Journal of Natural Environment Hazards
University of Sistan and Baluchestan
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol.14, Issue 45, September 2025

Identification of potential landslide zones using DInSAR data and landslide susceptibility: a case study of Damavand basin

Milad Davari Sarem[1], Jafar Hassanpour[2*], Maedeh Roshan Liarajdameh[3]

1. Researcher, Research and Technology Department, University of Tehran, Tehran, Iran
2. *Corresponding Author*, Associate Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Ph.D. Student, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 27 June 2024
Revised: 28 February 2025
Accepted: 22 April 2025

Keywords:
Landslide, Susceptibility zoning, Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR), Mass movements, Damavand basin.

ABSTRACT

Iran has vast mountainous regions and due to its geological, climatic, and seismic characteristics, is prone to numerous landslides. Given the diversity of topography and climatic conditions, this hazard occurs in many mountainous areas across the country. This research aims to identify zones with landslide potential and to mitigate the risks and damages caused by this hazard in the Damavand basin. The Damavand basin, with an area of 757.8 square kilometres, is located in the northeastern end of the Salt Lake basin. The methodology employed includes a combination of library studies, field surveys, and the use of radar images. After conducting field investigations and interpreting aerial photos, over 500 landslides were identified. Subsequently, 13 possible factors affecting the landslide occurrence were extracted and mapped. To prepare a landslide susceptibility zoning map, the Frequency Ratio (FR) method was utilized, resulting in a map with an accuracy of 81.7%. In this method, three factors of Normalized Differential Vegetation Index (NDVI), slope and Topographic Wetness Index (TWI), which indicates the amount of water accumulated in different areas, have the greatest impact on the occurrence of landslides. Additionally, the Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) method was used to estimate the amount of ground displacement and identify the active slopes of the area, and the necessary processing was done on Sentinel-1 images in two years. The results showed that the most significant mass movements are observed in the northern regions of the basin. Due to the very high accuracy of the ground displacement maps and landslide susceptibility zoning, as well as the concern about identifying hazardous zones, the study area was divided into three zones. The final map can be used as a framework for monitoring, planning and adopting a suitable strategy for sustainable development in susceptible areas.

Cite this article: Davari sarem, M. , Hassanpour, J. and Roshan Liarajdameh, M. (2025). Identification of potential landslide zones using DInSAR data and landslide susceptibility: a case study of Damavand basin. Journal of Natural Environmental Hazards, 14(45), 53-74. DOI: 10.22111/jneh.2025.49171.2058

© Jafar Hassanpour*
Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2025.49171.2058

* Corresponding Author Email: : hassanpour@ut.ac.ir

مخاطرات محیط طبیعی
شاپا چاپی: ۲۶۷۶-۴۳۷۷ شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۳۸۵
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۵، شماره پیاپی۳، مهر ۱۴۰۴

شناسایی پهنه‌های احتمالی زمین‌لغزش با استفاده از داده‌های DInSAR و استعداد زمین‌لغزش: مطالعه موردی حوضه آبریز دماوند

میلاد داوری صارم[۱]، جعفر حسن‌پور[۲*]، مائده روشن لیارجدمه[۳]

۱. پژوهشگر، معاونت پژوهش و فناوری، دانشگاه تهران
۲. دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول)
۳. دانشجوی دکتری، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۷
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

واژه‌های کلیدی:
زمین‌لغزش، پهنه‌بندی استعداد، تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، حرکات دامنه‌ای، حوضه آبریز دماوند.

چکیده

ایران با داشتن مناطق کوهستانی پهناور و به‌دلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی، اقلیمی و لرزه‌خیزی، مستعد وقوع زمین‌لغزش‌های متعدد است. با توجه به تنوع توپوگرافی و شرایط آب‌وهوایی، این مخاطره در بسیاری از مناطق کوهستانی کشور رخ می‌دهد. هدف این پژوهش، شناسایی نواحی دارای پتانسیل لغزش و کاهش ریسک و خسارت‌های ناشی از این پدیده در حوضه آبریز دماوند است. حوضه آبریز دماوند با وسعت ۷۵۷/۸ کیلومتر مربع در انتهای شمال شرقی حوضه آبریز دریاچه نمک واقع شده است. روش کار شامل ترکیبی از مطالعات کتابخانه‌ای، میدانی و استفاده از تصاویر راداری می‌باشد. پس از بررسی‌های میدانی و تفسیر عکس‌های هوایی، بیش از ۵۰۰ زمین‌لغزش شناسایی شد. سپس ۱۳ عامل احتمالی مؤثر در فرایند بروز زمین‌لغزش استخراج و نقشه‌های آنها تهیه گردید. به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش، از روش نسبت فراوانی (FR) استفاده شد که نقشه حاصل با دقت ۸۱/۷ درصد تهیه گردید. در این روش، سه عامل شاخص تراکم پوشش‌گیاهی، شیب و شاخص تری توپوگرافی (TWI) که نشان‌دهنده میزان آب انباشته‌شده در مناطق مختلف است، بیشترین تاثیر را در وقوع لغزش دارند. همچنین، برای برآورد میزان جابه‌جایی زمین و شناسایی دامنه‌های فعال منطقه، از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) استفاده شد و پردازش‌های لازم بر روی تصاویر سنتینل-۱ در بازه زمانی دو ساله انجام گرفت. نتایج نشان داد که در محدوده مطالعاتی، بیشترین حرکات دامنه‌ای در مناطق شمالی حوضه آبریز مشاهده می‌شود. به‌دلیل دقت بسیار بالا، نقشه‌های جابه‌جایی زمین و پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش و دغدغه شناسایی نواحی مخاطره‌آمیز، منطقه مورد مطالعه به سه پهنه تقسیم گردید. نقشه نهایی می‌تواند به‌عنوان چارچوبی برای پایش، برنامه‌ریزی و اتخاذ استراتژی مناسب جهت توسعه پایدار در مناطق حساس استفاده شود.

استناد: داوری صارم, میلاد , حسن پور, جعفر و روشن لیارجدمه, مائده . (۱۴۰۴). شناسایی پهنه‌های احتمالی زمین‌لغزش با استفاده از داده‌های DInSAR و استعداد زمین‌لغزش: مطالعه موردی حوضه آبریز دماوند. مخاطرات محیط طبیعی, ۱۴(۴۵)، ۷۴-۵۳.

DOI: 10.22111/jneh.2025.49171.2058

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© میلاد داوری صارم، جعفر حسن‌پور*، مائده روشن لیارجدمه.

*- جعفر حسن‌پور (نویسنده مسئول)

Email: : hassanpour@ut.ac.ir

مقدمه

بنا به تعریف ساده کارگروه زمین‌لغزش‌های یونسکو (WP/WLI[1])، به حرکت یک توده سنگ یا خاک به سمت پایین دامنه، زمین‌لغزش گفته می‌شود. وقوع این پدیده، معمولاً به‌دلیل برهم خوردن تعادل بین نیروهای وارد بر توده لغزشی در امتداد سطح گسیختگی ایجاد می‌شود. ایران با توپوگرافی اغلب کوهستانی، شرایط متنوع اقلیمی و زمین‌شناسی، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، بیشتر شرایط طبیعی برای ایجاد گستره‌ی وسیعی از زمین‌لغزش‌ها را دارا می‌باشد. بسته به قدرت و بزرگی عامل تحریک کننده ثانوی (جنگل‌زدایی، راه‌سازی، توسعه شهرها و روستاها، شدت و دوام بارش‌ها، زلزله و سایر عوامل تحریک‌کننده دیگر) اندازه زمین‌لغزش‌ها می‌تواند متفاوت باشد. همچنین، به‌دلیل فقدان مدیریت جامع و عدم رعایت آستانه‌های محیطی به‌عنوان یک کشور پرخطر به‌شمار می‌رود، به‌طوری‌که جزء ۱۰ کشور بلاخیز جهان محسوب می‌شود (داوری صارم[2] و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین، شناخت نواحی دارای پتانسیل لغزش و پهنه‌بندی آنها یکی از گام‌های اساسی در مدیریت مخاطرات طبیعی و کاهش خسارت‌های ناشی از این پدیده محسوب می‌شود. از طرفی طیف گسترده پدیده زمین‌لغزش، تعیین یک روش خاص برای شناسایی و به نقشه درآوردن آنها، جهت تعیین و ارزیابی مخاطرات همراه را مشکل و حتی غیرممکن می‌سازد. ولی تجربیات به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها و بررسی‌های انجام‌شده در بسیاری از نقاط جهان نشان داده است که بسته به نوع و تعداد زمین‌لغزش‌ها، وسعت، پیچیدگی محدوده مورد بررسی و منابع در دسترس، استراتژی‌های مختلف و ترکیبی از روش‌ها و فن‌ها به‌کار گرفته می‌شود (آنبالاگان[3]، ۱۹۹۲؛ گازتی[4] و همکاران، ۱۹۹۹؛ فال[5] و همکاران، ۲۰۰۶؛ کانونگو[6] و همکاران، ۲۰۰۶). یکی از روش‌های ارزیابی این مخاطره، تهیه نقشه استعداد زمین‌لغزش[7] می‌باشد. تهیه این نقشه یک سطح کیفی و تا حدودی عمومی از ارزیابی خطر زمین‌لغزش را ارائه می‌دهد. با توجه به مطالعه انجام‌شده و ارزیابی روش‌های مختلف پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز دماوند، انجام پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های قالبی به هیچ عنوان توصیه نمی‌گردد (سفیدگری و همکاران، ۱۳۸۴). بنابراین، لازم است برای پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش از روش‌های آماری استفاده شود. بدین جهت این پژوهش از روش نسبت فراوانی[8] در بستر نرم‌افزار ArcGIS 10.8 برای پهنه‌بندی استعداد لغزش استفاده کرده است.

