



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات، آموزش، پژوهش، مرکز کشاورزی

رفتارسنجی مکانی- زمانی زمین لغزش چاسرکا بابل با تلفیق داده‌های میدانی و سنجش از دور

رضاعلی رحیمی تالارپشتی^۱، قربان وهاب‌زاده^۲، عطاله کاویان^{۳*}، سید رمضان موسوی^۴

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

۲ و ۳- استاد گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

۴- استادیار گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

زمین لغزش‌ها، به عنوان یکی از ویرانگرترین پدیده‌های زمین ریخت‌شناختی، هرساله در مناطق مختلف ایران سبب خسارت‌های جانی و مالی هنگفتی می‌شوند. زمین لغزش‌ها، نوعی حرکت دامنه‌ای هستند که بیشتر تحت تأثیر عامل‌های طبیعی مانند زلزله، بارندگی شدید و فرسایش بوده، اما به وسیله مداخلات انسانی مانند ساخت و سازهای غیراصولی، جاده سازی و تغییر در الگوی رواناب، تشدید می‌شود. در مناطق کوهستانی و دامنه‌های شیب دار کشور به ویژه مناطق شمالی آن، به دلیل شرایط حساس سنگ شناسی و زمین ساختی، کانون اصلی این پدیده هستند. پیامدهای زمین لغزش‌ها به ویرانی خانه‌ها و شریان‌های حیاتی محدود نمی‌شود و بیشتر منجر به مسدود شدن مسیرهای حمل و نقل، آسیب به زمین‌های کشاورزی و تلفات انسانی می‌شود. با تلفیق روش‌های سنجش از دور و بررسی‌های میدانی، می‌توان امکان پایش و ارزیابی دقیق تر زمین لغزش‌ها را فراهم آورد. تحلیل‌های زمین فناوری و زمین ریخت‌شناختی نقش بسزایی در شناسایی مناطق مستعد و مدیریت خطر این مخاطره طبیعی دارند. از این رو، بررسی و شناسایی مناطق ناپایدار و تحلیل عامل‌های مهارکننده این پدیده، گامی اساسی در کاهش خطر و مدیریت بحران است. از این رو، این پژوهش با هدف سنجش رفتار مکانی- زمانی توده زمین لغزش چاسرکا بابل انجام شد.

مواد و روش‌ها

در مرحله نخست، به منظور بررسی تاریخیچه و شناخت توده زمین لغزش چاسرکا، از تصویرهای تاریخی سامانه گوگل ارث در بازه زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۴ استفاده شد و پنج سال ۲۰۱۰، ۲۰۱۳، ۲۰۱۶، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۵ به عنوان نمونه انتخاب شد. در این پژوهش، شبکه‌های رفتارسنجی منطقه لغزشی با چهار نقطه مبنا و ۲۲ نقطه پایش جابجایی، طراحی و ایجاد شد. افزون بر این، عکس‌های هوایی تصحیح شده هندسی در دوره‌های مختلف بررسی و روند تغییرات آنها مقایسه شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: ataollah.kavian@gmail.com

استناد: رحیمی تالارپشتی، ر.ع.، وهاب‌زاده، ق.، کاویان، ع.، موسوی، س.ر. ۱۴۰۵. رفتارسنجی مکانی- زمانی زمین لغزش چاسرکا بابل با تلفیق داده‌های میدانی و سنجش از دور. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۳):۲۱-۱.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2026.371320.1643

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۵۲، پاییز ۱۴۰۵، صفحه‌های ۱ تا ۲۱.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



برای پردازش داده‌ها و محاسبات سرشکنی شبکه زمین‌سنجی پایش زمین‌لغزش، از نرم‌افزار تجاری Leica Geo Office نسخه ۷ بهره‌برداری شد و دقت مدل و صحت کلی آن ارزیابی شد.

نتایج و بحث

نتایج این پژوهش نشان‌دهنده نقش ترکیبی عامل‌های طبیعی و مداخلات انسانی در رخداد زمین‌لغزش‌ها در منطقه چاسرکا بود. تحلیل‌ها بیانگر آن بود که عامل‌های طبیعی مانند شیب، جهت دامنه و ویژگی‌های زمین‌شناسی (مارن، شیل و رس‌های نئوژن) زمینه‌ساز رخداد زمین‌لغزش‌ها بودند، اما مداخلات انسانی به‌ویژه نابودی پوشش جنگلی، ساخت و سازهای غیرمهندسی، و تغییر پوشش زمین در دهه‌های پیشین، عامل اصلی ناپایداری شیب‌ها و تشدید خطر زمین‌لغزش‌ها، به‌شمار می‌آیند. بیشترین رخداد زمین‌لغزش‌ها در جهت‌های شمال‌شرق، شرق و شمال‌غرب در شیب‌های ۲۵ تا ۴۵٪ و در مناطق با ژرفای خاک کمتر از ۵۰ سانتی‌متر مشاهده شد. در ۴۰ سال گذشته، تغییرات پوشش زمین از جنگل‌های بکر به جاده‌ها و زمین‌های زراعی، افزون بر کاهش پوشش گیاهی، موجب اختلال در تعادل سازه‌ای آب‌های زیرزمینی دامنه‌ها و افزایش خطر لغزش‌ها شده است. ازاین‌رو، نتایج پایش زمین‌سنجی نشان‌دهنده تغییرات تدریجی و پیوسته در حرکت توده‌های لغزشی بود. تغییرات ثبت‌شده در پنج مرحله مشاهده‌ای، نشان داد که زمین‌لغزش‌ها در چاسرکا فرآیندهای تدریجی و پویایی هستند که سرانجام به شکست ناگهانی منجر می‌شوند. تحلیل‌ها نشان داد که جابجایی‌های قابل‌توجه در برخی نقاط (مانند R2 و R3) با جهت غالب لغزش‌ها در منطقه همخوانی زیادی داشته و این یافته نشان‌دهنده رخداد تغییرات تدریجی در مقاومت برشی خاک است که سرانجام موجب شکست شیب‌ها می‌شود. به‌طورکلی، نتایج این پژوهش مؤید اهمیت تحلیل جامع تغییرات اقلیمی، زمین‌ریخت‌شناختی و انسانی در مدیریت خطر زمین‌لغزش‌ها است. بر اساس نتایج این پژوهش برای پیشگیری از زمین‌لغزش‌ها، برنامه‌ریزی‌های مناسب برای مهار تغییرات پوشش زمین و حفظ پوشش گیاهی در مناطق حساس باید انجام شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های تحلیل پایش و رفتارسنجی توده زمین‌لغزش چاسرکا بیانگر آن بود که تغییر شکل‌های تدریجی پیش از گسیختگی ناگهانی عامل اصلی ناپایداری این توده است. ازاین‌رو، بر پایه نتایج این پژوهش استقرار سامانه پایش دائمی مبتنی بر داده‌های سنسجش از دور و اندازه‌گیری دقیق جابجایی‌ها برای توسعه سامانه هشدار زودهنگام زمین‌لغزش پیشنهاد می‌شود. افزون بر این، با توجه به نقش و اهمیت پوشش گیاهی در تعدیل شرایط آب‌شناختی و سازه‌ای شیب، احیای هدفمند پوشش گیاهی با استفاده از گونه‌های بومی به‌عنوان یک راهکار تکمیلی در مدیریت پایداری توده لغزشی پیشنهاد می‌شود. همچنین، با توجه به ویژگی بارش‌های حدی (نوع و شدت) به‌دلیل تغییر اقلیم در شمال ایران، تداوم پایش بلندمدت برای تحلیل رفتار توده لغزشی در پاسخ به محرک‌های آبی-اقلیمی در دیگر آبخیزهای مشابه کشور، پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی

پایداری شیب، پایش، تحلیل مکانی-زمانی، زمین‌لغزش، شکست شیب

مقدمه

اگرچه عامل‌های محیطی مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش‌ها، به‌ویژه در مناطق جنگلی، به‌طور گسترده بررسی شده‌اند (شفیعی کیگاسری و همکاران ۲۰۲۴)، اما ماهیت پنهان، توسعه تدریجی و رفتار پیچیده زمانی-مکانی این پدیده‌ها، سبب شده تا پایش و رفتارسنجی دقیق آن‌ها چالش اساسی شود (گوو و همکاران ۲۰۲۱). بسیاری از سامانه‌های متداول پایش، مبتنی بر مشاهده‌های تک‌بعدی است و نمی‌توان به‌طور هم‌زمان تغییر شکل‌ها و پاسخ‌های پویایی توده زمین‌لغزش را در مقیاس‌های مختلف، ثبت کرد (وانگ و

زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان یکی از مخاطره‌های طبیعی و ناپایداری دامنه‌ای (کاوایان و همکاران ۲۰۲۰؛ احسان و همکاران ۲۰۲۵) هر ساله در کشور خسارت‌های جانی و مالی سنگینی را در مناطق کوهستانی، پرباران و لرزه‌خیز، به‌همراه دارند (جویباری و همکاران ۲۰۱۶؛ دسترنج و نور ۲۰۲۱؛ درویشی و همکاران ۲۰۲۵). ازاین‌رو، برای کاهش خسارت‌های احتمالی دستیابی به اطلاعات شیوه سازوکار شروع، توسعه و پویایی حرکات زمین‌لغزشی، ضروری است.

همکاران ۲۰۲۲). افزون بر این، بخش قابل‌توجهی از زمین‌لغزش‌های ویران‌گر ثبت‌شده در سال‌های پیشین، به‌عنوان نواحی پرخطر شناسایی نشده‌اند؛ زیرا اغلب در مناطق صعب‌العبور، با پستی‌بلندی پیچیده و پوشش سطحی متراکم، توسعه یافته‌اند. از این‌رو، بازسازی تاریخچه حرکتی زمین‌لغزش‌ها، یکی از مؤلفه‌های مهم و ضروری برای درک پویایی و ارزیابی خطر آن‌ها است.

