمانی از پیش تعریف شده می‌باشد (وارنس و IAEG، ۱۹۸۴). این مفهوم نشان می‌دهد که شرط وقوع لغزش از نظر زمانی پس از رسیدن به آستانه‌های بحرانی عوامل ماشه‌ای مانند بارش، زلزله و ... به وجود می‌آید (گوزتی و همکاران، ۱۹۹۹). ریسک^۲ به اندازه‌گیری احتمال و شدت یک اثر نامطلوب بر زندگی، سلامت و اموال یا محیط می‌باشد (اینشتین^۳، ۱۹۸۸). استراتژی ریسک لغزش ابعاد اقتصادی و اجتماعی شکست دامنه‌ها را بیان می‌کند و به طور کلی برابر احتمال مرگ و خسارات مادی ناشی از لغزش در نظر گرفته می‌شود. این تعریف معمولاً به عنوان محصول آسیب پذیری و خطر لغزش تعریف می‌شود (وارنس و IAEG، ۱۹۸۴). ارزیابی آسیب‌پذیری عناصر انسانی در برابر زمین لغزش ترکیبی از مورفومتری لغزش (اندازه، شکل، حجم و سرعت) و عناصر در معرض خطر (جمعیت، اندازه و مشخصات سازه‌ها، وضعیت نگهداری و پایداری یک ساختمان) می‌باشد (کاردینالی^۴ و همکاران، ۲۰۰۲). غالب پژوهش‌های ارزیابی خطر لغزش در جهان و ایران براساس مطالعه حساسیت و تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش، با استفاده از مدل‌های آماری در محیط Arc GIS، مانند پژوهش‌های دیکشیت^۵ و همکاران (۲۰۲۰)، پیرا^۶ و همکاران (۲۰۲۰)، بروغنی و همکاران (۱۳۹۷)، ذاکری نژاد و عموشاهی (۱۴۰۱) و ... می‌باشد و مطالعات اندکی به مبحث ریسک لغزش از منظر آسیب‌پذیری عناصر انسانی و اقتصادی پرداخته است.

کاردینالی و همکاران (۲۰۰۲) روش ژئومورفولوژی کاملی را برای مطالعه ریسک لغزش در امبریا^۷ ایتالیا پیشنهاد دادند. در این مطالعه براساس نقشه موجودی زمین لغزش چندزمانه، حجم، فراوانی و شدت زمین لغزش، به مطالعه آسیب‌پذیری عوارض انسانی، خطر و ریسک لغزش پرداخته‌اند.

در دامنه‌های شرقی البرز در حوضه کالپوش زمین لغزش‌های قدیمی وسیعی در دامنه‌ها مدفون شده‌اند که در گذر زمان، با افزایش رطوبت (بارش، افزایش سطح آب دریاچه سد حسین آباد کالپوش) و تغییر کاربری، مجدداً فعال گشته‌اند (غیور بلورفروشان و همکاران، ۱۴۰۲ و واسسیلوا^۸ و همکاران، ۲۰۲۳). روستاهای حسین آباد، کرنگ، نام نیک و قوشه دگرمان و مزارع کشاورزی زیادی در این منطقه واقع شده‌اند. در اسفند (۱۳۹۷) زمین لغزش قدیمی روستای حسین آباد مجدداً فعال گشت و نزدیک به ۳۰۰ خانه را تخریب نمود. بنابراین با توجه به سکونت بالغ بر ۸۰۰۰ نفر جمعیت در این منطقه، حوضه مورد مطالعه از منظر ریسک لغزش، بحرانی و آسیب‌پذیر می‌باشد. این پژوهش با تلفیق داده‌های ژئومورفولوژی تاریخی، سنجش از دور و مطالعات میدانی با روش پیشنهادی کاردینالی و همکاران (۲۰۰۲) به مطالعه ریسک لغزش حوضه کالپوش پرداخته و میزان آسیب‌پذیری عناصر را در جهت برنامه‌ریزی و کاهش خسارت در آینده پیش بینی می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

^۱ Hazard

^۲ Risk

^۳ Einstein

^۴ Cardinali

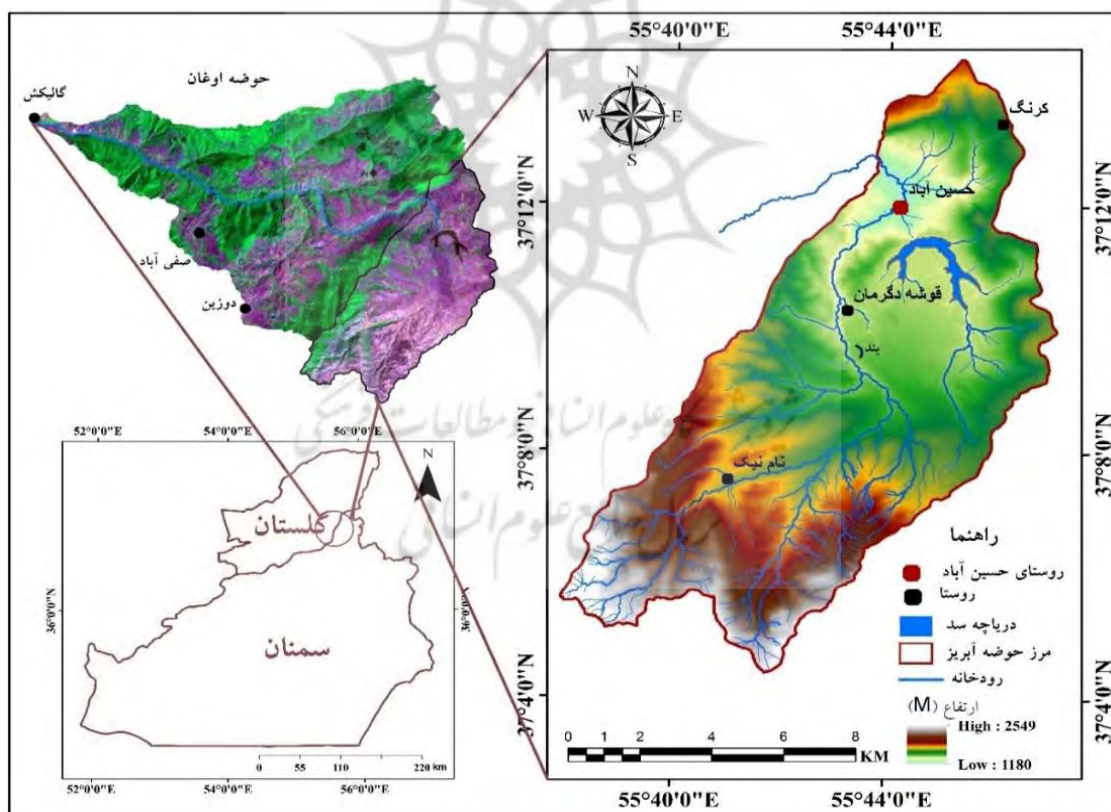
^۵ Dikshit

^۶ Pereira

^۷ Umbria

^۸ Vassileva

حوضه کالپوش در شمال استان سمنان و در مجاورت استان گلستان قرار گرفته است. این حوضه در شرق ارتفاعات جنگلی شهرهای گالیکش و مینودشت استان گلستان و در حد واسط عرض‌های $37^{\circ}14'21''$ - $37^{\circ}4'25''$ شمالی و طول‌های $49'$ - $55^{\circ}38'13''$ - $55^{\circ}47'13''$ شرقی واقع شده است. حوضه آبخیز کالپوش با مساحت ۱۱۳ کیلومتر مربع زیرحوضه، حوضه اوغان می‌باشد و از ارتفاعات نام‌نیک در جنوب حوضه با ۲۵۴۹ متر ارتفاع از سطح دریا، سرچشمه گرفته و بعد از عبور از روستای حسین‌آباد با ۱۱۸۰ متر ارتفاع در شمال حوضه، به دره گالیکش رودخانه اوغان گرگان‌رود استان گلستان می‌پیوندد (شکل ۱). بیشترین شیب با ۵۹ درجه متعلق به کوه‌های مرتفع نام‌نیک می‌باشد و شیب متوسط حوضه ۹ درجه است. منطقه مورد مطالعه در زون زمین‌شناسی کپه‌داغ و در محل تصادم آن با البرز شرقی قرار گرفته است. سنگ آهک سازندهای چمن‌بید، مزدوران و کلات، تیپ کوهستان منطقه با پوشش جنگلی و رسوبات نئوژن و کواترنری، دشت‌های شرقی و مرکزی با کاربری زراعی را تشکیل داده‌اند. آب و هوای حوضه کالپوش به دلیل مجاورت با دریاچه خزر، دارای اقلیم خزری می‌باشد و در تابستان هوای معتدل و مرطوب و در زمستان هوای سرد و مرطوب را تجربه می‌کند. متوسط بارش سالانه در ایستگاه باران سنجی حسین‌آباد از سال ۱۴۰۱-۱۳۹۵، ۷۲۰ میلی‌متر و بیشترین مقدار آن ۱۰۱۰ میلی‌متر در سال (۱۳۹۷) می‌باشد. همچنین سد خاکی کالپوش در جنوب روستای حسین‌آباد تأسیس و آبیگری آن در سال (۱۳۹۲) صورت پذیرفت (انتظام و همکاران، ۱۳۹۸).