توسعه سریع تکنولوژی فضایی، امکان آشکارسازی تغییرات سطح زمین را با دقت بالا فراهم ساخته است. این پیشرفت‌ها مرهون گرفتن تصاویر ماکروویو توسط سنجنده‌های SAR[9] در کنار توسعه روش‌های پیشرفته پردازش داده‌های آنها همچون روش اینترفرومتری می‌باشد (فرتی[10] و همکاران، ۲۰۰۱). تداخل‌سنجی راداری، یک فناوری دورسنجی و فن راداری است که در زمین‌لرزه ۱۹۹۲ لندرز کالیفرنیا به‌منظور مطالعه حرکات سطح زمین ابداع شد. اما اولین کاربری آن توسط گابریل[11] و همکاران (۱۹۸۹) با هدف مطالعه حرکات سطح زمین بود. امروزه نیز این

1 -Working Party on World Landslide Inventory
2 -Davari Sarem
3 -Anbalagan
4 -Guzzetti
5 -Fall
6 -Kanungo
7 -Landslide Susceptibility Map (LSM)
8 -Frequency Ratio (FR)
9 -Synthetic Aperture Radar (SAR)
10 -Ferretti
11 -Gabril

روش به‌عنوان یک روش رایج به منظور پایش حرکات سطحی زمین با نرخ حرکتی آهسته می‌باشد. ازطرفی، زمین‌لغزش‌ها با نرخ حرکتی آهسته، در صورت فعال شدن عوامل محرک، بیشتر مستعد وقوع هستند (پولکاری[۱] و همکاران، ۲۰۱۶؛ ژانگ[۲] و همکاران، ۲۰۱۸؛ داوری صارم و همکاران، ۲۰۲۴). پوشش سراسری و قدرت تفکیک مکانی خوب تصاویر راداری، دقت بالا، نیاز حداقلی به نیروی انسانی، به روز بودن داده‌ها، پایین بودن هزینه و سرعت در به‌دست آوردن نتایج، ازجمله مزایای این روش محسوب می‌گردد. این موضوع سبب کاربرد بیشتر فناوری یادشده در بررسی مخاطرات طبیعی ازجمله زمین‌لغزش‌ها، فرونشست، زلزله و فعالیت‌های آتشفشانی نسبت به روش‌های میدانی شده است. در همین راستا، این مطالعه از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری[۳] برای پایش پهنه‌های دارای پتانسیل لغزش بهره می‌برد. در این روش به یک زوج تصویر راداری، تصویر اصلی (Master) و فرعی (Slave) نیاز است تا تداخل نگاشت از کسر پیکسل‌های فاز دو تصویر به‌دست آید. این دو تصویر در زمان‌های مختلف از یک منطقه مشترک برداشت می‌شوند.

بررسی منابع و پژوهش‌های انجام‌شده در ارتباط با موضوع پژوهش نشان می‌دهد که موضوع پژوهش از پیشینه نسبتاً قوی برخوردار است؛ ولی با این همه، بسیاری از نقاط مخاطره‌آمیز ایران هنوز به‌طور کامل به‌خصوص در زمینه علمی با استفاده از روش‌ها و مدل‌های کمی مورد مطالعه و ارزیابی قرار نگرفته‌اند. پژوهش‌های متعددی در زمینه ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تصاویر راداری در نقاط مختلف ایران به انجام رسیده است (اشرفی فینی و همکاران، ۱۳۹۷؛ علیخانی و همکاران، ۱۴۰۰؛ اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۴۰۰؛ انتظاری و کردوانی، ۱۴۰۱). علیخانی و همکاران (۱۴۰۰) در گام اول، از فن تداخل‌سنجی دریچه مصنوعی تفاضلی بهره بردند و ۴۴ نقطه زمین‌لغزش در منطقه موردمطالعه را با استفاده از تصاویر راداری و ۲۹ نقطه دیگر را با توجه به مطالعات میدانی شناسایی کردند. در گام دوم، الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی شامل تابع شواهد قطعی (EBF)، شواهد وزنی (WOE) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده شدند. درمجموع از ۱۴ پارامتر موثر به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده شد. درنهایت، نتایج تحلیل منحنی ویژگی عملگر نسبی نشان‌داد که مدل‌های تابع شواهد قطعی، تابع شواهد وزنی و ماشین بردار پشتیبان به‌ترتیب دارای سطح زیر منحنی برابر ۰/۵۳۸، ۰/۷۱۷ و ۰/۹۷ می‌باشند. همچنین انتظاری و کردوانی (۱۴۰۱) به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از دو روش قضاوت کارشناسی و نسبت فراوانی در شهرستان فریدون‌شهر پرداختند. در این مطالعه، اعتبارسنجی روش‌های آماری و تحلیل کارشناسی، بر پایه GIS با استفاده از روش تداخل‌سنجی تصاویر راداری سنتینل-۱ مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج همپوشانی ۶۷ درصد از سلول‌های مناطق با خطر خیلی زیاد و زیاد در نقشه‌های پهنه‌بندی خطر با سلول‌هایی از نقشه جابه‌جایی سطحی به‌دست‌آمده از پردازش تصاویر راداری سنتینل با بیشترین جابه‌جایی را نشان داد. از سوی دیگر، به‌تازگی پژوهش‌های بین‌المللی جدیدی در رابطه با مخاطره یادشده انجام پذیرفته است (کوهارتسیوک و پردیکو[۴]، ۲۰۲۱؛ دوارا[۵] و همکاران، ۲۰۲۱؛ لیو[۶] و همکاران، ۲۰۲۳؛ آرسیاد و محدین[۷]، ۲۰۲۳). در پژوهش دوارا و

1 -Polcari
2 -Zhang
3 -Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR)
4 -Kouhartsiouk and Perdikou
5 -Devara
6 -Liu
7 -Arsyad and Muhiddin

همکاران (۲۰۲۱) از ۶۰ تصویر سنتینل-۱ به همراه تعدادی عامل تاثیرگذار به روش AHP در محیط نرم‌افزار GIS استفاده شد. در این بررسی اکثر زون‌های ناپایدار به‌درستی شناسایی شدند. همچنین، تهیه نقشه استعداد زمین‌لغزش به‌روز منجر به شناسایی ۴۴٫۵ درصد زون مستعد در ناحیه موردمطالعه گردید. همچنین، آرسیاد و محدین (۲۰۲۳) شش عامل تاثیرگذار در بروز زمین‌لغزش را توسط دو روش تحلیل کردند و رابطه هر عامل با وقوع زمین‌لغزش مورد شناسایی قرار گرفت. همچنین، از تصاویر سنتینل-۱ به منظور برآورد نرخ جابه‌جایی سطح زمین استفاده گردید. نتایج مطالعات حاکی از هم‌پوشانی بیش از ۹۰ درصدی نقشه‌های پهنه‌بندی و جابه‌جایی سطح زمین می‌باشد. همان-طورکه در مطالعات صورت‌گرفته مشخص است، تطابق حاصل از نتایج مدل‌های یادشده و تصاویر ماهواره‌ای راداری سنتینل-۱، با واقعیت‌های زمینی کاملاً مشهود می‌باشد. به‌دلیل وجود تنها یک نقشه ملی پهنه‌بندی زمین‌لغزش در سطح کشور (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۷) که دارای کم و کاستی‌های فراوانی ازجمله به‌روز نبودن لغزش‌ها، تغییر پارامترهای تاثیرگذار در هر منطقه و عدم دقت کافی به‌دلیل کلی بودن می‌باشد. هدف این پژوهش، شناسایی نواحی دارای پتانسیل لغزش و کاهش ریسک و خسارت‌های ناشی از این پدیده در حوضه آبریز دماوند است. نوآوری این پژوهش نسبت به پژوهش‌های مشابه، استفاده از روش ترکیبی است، به نحوی که منطقه به پهنه‌هایی با درجات خطر مختلف بر اساس دو عامل جابه‌جایی زمین و استعداد زمین‌لغزش تقسیم می‌شود.

داده‌ها و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز دماوند

گستره مورد بررسی با فاصله ۵۵ کیلومتر شرق تهران در دامنه جنوبی البرز مرکزی در منطقه‌ای کوهستانی با آب-وهوای ملایم قرار گرفته است. منطقه مطالعاتی در انتهای شمال‌شرقی حوضه آبریز دریاچه نمک، در استان تهران (بخش کوچکی از این محدوده در استان مازندران واقع شده است) و یکی از زیرحوضه‌های آبخیز ایران (زیرحوضه دماوند) به وسعت ۷۵۷/۸ کیلومتر مربع می‌باشد که دماوند، آبعلی، آردینه، بومهن و رودهن از مهم‌ترین مراکز مسکونی این محدوده به‌شمار می‌روند (شکل۱). حداکثر و حداقل ارتفاع در این محدوده به‌ترتیب ۴۰۴۳ و ۱۶۰۵ متر می‌باشد. رودخانه‌های تار و دماوند از اصلی‌ترین رودخانه‌های موجود در این ناحیه می‌باشند. جاده‌های هراز (محور تهران - آمل) و فیروزکوه از مهم‌ترین راه‌های ارتباطی موجود در این محدوده به‌شمار می‌آیند که در معرض خطر حرکات دامنه‌ای قرار دارند.