باین‌حال، اطلاعات مربوط به تاریخچه زمانی حرکات زمین‌لغزشی برای اکثر مناطق نامشخص است و روش‌های تاریخ‌گذاری مطلق به‌رغم کاربرد گسترده، با محدودیت‌هایی از جمله بازه زمانی محدود و نبودن قطعیت مواجه‌اند (لانگ و همکاران ۱۹۹۹؛ پنیک ۲۰۱۵). در چنین شرایطی پایش بلندمدت و پیوسته تغییر شکل توده زمین‌لغزش به‌عنوان رویکردی کارا و مؤثر برای شناسایی و پایش زمین‌لغزش‌های فعال و تحلیل رفتار حرکتی آن‌ها توصیه می‌شود. روش‌های پایش اندازه‌گیری مستقیم شامل روش زمین‌سنجی، روش عکس‌برداری نزدیک (شو ۲۰۱۴)، سامانه جهانی ناوبری ماهواره‌ای^۱ (GNSS) و تداخل‌سنجی^۲ (InSAR) (ژوو و همکاران ۲۰۱۹) است. به‌طور کلی، ابزارهای پایش جابجایی‌های سطحی زمین‌لغزش نیز شامل نقشه‌بردارها، ابزارهای عرض و طول جغرافیایی، ایستگاه‌های کل، حسگرهای جابجایی و اندازه‌گیرهای فاصله مادون‌قرمز است. با ابزارهای پایش می‌توان جابجایی مطلق سطح را مشاهده کرد، اما مناسب شرایط خارجی است (ژوو و همکاران ۲۰۱۹). در روش عکس‌برداری نزدیک از نقشه‌بردار نزدیک استفاده می‌شود تا به‌طور هم‌زمان دو نقطه ثابت مشاهده‌ای در موقعیت‌های مختلف، تصویربرداری شود و تغییرات موقعیت‌های متناظر برای هدف پایش تغییر شکل تحلیل شود و ذخیره‌سازی اطلاعات اندازه‌گیری آسان شود، اما در برابر شرایط جوی آسیب‌پذیر است (ژوو و همکاران ۲۰۲۵). در روش GNSS جابجایی و تغییر شکل را با ثبت ویژگی نقاط در موقعیت‌های ثابت پایش می‌کنند و اندازه‌ تغییرات آن‌ها را بر اساس تفاوت میان مختصات سه‌بعدی در دوره‌های مختلف به‌دست می‌آورند. این فناوری برای جمع‌آوری اطلاعات سریع است، ولی به‌دلیل پایه‌گذاری نقطه به نقطه و حساس بودن سیگنال نسبت به تداخل، نمی‌توان تغییرات

پیوسته سطح را به‌طور مستقیم مشاهده کرد (وانگ و همکاران ۲۰۲۲). با توجه به دشواری پایش‌بینی زمان رخداد، شناسایی و منطقه‌بندی مناطق مستعد زمین‌لغزش برای کاهش خسارت‌ها ضروری است. در این راستا، بررسی‌های پرشماری انجام‌شده است. موسوی و همکاران (۲۰۱۱) در آبخیز سجارود شمال ایران از تابع وایازی لجستیک برای مدل‌سازی خطر زمین‌لغزش از سنجه‌های شبکه جاده، بلندی، انحنای شیب، بارندگی و فاصله از گسل استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد فقط اثر شبکه جاده بر رخداد زمین‌لغزش معنادار بود و اثر دیگر سنجه‌ها بر افزایش دقت مدل قابل‌توجه نبوده و حذف شدند. آن‌ها بر اساس شاخص‌های آماری (ROC و R^2) دقت کلی مدل نهایی را $۸۵/۳\%$ گزارش کردند. رضوان‌زاده و همکاران (۲۰۱۷) در بخشی از مازندران، سه مدل نسبت فراوانی (FR)، وزن شواهد (WoE) و شاخص آماری (SI) را با استفاده از ۱۳ عامل مؤثر بر زمین‌لغزش ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که عملکرد (AUC) هر سه مدل مناسب و از $۷۹/۴۳$ تا $۸۱/۵۱\%$ بود و می‌توان از این مدل‌ها به‌عنوان ابزارهای قابل‌اطمینان برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش در منطقه بهره برد. دسترنج و نور (۲۰۲۰) برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش در بینالود، روش‌های AHP و منطق فازی در GIS را با یکدیگر مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند که روش AHP ^۳ با دقت $۸۱/۷\%$ برتر از روش فازی ($۷۵/۲\%$) بود و از نقشه‌های تهیه‌شده به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری برای کاهش خسارت‌های زمین‌لغزش، می‌توان استفاده کرد. شفیی کیگاسری و همکاران (۲۰۲۴) از سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش وایازی وزنی فراوانی برای پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در رامسر استفاده کردند. آن‌ها مهم‌ترین سنجه‌های مؤثر را عامل‌های شیب، خاک، زمین‌شناسی، فاصله از جاده و پوشش گیاهی معرفی کردند. افزون بر این، آن‌ها دریافتند که $۳۱/۷۹\%$ از منطقه در معرض لغزش شدید است و بیشترین خطر مربوط به جاده‌های شمال‌غرب و شرق است. ژانگ و چین (۲۰۲۵) برای بررسی علت ریزش‌های زمین به‌دلیل بارش در جنوب‌غربی چین از چهار گروه داده‌های بارش و داده‌های تاریخی ریزش‌های زمین (۲۰۱۸-۲۰۱۰) استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد ۸۰%

زمین‌لغزشی نامبرده انجام شد تا تصویر دقیقی از وضعیت فعالیت و الگوی تغییر شکل آن ارائه شود.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه شده

توده زمین‌لغزش چاسرکا در جنوب‌شرقی شهر گلوگاه (بخش بندپی شرقی) و در فاصله ۳۵ کیلومتری جنوب شهرستان بابل است. این منطقه در آبخیز سجاد رود و مساحت آن حدود ۷۲ هکتار است. زمین‌لغزش‌های رخ داده در این منطقه از نوع چرخشی مرکب بوده و اثرات آن بر زیرساخت‌ها و زندگی ساکنان قابل توجه است. افزون بر نابودی راه‌های روستایی و منازل مسکونی، این زمین‌لغزش‌ها موجب قطع ارتباط ۳۰ روستای ییلاقی منطقه فیروزجاه با شهرهای گلوگاه و بابل شده است. اجرای طرح‌های زیربنایی مانند لوله‌گذاری آب شرب، انتقال گاز، برق‌رسانی و تلفن در سال‌های ۹۰ تا ۹۵ نیز در تشدید این پدیده تأثیرگذار بوده است. با توجه به این مشکلات و اثرات اجتماعی و اقتصادی زمین‌لغزش‌ها، این منطقه به‌عنوان منطقه پژوهشی مناسب برای بررسی الگوهای زمین‌لغزش در مناطق مشابه شمال ایران انتخاب شد. موقعیت منطقه پژوهشی و پراکنش نقاط زمین‌لغزش در شکل ۱ و نمودار روندنمای پژوهش در شکل ۲، نشان داده شده است.

روش پژوهش

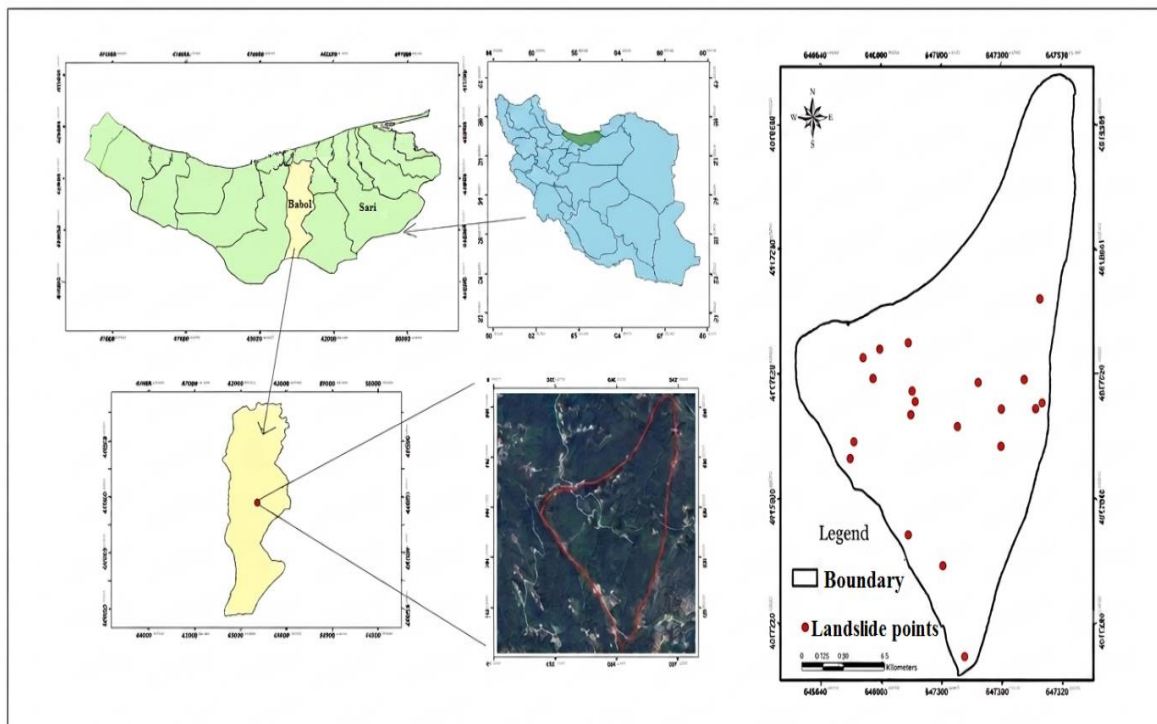
به‌منظور دستیابی به راهکارهای مهار زمین‌لغزش‌ها، مراحل مهم در اجرای این پژوهش شناسایی سازوکارهای رخداد حرکت و عامل‌های اصلی رانش بود. می‌توان با استفاده از سامانه‌ها و روش‌های مختلفی ازجمله روش‌های سنجش از دور، تصویرسنجی، نقشه‌برداری، مشاهده‌ای، زمین‌فناوری و زمین‌فیزیکی، جابجایی سطح و تغییر شکل زمین در مدت زمین‌لغزش پایش کرد (یوردانوف و همکاران ۲۰۲۱؛ میننو و همکاران ۲۰۲۵).

ریزش‌های زمین در فصل سیلاب (آوریل-ژوئیه) رخ داده است. این پژوهشگران بیشترین تراکم را در شیب‌های پیچیده مشاهده کردند.