شکل ۱: نقشه موقعیت مورد مطالعه، تصویر سمت چپ حوضه اوغان روی تصویر ۴۵۶ لندست ۸ (گذر ۱۶۲ و ردیف ۳۴) و تصویر سمت راست نقشه ارتفاعی و موقعیت حوضه کالپوش اوغان می‌باشد.

روش تحقیق

روش تحقیق مورد استفاده در این پژوهش تجربی است. بدین منظور ابتدا با استفاده از روش‌های کتابخانه‌ای منابع مربوطه جمع‌آوری گردید. سپس با استفاده از عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰ تیرماه سال (۱۳۴۷)، موقعیت زمین لغزش‌های قدیمی‌تر با مورفولوژی باقیمانده مشخص گردید و با استفاده از تصاویر گوگل ارث ۱۳۸۹ و ۱۳۹۸ و مشاهدات میدانی، مرز لغزش‌های

جدید با مورفولوژی تازه و دوباره فعال شده تعیین شد. در انتها نیز با انجام مشاهدات میدانی در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰، مرز لغزش‌های جدیدتر مشخص گردید و نقشه نهایی موجودی زمین لغزش چندزمانه براساس زمان نسبی رخداد در ۴ طبقه ترسیم شد. پس از جمع‌آوری مستندات فوق، در ۵ مرحله ارزیابی ریسک لغزش با استفاده از روش ژئومورفولوژی پیشنهادی کاردینالی و همکاران (۲۰۰۲) انجام گردید.

با توجه به ادبیات لغزش، اندازه‌گیری هندسه تمامی لغزش‌های حوضه کالپوش، نوع لغزش، حجم، عمق و سرعت آنها براساس اندازه‌گیری‌های میدانی، محاسباتی و تصویری تعیین گردید. انواع زمین‌لغزش با توجه به طبقه‌بندی کرودن و وارنس (۱۹۷۸) براساس مشاهدات میدانی مشخص گردید. لغزش‌های چرخشی و انتقالی، جریان‌ها، لغزش‌های پیچیده و مرکب به عنوان حرکات آهسته و جریان آوار، ریزش، سقوط، واژگونی به عنوان لغزش‌های سریع طبقه‌بندی شدند. با توجه به فقدان اطلاعات کافی از عمق لغزش‌ها لذا از معادله گوزتی و همکاران (۲۰۰۸) (رابطه ۱)، که از ارتباط مثبت مساحت با حجم لغزش بدست می‌آید استفاده گردید. همچنین طبق تعریف NIED^۱، لغزش‌ها با توجه به مقدار عمق لغزش به کم-عمق (بین ۱/۵ تا ۱۰ متر از سطح زمین) و عمیق (بیشتر از ۱۰ متر) طبقه‌بندی شدند (رورینگ^۲ و همکاران، ۲۰۰۳) و براساس معادله مارتین^۳ و همکاران (۲۰۰۲) (رابطه ۲)، محاسبه شدند.

$$V_L = 0.0844 \times A_L^{1.4324} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$A_L = 1 \times 10^1 - 1 \times 10^9$$

$$D_r = V_L / A_L \quad (\text{رابطه ۲})$$

در معادلات فوق A_L مساحت زمین لغزش، V_L حجم زمین لغزش و D_r عمق سطح گسیختگی می‌باشد.

فراوانی و شدت زمین لغزش

فراوانی به وقوع موقت زمین لغزش اشاره دارد و از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های تاریخی به دست می‌آید (گوزتی و همکاران، ۱۹۹۹). به دلیل کمبود اطلاعات از زمان وقوع لغزش‌ها، فراوانی وقوع لغزش‌ها را براساس تجزیه و تحلیل نقشه موجودی چندزمانه لغزش، که یک دوره ۵۴ ساله را پوشش می‌دهد و ۴ نوبت مشاهدات میدانی از سال‌های ۱۳۹۸-۱۴۰۱ مشخص گردید و تعداد تغییرات مورفولوژیکی یا به عبارتی تعداد وقوع لغزش‌ها در این دوره شناسایی شد و در ۴ گروه طبقه‌بندی گردید (جدول ۱).

جدول ۱: طبقه‌بندی فراوانی لغزش (کاردینالی و همکاران، ۲۰۰۲)

طبقه	نام	توضیحات
۱	فراوانی پایین	هنگامی که ۱ رویداد مشاهده شد.
۲	فراوانی متوسط	هنگامی که ۲ رویداد مشاهده شد.
۳	فراوانی بالا	هنگامی که ۳ رویداد مشاهده شد.
۴	فراوانی بسیار بالا	هنگامی که بیش از ۳ رویداد مشاهده شد.

برخلاف سایر مخاطرات طبیعی مانند زلزله و آتشفشان، هیچ معیار منحصر به فردی از شدت زمین لغزش در دسترس نیست (هانگر، ۲۰۱۸). لذا میزان مخرب بودن لغزش معیاری برای شدت زمین لغزش (I) در نظر گرفته شده و براساس رابطه (۳) سرعت (S) و حجم (V) محاسبه گردید و جدول (۲) چگونگی برآورد شدت لغزش براساس حجم و نوع لغزش را نشان می‌دهد.

$$I = f(v, s) \quad (\text{رابطه ۳})$$

^۱ National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

^۲ Roering

^۳ Martin

جدول ۲: شدت لغزش براساس نوع لغزش‌ها (کاردینالی و همکاران، ۲۰۰۲)

سرعت لغزش مورد انتظار			حجم احتمالی (m ³)
حرکت کند (لغزش‌ها)	حرکت سریع (جریان واریزه)	حرکت سریع (انواع سقوط، ریزش و ...)	
		خفیف (۱)	<۰/۰۰۱
		متوسط (۲)	<۰/۵
		زیاد (۳)	>۰/۵
	خفیف (۱)	زیاد (۳)	<۵۰۰
خفیف (۱)	متوسط (۲)	زیاد (۳)	۵۰۰-۱۰۰۰۰
متوسط (۲)	زیاد (۳)	بسیار زیاد (۴)	۱۰۰۰۰-۵۰۰۰۰۰
زیاد (۳)	بسیار زیاد (۴)		۵۰۰۰۰-۵۰۰۰۰۰۰
بسیار زیاد (۴)			≥۵۰۰۰۰۰۰

مناطق خطر لغزشی و ارزیابی خطر

برای شناسایی و ترسیم مناطق خطر لغزشی (LHZ) از نقشه فهرست لغزش چندزمانه استفاده گردید. پراکندگی و الگوی لغزش‌ها، حرکت، فعالیت، زمین شناسی، ژئومورفولوژی، فعال شدن مجدد جزئی یا کلی، گسترش جانبی، فرسایش قهقرائی رأس یا فرسایش پیشرونده پنجه لغزش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. ارزیابی خطر لغزش (H) مطابق رابطه تابع (۴) به فراوانی حرکات لغزش (F) و شدت لغزش (I) وابسته است و براساس جدول (۳) برآورد گردید.

$$H = f(F, I) \quad \text{رابطه (۴)}$$

جدول ۳: خطر لغزش برای LHZ (کاردینالی و همکاران، ۲۰۰۲)

فراوانی لغزش تخمینی	شدت لغزش			
	بسیار زیاد	زیاد	متوسط	خفیف
کم (۱)	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱
متوسط (۲)	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱
زیاد (۳)	۳۴	۳۳	۳۲	۳۱
بسیار زیاد (۴)	۴۴	۴۳	۴۲	۴۱

عناصر در معرض خطر و آسیب پذیری آنها

برای تخمین آسیب پذیری عناصر انسانی در معرض خطر از یک رویکرد ساده مبتنی بر شدت و نوع لغزش و آسیب احتمالی لغزش براساس ادبیات علمی محدود الکساندر^۲ (۱۹۸۹)، الکساندر^۲ (۲۰۰۰)، کاردینالی و همکاران (۲۰۰۰) و آنتونینی و همکاران (۲۰۰۱) استفاده گردید. براساس حضور ساختمان‌ها، جاده‌ها، تأسیسات، مقدار جمعیت و ... در مقیاس کوچک، نقشه عناصر در معرض خطر لغزش باتوجه به جدول (۴) تهیه گردید و به هر یک از عناصر براساس شدت زمین لغزش و جدول (۵ و ۶) امتیاز آسیب پذیری داده شد. خسارت مورد انتظار برای جمعیت به شرح زیر طبقه‌بندی گردید.