تهیه نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش

این مطالعه از نظر هدف و روش به‌ترتیب از نوع کاربردی و توصیفی - تحلیلی است. مطابق شکل۲، مراحل ارزیابی پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه بر اساس مجموعه‌ای از داده‌ها از منابع مختلف انجام شده است. بدین منظور، ابتدا نقشه پهنه‌بندی منطقه با استفاده از روش نسبت فراوانی تهیه شد که مراحل پهنه‌بندی و صحت‌سنجی این روش‌ها به شرح ذیل می‌باشد:

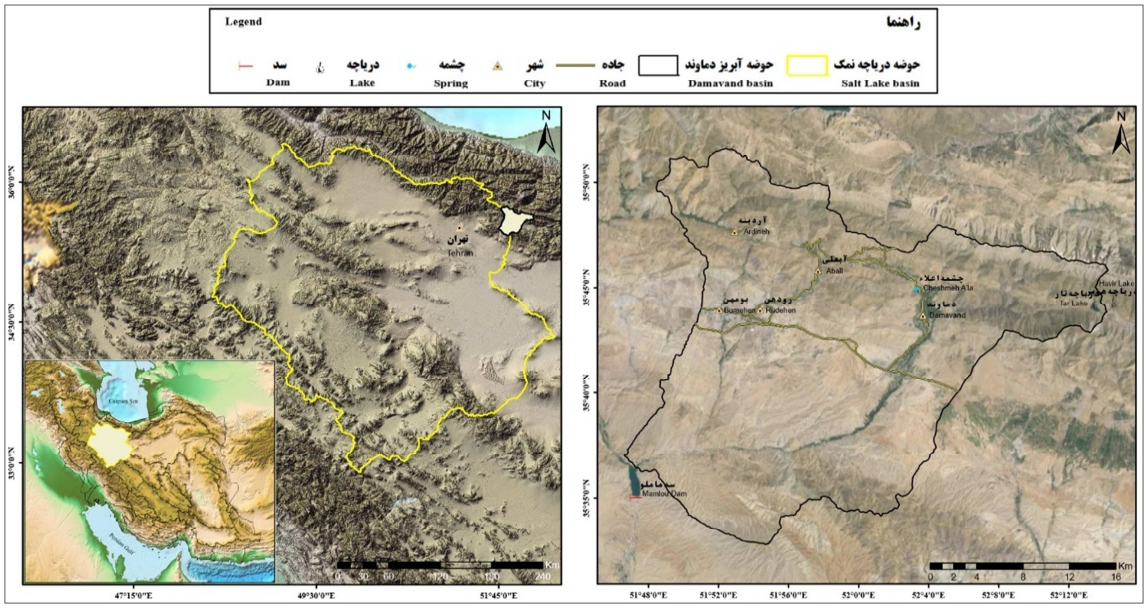
۱- تهیه نقشه فهرست زمین‌لغزش‌ها؛

۲- انتخاب عوامل مؤثر و آماده‌سازی نقشه‌های عوامل؛

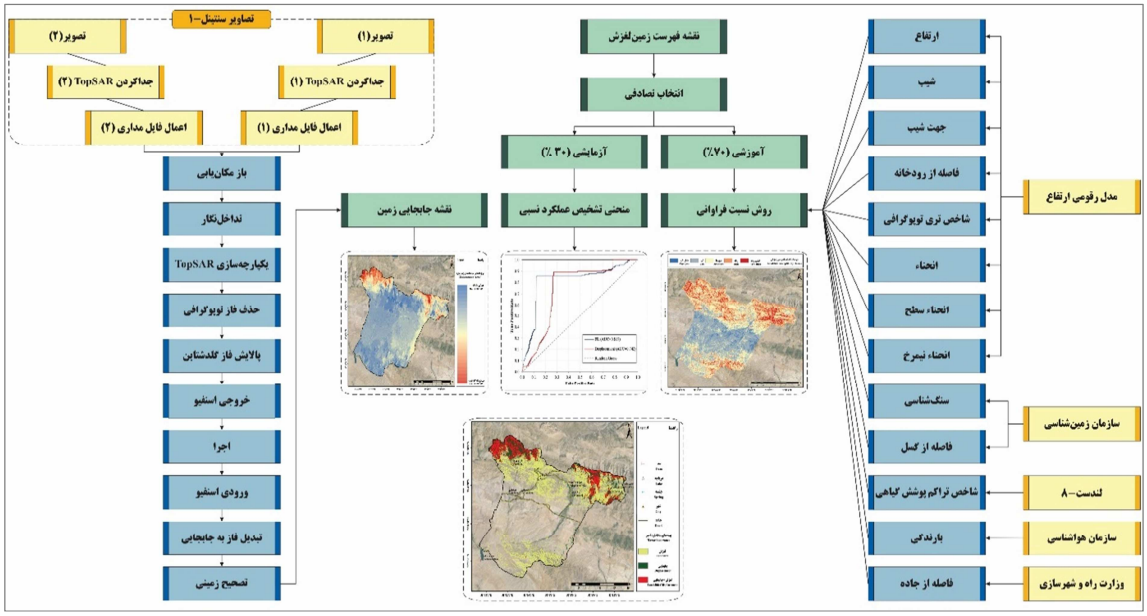
۳- وزن‌دهی به عوامل با استفاده از روش‌های مرسوم؛

۴- پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش؛

۵- بررسی صحت و اعتبار نقشه پهنه‌بندی.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲: فلوچارت روش پژوهش و داده‌های مورد استفاده در این مطالعه

نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها در یک ناحیه، به‌عنوان لایه اطلاعاتی اصلی و مهم محسوب می‌گردد. بدیهی است دقت بالا و کامل بودن نقشه پراکنش، در صحت نتایج مطالعات، به‌ویژه نقشه‌های پهنه‌بندی استعداد و وقوع زمین‌لغزش، تأثیرگذار خواهد بود. در این مطالعه، علاوه بر دریافت اطلاعات مربوط به پراکنش زمین‌لغزش‌های گذشته که توسط سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری ثبت شده است، از تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و گزارش‌های موجود نیز برای تکمیل فهرست زمین‌لغزش‌های پیشین استفاده شده است. در گام دوم، مهم‌ترین عوامل موثر در وقوع پدیده زمین‌لغزش (شامل ارتفاع، شیب، جهت‌شیب، سنگ‌شناسی، شاخص تراکم پوشش‌گیاهی[1]، بارندگی، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، شاخص تری توپوگرافی[2](میزان آب انباشته شده در مناطق مختلف)، انحناء (ویژگی‌های هندسی سطح زمین)، انحناء سطح و انحناء نیم‌رخ) در منطقه شناسایی و برای تحلیل‌های بعدی انتخاب شدند. جدول۱، جزئیات مرتبط با منابع این عوامل را یاد کرده است. در ادامه، هر یک از این عوامل با استفاده از روش‌های مرسوم به نقشه‌های عوامل در محیط ArcGIS 10.8 تبدیل شدند.

جدول ۱: شرح مختصری از منبع عوامل موثر استفاده‌شده در پهنه‌بندی زمین‌لغزش

عامل موثر	منبع داده	فرمت	رزولوشن (متر)	منبع
ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از رودخانه، شاخص تری توپوگرافی، انحناء، انحناء سطح، انحناء نیم‌رخ	مدل رقومی ارتفاع (DEM)	رستری	۳۰	(SRTM) http://earthexplorer.usgs.gov/
سنگ‌شناسی و فاصله از گسل	نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ دماوند و شرق تهران	پلی‌گون و لاین وکتوری	-	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
شاخص تراکم پوشش‌گیاهی	لندست-۸	رستری	۳۰	Landsat-8 OLI sensor satellite data http://earthexplorer.usgs.gov/
بارندگی	داده‌های ایستگاه هواشناسی	-	-	سازمان هواشناسی
فاصله از جاده	شیپ فایل جاده‌های کشور	لاین وکتوری	-	وزارت راه و شهرسازی

در گام سوم، به کمک روش نسبت فراوانی، ابتدا با اشتراک‌گیری از لایه زمین‌لغزش‌ها و لایه‌های عوامل موثر، تعداد پیکسل زمین‌لغزش‌های رخداده در هر یک از زیررده‌های این عوامل (a) محاسبه می‌شود. سپس با داشتن تعداد کل پیکسل زمین‌لغزش‌ها (b)، تعداد کل پیکسل‌های منطقه (d) و تعداد پیکسل‌های هر زیررده (c) و با استفاده از رابطه۱، مقدار FR برای هر زیررده محاسبه شده و نقشه‌ای به‌دست می‌آید که هر پیکسل آن حاوی ارزشی برابر با شاخص استعداد زمین‌لغزش (LSI) می‌باشد.

$$FR = \frac{a/b}{c/d} \quad (۱)$$

در گام نهایی، میزان اعتبار و صحت نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از پارامترهای شاخص نسبت تراکم[3]، شاخص مجموع کیفیت[4] و منحنی تشخیص عملکرد نسبی[5] ارزیابی می‌شود. مطابق رابطه۲، شاخص نسبت تراکم عبارت است

1 -Normalized Differential Vegetation Index (NDVI)
2 -Topographic Wetness Index (TWI)
3 -Density Ratio (Dr)
4 -Quality Index (Qs)
5 -Receiver Operating Characteristics (ROC)