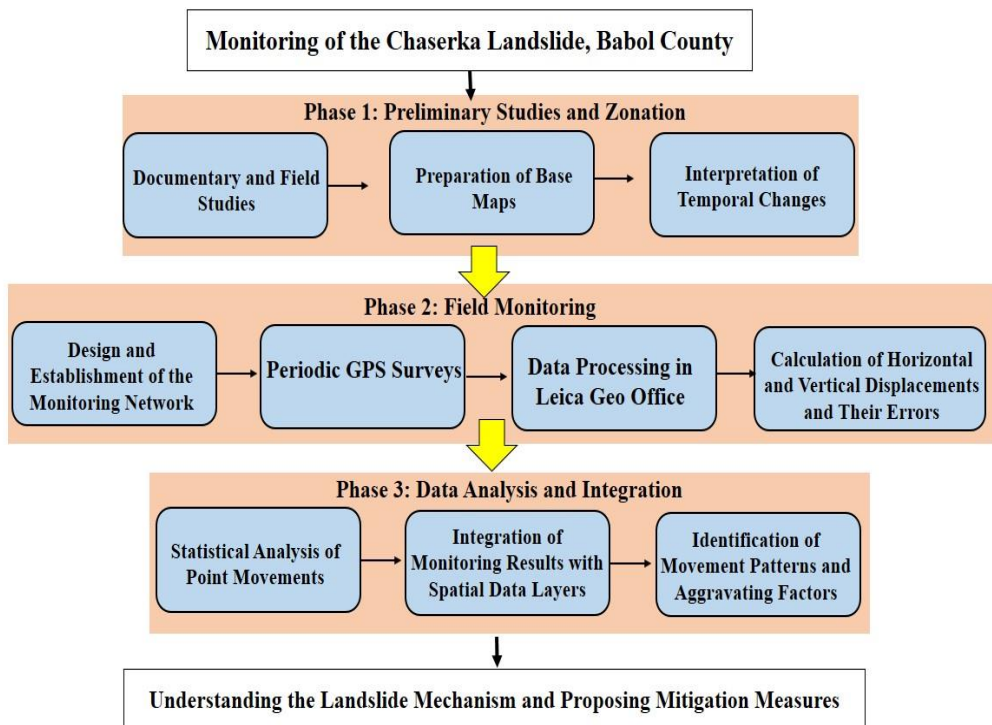
منحنی‌های مؤثر شدت-مدت (EID) و تحلیل حساسیت نشان دادند بهترین عملکرد در پیش‌بینی ریزش‌های زمین مربوط به داده‌های CMFD ($R^2=0/9529$) است. ترکیب فراوانی حرکات شناسایی شده با توزیع مکانی آن‌ها، اطلاعات بسیار مهمی برای تعیین خطر زمین‌لغزش در مناطق جنگلی، به‌ویژه مناطقی که منابع اطلاعاتی دیگری درباره جابجایی‌های زمین‌لغزشی برای آن‌ها در دسترس نیست، فراهم می‌آورد.

بر پایه نتایج بررسی‌های پیشین، تحلیل پایش و رفتارسنجی مکانی-زمانی الگوهای حرکتی زمین‌لغزش‌ها یکی از مؤلفه‌های مهم برای درک پویایی و ارزیابی خطر توده‌های ناپایدار است. اگرچه پدیده زمین‌لغزش در پژوهش‌های پرشماری در شمال کشور، ازجمله آبخیزهای شلمانرود و چاکرود در استان گیلان (شعبانی و همکاران، ۲۰۱۵؛ مهرپویا ۲۰۲۴)، آبخیز رامیان در استان گلستان (صالحی‌پورمیلانی و یمانی ۲۰۱۸)، آبخیز نکارود و شهرستان نور در استان مازندران (زالی و شاهدی، ۲۰۲۱؛ شریفی و همکاران، ۲۰۲۲) و گسله خزر در البرز مرکزی (نظری و همکاران، ۲۰۲۱) بررسی شده است، اما هدف غالب این پژوهش‌ها شناسایی، مدل‌سازی، پهنه‌بندی و تحلیل عامل‌های مؤثر بوده است و همچنان داده‌های مبتنی بر پایش پیوسته و رفتارسنجی تغییر شکل توده‌های زمین‌لغزشی ناکافی و محدود است.

در این راستا، نتایج پژوهش‌های انجام شده برای پایش و رفتارسنجی مکانی-زمانی توده زمین‌لغزشی منطقه چاسرکا در شهرستان بابل که یکی از نواحی مستعد ناپایداری دامنه‌ای است، نیز محدود و ناکافی است. ازاین‌رو، این پژوهش با هدف پایش پیوسته و تحلیل رفتار حرکتی توده



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه‌شده در سطح استان مازندران و ایران.
Figure 1- Location of the study area in the Mazandaran Province and Iran.



شکل ۲- روندنمای پژوهش برای پایش و تحلیل زمین‌لغزش چاسرکا.
Figure 2- Research Flowchart for Monitoring and Analysis of the Chaserka Landslide.

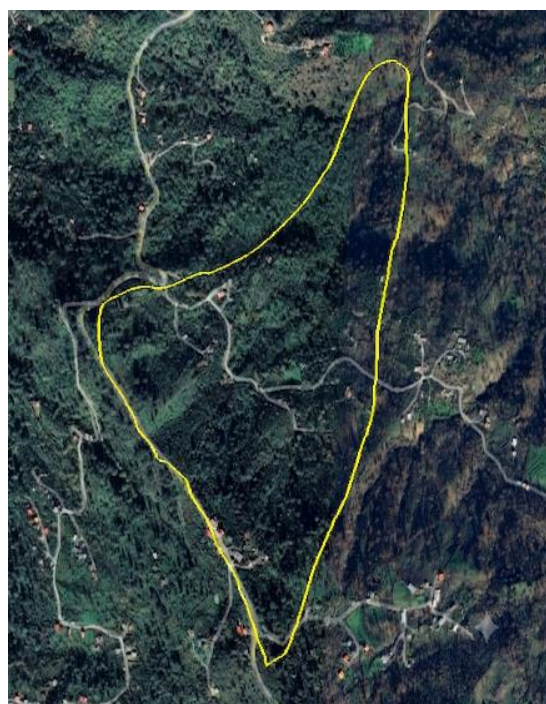
به‌عنوان نمونه‌های مهم انتخاب شدند. با این رویکرد می‌توان تغییرات جغرافیایی و رفتاری توده زمین‌لغزش در طول زمان را شناسایی کرد و به درک بهتری از عامل‌های اثرگذار بر پایداری آن، دست‌یافت.

تهیه نقشه‌های پستی‌بلندی و پوشش زمین چاسرکا
با استفاده از نقشه رقومی بلندی (DEM) با دقت 10×10 متر، نقشه‌های اولیه شیب، جهت و بلندی منطقه تهیه شد. بررسی‌های پستی‌بلندی در منطقه چاسرکا نشان داد بیشترین عامل اثرگذار بر فعال‌سازی لغزش‌های چرخشی، صفحه‌ای و حرکت گل‌آلود شیب‌های از ۲۵ تا ۴۵٪ است. این بازه شیب معمولاً در سازندهای حساس به لغزش (مارن، شیل، رس‌های نئوژن و آبرفت‌های اشباع‌شده کوهپایه‌ای) مشاهده شد. تصویر پوشش زمین با استفاده از گوگل‌ارث و پستی‌بلندی منطقه چاسرکا در شکل ۳، نشان‌داده شده است.

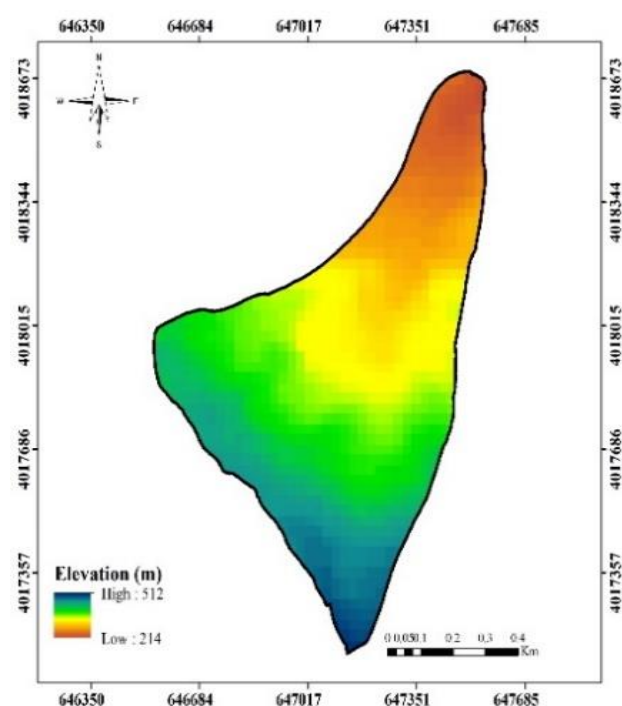
مراحل اولیه پژوهش شامل ارزیابی بررسی‌های پیشین، شناسایی منطقه لغزشی با انجام بازدیدهای اولیه به‌منظور آشنایی با زمین‌لغزش‌های موجود، ثبت اطلاعات عمومی و توجیه منطقه، تعیین مرز توده لغزشی با استفاده از دستگاه GPS دستی و تعیین مرز محدوده لغزش به‌وسیله نقشه‌های پستی‌بلندی و تصویرهای ماهواره‌ای، بود.

شناسایی تغییرات تاریخی توده زمین‌لغزش

با استفاده از تصویرهای تاریخی سامانه گوگل‌ارث و پیش از انجام بازدیدهای میدانی، پیشینه تغییرات تاریخی توده زمین‌لغزش چاسرکا، به‌طور دقیق بررسی شد. در این راستا، از تصویرهای موجود در بازه زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۴ بهره‌برداری شد تا امکان تحلیل روند تغییرات در طول زمان فراهم آید. برای بررسی دقیق وضعیت توده زمین‌لغزش در این سال‌ها، پنج سال ۲۰۱۰، ۲۰۱۳، ۲۰۱۶، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۵



(الف)



(ب)

شکل ۳- تصویر پوشش زمین با استفاده از گوگل‌ارث (الف) پستی‌بلندی منطقه چاسرکا (ب).

Figure 3 – Land cover image using Google Earth (a) topography map of the Chaserka Region (b).

شبکه ای با ۲۶ نقطه طراحی شد. این شبکه شامل چهار نقطه مبنا در محل های ثابت و ۲۲ نقطه پایش جابجایی در محل درزها، شکاف ها، توده های مشکوک به لغزش و جابجایی سطحی زمین بود (شکل ۴). این نقاط به گونه ای انتخاب شدند تا موانع (درختان، تیر برق، ساختمان و...) کمترین اثر را بر امواج میان منبع و گیرنده داشته باشند و معمولاً در مکان هایی با تراکم کمتری از درخت و پوشش گیاهی مستقر می شوند. نمایی از آثار ویرانگر زمین لغزش در مناطق مختلف با انواع پوشش گیاهی در روستای چاسرکا در شکل ۵، نشان داده شده است.

ایجاد شبکه های رفتارسنجی منطقه لغزشی

در این مرحله، موقعیت تمام نقاط ثابت شبکه (نقاط مبنا) روی زمین با استفاده از GPS تعیین شد و پس از حفاری، این نقاط نصب شدند. شبکه نقاط ثابت شامل چهار نقطه مبنا بود که معمولاً در محدوده ای خارج از پیرامون توده لغزشی و در مکان هایی که زمین ثابت و بدون حرکت بود، انتخاب شدند و با مقایسه تفاوت مختصات محاسبه شده از حداقل دو دوره مشاهده ای برای تعیین جابجایی، استفاده شدند. به منظور رفتارسنجی جابجایی سطحی به دلیل پدیده زمین لغزش در روستای چاسرکا و مناطق پیرامون آن،



شکل ۴- نمای قائم از شبکه رفتارسنجی جابجایی سطحی زمین در زمین لغزش روستای چاسرکا.

Figure 4 - Vertical view of the surface ground displacement behavior measurement network in the Chasarka Village landslide.



شکل ۵- نمایی از آثار ویرانگر زمین لغزش در مناطق مختلف با انواع پوشش گیاهی در روستای چاسرکا.