- مستقیم: هنگامی که تلفات انسانی وارد شده است.

^۱ Landslide Hazard Zone

^۲ Alexander

- غیرمستقیم: هنگامی که فقط آسیب‌های اجتماعی-اقتصادی وارد شده است و به طور موقت یا دائم خانه‌ها از بین رفته و افراد بی‌خانمان شده‌اند.
معمولاً خسارت مستقیم با لغزش‌های سریع و خسارت غیرمستقیم با لغزش‌های کند همراه هستند.

جدول ۴: انواع عناصر در معرض خطر برای سازه‌ها و زیرساخت‌ها (کاردینالی و همکاران، ۲۰۰۲)
رنگ خاکستری مواردی هستند که نویسنده با توجه به ویژگی‌های منطقه پیشنهاد نموده است.

نوع سازه	علامت اختصاری	نوع سازه	علامت اختصاری
صنایع	IN ^۲	مناطق ساخته شده با تراکم جمعیت بالا	HD ^۱
مزارع حیوانات	FA ^۴	مناطق ساخته شده با تراکم جمعیت کم و خانه‌های پراکنده	LD ^۳
امکانات ورزشی	SP ^۶	جاده‌های اصلی و بزرگراه‌ها	MR ^۵
معادن	Q ^۸	جاده‌های آسفالت فرعی	SR ^۷
آرامستان	C ^{۱۰}	مزرعه و جاده‌های فرعی و خاکی	FR ^۹
مزارع کشاورزی	F ^{۱۲}	ریل راه آهن	RW ^{۱۱}
-	-	جنگل‌های حفاظت شده	PF ^{۱۳}

جدول ۵: آسیب پذیری، آسیب مورد انتظار برای عناصر در معرض ریسک. A = آسیب سطحی (خفیف)، F = آسیب عملکردی (متوسط)، S = آسیب ساختاری (شدید) (کاردینالی و همکاران، ۲۰۰۲)

شدت لغزش	عناصر			
	ساختمان‌ها	جاده‌ها	سایر	جمعیت
			مستقیم	

^۱ High Density

^۲ Industries

^۳ Low Density

^۴ Animals Farms

^۵ Main Road

^۶ Sports facilities

^۷ Secondary Roads

^۸ Quarries

^۹ Farm and minor roads

^{۱۰} Cemeteries

^{۱۱} Railway lines

^{۱۲} Farms

^{۱۳} Protected Forests

بی- خانمان	غیر مستقیم		PF	F	Q	RW	FR	SR	MR	C	SP	FA	IN	LD	HD			
																ریزش	خفیف	
No	No	No	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	ریزش	خفیف
No	No	No	A	A	A	A	F	F	A	A	A	A	A	A	A	A	جریان واریزه	
No	No	No	A	A	A	A	S	F	A	A	A	A	A	A	A	A	لغزش	
Yes	Yes	Yes	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	ریزش	متوسط
Yes	Yes	Yes	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	جریان واریزه	
No	Yes	No	F	F	F	F	S	S	F	F	F	F	F	F	F	F	لغزش	
Yes	Yes	Yes	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	ریزش	زیاد
Yes	Yes	Yes	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	جریان واریزه	
Yes	Yes	No	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	لغزش	
Yes	Yes	Yes	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	ریزش	بسیار زیاد
Yes	Yes	Yes	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	جریان واریزه	
No	Yes	No	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	لغزش	

جدول ۶: طبقه‌بندی آسیب به سازه‌ها و زیرساخت‌ها (کاردینالی و همکاران، ۲۰۰۲)

شرح	مقیاس آسیب	نام آسیب
در این سازه‌ها عملکرد ساختمان و جاده‌ها به خطر نیفتاد و آسیب را می‌توان به سرعت و با هزینه کم بازسازی کرد.	زیبایی شناختی و جزئی	آسیب سطحی
در آن عملکرد سازه‌ها و زیرساخت‌ها به خطر افتاده است و رفع آسیب به زمان و منابع زیادی نیاز دارد.	متوسط	آسیب عملکردی
هنگامی که ساختمان‌ها یا مسیرهای حمل و نقل به شدت یا به طور کامل آسیب دیده‌اند و به بازسازی و تخریب گسترده و پرهزینه نیاز دارد.	شدید یا کلی	آسیب ساختاری

ارزیابی ریسک لغزش

هنگامی که خطر و آسیب پذیری را نمی‌توان به صورت احتمالاتی (عددی) تعیین کرد، خطر لغزش همچنان به وضعیت طبیعت منطقه بستگی دارد. خطر لغزش (H) و آسیب مورد انتظار (V) با استفاده از تابع رابطه (۵) برای برآورد ریسک لغزش (R_s) و جدول (۷) استفاده می‌گردد و نقشه آن براساس میزان ریسک لغزش و تجمع لغزش‌های مشابه به ۴ طبقه تقسیم و ترسیم گردید.

رابطه (۵)

$$R_s = f(H, V)$$

جدول ۷: سطوح ریسک ویژه لغزش، براساس خطر لغزش در ۱۶ طبقه و آسیب پذیری در ۳ طبقه (کاردینالی و همکاران، ۲۰۰۲)

آسیب پذیری (خسارت مورد انتظار)			خطر	
خسارت کلی	خسارت متوسط	خسارت خفیف		
S 1 1	F 1 1	A 1 1	۱۱	کم ↑
S 1 2	F 1 2	A 1 2	۱۲	
S 1 3	F 1 3	A 1 3	۱۳	
S 2 1	F 2 1	A 2 1	۲۱	
S 1 4	F 1 4	A 1 4	۱۴	

S 2 2	F 2 2	A 2 2	۲۲	
S 2 3	F 2 3	A 2 3	۲۳	
S 3 1	F 3 1	A 3 1	۳۱	
S 3 2	F 3 2	A 3 2	۳۲	
S 2 4	F 2 4	A 2 4	۲۴	
S 3 3	F 3 3	A 3 3	۳۳	
S 4 1	F 4 1	A 4 1	۴۱	
S 4 2	F 4 2	A 4 2	۴۲	
S 3 4	F 3 4	A 3 4	۳۴	
S 4 3	F 4 3	A 4 3	۴۳	↓
S 4 4	F 4 4	A 4 4	۴۴	زیاد