از درصد نسبت سطح لغزش‌یافته در هر رده به مساحت آن رده تقسیم بر نسبت مجموع لغزش به سطح کل رده (گی[1]، ۱۹۹۲):

$$D_r = \frac{{S_i}/{A_i}}{\sum_{i=1}^{n} ({S_i}/{A_i})} \quad (۲)$$

در این رابطه D_r شاخص پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در هر رده به درصد، S_i مساحت سطح لغزش‌یافته در هر رده، A_i مساحت هر رده و n تعداد رده‌ها است. شاخص مجموع کیفیت نشان‌دهنده صحت یا مطلوبیت عملکرد روش در پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش است. در ارزیابی روش‌ها هر چه Q_S بیشتر باشد، آن روش صحت یا مطلوبیت بیشتری دارد. مقدار مجموع کیفیت از رابطه۳ حاصل می‌شود (گی، ۱۹۹۲):

$$Q_s = \sum_{i=1}^{n}((D_r - 1)^2 \times s) \quad (۳)$$

در رابطه بالا Q_s مجموع کیفیت، D_r نسبت تراکم، S نسبت مساحت هر رده‌ی خطر به مساحت کل منطقه و n تعداد رده‌های استعداد زمین‌لغزش می‌باشد. سپس با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی، دقت مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. منحنی ROC و محاسبه سطح زیرمنحنی[2]، یکی از روش‌های استاندارد اعتبارسنجی به منظور مقایسه‌ی عملکرد پیش‌بینی انواع مدل‌ها است. در این منحنی، در محور x مقدار خطای مثبت و بر روی محورy مقدار خطای منفی نمایش‌داده می‌شود. این منحنی، یکی از کارآمدترین روش‌ها برای نمایش کیفیت روش‌های مورد استفاده است که سطح زیرمنحنی مقدار پیش‌بینی مدل را نشان می‌دهد.

تهیه نقشه جابه‌جایی زمین

روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، به‌دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا و توانایی به‌دست آوردن اطلاعات از راه دور، یک فن مهم جهت اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین می‌باشد. این روش از اختلاف فاز میان دو تصویر گرفته‌شده در دو زمان متفاوت از یک منطقه برای محاسبه تغییر شکل استفاده می‌کند. در روش یادشده پس از انتخاب منطقه مطالعاتی، عملیات هم‌مرجع‌سازی[3] انجام می‌شود. در این مرحله، تغییر موقعیت هر سلول در تصویر فرعی نسبت به تصویر اصلی بررسی و با محاسبه مجدد دامنه و فاز سلول‌ها با درون‌یابی برای هر سلول در تصویر فرعی، تصاویر ثبت-شده و تصویر فرعی نسبت به تصویر اصلی توجیه می‌گردد. مرحله بعد، تولید اینترفروگرام است که از اختلاف فاز بین دو تصویر SAR و از حاصل‌ضرب تصویر اول در مزدوج تصویر دوم به‌دست می‌آید. دامنه اینترفروگرام برابر حاصل ضرب دامنه دو تصویر اولیه و فاز اینترفروگرام برابر اختلاف فاز بین این دو تصویر است که دارای انواع خطاها ازجمله، اثر توپوگرافی، خطاهای مداری، جابه‌جایی و اثرات اتمسفری می‌باشد. ضرورت دارد برای محاسبه جابه‌جایی سطح زمین در یک بازه زمانی، خطاها حذف شوند. گام بعد، مرحله یکپارچه‌سازی تصاویر[4] است. در این مرحله با حذف نویزهای نواری تمام داده‌ها به‌صورت تصویر واحد به هم می‌پیوندند. در ادامه لازم است در مرحله حذف فاز

1 -Gee
2 -Area Under the Curve (AUC)
3 -Co-registration
4 -Deburst

توپوگرافی[1] و با استفاده از مدل ارتفاعی‌رقومی، اثرات توپوگرافی را از بین برد. به این‌منظور از مدل ارتفاعی رقومی SRTM (دانلود خودکار) استفاده شد. در مرحله پالایش فاز گلدشتاین[2]، از فیلتر گلدشتاین استفاده می‌گردد. این فیلتر از نوع تطبیقی است که در کاهش نویز فاز موثر می‌باشد. سپس مرحله بازیابی فاز[3] لحاظ شد تا بتوان فاز اینترفروگرام (که تنها در 2π شناخته شده است) را به ارتفاع توپوگرافی مرتبط کرد و در انتها پس از طی این مراحل، نسبت به تعیین میزان جابه‌جایی سطح زمین اقدام می‌شود. در این پژوهش، تصاویر S1A از طریق وب‌سایت کوپرنیک[4] تهیه شده‌اند و از ۱۶ تصویر S1A در بازه زمانی ۴۸ روزه و با فرمت SLC، حالت IW ، مسیر پایین‌رو[5] و قطبش VV در بازه زمانی ۷ اکتبر ۲۰۲۱ الی ۲۷ سپتامبر ۲۰۲۳ استفاده شده است. همچنین، با مراجعه به وب‌سایت کوپرنیک، اطلاعات دقیق مداری تصاویر دانلود گردید. در جدول۲، فهرست داده‌های راداری مورد استفاده ارائه شده است. به جهت پردازش تصاویر سنتینل-۱، از نرم‌افزار ESA-SNAP Desktop 9.0 استفاده شده است. این نرم‌افزار، یک سیستم پردازش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری به‌صورت منبع باز است که با زبان جاوا و مبتنی بر DORIS توسعه یافته است.

جدول ۲: داده‌های راداری سنتینل-۱ به‌منظور تداخل‌سنجی تفاضلی راداری در حوضه آبریز دماوند

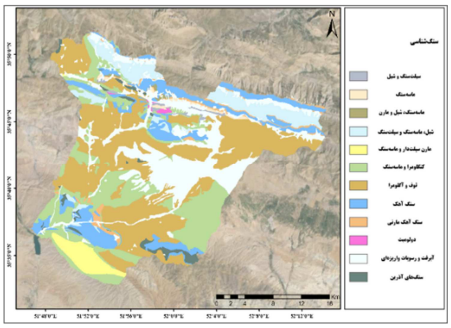
شماره تصویر	تاریخ تصویر (میلادی)	شماره مدار
تصویر-۱	۲۰۲۱۱۰۰۷	۴۰۰۰۷
تصویر-۲	۲۰۲۱۱۱۲۴	۴۰۷۰۷
تصویر-۳	۲۰۲۲۰۱۱۱	۴۱۴۰۷
تصویر-۴	۲۰۲۲۰۲۲۸	۴۲۱۰۷
تصویر-۵	۲۰۲۲۰۴۱۷	۴۲۸۰۷
تصویر-۶	۲۰۲۲۰۶۰۴	۴۳۵۰۷
تصویر-۷	۲۰۲۲۰۷۲۲	۴۴۲۰۷
تصویر-۸	۲۰۲۲۰۹۰۸	۴۴۹۰۷
تصویر-۹	۲۰۲۲۱۰۲۶	۴۵۶۰۷
تصویر-۱۰	۲۰۲۲۱۲۱۳	۴۶۳۰۷
تصویر-۱۱	۲۰۲۳۰۱۳۰	۴۷۰۰۷
تصویر-۱۲	۲۰۲۳۰۳۱۹	۴۷۷۰۷
تصویر-۱۳	۲۰۲۳۰۵۰۶	۴۸۴۰۷
تصویر-۱۴	۲۰۲۳۰۶۲۳	۴۹۱۰۷
تصویر-۱۵	۲۰۲۳۰۸۱۰	۴۹۸۰۷
تصویر-۱۶	۲۰۲۳۰۹۲۷	۵۰۵۰۷

یافته‌های پژوهش

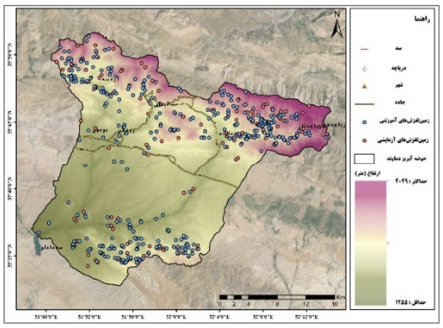
مطابق مراحل پنجگانه تهیه نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش، در گام اول درمجموع ۵۰۲ مورد لغزش در محدوده شناسایی گردید که به دو گروه ۳۰ درصد (آزمایشی) و ۷۰ درصد (آموزشی) تقسیم شدند (شکل۳-الف). سپس در بستر نرم‌افزار ArcGIS 10.8، نقشه‌های عوامل موثر شناسایی‌شده در منطقه ترسیم گردید (شکل۳). در گام سوم، مقدار FR همانند جدول۳ برای هر زیررده محاسبه شد که در نتیجه باعث تهیه نقشه پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش منطقه با پنج رده خطر خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم شده است (شکل۴). در گام پنجم، نتایج حاصل از تلاقی نقشه‌های پهنه‌بندی وقوع زمین‌لغزش با نقشه پراکنش و محاسبه شاخص‌های نسبت تراکم و مجموع کیفیت برای مدل ارائه‌شده به‌صورت جدول۴ است. اگر روند شاخص نسبت تراکم نزولی و نامنظم باشد، مدل تهیه‌شده از دقت کافی برخوردار نخواهد بود. با توجه به محاسبات انجام‌شده، روش نسبت فراوانی روند صعودی داشته که نمایانگر

1 -Topographic Phase Removal
2 -Goldstein Phase Filtering
3 -Phase Unwrapping
4 -Https://scihub.copernicus.eu
5 -Descending