Figure 5 - A view of the destructive effects of landslides in various areas with different types of vegetation cover in the Chasarka Village.

این اساس، بیشتر پوشش های جنگلی در جهت های شمال تا شرق و زاویه با زاویه حداکثر ۵۰ درجه با زمین لغزش های منطقه مرتبط بودند. افزون بر این، بیشترین ژرفای زمین در دامنه شمال غربی منطقه ۵۰ سانتی متر بود.

بر اساس یافته های کیفی به دست آمده از پرسشنامه مشخص شد که تغییرات پوشش جنگلی در منطقه چاسرکا قابل توجه است (جدول ۱). در وضعیت قبل از رخداد زمین لغزش، بیشتر مساحت منطقه تحت پوشش جنگلی بود، اما در هنگام رخداد زمین لغزش، تغییرات چشمگیری در پوشش زمین رخ داد. بسیاری از کاربری های جنگلی به ترکیب هایی از جنگل و جاده تغییر یافتند و کاربری برخی دیگر به زمین بایر تبدیل شد. این تغییرات بیشتر به دلیل اثرات نابودگر زمین لغزش ها و نیاز به ایجاد زیرساخت های جدید برای دسترسی به مناطق آسیب دیده رخ داده است. پس از رخداد زمین لغزش، وضعیت پوشش زمین به طور قابل توجهی تغییر کرد و بخش گسترده ای از کاربری مناطق جنگلی به زمین های زراعی و جاده ها تغییر یافت. این موضوع سبب کاهش چشمگیر سطح پوشش جنگلی شد. این روند نشان دهنده فشارهای انسانی و نیاز به توسعه زیرساخت ها و فعالیت های اقتصادی در منطقه است. به طور کلی، این تغییرات هم سبب کاهش تنوع زیستی و هم سبب اثرات منفی بر بوم سازگان و پایداری آن در منطقه می شوند.

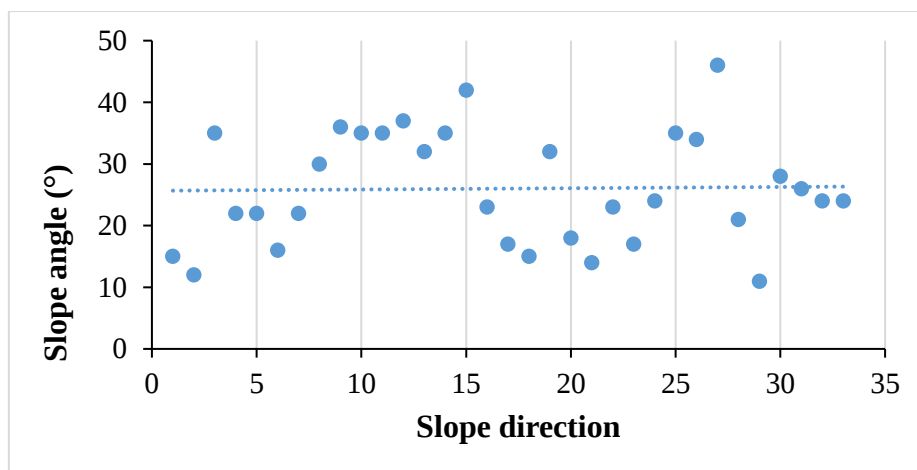
بررسی عکس های هوایی تصحیح شده هندسی مربوط به دوره های مختلف و مقایسه روند تغییرات

در این مرحله پنج دوره (پنج دهه) عکس های هوایی از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۸۳ مربوط به سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح و سازمان نقشه برداری کل کشور، تهیه و با انجام تصحیحات هندسی روی آنها تغییرات پوشش، مشاهده شد. پردازش و محاسبات سرشکنی شبکه زمین سنجی پایش زمین لغزش

برای پردازش مشاهده ها و انجام محاسبات شبکه زمین سنجی تعیین موقعیت ماهواره ای، از نرم افزار تجاری Leica Geo Office نسخه ۷ استفاده شد. با بهره گیری از این نرم افزار و با استفاده از روش برآورد کمترین مربعات می توان داده های مشاهده ای یک و دو فرکانسه را برای سرشکنی شبکه، پردازش کرد (جویباری و همکاران ۲۰۱۶). افزون بر این، با استفاده از این نرم افزار می توان مدل های مناسبی برای تعدیل خطاهای محیطی جوی (اثر تروپوسفر) طراحی کرد. ورودی این نرم افزار، فایل های مشاهده ای در قالب Rinex و خروجی آن، مختصات سه بعدی منحصربه فرد برای هر یک از نقاط شبکه در هر مرحله مشاهده ای است.

نتایج و بحث

برای تحلیل وضعیت منطقه، پرسشنامه ای به وسیله افراد بومی تهیه و نتایج به شکل نموداری ارائه شد. با استفاده از این نمودارها پوشش جنگل بر اساس سنجه های جهت شیب و زاویه شیب تحلیل شد. نتایج بیانگر رابطه معنادار میان جهت و زاویه شیب و رخداد زمین لغزش بود (شکل ۶). بر



شکل ۶- وضعیت کاربری جنگل بر اساس جهت شیب و زاویه شیب (درجه) در منطقه.

Figure 6 - Forest use status based on slope direction and slope angle (degree) in the region.

جدول ۱- تغییرات کاربری جنگل در منطقه چاسرکا.

Table 1 - Forest use changes in the Chaserka Region.

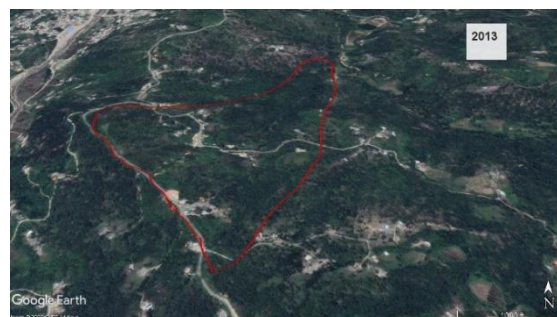
Land-cove before slipping	Land-cove during slipping	Land-cove after slipping
Forest	Forest, Road	Road, Bare
Forest	Forest, Road, S	Forest, Road, S, Bare
Forest	Forest, Road	Road, Bare
Forest	Agricultural	Agricultural, Bare
Forest	Forest	Forest, Bare
Forest	Agricultural	Agricultural, Bare
Forest	Forest, Road	Bare
Forest	Forest	Forest, Bare
Forest	Road, Road	Forest, Road, Bare
Forest	Forest, Road	Road, Bare
Forest	Forest, Agricultural, Road, Agricultural	Agricultural, Road, Bare

فعالیت‌های دامداری است که با حذف بخشی از پوشش جنگلی و خاک‌برداری در دامنه‌ها همراه بوده‌اند. افزون بر این، افزایش باغ‌های میوه در شیب‌های متوسط تا زیاد با ایجاد تراس‌های غیرمهندسی، تعادل طبیعی دامنه را مختل کرده‌اند. بخش بزرگی از زمین‌های مرتعی نیز نابود شده یا خارج از چارچوب غیرقانونی به باغ تغییر کاربری یافته‌اند. نتایج این تحلیل نشان داد در ۴۰ سال گذشته، وضعیت بوم‌شناختی منطقه چاسرکا از یک ساختار نسبتاً پایدار به یک ساختار نیمه‌مصنوعی تغییر یافته است. این موضوع سبب افزایش قابل توجه خطر پدیده‌هایی مانند زمین‌لغزش شده است. نابودی پوشش گیاهی در شیب‌های ناپایدار، ایجاد مسیرهای دسترسی در بلندی‌ها و گسترش فعالیت‌های انسانی در نقاط حساس زمین‌ریخت‌شناختی، از مهم‌ترین عامل‌های تشدید ناپایداری زمین در این منطقه به‌شمار می‌آیند (شکل ۷).

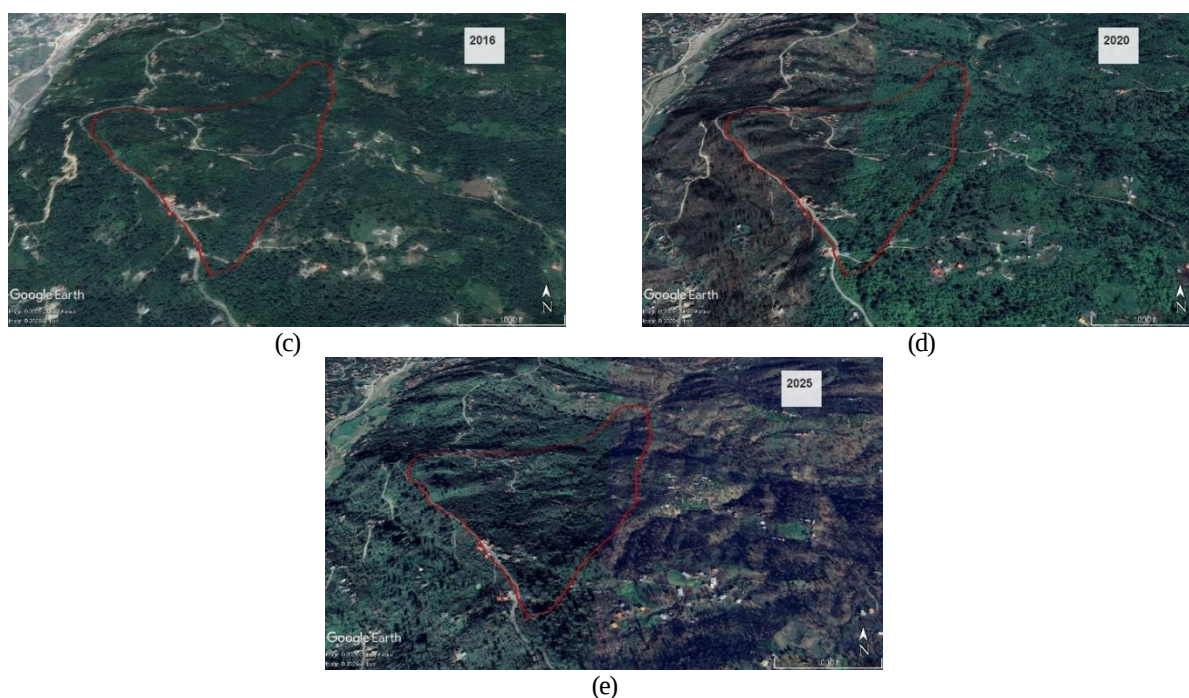
در چهار دهه پیشین، نتایج بررسی روند تغییرات پوشش زمین در منطقه کوهستانی چاسرکا بر پایه تحلیل داده‌های گوگل ارث و بررسی‌های میدانی، بیانگر تحول قابل توجهی در ساختار چشم‌انداز و الگوهای بهره‌برداری از زمین بود. در دهه ۱۳۶۰، پوشش بخش گسترده‌ای از منطقه طبیعی و بکر بود و دامنه‌های شمالی و شمال شرقی بیشتر پوشیده از جنگل‌های انبوه با درختان بومی (ممرز، راش، افرا و بلوط) بودند و در تثبیت شیب‌ها نقش مؤثری داشتند. در آن زمان، مراتع طبیعی در نواحی بلندتر و زمین‌های کشاورزی سنتی در مناطق پایین دست به‌طور محدود توسعه یافته بودند و ساخت و سازها بسیار پراکنده در قالب بافت‌های کوچک روستایی بودند. از سوی دیگر، تحلیل داده‌های دو دهه پیشین نشان‌دهنده روند افزایشی نابودی پوشش طبیعی و گسترش مداخلات انسانی بود. بارزترین تحولات شامل افزایش سطح ساخت و سازها، گسترش جاده‌های فرعی و مسیرهای دسترسی به درون شیب‌ها با هدف ویلاسازی و