بحث و یافته‌ها

بررسی زمین لغزش‌های حوضه کالپوش

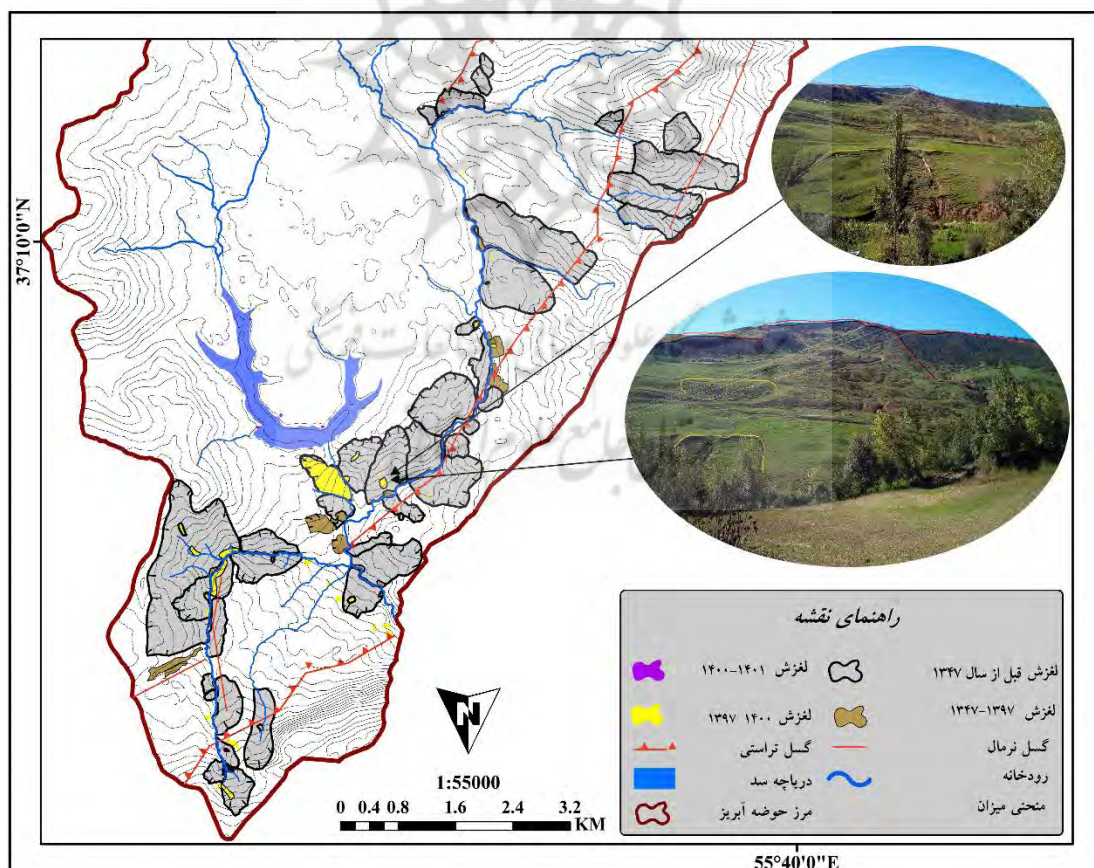
با توجه به نقشه شکل ۲، ۱۰۹ زمین لغزش به مساحت تقریبی ۱۱ کیلومترمربع شناسایی شد، که ۱۰ درصد کل حوضه را تشکیل می‌دهند. تمرکز این لغزش‌ها در جنوب و جنوب غرب حوضه کالپوش می‌باشد و با توجه به ژئومورفولوژی منطقه در بخش شمالی و شرقی، لغزشی مشاهده نگردید. لغزش‌ها براساس زمان نسبی رخداد (دوره ۵۴ ساله)، تاریخ تصاویر، رویدادهای بارشی سال ۱۳۹۷ و کاهش سطح آب دریاچه سد کالپوش در سال ۱۴۰۰ به ۴ طبقه قبل از سال ۱۳۴۷، سال ۱۳۴۷-۱۳۹۷، سال ۱۴۰۰-۱۳۹۷ و سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ تقسیم گردیدند. براساس نمودار شکل ۳ این لغزش‌ها به ترتیب با ۴۰، ۱۶، ۳۹ و ۵ درصد بیشترین فراوانی را دارا می‌باشند. همچنین ۶۶ درصد لغزش‌های سال ۱۴۰۰-۱۳۹۷ و ۵۵ درصد لغزش‌های ۱۳۹۷-۱۴۰۱ روی لغزش‌های قدیمی‌تر از سال ۱۳۴۷ به وقوع پیوسته‌اند. تمام لغزش‌های جدید سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ نیز در ساحل دریاچه سد تشکیل شده‌اند. تصاویر این لغزش‌ها در شکل ۴ آمده است.

نتایج حاصل از بررسی ویژگی‌های هندسی و مورفومتریک لغزش‌ها نشان می‌دهد که دامنه تغییرات مساحت و حجم لغزش‌های حوضه به ترتیب $10.8433 \leq A_L \leq 235$ مترمربع و $210 \leq V_L \leq 33571170$ مترمکعب می‌باشد و بیشینه فراوانی آنها نیز به ترتیب با ۳۳ درصد (لغزش ۳۶) در طبقه مساحت $10000-20000$ مترمربع و ۲۹ درصد (لغزش ۴۲) در طبقه حجمی 10^4-10^5 مترمکعب می‌باشد. ۹۵ درصد لغزش‌های قبل از سال (۱۳۴۷) با مساحت 10^6-10^4 مترمربع و حجم 10^8-10^5 مترمکعب، وسیع‌ترین و حجیم‌ترین لغزش‌های منطقه می‌باشند. دامنه تغییرات عمق لغزش‌ها نیز بین $DL \leq 33$ متر متغیر می‌باشد به طوری که ۶۶ درصد لغزش‌ها کمتر از ۱۰ متر و ۳۴ درصد لغزش‌ها بیشتر از ۱۰ متر عمق دارند. بنابراین غالب لغزش‌های حوضه به غیر از ۸۰ درصد لغزش‌های قبل از سال ۱۳۴۷ از نوع کم عمق می‌باشند.

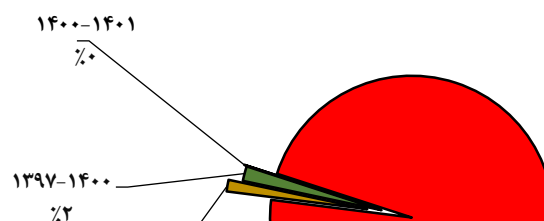
بررسی مطالعه مورفومتریک (حجم، مساحت و عمق) ۱۰۹ زمین لغزش حوضه کالپوش منطبق با نتایج مطالعه تیموری یانوسری و همکاران (۱۳۹۷) در ۴۸۵ لغزش حوضه چهاردانگه مازندران بوده و زمین لغزش‌های کالپوش با توجه به عمیق‌تر بودن، از حجم بیشتری برخوردار است.

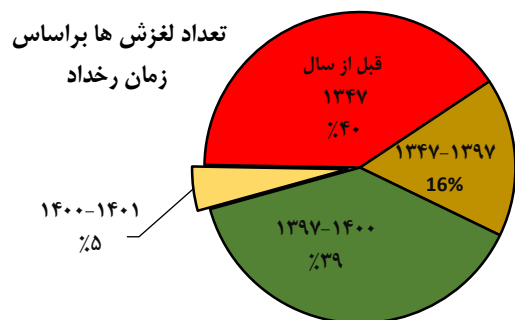
براساس طبقه‌بندی کرودن و وارنس (۱۹۹۶) غالب لغزش‌های قبل از سال (۱۳۴۷) با مورفولوژی پهنه برداشت و تجمع، با فراوانی ۶۶ درصد به صورت چرخشی حرکت کرده و تثبیت شده‌اند و باقی لغزش‌ها به صورت انتقالی حرکت کرده‌اند. با

گذر زمان به دلیل زیربری رودخانه‌های پای لغزش‌ها ناپایدار شده و به صورت انتقالی و خزشی حرکت نموده‌اند. با توجه به نوع لغزش‌های حوضه کالپوش و براساس طبقه‌بندی کروند و وارنس (۱۹۹۶)، ۹۸ درصد لغزش‌ها (۱۰۷ مورد) که شامل لغزش‌های خز، چرخشی، انتقالی و گسترش جانبی هستند، دارای حرکت کند می‌باشند و فقط ۲ جریان گلی در گروه لغزش‌های سال ۱۴۰۰-۱۳۹۷، دارای حرکت سریع می‌باشند. بنابراین تقریباً تمام لغزش‌های حوضه کالپوش از گذشته تا حال با سرعت و حرکت کند به وقوع پیوسته‌اند.