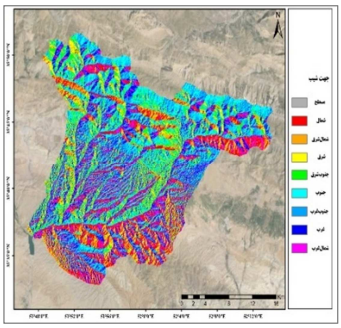
دقت کافی این مدل می‌باشد. همچنین، مقدار شاخص کیفیت برابر ۰/۷۸۹ می‌باشد. طبق نتیجه به‌دست‌آمده از شاخص کیفیت، روش نسبت فراوانی از دقت خوبی برخوردار است. همچنین، با استفاده از نرم‌افزار ESA-SNAP Desktop 9.0 در بازه زمانی ۷ اکتبر ۲۰۲۱ الی ۲۷ سپتامبر ۲۰۲۳، نقشه تغییر شکل منتج از ۱۶ تصویر راداری سنتینل-۱ در راستای دید ماهواره ایجاد شد. در شکل ۵، نقشه نرخ جابه‌جایی با روش DInSAR در حوضه آبریز دماوند نمایش‌داده شده است. بر این اساس، در این محدوده به‌صورت میانگین حداکثر و حداقل میزان جابه‌جایی به‌ترتیب بین ۱ و ۶- سانتی‌متر در سال می‌باشد. بیشترین حرکات دامنه‌ای مطابق نقشه تهیه‌شده در مناطق شمالی حوضه آبریز قابل مشاهده است. در ادامه، جهت ارزیابی و تعیین دقت نقشه‌های استعداد زمین‌لغزش و جابه‌جایی، از ۳۰ درصد (۱۵۰ لغزش) داده‌های لغزشی آزمایشی که به‌صورت تصادفی انتخاب شده بودند، استفاده گردید (شکل۶). نتایج ارزیابی نقشه استعداد زمین‌لغزش گویای آن است که نقشه پهنه‌بندی تهیه‌شده با استفاده از روش FR با سطح زیر منحنی ۸۱/۷ درصد، دارای دقت مطلوب و مناسبی می‌باشد. همچنین، نقشه جابه‌جایی زمین با سطح زیر منحنی ۷۴/۲ درصد، دقت بالایی را نشان می‌دهد.



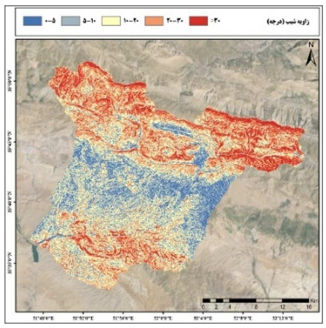
(ب)



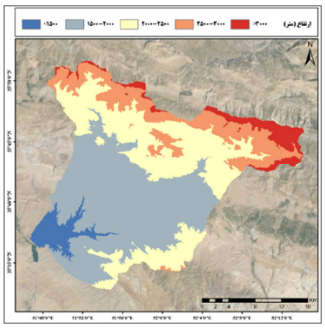
(الف)



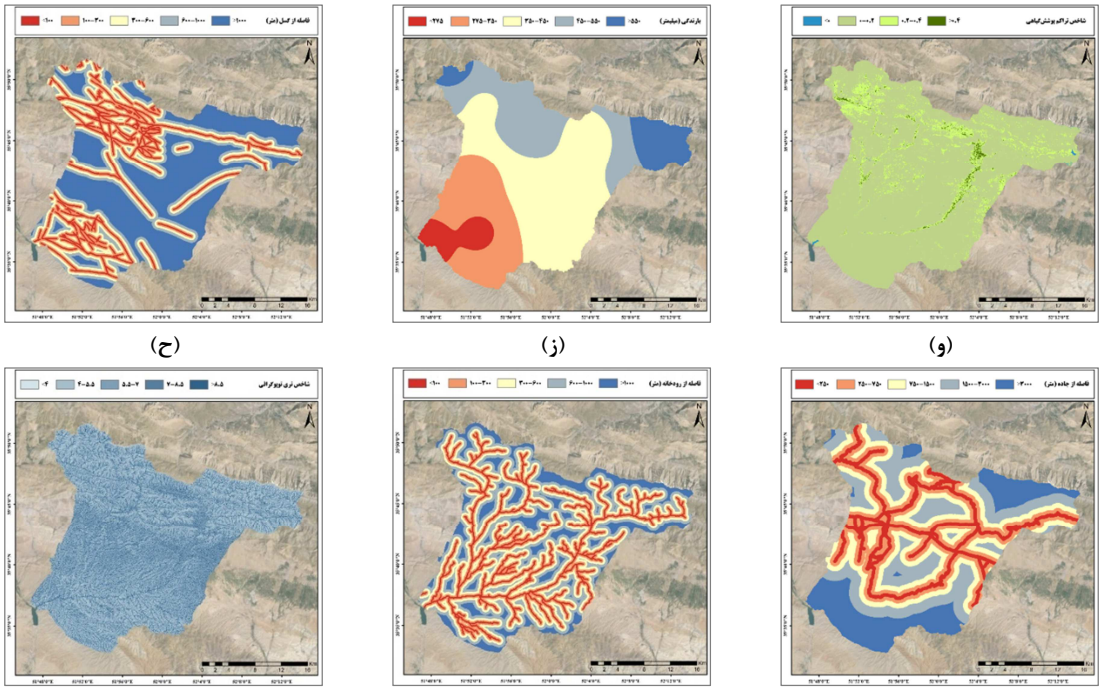
(ه)



(د)



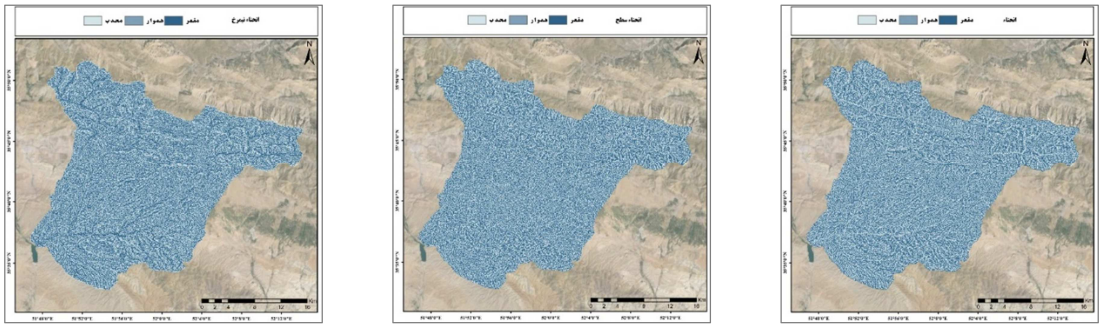
(ج)



(ح) (ز) (و)

(ک) (ی) (ط)

شکل ۳: نقشه‌های: الف) پراکنش زمین‌لغزش، ب) سنگ‌شناسی، ج) ارتفاع، د) شیب، ه) جهت‌شیب، و) NDVI، ز) بارندگی، ح) فاصله از گسل، ط) فاصله از جاده، ی) فاصله از رودخانه، ک) TWI، ل) انحناء، م) انحناء سطح، ن) انحناء نیم‌رخ



(ن) (م) (ل)

شکل ۳: ادامه

جدول ۳: مقادیر نسبت فراوانی محاسبه‌شده برای زیررده‌های عوامل موثر

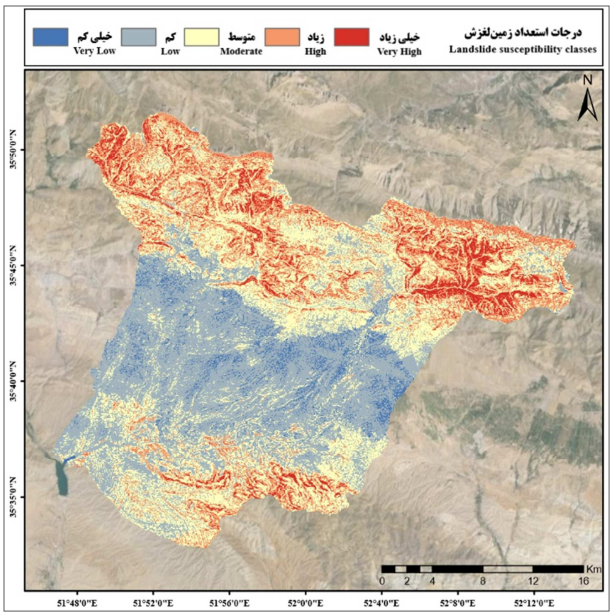
عامل	رده	درصد پیکسل لغزش	درصد پیکسل هر رده	مقدار FR
ارتفاع (متر)	<۱۵۰۰	۲,۵۶	۴,۵۳	۰,۵۶۵
	۲۰۰۰-۱۵۰۰	۱۹,۶۰	۴۳,۱۸	۰,۴۵۴
	۲۰۰۰-۲۵۰۰	۵۳,۶۹	۳۱,۳۱	۱,۷۱۵
	۲۵۰۰-۳۰۰۰	۲۲,۱۶	۱۵,۶۶	۱,۴۱۵
	۳۰۰۰<	۱,۹۹	۵,۳۳	۰,۳۷۳
شیب	۰-۵	۲,۸۴	۱۰,۵۷	۰,۲۶۹