(a)



(b)

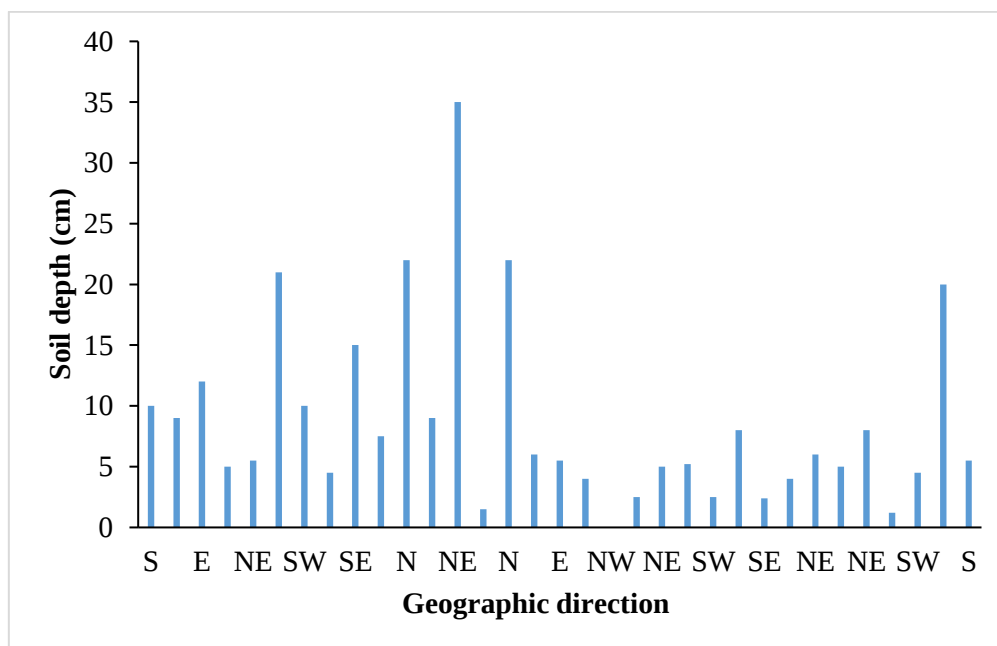


شکل ۷- تغییرات منطقه چاسرکا در پنج سال: ۲۰۱۰ (الف)، ۲۰۱۳ (ب)، ۲۰۱۶ (پ)، ۲۰۲۰ (ت) و ۲۰۲۵ (ث).

Figure 7 - Changes in the Chaserka Region in the five years: 2010 (a), 2013 (b), 2016 (c), 2020 (d) and 2025 (e).

۳۵ سانتی‌متر و در جهت شمال شرقی و جنوب غربی منطقه چاسرکا بود. کمترین آن کمتر از پنج سانتی‌متر و در دامنه شمال غربی منطقه مشاهده شد.

وضعیت ژرفای خاک منطقه چاسرکا در جهت‌های جغرافیایی مختلف در شکل ۸، نشان داده شده است. بر پایه شکل ۸، بیشترین ژرفای خاک منطقه بر اساس بافت خاک



شکل ۸- نتایج بررسی ژرفای خاک در جهت‌های جغرافیایی مختلف منطقه.

Figure 8 - Results of soil depth investigation in different geographical directions of the region.

و سنگ‌شناسی‌های ناپایدار، زمینه‌ساز بیشترین لغزش‌های مشاهده‌شده در منطقه است.

پردازش و محاسبات سرشکنی شبکه زمین‌سنجی پایش زمین‌لغزش

نتایج به‌دست‌آمده از مختصات سرشکن‌شده به‌همراه ابعاد بیضی خطا و خطای بلندی نقاط مبناء در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ در پنج مرحله مشاهده‌ای، نشان داد دامنه دقت ثبت تغییرات نرم‌افزار نامبرده از شش، یک، یک، دو و دو میلی‌متر برای مؤلفه مسطحاتی (بیضی خطا در سطح اطمینان ۹۵٪) و نه، دو، دو، چهار و سه میلی‌متر (فاصله اطمینان ۹۵٪) برای مؤلفه بلندی نقاط است. نتایج این تغییرات در پنج مرحله مشاهده‌ای در جدول‌های ۲ تا ۶ نشان‌داده شده است.

در بررسی نقشه‌های شیب، جهت دامنه و زمین‌شناسی منطقه چاسرکا در سامانه GIS، مشاهده شد که بیشترین اندازه لغزش‌های فعال و لغزش‌های قدیمی تثبیت‌شده مربوط به دامنه‌های شمال‌شرقی (NE)، شرقی (E) و شمال غربی (NW) است. به‌طور کلی، در منطقه چاسرکا، جهت دامنه یک عامل مهم اثرگذار بر رخداد لغزش زمین است. نقش و اثرگذاری آن بر ناپایداری شیب هم از دیدگاه هندسی (زاویه تابش، جریان سطحی و ساختار دامنه)، و هم از دیدگاه تعامل با اقلیم خزری و شرایط زمین‌شناسی حائز اهمیت است. بر این اساس، ترکیب جهت‌های شمال‌شرقی، شرقی و شمال‌غربی با شیب‌های متوسط تا زیاد (۴۵-۲۰٪)

جدول ۲- مختصات سرشکن‌شده شبکه نقاط مبناء، به‌همراه ابعاد بیضی خطا و خطای بلندی نقاط در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ (مرحله اول مشاهده‌ای).

Table 2 - The distributed coordinates of the base point network, along with the dimensions of the error ellipse and the elevation error of the points on the surface and the 95% confidence interval (first observational stage).

Base points	X (m)	Y (m)	Elevation (m)	Slope angle (m)	B (m)	PHI (deg)	Std.Hgt (m)
R1	646863.6	4018830.3	361.79	0.0031	0.002	-27	0.0062
R2	646731.9	40180816.6	378.33	0.0014	0.001	-14	0.0035
R3	647286.6	4016927.6	543.2	0.0062	0.0043	20	0.0093
R4	647722.2	4017945.9	350.6	0.0000	0.0000	90	0.0000

جدول ۳- مختصات سرشکن‌شده شبکه نقاط مبناء، به همراه ابعاد بیضی خطا و خطای بلندی نقاط در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ (مرحله دوم مشاهده‌ای).

Table 3 - The distributed coordinates of the base point network, along with the dimensions of the error ellipse and the elevation error of the points on the surface and the 95% confidence interval (second observational stage).

Base points	X (m)	Y (m)	Elevation (m)	Slope angle (m)	B (m)	PHI (deg)	Std.Hgt (m)
R1	646863.6	4018830.3	361.79	0.0006	0.0005	-4	0.0010
R2	646731.9	40180816.6	378.33	0.0005	0.0004	-3	0.0008
R3	647286.6	4016927.6	543.2	0.0007	0.0006	-4	0.0011
R4	647722.2	4017945.9	350.6	0.0005	0.0004	-3	0.0008

جدول ۴- مختصات سرشکن‌شده شبکه نقاط مبناء، به همراه ابعاد بیضی خطا و خطای بلندی نقاط در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ (مرحله سوم مشاهده‌ای).

Table 4 - The distributed coordinates of the base point network, along with the dimensions of the error ellipse and the elevation error of the points on the surface and the 95% confidence interval (third observational stage).

Base points	X (m)	Y (m)	Elevation (m)	Slope angle (m)	B (m)	PHI (deg)	Std.Hgt (m)
R1	646863.6725	4018830.3060	361.7858	0.0009	0.0008	-32	0.0016
R2	646731.9330	4018081.6031	378.3438	0.0009	0.0009	-47	0.0017
R3	647286.6762	4016927.6251	543.1991	0.0006	0.0006	-20	0.0012
R4	647722.2240	4017945.9785	350.6432	0.0008	0.0007	-8	0.0015

جدول ۵- مختصات سرشکن شده شبکه نقاط مبنا، به همراه ابعاد بیضی خطا و خطای بلندی نقاط در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ (مرحله چهارم مشاهده‌ای).

Table 5 - The distributed coordinates of the base point network, along with the dimensions of the error ellipse and the elevation error of the points on the surface and the 95% confidence interval (fourth observational stage).

Base points	X (m)	Y (m)	Elevation (m)	Slope angle (m)	B (m)	PHI (deg)	Std.Hgt (m)
R1	646863.6	4018830.3	361.79	0.0019	0.0012	-27	0.0034
R2	646731.9	40180816.6	378.33	0.0018	0.0013	-23	0.0033
R3	647286.6	4016927.6	543.2	0.0015	0.0010	-24	0.0027
R4	647722.2	4017945.9	350.6	0.0019	0.0012	-27	0.0034

جدول ۶- مختصات سرشکن شده شبکه نقاط مبنا، به همراه ابعاد بیضی خطا و خطای بلندی نقاط در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ (مرحله پنجم مشاهده‌ای).

Table 6 - The distributed coordinates of the base point network, along with the dimensions of the error ellipse and the elevation error of the points on the surface and the 95% confidence interval (fifth observational stage).