شکل ۲: نقشه موجودی لغزش چندزمانه حوضه کالپوش





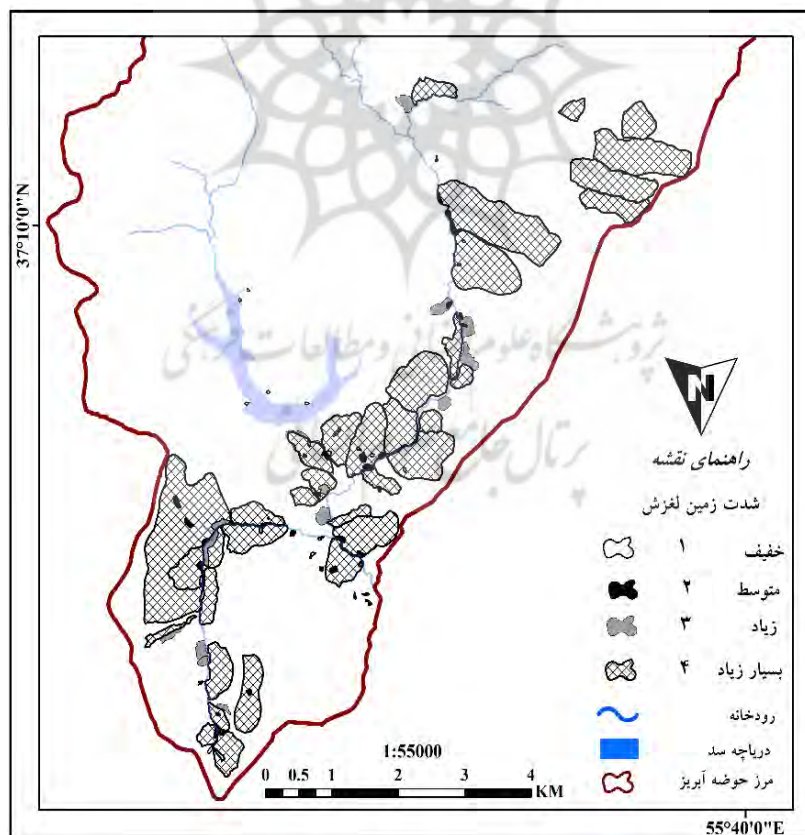
شکل ۳: نمودار توزیع تعداد و حجم لغزش های حوضه کالیپوش



شکل ۴: نمونه‌ای از لغزش‌های حوضه کالپوش: رنگ بنفش لغزش‌های قبل از سال ۱۳۴۷ و رنگ قرمز لغزش‌های ۱۳۹۷-۱۴۰۰

بررسی شدت زمین لغزش‌های حوضه کالپوش

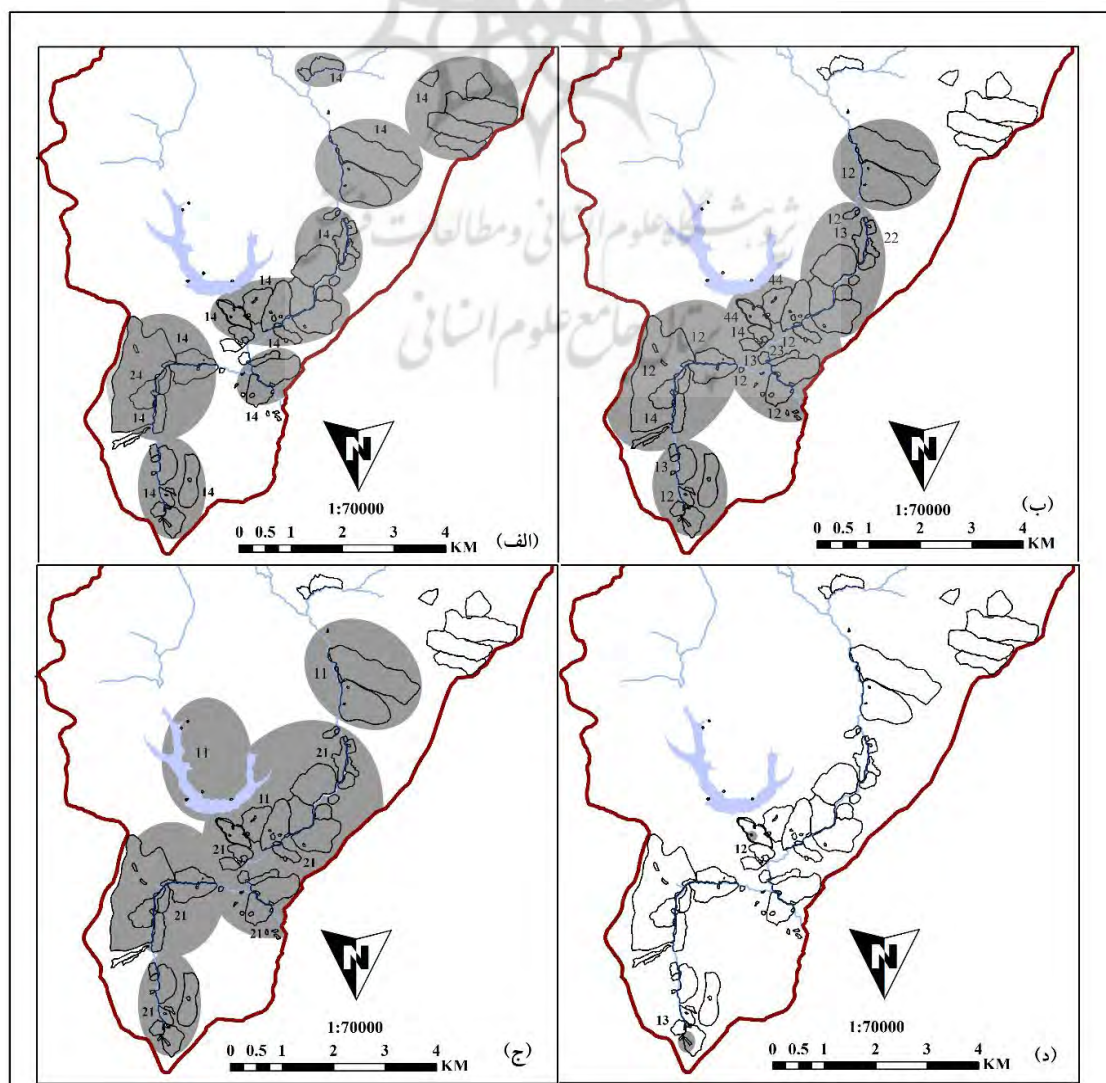
شدت زمین لغزش (I) به نوع لغزش، حجم و عمق تخمینی بستگی دارد و نقشه آن تهیه گردید. با توجه به شکل ۵ لغزش‌های قبل از سال ۱۳۴۷ با توجه به حجم زیاد دارای شدت بسیار زیاد بوده و در نتیجه بسیار مخرب می‌باشند. لغزش ۱۴۰۰-۱۳۹۷ روستای حسین آباد نیز دارای شدت بسیار زیاد می‌باشد و شایان ذکر است تمام لغزش‌های سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ نیز شدت خفیف دارند.



شکل ۵: نقشه شدت زمین لغزش حوضه کاپوش

ارزیابی خطر و مناطق خطر لغزشی

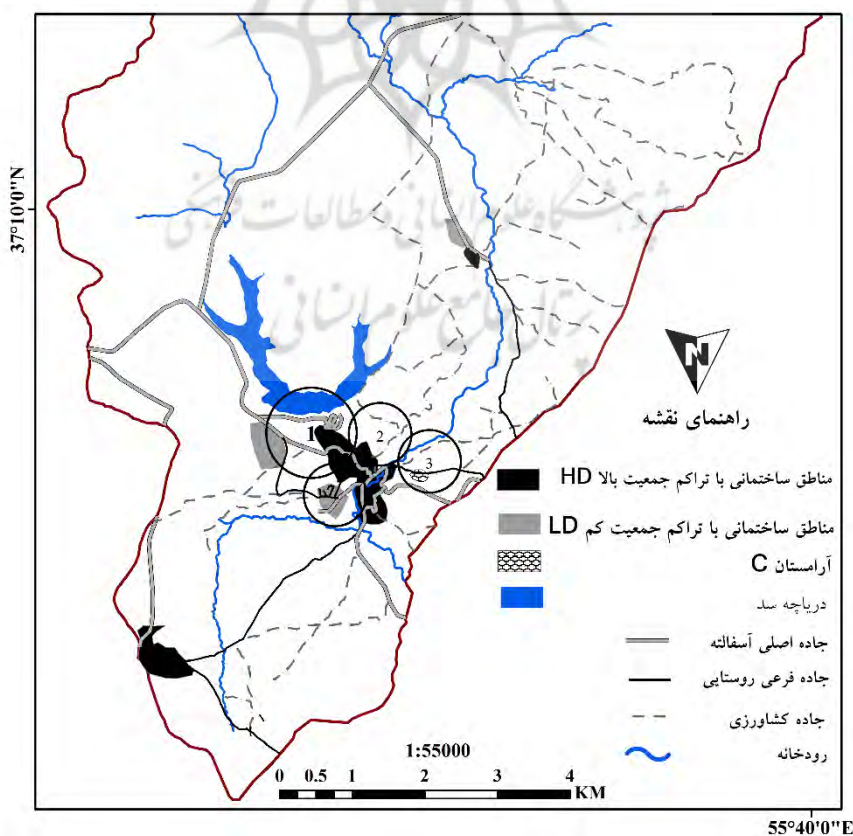
مناطق خطر لغزشی (LHZ)، محدوده احتمالی تکامل زمین لغزش‌ها با ویژگی‌های مشابه (نوع، حجم، عمق، سن و سرعت) می‌باشد و به طور کلی مناطق خطر لغزشی به محیط پیرامون زمین لغزش موجود، یا گروهی از لغزش‌ها محدود می‌شود (کاردینالی و همکاران، ۲۰۰۲). نتایج شکل ۶ (الف) نشان می‌دهد که لغزش‌های عمیق قدیمی‌تر از سال ۱۳۴۷ (باقیمانده) که در زمان رخداد احتمالاً تحت تأثیر شرایط مختلف ژئومورفولوژی، آب و هوایی و زمین لرزه بوده‌اند، دارای شدت زیاد و فراوانی وقوع نسبی کم با شاخص خطر ($H=14$) در زمان تشکیل بوده‌اند و ۸ منطقه خطر لغزش را تشکیل داده‌اند. این مناطق در شکل ۶ (ب) برای لغزش‌های عمیق سال ۱۳۴۷-۱۳۹۷ و سال ۱۴۰۰-۱۳۹۷ به ۵ منطقه کاهش یافته و فعالسازی مجدد لغزش‌ها، شدت کمتر و فراوانی بیشتری دارد به طوری که خطر لغزشی متغییری را نشان دادند و لغزش روستای حسین آباد بیشینه شاخص خطر لغزشی ($H=44$) را ثبت کرده است. در شکل ۶ (ج) لغزش‌های کم عمق و سطحی، ۵ منطقه خطرهای لغزشی ضعیف (۱۱) و (۲۱) را نشان می‌دهند که شامل لغزش‌های ۱۴۰۰-۱۳۹۷ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰ می‌باشد. جریان‌های گلی نیز در شکل ۶ (د) دارای خطر لغزشی کم تا متوسط (۱۲) و (۱۳) می‌باشند.