عامل	رده	درصد پیکسل لغزش	درصد پیکسل هر رده	مقدار FR
(درجه)	۵-۱۰	۵,۴۰	۱۹,۸۱	۰,۲۷۳
	۱۰-۲۰	۲۰,۴۵	۳۳,۰۶	۰,۶۱۹
	۲۰-۳۰	۳۸,۰۷	۲۴,۲۳	۱,۵۷۱
	۳۰<	۳۳,۲۴	۱۲,۳۳	۲,۶۹۶
جهت شیب	هموار	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۰۰
	شمال	۱۹,۸۹	۱۱,۳۷	۱,۷۴۹
	شمال‌شرق	۹,۶۶	۹,۲۹	۱,۰۴۰
	شرق	۸,۸۱	۸,۰۱	۱,۰۹۹
	جنوب‌شرق	۹,۶۶	۱۱,۴۷	۰,۸۴۲
	جنوب	۱۵,۹۱	۱۷,۸۶	۰,۸۹۱
	جنوب‌غرب	۱۳,۰۷	۱۷,۴۵	۰,۷۴۹
	غرب	۱۱,۳۶	۱۲,۳۰	۰,۹۲۴
	شمال‌غرب	۱۱,۶۵	۱۲,۲۳	۰,۹۵۲
سنگ‌شناسی	سیلت‌سنگ و شیل	۱,۴۲	۰,۵۷	۲,۵۰۳
	ماسه‌سنگ	۱,۷۰	۰,۶۴	۲,۶۷۹
	ماسه‌سنگ، شیل و مارن	۰,۲۸	۰,۲۲	۱,۲۶۳
	شیل، ماسه‌سنگ و سیلت‌سنگ	۸,۲۴	۷,۲۸	۱,۱۳۱
	مارن سیلت‌دار و ماسه‌سنگ	۳,۱۳	۲,۹۷	۱,۰۵۲
	کنگلومرا و ماسه‌سنگ	۱۳,۹۲	۱۹,۰۸	۰,۷۳۰
	توف و آگلومرا	۳۷,۲۲	۳۴,۴۴	۱,۰۸۱
	سنگ‌آهک	۱۷,۶۱	۱۱,۱۶	۱,۵۷۹
	سنگ‌آهک مارنی	۳,۴۱	۱,۷۱	۱,۹۸۸
	دولومیت	۰,۰۰	۰,۲۱	۰,۰۰۰

جدول ۳: ادامه

عامل	رده	درصد پیکسل لغزش	درصد پیکسل هر رده	مقدار FR
سنگ‌شناسی	آبرفت و رسوبات واریزه‌ای	۱۱,۳۶	۲۰,۰۶	۰,۵۶۶
	سنگ‌های آذرین	۱,۷۰	۱,۶۵	۱,۰۳۰
شاخص تراکم پوشش گیاهی	<۰	۰,۰۰	۰,۱۱	۰,۰۰۰
	۰,۲-۰	۸۸,۹۲	۸۸,۲۳	۱,۰۰۸
	۰,۴-۰,۲	۹,۰۹	۱۰,۵۶	۰,۸۶۱
	۰,۴<	۱,۹۹	۱,۱۰	۱,۸۱۰
بارندگی (میلی‌متر)	<۲۷۵	۱,۹۹	۶,۰۴	۰,۳۲۹
	۳۵۰-۲۷۵	۲۱,۰۲	۲۰,۹۶	۱,۰۰۳
	۴۵۰-۳۵۰	۳۱,۲۵	۴۱,۸۵	۰,۷۴۷
	۵۵۰-۴۵۰	۲۹,۸۳	۲۲,۰۲	۱,۳۵۵
	۵۵۰<	۱۵,۹۱	۹,۱۳	۱,۷۴۳
فاصله از گسل (متر)	<۱۰۰	۱۴,۴۹	۱۰,۴۰	۱,۳۹۳
	۳۰۰-۱۰۰	۲۲,۷۳	۱۷,۱۳	۱,۳۲۶
	۶۰۰-۳۰۰	۲۳,۵۸	۱۶,۷۵	۱,۴۰۸

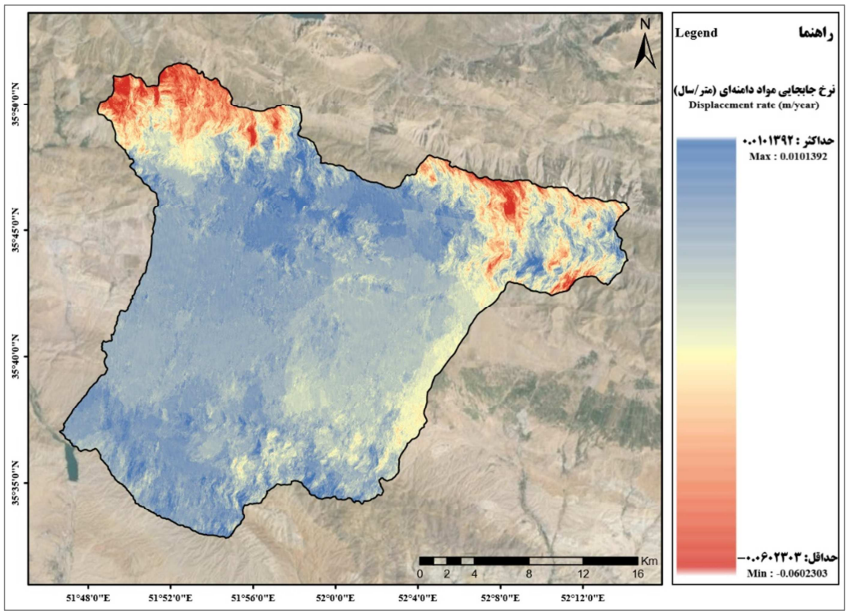
	۱۰۰۰-۶۰۰	۱۶,۱۹	۱۵,۳۹	۱,۰۵۲
	۱۰۰۰<	۲۳,۰۱	۴۰,۳۳	۰,۵۷۱
فاصله از جاده (متر)	<۲۵۰	۱۶,۴۸	۱۳,۸۳	۱,۱۹۱
	۷۵۰-۲۵۰	۱۳,۹۲	۲۰,۰۸	۰,۶۹۳
	۱۵۰۰-۷۵۰	۱۱,۶۵	۲۱,۸۴	۰,۵۳۳
	۳۰۰۰-۱۵۰۰	۲۵,۵۷	۲۴,۳۳	۱,۰۵۱
	۳۰۰۰<	۳۲,۳۹	۱۹,۹۲	۱,۶۲۶
فاصله از رودخانه (متر)	<۱۰۰	۱۹,۸۹	۱۲,۶۴	۱,۵۷۳
	۳۰۰-۱۰۰	۳۱,۲۵	۲۲,۰۳	۱,۴۱۹
	۶۰۰-۳۰۰	۲۱,۸۸	۲۶,۶۱	۰,۸۲۲
	۱۰۰۰-۶۰۰	۱۸,۷۵	۲۴,۵۱	۰,۷۶۵
	۱۰۰۰<	۸,۲۴	۱۴,۲۱	۰,۵۸۰
شاخص تری توپوگرافی	<۴	۴,۲۶	۲,۱۱	۲,۰۲۳
	۵,۵-۴	۴۶,۵۹	۳۸,۰۴	۱,۲۲۵
	۷-۵,۵	۳۸,۹۲	۳۹,۳۴	۰,۹۸۹
	۸,۵-۷	۷,۳۹	۱۲,۰۹	۰,۶۱۱
	۸,۵<	۲,۸۴	۸,۴۳	۰,۳۳۷
انحناء	محدب (-)	۴۵,۴۵	۴۷,۸۳	۰,۹۵۰
	هموار (۰)	۵,۹۷	۵,۷۹	۱,۰۳۱
	مقعر (+)	۴۸,۵۸	۴۶,۳۸	۱,۰۴۷
انحناء سطح	محدب (-)	۴۶,۵۹	۴۷,۶۰	۰,۹۷۹
	هموار (۰)	۱,۹۹	۳,۴۳	۰,۵۷۹
	مقعر (+)	۵۱,۴۲	۴۸,۹۷	۱,۰۵۰
انحناء نیم‌رخ	محدب (-)	۴۷,۴۴	۴۷,۰۹	۱,۰۰۸
	هموار (۰)	۲,۵۶	۲,۶۶	۰,۹۶۳
	مقعر (+)	۵۰,۰۰	۵۰,۲۶	۰,۹۹۵



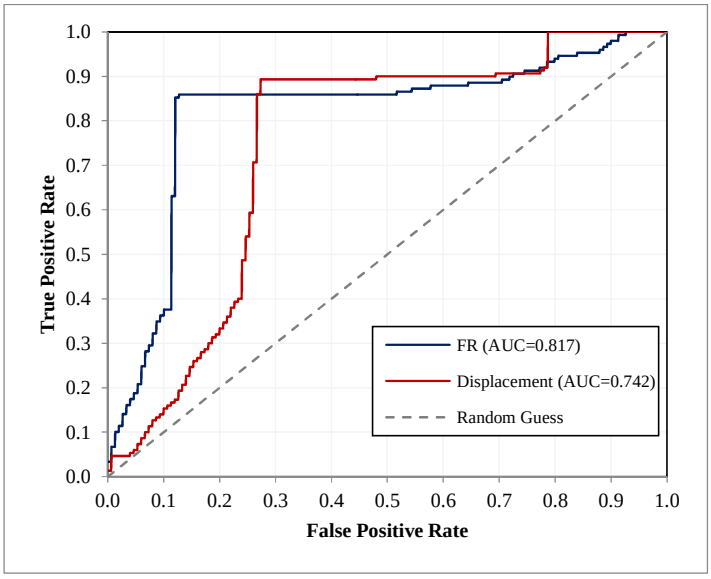
شکل ۴: نقشه پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش به روش نسبت فراوانی (FR)