Base points	X (m)	Y (m)	Elevation (m)	Slope angle (m)	B (m)	PHI (deg)	Std.Hgt (m)
R1	646863.6	4018830.3	361.79	0.0014	0.0007	-2	0.0016
R2	646731.9	40180816.6	378.33	0.0010	0.0005	-2	0.0012
R3	647286.6	4016927.6	543.2	0.0020	0.0010	-2	0.0023
R4	647722.2	4017945.9	350.6	0.0010	0.0005	-2	0.0012

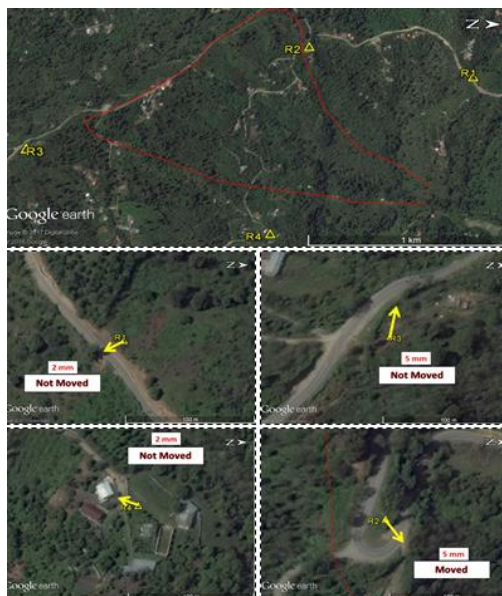
رفتارسنجی جابجایی شبکه نقاط مبنا

نتایج پردازش و سرشکنی شبکه نقاط مبنا در مراحل اول تا پنجم مشاهده‌ای با روش شبکه آزاد (Inner-Constraint)، با وجود ثبت جابجایی‌های نامحسوس مسطحاتی و بلندی، مؤید ثبات نسبی شبکه بود. نتایج به دست آمده از اختلاف موقعیت مراحل مشاهده‌ای اول تا پنجم شبکه نقاط مبنا در جدول‌های ۷ و ۸ ارائه شده است و بردارهای جابجایی نیز در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. نتایج جدول ۷، بیانگر الگوی حرکتی متفاوت داده‌های پایش چهار نقطه شاهد (R1 تا R4) در بازه زمانی ۱۰۶ روزه، در منطقه لغزشی، بود. به طوری که جابجایی بلندی نقطه R1 اندک و رو به پایین (۸- میلی‌متر) و جابجایی افقی آن نیز اندک (۲ میلی‌متر) بود اما این جابجایی‌ها از دیدگاه آماری معنادار نبودند. این یافته بیانگر آن است که احتمالاً حرکت این نقطه در این بازه از حداقل قابلیت تشخیص شبکه فراتر نرفته است. حرکت نقطه R2 برخلاف دیگر نقاط، در هر دو مؤلفه از دیدگاه آماری معنادار بود. جابجایی افقی این نقطه با دقت اندازه‌گیری زیاد (بیضی خطای کوچک و خطای بلندی ۴ میلی‌متر) همراه با فرازش قابل توجهی (۱۷+ میلی‌متر) ۵ میلی‌متر بود که آن را به شاخص اصلی حرکت فعال تبدیل کرد. برای نقطه R3 اگرچه جابجایی‌هایی به اندازه ۵ میلی‌متر در مؤلفه افقی و ۶- میلی‌متر در مؤلفه قائم برآورد شد، اما داده‌های آن

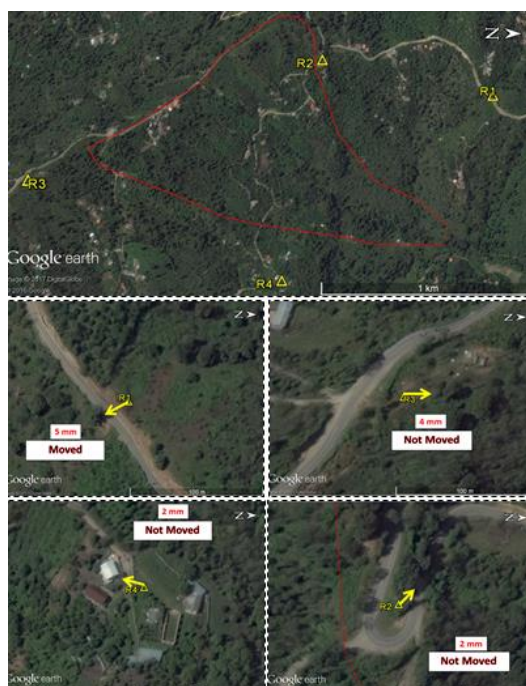
به دلیل دقت بسیار کم (بزرگ‌ترین بیضی خطا با ابعاد ۹ و ۷ میلی‌متر و خطای بلندی ۱۴ میلی‌متر) از دیدگاه آماری قابل اطمینان نبود و بر اساس آن‌ها نمی‌توان وجود حرکت قطعی را تأیید کرد. سرانجام، نقطه R4 مشابه R1، بدون حرکت معنادار و جابجایی‌های اندک ثبت شده آن در محدوده خطای اندازه‌گیری بود. در مجموع، از میان چهار نقطه پایش شده، فقط نقطه R2 به عنوان شاخص قابل اتکای حرکت فعال زمین لغزه در بازه ۱۰۶ روزه، شناسایی شد. این یافته بیانگر فعال بودن فقط یک بخش خاص از لغزش یا متفاوت بودن نرخ حرکت در زیر بخش‌های مختلف آن است. داده‌های نقاط دیگر، یا حرکت معناداری را نشان ندادند (R1 و R4) و یا به دلیل خطای زیاد نامعتبر بودند (R3). بر اساس نتایج پایش زمین‌سنجی در بازه ۱۱۱ روزه مراحل چهارم و پنجم (جدول ۸) مشخص شد که نقطه R1 با ثبت یک جابجایی افقی معنادار (۵ میلی‌متر) و مؤلفه عمودی بدون جابجایی معنادار، نشان‌دهنده یک سازوکار حرکتی غالباً انتقالی در آن بخش از دامنه است. از سوی دیگر، نقطه R3 یک رفتار کاملاً متفاوت را با رخداد یک فرونشست قائم معنادار (۱۳- میلی‌متر) و بدون حرکت افقی معنادار نشان داد که می‌تواند به دلیل سازوکار چرخشی یا فرآیند تراکم و تحکیم درونی توده باشد. دو نقطه R2 و R4 بدون هرگونه جابجایی معنادار در هر دو مؤلفه نشان‌دهنده وضعیت پایدار یا نرخ تغییر شکل بسیار ناچیز در آن بخش‌ها در این بازه

می‌بایست در مقیاس محلی انجام شود و نباید فقط بر میانگین‌گیری منطقه‌ای تأکید داشت. این موضوع برای مدل‌سازی صحیح خطر و تعیین مرزهای دقیق بخش‌های فعال زمین‌لغزش ضروری است. نمای کلی تغییرات در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

زمانی بودند. این پراکندگی مکانی در الگوهای حرکت (انتقالی محض در R1، قائم محض در R3 و سکون در R2 و R4) به‌خوبی مؤید ناهمگن بودن رفتار پویایی توده لغزشی و فعال بودن ترجیحی زیر بخش‌های خاصی از آن است. چنین مشاهده‌ای مؤید آن است که تفسیر نتایج پایش



شکل ۹- نمودار نقاط مبنا و بردار جابجایی (جهت و اندازه) میان سه مرحله اول مشاهده‌ها روی تصویر هوایی.
Figure 9- Diagram of the reference points and the displacement vector (direction and magnitude) between the first three stages of observations on the aerial image.



شکل ۱۰- نمودار نقاط مبنا و بردار جابجایی (جهت و اندازه) میان مرحله چهارم و پنجم مشاهده‌ها روی تصویر هوایی.
Figure 10 - Diagram of the reference points and the displacement vector (direction and magnitude) of the boundary between the fourth and fifth stages of observations on the aerial image.

جدول ۷- اندازه‌های جابجایی‌های مسطحاتی و بلندی به‌همراه ابعاد بیضی خطای نسبی جابجایی و خطای تعیین جابجایی بلندی شبکه نقاط شاهد منطقه لغزشی در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ در بازه ۱۰۶ روزه.

Table 7 - The values of planar and elevational displacements along with the ellipse dimensions, relative displacement error and elevational displacement determination error of the network of witness points of the landslide area at the surface and the 95% confidence interval in the 106-day period.

Base points	ΔX (mm)	Δy (mm)	D (mm)	AZ (deg)	a (mm)	b (mm)	Horizontal Status	Δz (mm)	$Sd.\Delta z$ (mm)	Vertical Status
R1	1	-2	2	149	3	1	N	-8	10	N
R2	4	3	5	52	2	1	Y	17	4	Y
R3	-5	0	5	275	9	7	N	-6	14	N
R4	0	-2	2	193	2	1	N	-3	3	N

* Y : نشان‌دهنده حرکت نقطه است. * N : نشان‌دهنده عدم حرکت نقطه است.

* Y = Point analyzed as moving. * N = Point analyzed as non-moving.

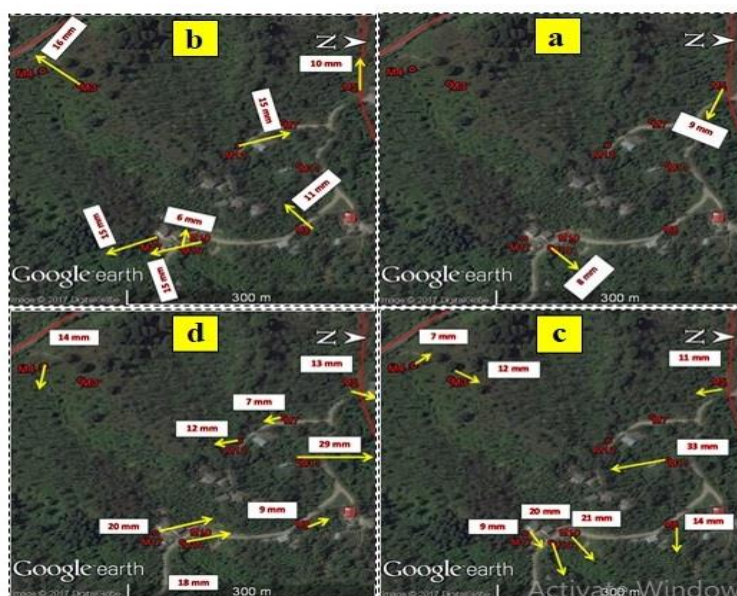
جدول ۸- اندازه‌های جابجایی‌های مسطحاتی و بلندی به‌همراه ابعاد بیضی خطای نسبی جابجایی و خطای تعیین جابجایی بلندی شبکه نقاط شاهد منطقه لغزشی در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ در بازه ۱۱۱ روزه مرحله چهارم و پنجم مشاهده‌ها.

Table 8 - The values of planar and elevational displacements along with the ellipse dimensions, relative displacement error and elevational displacement determination error of the network of witness points of the landslide area at the surface and the 95% confidence interval in the 111-day period of the fourth and fifth observation stages.

Base points	ΔX (mm)	Δy (mm)	D (mm)	AZ (deg)	a (mm)	b (mm)	Horizontal Status	Δz (mm)	$Sd.\Delta z$ (mm)	Vertical Status
R1	3	-4	5	147	2	1	Y	6	6	N
R2	-2	2	3	317	3	1	N	3	5	N
R3	0	4	4	0	4	2	N	-13	5	Y
R4	-1	-2	2	192	2	1	N	3	6	N

* Y به‌منزله تحلیل به حرکت نقطه می‌باشد. * N به‌منزله تحلیل به عدم حرکت نقطه می‌باشد.

* Y = Point analyzed as moving. * N = Point analyzed as non-moving.