شکل ۶: نقشه مناطق خطر زمین لغزش حوضه کالیپوش (LHZ) (پهنه خاکستری) و خطر زمین لغزش (H) (الف) لغزش‌های قبل از سال ۱۳۴۷ و عمیق، (ب) لغزش‌های عمیق ۱۳۹۷-۱۳۴۷ و ۱۴۰۰-۱۳۹۷، (ج) لغزش‌های کم عمق (د) جریان گلی با یک شاخص دو رقمی (شدت، فراوانی) نشان داده شده است.

ارزیابی عناصر در معرض خطر و آسیب‌پذیری احتمالی آنها

با توجه به نقشه شکل ۷ عناصر در معرض خطر کالیپوش و موقعیت حضور لغزش‌ها، روستاهای حسین آباد، قوشه دگرمان و کرنگ به دلیل جمعیت و تراکم بالا و جاده‌های منتهی به آنها دارای خطر آسیب‌پذیری احتمالی (V) بیشتری می‌باشند.

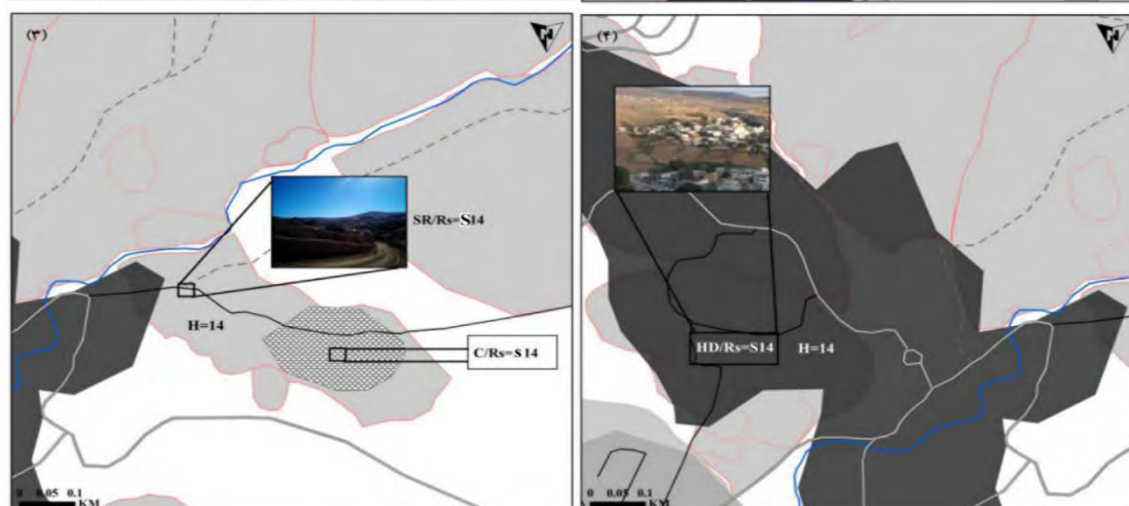
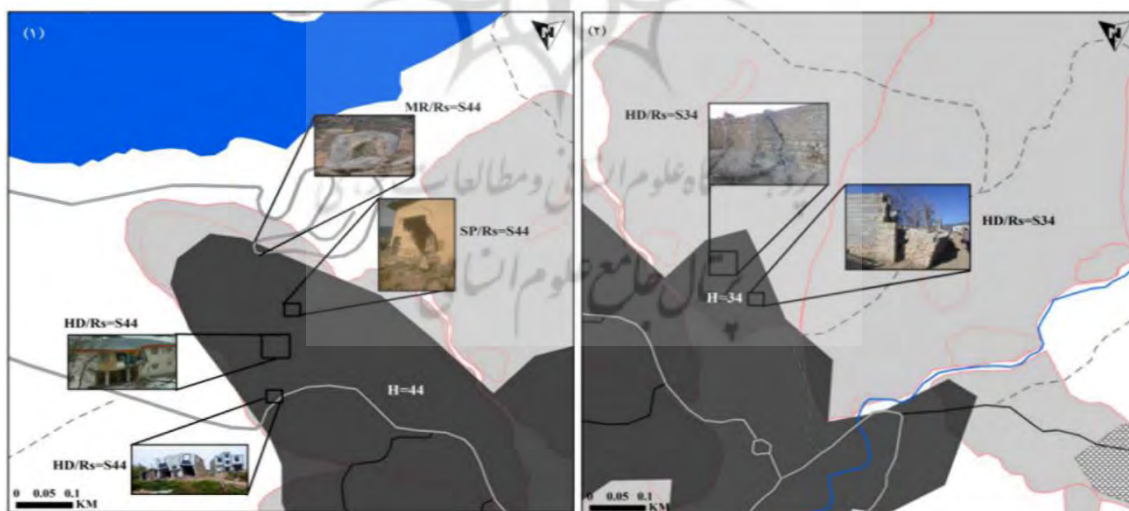


شکل ۷: عناصر در معرض آسیب پذیری احتمالی (V)