جدول ۴: مقادیر شاخص‌های نسبت تراکم و مجموع کیفیت محاسبه‌شده برای رده‌های استعداد زمین‌لغزش به روش FR

رده خطر	تعداد پیکسل هر رده	تعداد پیکسل لغزش	Si/Ai	Dr	$(Dr-1)^2 \times s$	Qs
خیلی کم	۳۱۰۲۸	۱۸۰۰	۰,۰۵۸	۱,۳۴۳	۰,۰۳۶	۰,۷۸۹
کم	۳۰۷۰۷۸	۴۰۵۰۰	۰,۱۳۲	۳,۰۵۴	۰,۳۴۵	
متوسط	۲۸۰۱۶۶	۱۱۷۹۰۰	۰,۴۲۱	۹,۷۴۵	۰,۲۷۳	
زیاد	۱۶۳۴۱۱	۱۳۵۹۰۰	۰,۸۳۲	۱۹,۲۵۸	۰,۱۲۷	
خیلی زیاد	۵۴۱۳۸	۱۵۵۷۰۰	۲,۸۷۶	۶۶,۵۹۹	۰,۰۰۷	



شکل ۵: نقشه نرخ جابه‌جایی حاصل از پردازش تصویر سنتینل-۱ به روش DInSAR



شکل ۶: منحنی تشخیص عملکرد نسبی نقشه‌های استعداد زمین‌لغزش به روش FR و جابه‌جایی زمین

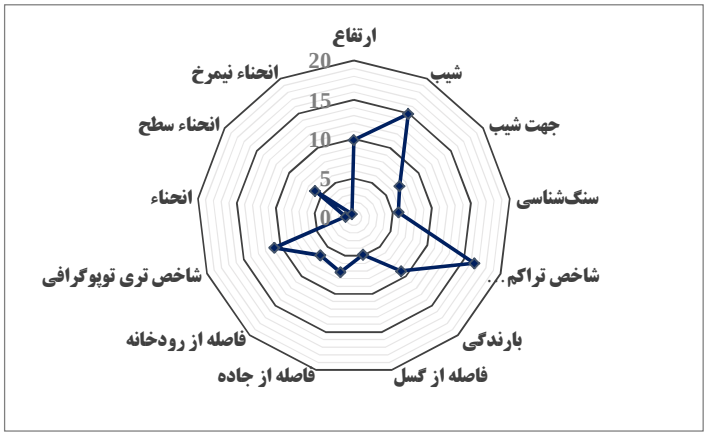
نتایج و بحث

طبق مطالعات صورت‌گرفته در خصوص وقوع زمین‌لغزش، عوامل شاخص تراکم پوشش‌گیاهی، شیب، شاخص تری توپوگرافی، ارتفاع و بارندگی به‌ترتیب با ۱۶/۴۱، ۱۴/۹۲، ۱۰/۸۴، ۹/۹۰ و ۹/۱۱ درصد، بیشترین تاثیرگذاری را در پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش به روش نسبت فراوانی دارا می‌باشند (شکل۷). تعیین این عوامل بر اساس مطالعه

آماری زمین‌لغزش‌های پیشین، اطلاعات ثبت‌شده در تفسیر عکس‌های هوایی و اعمال مشاهدات میدانی انجام شده است. ازاین‌رو، در ادامه به بررسی دلایل تاثیرگذاری هر یک از عوامل موثر و نقش زیررده‌های آن در بروز این مخاطره پرداخته می‌شود. بیشترین وزن شاخص تراکم پوشش‌گیاهی را رده <۰/۴ به خود اختصاص داده است. این بدان معناست نیست که در منطقه مطالعاتی پوشش‌گیاهی محرک ناپایداری می‌باشد. لغزش‌های این رده، همگی در مناطق مسکونی احداث‌شده در دامنه‌ها به وقوع پیوسته است. به همین دلیل با بررسی‌های صورت‌گرفته، نقش عوامل دیگری همچون تغییر کاربری اراضی، شاخص تری توپوگرافی، فاصله از رودخانه و فاصله از جاده در بروز لغزش‌ها محرز گردید. از طرفی، رده ۰/۲-۰ با پوشش‌گیاهی ضعیف در رتبه بعدی بیشترین تاثیرگذاری قرار دارد. ۸۹ درصد از لغزش‌های منطقه در این رده رخ داده است. بر طبق مطالعات انجام‌شده، رده <۳۰ از فاکتور شیب بیشترین تاثیرگذاری را در احتمال وقوع لغزش دارد. به‌طورکلی، عامل حرکت بر روی یک سطح شیب‌دار نیروی گرانش است. شیب دامنه‌ها رابطه معکوس با پایداری دامنه‌ها دارند؛ به‌طوری‌که با افزایش این پارامتر ضریب پایداری شیب کاهش می‌یابد. این رابطه در این پژوهش نیز صادق می‌باشد؛ به‌طوری‌که با افزایش شیب میزان نسبت فراوانی به‌صورت نمایی با ضریب تعیین (R^2) ۰/۹۸۷۷ افزایش یافته است. در رابطه با عامل شاخص تری توپوگرافی، رده ۴< بیشترین وزن را دارا می‌باشد. مطابق محاسبات، با افزایش TWI، میزان نسبت فراوانی به‌صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد. علت این امر نیز به تعداد انباشت آب در مناطق مسطح و رودخانه‌های جاری در منطقه مرتبط است. در واقع حد بحرانی این شاخص در شیب‌ها کمتر از چهار می‌باشد؛ به‌طوری‌که این میزان رطوبت، ارتباط تنگاتنگی با بروز لغزش‌های کم‌عمق دارد. همچنین، تاثیر این عامل زمانی بیشتر می‌گردد که عواملی مثل بافت خاک و نوع سازند پتانسیل ایجاد لغزش‌ها را فراهم نماید. ارتفاع زیاد دامنه‌ها ازجمله عوامل مهمی هست که شرایط را برای حرکات دامنه‌ای و زمین‌لغزش فراهم می‌کنند. بر اساس بررسی‌های صورت‌گرفته در رده ۲۰۰۰-۲۵۰۰ متر از عامل ارتفاع، احتمال وقوع مکانی زمین‌لغزش بیشینه بوده و در ادامه سیر نزولی دارد. علت این عامل را باید در وجود خاک کم‌عمق و مناطق سنگی پایدار در ارتفاعات بالا جستجو کرد. البته وقوع سایر حرکات توده‌ای نظیر ریزش در این مناطق محتمل است. از سوی دیگر، این روند همان‌طورکه در نتایج نشان‌داده شده، نمایانگر نقش بارندگی در وقوع زمین‌لغزش می‌باشد؛ زیرا با افزایش ارتفاع میزان بارش بیشتر شده و حساسیت وقوع لغزش‌ها نیز بیشتر می‌شود. اما این روند در ارتفاعات بالا به‌علت بارش برف و پدیده یخبندان در بخش زیادی از سال باعث کندی پدیده خاک‌زایی شده و همچنین عدم وجود آب کافی برای اشباع سازندها و کاهش دخالت‌های انسانی در ارتفاعات بالا از دلایل کاهش زمین‌لغزش ارتفاعات می‌باشد. زمین‌لغزش ارتباط نزدیکی با مقدار بارندگی و زمان دوام آن در منطقه دارد. تاثیر باران به دو صورت افزایش وزن توده و کاهش مقاومت برشی می‌باشد. در همین راستا بیشترین وزن فاکتور بارندگی را رده <۵۵۰ میلی‌متر به خود اختصاص داده است. به‌دلیل کوهستانی بودن منطقه مطالعاتی و غالب بودن پدیده بارندگی که باعث اشباع شدن دامنه و در نتیجه کاهش نیروی موئینگی در خاک و افزایش فشار آب منفذی در مصالح تشکیل‌دهنده دامنه (که نتیجه همه آن‌ها کاهش مقاومت برشی مصالح است) می‌شود، این فاکتور از اهمیت بالایی در احتمال رخداد زمین‌لغزش برخوردار است.