شکل ۱۱- بزرگنمایی‌شده از جهت و اندازه بردار جابجایی مسطحاتی شبکه نقاط شاهد در بخش الف) جابجایی میان مرحله اول و دوم؛ ب) جابجایی میان مرحله دوم و سوم؛ ج) جابجایی میان مرحله سوم و چهارم؛ د) جابجایی میان مرحله چهارم و پنجم.

Figure 11 - Enlarged view of the direction and magnitude of the planar displacement vector of the control grid points in section a) Displacement of the first and second stage boundary; b) Displacement of the second and third stage boundary; c) Displacement of the third and fourth stage boundary; d) Displacement of the fourth and fifth stage boundary.

منطقه پوشیده از جنگل‌های بکر با درختان بومی (راش، مرمرز، بلوط و افرا) بودند که همراه با ریشه‌های ژرف، سبب پایداری خاک در برابر فرسایش و لغزش شده بودند؛ اما در دو دهه پیشین، بخش گسترده‌ای از این پوشش جنگلی بر اساس نتایج جدول ۱، به‌شکل نظام‌مند به جاده، زراعت و ساخت و ساز ویلایی تبدیل شده است. این تغییرات هم پوشش گیاهی را نابود کرده و هم با ایجاد برش‌های مصنوعی در شیب، تراس‌های غیرمهندسی و مسیرهای دسترسی در بلندی‌ها، تعادل سازه‌ای آب‌های زیرزمینی شیب‌ها را به‌شدت مختل کرده‌اند.

نتایج بررسی‌های بورنانه و بوهدا (۲۰۲۱) و پاچکوکودو و همکاران (۲۰۲۳) نیز مبنی بر اثر تغییر کاربری زمین بر افزایش تعداد و شدت زمین‌لغزش‌ها با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. بر اساس داده‌های میدانی، در ۶۲/۷٪ موارد، فعالیت‌های انسانی پیش از رخداد لغزش اجرایی شده‌اند که این یافته نشان‌دهنده رابطه علی مستقیم میان مداخله انسان و فعال‌سازی لغزش‌ها است. در سطح سوم، نتایج پایش زمین‌سنجی با استفاده از شبکه نقاط مبناء و نرم‌افزار Leica Geo Office، نشان‌دهنده جابجایی‌های مسطحاتی و بلندی در حد چند میلی‌متر بود (جدول‌های ۲ تا ۶)، اما الگوی این جابجایی‌ها به‌ویژه در بازه‌های بارانی نشان‌دهنده فرآیند تدریجی ناپایداری بود. بر اساس نتایج جدول‌های ۷ و ۸، جابجایی‌های برخی نقاط (مانند R2 و R3) در بازه‌های مشاهده‌ای ۱۰۶ و ۱۱۱ روزه، در جهت‌های خاصی (مثلاً زاویه ۵۲ یا ۰°) معنادار بود که با جهت غالب لغزش‌های منطقه (شمال تا شرق) همخوانی داشت. این یافته بسیار با اهمیت، بیانگر آن است که زمین‌لغزش‌ها در چاسرکا رویدادهای ناگهانی نیستند، بلکه نتیجه نابودی تدریجی مقاومت برشی خاک هستند که سرانجام به شکست ناگهانی منجر می‌شود. از این‌رو، زنجیره علی-معلولی به‌شکل زیر تبیین می‌شود:

نابودی پوشش جنگلی → کاهش مقاومت برشی + افزایش نفوذ آب → جابجایی تدریجی جرم → شکست ناگهانی شیب.

یافته‌های این پژوهش نشان داد زمین‌لغزش‌های آبخیز چاسرکا نتیجه یک فرآیند تدریجی، پویا و چندعاملی است که در آن، عامل‌های طبیعی زمینه‌ساز اولیه هستند، اما مداخلات انسانی عامل بسیارمهم و فعال‌کننده ناپایداری شیب است. در این راستا، نتایج این پژوهش با یافته‌های لی و همکاران (۲۰۲۰) و آلکانترا-آیالا (۲۰۲۵) مبنی بر اینکه فعالیت‌های انسانی نیز مانند تغییرات اقلیمی، گسترش شهری و جنگل‌زدایی سبب رخداد مکرر زمین‌لغزش‌ها می‌شوند، هم‌راستا است. برای مدیریت این پدیده، تعیین اثر این فعالیت‌ها بر احتمال رخداد زمین‌لغزش ضروری است. این موضوع را می‌توان در سه سطح تحلیل کرد: (۱) زمینه‌های زمین‌ریخت‌شناختی و اقلیمی، (۲) نابودی ساختار بوم‌شناختی در چهار دهه گذشته و (۳) پویایی حرکتی شیب‌ها که با رفتارسنجی زمین‌سنجی تأیید شده است.

تحلیل‌ها نشان داد بیشترین اندازه لغزش‌های فعال و قدیمی مربوط به دامنه‌های شمال‌شرقی، شرقی و شمال‌غربی در شیب‌های ۲۵ تا ۴۵٪ و سنگ‌شناسی ناپایدار (مارن، شیل و رس‌های نئوژن) است. شریفی و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل تحلیل شبکه در شهرستان نور دریافتند بیشترین اندازه زمین‌لغزش در این شهرستان مربوط به بخش‌های شمال، شمال‌غربی و شمال‌شرقی است که با نتایج این پژوهش مبنی بر تأیید جهت‌های منطقه بر رخداد زمین‌لغزش، هم‌راستا است. افزون بر این، داده‌های آبی-اقلیمی بیانگر آن است که بیشترین فراوانی لغزش‌ها مربوط به مناطقی با بارش سالانه ۸۵۰ میلی‌متر و ژرفای خاک ۵۰ سانتی‌متر است. این شرایط، هرچند برای رخداد لغزش لازم هستند، اما کافی نیستند؛ زیرا در دهه ۱۳۶۰، این شرایط هم بود، ولی لغزش‌ها به‌شکل گسترده نبودند. در پژوهشی شریفی‌پیچون و همکاران (۲۰۲۲) دریافتند در میان عامل‌های طبیعی، بیشترین نقش در رخداد زمین‌لغزش‌های آبخیز وهرگان در پیشکوه‌های زاگرس مربوط به عامل سنگ‌شناسی و بارش به‌ترتیب با ضریب تأثیر ۰/۳۶۲ و ۰/۲۹۹ بود که با یافته‌های این پژوهش هم‌راستا است. در سطح دوم، تحلیل تغییرات پوشش زمین در طول ۴۰ سال گذشته بیانگر شواهدی بر نابودی سامانه تثبیت‌کننده طبیعی بود. در گذشته، دامنه‌های شمالی و شمال‌شرقی

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش به‌خوبی نشان داد که رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه چاسرکا در شهرستان بابل تابع الگوهای مکانی-زمانی خاصی است. تحلیل‌ها نشان‌دهنده بیشترین فعالیت‌های زمین‌لغزشی در جهت‌های شمال‌شرقی تا شمال‌غربی و در شیب‌های ۲۵ تا ۴۵٪ بودند. افزون بر این، نتایج این پژوهش مؤید وجود یک الگوی تدریجی از ناپایداری قبل از رخداد شکست ناگهانی است. با تبدیل‌شدن جنگل‌ها به زمین‌های زراعی و ساخت و ساز، گسترده‌گی پوشش گیاهی کاهش‌یافته است و به‌دنبال آن برش‌های مصنوعی در شیب‌ها سبب اختلال تعادل سازه‌ای آب‌های زیرزمینی شده است. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در پهنه‌های پرخطر تحت نظارت نهادهای مسئول و در چارچوب قانونی، ممنوعیت ساخت و ساز، اجرا شود. همچنین پیشنهاد می‌شود احیای پوشش گیاهی بومی و عملیات مهندسی تثبیت شیب‌ها با مشارکت سازمان‌های محیط‌زیست و منابع طبیعی انجام شود. پایش بلندمدت (بیش از دو سال) در پژوهش‌های آتی برای تحلیل رفتار بلندمدت توده زمین‌لغزش و توسعه سامانه هشدار زودهنگام بسیار ارزشمند است. افزون بر این، پیشنهاد می‌شود با توجه به افزایش بارش‌های حدی در اثر تغییرات اقلیمی در شمال ایران، ضروری است مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی برای مدیریت آب و خاک در برنامه‌ریزی منطقه‌ای لحاظ شوند و در راستای آن آموزش‌های لازم برای جوامع محلی به‌منظور

افزایش آمادگی در برابر زمین‌لغزش ارائه شود. با اجرای این مجموعه اقدامات می‌توان به‌طور اثرگذاری خطرپذیری منطقه را کاهش داد و سبب ارتقای ایمنی ساکنان شد. در پایان پیشنهاد می‌شود که در بررسی‌ها و پژوهش‌های آینده از تعداد و تراکم بیشتری از نقاط شبکه زمین‌سنجی استفاده شود تا دقت و صحت نتایج افزایش یابد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله
نویسنده دوم: مفهوم‌سازی، بررسی نتایج
نویسنده سوم: مفهوم‌سازی، بررسی نتایج
نویسنده چهارم: مفهوم‌سازی، ویرایش، بازبینی متن مقاله

فهرست منابع

- Alcántara-Ayala I. 2025. Landslides in a changing world. Landslides. pp. 1-15.
Bourenane H, Bouhadad Y. 2021. Impact of land use changes on landslides occurrence in urban area: the case of the Constantine City (NE Algeria). Geotechnical and Geological Engineering. 39(6): 1-21. doi.org/10.1007/s10706-021-01768-1
Darvishi R, Jafarian Y, Lashgari A. 2025. Fragility analysis of buried pipelines subjected to seismic landslides in Iran. Journal of Earthquake

- Engineering. 29(9): 1820-1838. doi.org/10.1080/13632469.2025.2496653
Dastranj A, Noor H. 2021. Comparative evaluation of landslide susceptibility map using Analytical Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy methods. Journal of RS and GIS for Natural Resources. 12(3): 62-81. (In Persian).
Ehsan M, Anees MT, Bakar AFB.A, Ahmed A. 2025. A review of geological and triggering factors influencing landslide susceptibility: artificial intelligence-based trends in mapping and prediction. International Journal of