ارزیابی ریسک لغزش

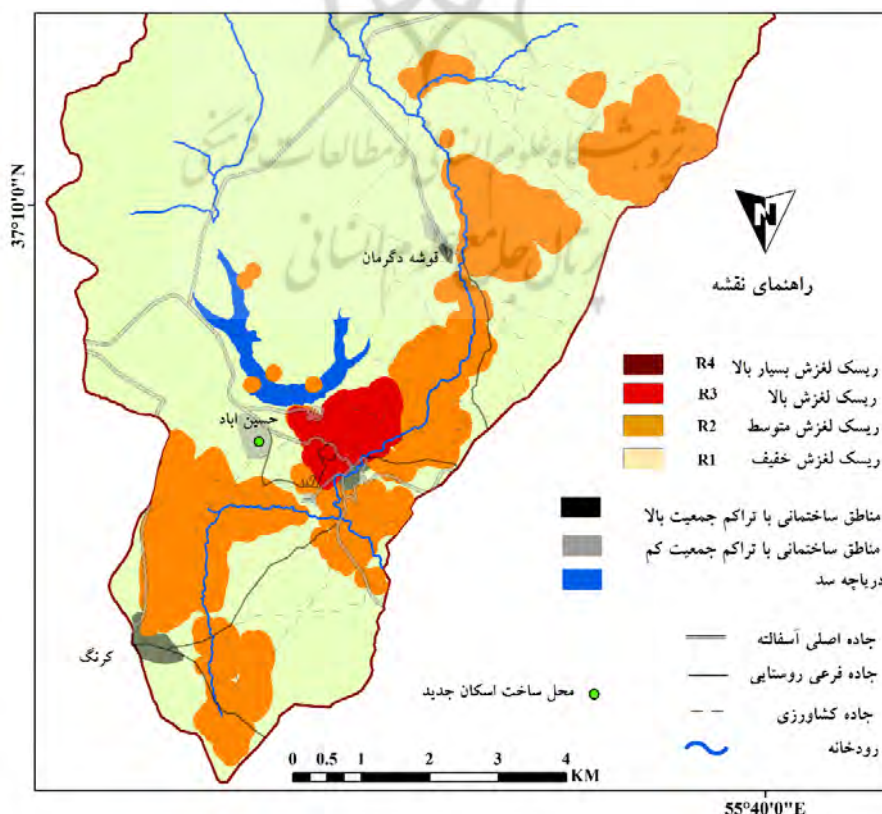
ارزیابی دقیق ریسک زمین لغزش بسیار دشوار و وابسته به وضعیت محیط است. طبق نظر انیشتین (۱۹۸۸)، هنگام رخداد یک زمین لغزش، خطری که مجموعه‌ای از عناصر محیطی (مانند ساختمان، جاده و ...) را تهدید می‌کند، به عنوان ریسک زمین لغزش تعریف می‌شود. با توجه به شاخص خطر لغزش (H) و آسیب مورد انتظار یا احتمالی (V)، سطوح ریسک لغزش (Rs) برای مناطق خطر لغزشی (LHZ) در شکل ۸ بدست آمد. با توجه به اینکه عناصر مختلفی در مناطق خطر لغزشی (LHZ) وجود دارد، لذا برای هر منطقه و عنصر به طور جداگانه ریسک لغزش محاسبه گردید.

نقشه (۱) شکل ۸ عناصر جاده اصلی، سوله ورزشی، مدرسه و منازل را نشان می‌دهد که دارای آسیب ساختاری شدید و کلی و شاخص احتمالی خطر بسیار زیاد (۴۴) شدت لغزش بسیار زیاد و فراوانی بسیار زیاد) می‌باشد. در این نقشه ریسک لغزش احتمالی با مشاهدات میدانی منطقه و آسیب‌های شدید که بعد از لغزش سال (۱۳۹۸) به ساختمان‌ها و جاده اصلی روستای حسین آباد وارد شد (تصاویر داخل نقشه)، کاملاً مطابقت دارد، بنابراین صحت عملکرد این نقشه همراه با طبقه‌بندی‌های آن تأیید می‌گردد. نقشه (۲) شکل ۸ نیز دیوار حیاط منازل را نشان می‌دهد که دارای آسیب کلی و ساختاری و شاخص خطر (۳۴) شدت لغزش بسیار زیاد و فراوانی زیاد) می‌باشد. شکل‌های (۳) و (۴) نیز شاخص خطر (۱۴) شدت لغزش بسیار زیاد و فراوانی کم) را نشان می‌دهد، که انتظار می‌رود برای آرامستان و جاده آن و منطقه مسکونی آسیب ساختاری و کلی در آینده، رخ دهد. در حال حاضر آرامستان دارای آسیب خفیف، جاده آن خسارت عملکردی و برخی مناطق منطقه مسکونی شرق حسین آباد، خسارت عملکردی را تجربه می‌کنند، که با توجه به نتایج فوق احتمال تشدید شرایط و آسیب پذیری بیشتر در منطقه وجود دارد.

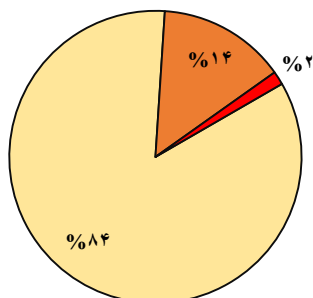


شکل ۸ نقشه ریسک خطر لغزش (R_s) (۱) لغزش پایین دست سد روستای حسین آباد با عناصر جاده اصلی (MR)، سوله ورزشی (SP)، ساختمان مدرسه (HD) و منازل (HD) (۲) لغزش دوم پایین دست سد روستای حسین آباد دیوار حیاط و ساختمان منازل (HD) (۳) آرامستان (C) و جاده فرعی (SR) (۴) منازل (HD) لغزش شرقی روستای حسین آباد. رنگ صورتی لغزش، هاشور آرامستان و رنگ سیاه مناطق پرجمعیت و پرتراکم می‌باشد. این مناطق با دایره در نقشه شکل ۷ مشخص شده‌اند.

نتایج نقشه ریسک زمین لغزش در شکل ۹ نشان می‌دهد که در حوضه کالپوش منطقه‌ای با ریسک لغزش بسیار بالا (R₄) به دلیل نبودن لغزش‌های سریع (ریزش و ...) وجود ندارد. همچنین روستای حسین آباد به طور کامل در پهنه ریسک لغزش بالا می‌باشد. ریسک لغزش بالا (R₃) معرف مناطقی است که دارای لغزش‌های کند با شدت و فراوانی بالا، احتمال زیاد آسیب پذیری ساختاری و عملکردی سازه‌ها و زیرساخت‌ها و خطر مرگ کمتر می‌باشد. بخشی از روستای کرنگ در پهنه با ریسک لغزش متوسط (R₂) قرار دارد. ریسک لغزش متوسط (R₂) معرف مناطقی است که دارای لغزش‌های کند یا سریع با شدت خفیف و آسیب پذیری سطحی می‌باشد. براساس شکل ۱۰، ۸۴ درصد حوضه کالپوش نیز به دلیل نداشتن لغزش و یا عناصر در معرض خطر دارای ریسک لغزش خفیف (R₁) می‌باشد و محل ساخت اسکان جدید روستای حسین آباد در آن قرار دارد. نتایج مباحث فوق نشان می‌دهد که در حوضه کالپوش ۹ منطقه خطر لغزشی (LHZ) با مساحت ۱۷ کیلومتر مربع به صورت متمرکز در جنوب و غرب حوضه شناسایی شده است.



شکل ۹: نقشه ریسک لغزش حوضه کاپوش



شکل ۱۰: نمودار توزیع مساحت پهنه‌های ریسک لغزش، رنگ قرمز R3، نارنجی R2 و زرد R1

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با یک روش ژئومورفولوژیکی با بهره‌برداری از داده‌های تاریخی عکس‌های هوایی، سنجش از دور و مشاهدات میدانی و تلفیق آن با روش کاردینالی و همکاران (۲۰۰۲) به ارزیابی ریسک لغزش با هدف کاهش آسیب پذیری روستاهای حوضه کاپوش صورت گرفت. روش ژئومورفولوژیکی پیشنهادی یک روش تخصصی، دقیق و کارآمد می‌باشد که در مکان‌های مختلف پاسخ متفاوتی دارد. این روش برپایه مشاهدات ژئومورفولوژیکی متخصصین و تهیه نقشه موجودی لغزش چند زمانه می‌باشد. در صورتی که الگوی مورفولوژی لغزش‌های قدیمی‌تر در عکس‌های هوایی مشهود باشد، می‌توان از این روش استفاده نمود. همچنین این روش برای مقیاس‌های مختلف حوضه آبریز، استانی، شهر و روستا قابل اعتماد و مقرون به صرفه می‌باشد. نتایج این پژوهش با مطالعات کاردینالی و همکاران (۲۰۰۲)، برای لغزش‌های منطقه امبریا ایتالیا مطابقت دارد. در پژوهش حاضر با توجه به ویژگی‌های منطقه، دو عنصر اراضی کشاورزی و جنگلی به دلیل اهمیت‌شان به عناصر پیشنهادی مذکور، برای ارزیابی آسیب پذیری اضافه گردید و در ارزیابی ریسک لغزش لحاظ گردیدند. همچنین پیشنهاد می‌گردد با توجه به حضور کامل روستای حسین آباد در پهنه ریسک لغزش بالا، روستا به طور کامل جابه‌جا شود، تا در آینده احتمال آسیب پذیری عناصر در معرض خطر زمین لغزش و تلفات جانی و مالی کاهش یابد. این روش به عنوان یک روش قابل اعتماد و سازگار برای ژئومورفولوژیست‌ها، مهندسان و مدیریت بحران در دامنه‌های البرز و زاگرس ایران معرفی و پیشنهاد می‌گردد.

منابع

- انتظام، ا.، رضایی، ع.، وکیل‌زاده، ی.، محمدی، ی. و آقابابا زاده، ن. (۱۳۹۸). بررسی و تحلیل مقدماتی زمین لغزش حسین آباد کاپوش. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- بروغنی، م.، پورهایمی، س.، و زنگنه اسدی، م. (۱۳۹۷). ارزیابی خطر و خسارت زمین لغزش در حوضه آبخیز بقیع به روش‌های فاکتور قطعیت و رگرسیون لجستیک. مجله آمایش جغرافیایی فضا، ۸(۲۹)، ۱-۱۸.
- تیموری یانسری، ز. (۱۳۹۷). مطالعه حساسیت به وقوع زمین لغزش در حوزه آبخیز چهاردانگه با تأکید بر مقایسه تطبیقی روش‌های ارزیابی. رساله دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، گروه جغرافیا.
- ذاکری نژاد، ر.، و عموشاهی، ن. (۱۴۰۱). ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از داده‌های سنجش از دور و مدل حداکثر آنتروپی (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبخیز کمه، جنوب استان اصفهان). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۱(۲)، ۱۲۸-۱۴۹.
- غیور بلورفروشان، م.، حسین زاده، س.، لشکری پور، غ.، مینائی، م.، و مربی هروی، ح. (۱۴۰۲). ارزیابی عملکرد بارش سنگین در فعال شدن مجدد پالئولنداسلاید روستای حسین آباد کاپوش. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۱(۴)، ۲۲-۳۸.

- کریمی‌نژاد، پورقاسمی، ح.ر.، حسین‌علیزاده، م. و شفاهی، و. (۱۴۰۳). تشخیص فروچاله‌ها و زمین لغزش‌ها با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق و تصاویر پهپادی. مهندسی و مدیریت آبخیز، <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2024.363888.2037>
- Alexander, D. (1989). Urban landslides. *Progress in Physical Geography*, 13(2), 157-189.
- Alexander, D. (2000). *Landslide risk estimation in Umbria Region. Unpublished technical report for the CNR-IRPI*, 110.
- Antonini, G., Arsicione, F., Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2001). Surface deposits and landslide inventory map of the area affected by the 1997 Umbria-Marche earthquakes. *Bollettino della Società geologica italiana*, 121(1), 843-853.
- Bernardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 40(11), 2375-2383.
- Brabb, E. E. (1984). *Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping*.
- Brardinoni, 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, 179 – 196.
- Brunnsden, D. (1985). Landslide types, mechanisms, recognition, identification. In *landslides in the South Wales coalfield*, edited by: Morgan, CS, *Proceedings Symposium, April*, 1-3.
- Cardinali, M., Antonini, G., Reichenbach, P., & Guzzetti, F. (2001). Photo geological and landslide inventory map for the Upper Tiber River basin. CNR, Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, Publication, 2154.
- Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M. & Salvati, P. (2002). A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2(1/2), 57-72.
- Cascini, L., Fornaro, G., & Peduto, D. (2009). Analysis at medium scale of low-resolution DInSAR data in slow-moving landslide-affected areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6), 598-611.
- Cigna, F., Del Ventisette, C., Liguori, V., & Casagli, N. (2011). Advanced radar-interpretation of InSAR time series for mapping and characterization of geological processes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(3), 865-881.
- Cruden, D. M. and Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. *Landslides, investigation and mitigation: special report 247*, 36-75.
- Dikshit, A., Sarkar, R., Pradhan, B., Jena, R., Drukpa, D., & Alamri, A. M. (2020). Temporal probability assessment and its use in landslide susceptibility mapping for eastern Bhutan. *Water*, 12(1), 267.
- Einstein, H. (1988). Special lecture: Landslide risk assessment procedure. *Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Lausanne*, 2, 1075-1090.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering geology*, 102(3-4), 85-98.
- Ferretti A, Prati C, Rocca F. (2000). Multibaseline InSAR DEM reconstruction: the wavelet approach. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 37(2):705-715.
- Fiorucci, F., Cardinali, M., Carlà, R., Rossi, M., Mondini, A. C., Santurri, L., ... & Guzzetti, F. (2011). Seasonal landslide mapping and estimation of landslide mobilization rates using aerial and satellite images. *Geomorphology*, 129(1-2), 59-70.
- Fookes, P. G., Lee, E. M., Milligan, G. C., & Press, C. R. C. (2005). *Geomorphology for engineers*. Caithness: Whittles Publishing.
- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2008). Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology*, 94(3-4), 268-289.

- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., & Carrara, A. (2001). Comparing Landslide Maps: A Case Study in the Upper Tiber River Basin, Central Italy. *Environmental management*, 25(3).
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P., (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31, 181–216.
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42-66.
- Hansen, A. (1984). Engineering geomorphology: the application of an evolutionary model of Hong Kong's terrain. *Zeitschrift für Geomorphologie. Supplementband*, 51, 39-50.
- Hooper, A., Segall, P., & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis. *J. Geophys. Res*, 112, 1-21.
- Hungr, O. (2018). Some methods of landslide hazard intensity mapping. In *Landslide risk assessment*. Routledge.
- Luo, S. L. & Huang, D. (2020). Deformation characteristics and reactivation mechanisms of the Outang ancient landslide in the Three Gorges Reservoir, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 3943-3958.
- Ma, S., Qiu, H., Hu, S., Yang, D. & Liu, Z. (2021a). Characteristics and geomorphology change detection analysis of the Jiangdingya landslide on July 12, 2018, China. *Landslides*, 18, 383-396.
- Martin, Y., Rood, K., Schwab, J. W., & Church, M. (2002). Sediment transfer by shallow landsliding in the Queen Charlotte Islands, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 39(2), 189-205.
- Mather, A.E., Griffiths, J.S., Stokes, M., (2003). Anatomy of a fossil landslide from the Pleistocene of SE Spain. *Geomorphology* 50,135–149.
- McCalpin, J. (1984). Preliminary age classification of landslides for inventory mapping. In *Proceedings of the Annual Symposium on Engineering Geology and Soil Engineering* (21), 99-120.
- Meng, Q., Li, W., Raspini, F., Xu, Q., Peng, Y., Ju, Y. & Casagli, N. (2021). Time-series analysis of the evolution of large-scale loess landslides using InSAR and UAV photogrammetry techniques: A case study in Hongheyan, Gansu Province, Northwest China. *Landslides*, 18, 251-265.
- Pereira, S., Santos, P. P., Zêzere, J. L., Tavares, A. O., Garcia, R. A. C., & Oliveira, S. C. (2020). A landslide risk index for municipal land use planning in Portugal. *Science of the Total Environment*, 735, 139463.
- Qiao, P.D. & Li, Z.J.,(1990). *Engineering Geology in Loess Covered Area*. Water and Power Press.
- Rajabi, A.M., Khamchian, M., Mahdavi, M. R. & Del Gaudio, V.(2010). Attenuation relation of Arias intensity for Zagros Mountains region (Iran). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(3), 110-118.
- Rib, H. T., & Liang, T. (1978). *Recognition and identification*. Transportation Research Board Special Report, (176).
- Roering, J. J., Schmidt, K. M., Stock, J. D., Dietrich, W. E., & Montgomery, D. R. (2003). Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(2), 237-253.
- Sassa, K., Tsuchiya, S., Fukuoka, H., Mikos, M. & Doan, L. (2015). Landslides: review of achievements in the second 5-year period (2009–2013). *Landslides*, 12, 213-223.
- Shoaie, Z., Shoaie, G., & Shoaie, A. (2021). Deadly Landslide and Debris Avalanche in Abikar Village, Farsan City, Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran.

- Sidle, R. C. & Ochiai, H. (2006). *Landslides: Processes, Prediction, and Land Use, Water Resour. vol. 18. Monogr. Ser.*
- Van Westen, C.J., Seijmonsbergen, A.C., Mantovani, F. (1999). *Comparing landslide hazard maps. Natural Hazards 20, 137–158.*
- Varnes, D. J. & IAEG Commission on Landslides. (1984). *Landslide hazard zonation—a review of principles and practice. UNESCO Paris.*
- Vassileva, M., Motagh, M., Roessner, S., & Xia, Z. (2023). *Reactivation of an old landslide in north-central Iran following reservoir impoundment: Results from multisensor satellite time-series analysis. Engineering Geology, 327, 107337.*
- Wang, H.B., Zhou, B., Wu, S.R., Shi, J.S. & Li, B. (2011). *Characteristic analysis of large-scale loess landslides: a case study in Baoji city of loess plateau of northwest China: Natural Hazards and Earth System Sciences, 11, 1829–1837.*