- Environmental Science and Technology. 22(16): 17347-17382. doi.org/10.1007/s13762-025-06741-6
- Guo X, Guo Q, Feng Z. 2021. Detecting the vegetation change related to the creep of 2018. Baige landslide in Jinsha River, SE Tibet using SPOT data. *Front. Earth Science*. 9: 706998. doi.org/10.3389/feart.2021.706998
- Joybari J, Kavian A, Mosaffaei J. 2016. The effect of precipitation characteristics on spatial and temporal variations of Tavan Landslide Movement. *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 4(4): 75-86. (In Persian).
- Kavian A, Rezaei M, Shahedi K, Hadian Amri MA. 2021. Evaluation of random forest method in landslide susceptibility mapping in Sadat Mahalleh Watershed of Sari. *Watershed Management Research*. 34(1): 74-92. (In Persian).
- Lang A, Moya J, Corominas J, Schrott L, Dikau R. 1999. Classic and new dating methods for assessing the temporal occurrence of mass movements. *Geomorphology*. 30(1-2): 33-52.
- Li Y, Wang X, Mao H. 2020. Influence of human activity on landslide susceptibility development in the Three Gorges area. *Natural Hazards*. 104(3): 2115-2151. doi.org/10.1007/s11069-020-04264-6
- Mehrpouya MR. 2024. Using the TRIGRS program in the analysis of landslide probability (Case study: Chakrod Watershed, Gilan). *Journal of Range and Watershed Management*. 77(4): 471-489. (In Persian). doi: 10.22059/jrwm.2024.377135.1767
- Mineo S, Calì D, Intelisano M, Pappalardo G. 2025. Landslide studying and monitoring by combining digital models from aerial visible and infrared photogrammetry. *Landslides*. 22(6): 1789-1804. doi.org/10.1007/s10346-025-02481-3
- Mousavi SZ, Kavian A, Soleimani K, Mousavi SR, Shirzadi A. 2011. GIS-based spatial prediction of landslide susceptibility using logistic regression model. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2(1): 33-50. doi.org/10.1080/19475705.2010.532975
- Nazari H, Ritz J, Avagyan A. 2021. Morphotectonics and Slip rate of the Khazar fault in Central Alborz, (North of Iran). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*. 31(2): 101-110. (In Persian). doi: 10.22071/gsj.2021.259868.1863
- Pacheco Quevedo R, Velastegui-Montoya A, Montalván-Burbano N, Morante-Carballo F, Korup O, Daleles Rennó C. 2023. Land use and land cover as a conditioning factor in landslide susceptibility: a literature review. *Landslides*. 20(5): 967-982. doi.org/10.1007/s10346-022-02020-4
- Pánek T, Šilhán K, Tábořík P, Hradecký J, Smolková V, Lenart J, Pazdur A. 2011. Catastrophic slope failure and its origins: Case of the May 2010 Girová Mountain long-runout rockslide (Czech Republic). *Geomorphology*. 130(3-4): 352-364. doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.04.020
- Razavizadeh S, Solaimani K, Massironi M, Kavian A. 2017. Mapping landslide susceptibility with frequency ratio, statistical index, and weights of evidence models: A case study in northern Iran. *Environmental Earth Sciences*. 76(14): 1-16. doi.org/10.1007/s12665-017-6839-7
- SalehiPour Milani A, Yamani M. 2018. Landslide hazard zoning in Ramian Basin (Golestan Provinces). *Disaster Prevention Management of Knowledge*. 8(2):161-172. (In Persian). doi: 20.1001.1.23225955.1397.8.2.5.9
- Sathyanarayanan S, Tantri BR. 2024. Confusion matrix-based performance evaluation metrics. *African Journal of Biomedical Research*. 27(4S): 4023-4031. doi.org/10.53555/AJBR.v27i4S.4345
- Shabani E, Javadi MR, Zare Khosh Eghbal M. 2015. Landslide hazard zonation using information value and analytical hierarchy process (AHP) methods (A case study: Shalmanrood Watershed). *Journal Watershed Management Resource*. 5(10): 157-169. (In Persian).
- Shafiee kigasari N, Hosseinim AO, Pourghasemi HR. 2024. Spatial assessment of the sensitivity of landslide occurrence and their correlation with the forest road network (Case study: Ramsar County). *Journal Watershed Management Resource*. 15(1): 63-77. (In Persian).
- Sharifi Paichoon M, Shirani K, Shirani M. 2021. Prioritization of factors affecting the occurrence of landslides and zoning its sensitivity using multiple linear regression case study: Vahargan Catchment-west of Isfahan Province. *Journal of Hydrogeomorphology*. 8(26): 163-139. (In Persian).
- Sharifi H, Ramazanipore M, Ebrahimi L, Haghzad A. 2022. Landslide hazard zoning of Noor City using network analysis model. *Economic Geography Research*. 2(6): 40-55. (In Persian).
- Sharifi H, Ramazanipore M, Ebrahimi L, Haghzad A. 2022. Landslide hazard zoning of Noor city using network analysis model. *Economic Geography Research*. 2(6): 40-55. (In Persian).

Wang H, Guo Q, Ge X, Tong L. 2022. A spatio-temporal monitoring method based on multi-source remote sensing data applied to the case of the Temi landslide. *Land*. 11(8): 1-19. doi.org/10.3390/land11081367

Xu X, Shang M, Deng Y. 2014. Analysis about the classification of landslide monitoring method. *Appl. Mech. Mater.* 638, 360–364.

Yordanov V, Biagi L, Truong XQ, Tran VA, Brovelli MA. 2021. An overview of geoinformatics state-of-the-art techniques for landslide monitoring and mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 46: 205-212. doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W2-2021-205-2021

Zali M, Shahedi K. 2021. Landslide sensitivity assessment using fuzzy logic

approach and GIS in Neka Watershed. *Water and Soil Management and Modelling*. 1(1): 67-80. (In Persian). doi: 10.22098/mmws.2021.1183

Zhang R, Chen S. 2025. Spatiotemporal analysis, simulation, and early warning of landslides based on landslide sensitivity and multisource precipitation products in Southwestern China. *Landslides*. 22(5): 1413-1434. doi.org/10.1007/s10346-024-02437-z

Zhu Q, Zeng H, Ding Y. 2019. A review of major potential landslide hazards analysis. *Acta Geodaetica Cartogr. Sinica*. 48: 1551–1561 .

Zhu Z, Li Q, Zhao L, Huang D, Wu Q, Zuo S. 2025. Whole-process survey of a landslide based on UAV tilt photography and 3D reconstruction and spatial analysis techniques. *Landslides*. 22(2): 485-497. doi.org/10.1007/s10346-024-02396-5



Spatial-Temporal Behavior Analysis of the Chaserka Babol Landslide by Combining Field Data and Remote Sensing

Reza Ali Rahimi Talarposhti^{1*}, Ghorban Vahabzadeh², Ataollah Kavian³,
Seyed Ramezan Mousavi³

1- Ph.D. Student, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran

2 and 3- Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran

4- Assistant Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Landslides, as one of the most destructive geomorphological phenomena, cause huge loss of life and property every year in different regions of Iran. Landslides are a type of slope movement is mostly influenced by natural factors such as earthquakes, heavy rainfall, and erosion, but is exacerbated by human interventions such as substandard construction, road construction, and changes in runoff patterns. The mountainous regions and steep slopes of the country, especially the northern regions, are the main focus of this phenomenon due to sensitive lithological and geological conditions. The consequences of landslides are not limited to the destruction of homes and vital arteries, but also lead to the blockage of transportation routes, damage to agricultural lands, and human casualties. By combining remote sensing methods and field studies, it is possible to provide more accurate monitoring and assessment of landslides. Geotechnical and geomorphological analyses play a significant role in identifying susceptible areas and managing the risk of this natural hazard. Therefore, studying and identifying unstable zones and analyzing the factors that inhibit this phenomenon is a fundamental step in risk reduction and crisis management. For this reason, this study aimed to assess the spatio-temporal behavior of the landslide mass in Chaserka, Babol.

Materials and Methods

In the first stage, to examine the history and identify the Chaserka landslide mass, historical images from Google Earth were used between 1981 and 2004, and five years, 2010, 2013, 2016, 2020, and 2025, were selected as samples.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** ataollah.kavian@gmail.com

Citation: Rahimi Talarposhti, R.A., Vahabzadeh, Gh., Kavian, A., Mousavi, S.R. 2026. Spatial-temporal Behavior Analysis of the Chaserka Babol Landslide by Combining Field Data and Remote Sensing. Watershed Management Research. 39(3): 1-21.

DOI: 10.22092/wmrj.2026.371320.1643

Received: 06 November 2025, **Received in revised form:** 04 January 2026, **Accepted:** 19 March 2026,

Published online: 23 September 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 3, Ser. No, 152, Autumn 2026, pp. 1-21.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



In this study, landslide behavior measurement networks with four reference points and 22 displacement monitoring points were designed and created. In addition, orthorectified aerial photographs were examined in different periods and their change trends were compared. For data processing and landslide monitoring geodetic network calculations, Leica Geo Office version 7 commercial software was used, and the model accuracy and overall accuracy were evaluated.

Results and Discussion

The results of this study indicate the combined role of natural factors and human interventions in the occurrence of landslides in the Chaserka region. The analyses indicate that natural factors such as slope, direction of the slope, and geological features (marl, shale, and Neogene clays) were the factors that caused the occurrence of landslides, but human interventions, especially the destruction of forest cover, non-engineering constructions, and land cover changes in previous decades, were the main factors in the instability of slope and the intensification of the risk of landslide. The highest incidence of landslides was observed in the northeast, east, and northwest directions on slopes of 25 to 45 percent and in areas with soil depths less than 50 cm. Changes in land cover in the last 40 years from virgin forests to roads and agricultural lands, in addition to reducing vegetation cover, have disrupted the hydrogeochemical balance of slopes and increased the risk of landslides. Therefore, the results of geodetic monitoring indicate gradual and continuous changes in the movement of the landslide masses. The changes recorded in five observational stages indicate that landslides in Chaserka are gradual and dynamic processes that ultimately lead to sudden failure. The analyses showed that significant displacements at some points (such as R2 and R3) were highly consistent with the dominant direction of landslides in the region, and this finding indicates the occurrence of gradual changes in the soil shear strength that ultimately cause slope failure. Overall, the results of this study emphasize the importance of comprehensive analysis of climatic, geomorphological, and human changes in landslide risk management. Based on the results of this research, to prevent landslides, appropriate planning should be carried out to control land cover changes and preserve vegetation in sensitive areas.

Conclusion and Suggestions

The findings of the monitoring and behavior analysis of the Chaserka landslide mass indicate that gradual deformations before sudden rupture are the main factor in the instability of this mass. Therefore, based on the results of this study, it is recommended to establish a permanent monitoring system based on remote sensing data and accurate measurement of displacements to develop a landslide early warning system. In addition, considering the role and importance of vegetation in modulating the hydrological and structural conditions of the slope, targeted vegetation restoration using native species is suggested as a complementary solution in managing landslide stability. Also, considering the characteristics of extreme precipitation (type and intensity) due to climate change in northern Iran, continued long-term monitoring is recommended to analyze landslide mass behavior in response to hydro-climatic stimuli in other similar watersheds in the country.

Keywords: Landslide, monitoring, slope failure, slope stability, spatio-temporal analysis

Article Type: Research Article

Conflicts of Interest

The authors of this article declare that they have no conflicts of interest in writing and publishing the materials and results of this research.

Data Availability Statement

The data and results used in this research will be made available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution

Author 1: Software/statistical analyses, writing the first draft of the article

Author 2: Conceptualization, review of results

Author 3: Conceptualization, review of results

Author 4: Conceptualization, editing, revision of the text