در سایر عوامل موثر، جهات شمال و شمال‌شرق با بیشترین نسبت فراوانی، احتمال وقوع لغزش بالاتری را دارند. عامل جهت شیب، بیشتر به‌عنوان فاکتور مکمل شناخته می‌شود. در عامل سنگ‌شناسی، سه رده سیلت‌سنگ و شیل،

ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک مارنی بیشترین حساسیت را نشان می‌دهند. اکثریت این رده‌ها شامل سازندهایی همچون باروت، زاگون، لالون، نسن، الیکا و دلیچای می‌باشد. سازندهای شیلی، مارنی و آهک مارنی معمولا شامل سنگ‌های ضعیف و هوازده‌ای هستند که به‌ویژه در دامنه‌های پرشیب، از پایداری اندکی برخوردارند. فرسایش‌پذیری زیاد، استحکام و دوام‌پذیری بسیار اندک، حساسیت نسبتاً زیاد به آب و تورم‌پذیری بالا ازجمله خصوصیت‌های بارز این سنگ‌ها می‌باشد. به‌طورکلی اینگونه سنگ‌ها در حالت خشک و طبیعی، از مقاومت برشی نسبتاً مطلوبی برخوردار هستند. اما پس از جذب رطوبت و مجاورت با آب‌های سطحی و زیرزمینی، به‌شدت دچار کاهش مقاومت می‌گردند. از سوی دیگر ۳۷/۲ درصد از مساحت کل لغزش‌ها، در سازند کرج ثبت شده است. گسل‌ها نیز می‌توانند با ایجاد شکستگی‌ها و یا زون‌های خردشده در اطراف خود، احتمال وقوع زمین‌لغزش را افزایش دهند. این عامل در ترکیب با سایر عوامل در وقوع ناپایداری‌ها مؤثر هستند. رده‌های ۱۰۰> و ۶۰۰-۳۰۰ متر بیشترین احتمال وقوع لغزش را دارند و با افزایش فاصله از میزان نسبت فراوانی کاسته می‌شود. بررسی‌ها نشان‌دهنده این است که وجود گسل اصلی مشا بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه بی‌تأثیر نبوده است. در عامل فاصله از جاده، رفتارهای متفاوتی در فواصل مختلف مشاهده شد. در فاصله زیر ۲۵۰ متر افزایش حساسیت، ۱۵۰۰-۲۵۰ متر کاهش حساسیت و پس از آن دوباره افزایش حساسیت مشاهده می‌شود. علت این بی‌نظمی را می‌توان در غلبه رده‌های عوامل دیگر نظیر شیب، شاخص تری توپوگرافی و بارندگی بر رده‌های عامل فاصله از جاده دانست. این موضوع ریشه در این حقیقت دارد که عوامل موثر در وقوع زمین‌لغزش برهمکنش و تعاملات پیچیده‌ای داشته، کما اینکه این موضوع در طبیعت نیز دیده می‌شود. آب-های سطحی به‌خصوص رودخانه‌ها هم یکی از اصلی‌ترین عوامل فرسایش هستند. رودخانه‌ها، پای شیب دامنه‌ها و دیواره‌های مسیر خود را فرسایش می‌دهند. فرسایش و حمل مصالح موجود در پای شیب باعث می‌شود بخشی از نیروهای مقاوم که در مقابل لغزش دامنه‌ها مقاومت می‌کنند، از بین بروند و شرایط برای لغزش و سایر انواع ناپایداری‌ها فراهم گردد. ازاین‌رو، در این مطالعه نیز با افزایش فاصله از رودخانه، مقدار نسبت فراوانی کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که رده ۱۰۰> متر بیشترین تاثیرگذاری را در وقوع لغزش دارا می‌باشد. اثرات انحناء ناشی از کنترلی است که مقادیر انحناء بر پدیده فرسایش خاک و حرکت سریع آب در دامنه‌ها دارد. در همین راستا در دو عامل انحناء و انحناء سطح، رده مقعر (+) و در فاکتور انحناء نیم‌رخ رده‌های مقعر و محدب بیشترین میزان نسبت فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند. به‌طورکلی مناطق مقعر به نوبه خود باعث افزایش رطوبت موجود در خاک می‌شوند که این عامل باعث افزایش فرسایش و کاهش ثبات خاک می‌گردد. از طرفی بیشتر زمین‌لغزش‌های حوضه از نوع چرخشی بوده و این تیپ لغزشی دارای سطح لغزشی قاشقی شکل مشابه مدل انحنا بحرانی به‌دست‌آمده در این مطالعه است. بنابراین، نتیجه حاصل از ادغام این عوامل قابل‌قبول می‌باشد.



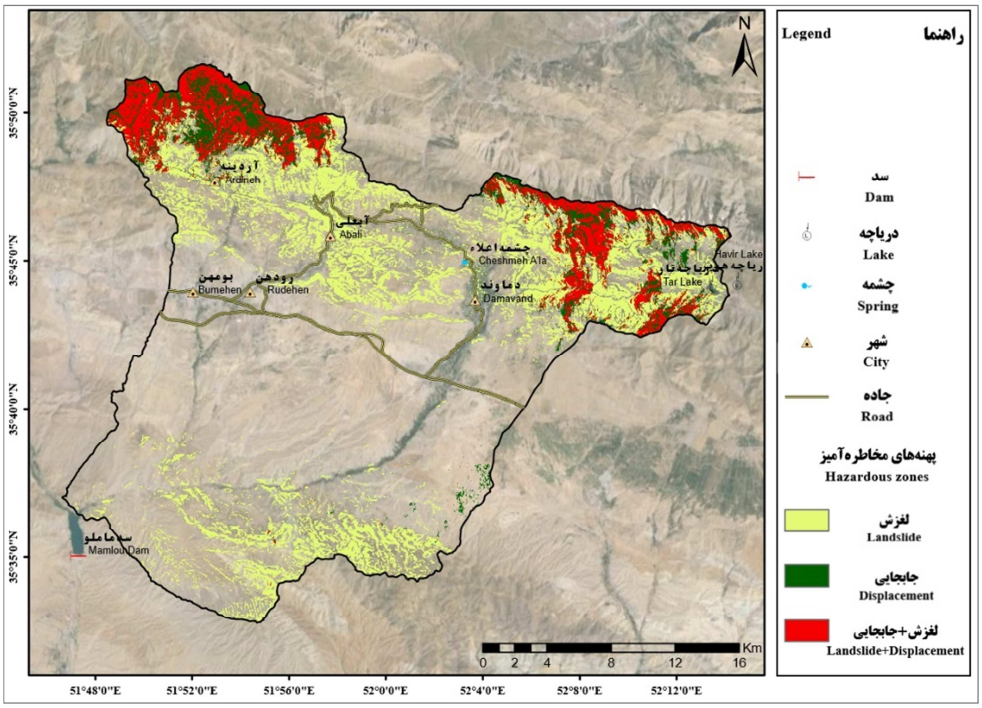
شکل ۷: اهمیت عوامل موثر وقوع زمین‌لغزش در روش FR

در مطالعه فیض‌نیا و محمدی (۱۳۸۷) که در حوضه آبخیز دماوند به انجام رسیده است، عوامل مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش را کاربری اراضی، سازند زمین‌شناسی، بارندگی، شیب، جهت شیب و ارتفاع معرفی کردند که از این بین چهار عامل کاربری اراضی، بارندگی، شیب و ارتفاع مورد تایید می‌باشد. اما این پژوهش به نقش شاخص تری توپوگرافی که نقش مهمی در بروز لغزش‌های کم‌عمق دارد، اشاره نکرده است.

بررسی وضعیت میزان حرکات دامنه‌ای منطقه بیانگر این است که نواحی شمالی محدوده مطالعاتی دارای بیشترین پتانسیل جابه‌جایی هستند. همچنین، نتایج حاصل از پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش به روش نسبت فراوانی گویای آن است که بخش‌های شمالی محدوده به‌دلیل شرایط لازم، پتانسیل خیلی زیادی جهت رخداد زمین‌لغزش دارند. بدین منظور برای شناسایی نواحی مخاطره‌آمیز، منطقه مورد مطالعه مطابق شکل ۸ به سه پهنه که شامل: مناطق با پتانسیل خیلی‌زیاد و زیاد جهت وقوع لغزش (براساس شکل۴)، مناطق با جابه‌جایی بیش از ۲۵ میلی‌متر در سال و مناطق با پوشش مشترک هر دو پهنه قبلی (مناطق با پتانسیل خیلی‌زیاد و زیاد استعداد زمین‌لغزش+ مناطق با جابه‌جایی ۲۵ میلی‌متر در سال) می‌باشد، تقسیم گردید. ازاین‌رو مناطق مستعد لغزش ۲۵/۶ درصد، مناطق دارای جابه‌جایی بیش از ۲۵ میلی‌متر در سال ۱۰/۲۱ درصد و همچنین مناطق مستعد لغزش و دارای جابه‌جایی بیش از ۲۵ میلی‌متر در سال ۶/۵۴ درصد از کل مساحت محدوده را در برگرفته است (جدول۵).

یوسفی و کرم (۱۳۹۶) به مطالعه سه مخاطره‌ی زمین‌لرزه، سیلاب و زمین‌لغزش در شهرستان دماوند پرداختند. این پژوهش نشان‌دهنده شدت نسبتاً زیاد مخاطرات ژئومورفیک در سکونتگاه‌های شهرستان دماوند است. بدین سبب بر اساس شکل ۸، به بررسی شهرها و جاده‌های اصلی و روستایی موجود در حوضه آبریز پرداخته شد. ما بین پنج شهر موجود در محدوده، سه شهر آردینه، دماوند و آبعلی در معرض خطر لغزش قرار دارند. در رسوبات کواترنری دامنه جنوبی شهر آردینه، استعداد لغزش بالایی قابل‌مشاهده است. همچنین، دامنه‌های شمالی این منطقه در پهنه سه نواحی مخاطره‌آمیز دسته‌بندی شده است. دامنه‌های شرق شهر دماوند در اثر جنس مصالح (شیل‌های توفی سازند کرج) و زیرشویی پای دامنه توسط رودخانه، مستعد بروز لغزش می‌باشند (شکل۹-الف). در غرب این شهر نیز خطر لغزش به‌دلیل دستکاری شیب طبیعی دیده می‌شود. شیب‌های موجود در شرق و غرب شهر آبعلی مستعد حرکت بوده (به‌خصوص دامنه‌های اطراف جاده امامزاده هاشم - رودهن) و در پهنه یک نواحی مخاطره‌آمیز جای می‌گیرند. از

بین جاده‌های اصلی، محورهای امامزاده هاشم - رودهن (جاده‌هراز) و آبعلی - گیلاوند مستعد وقوع لغزش و آسیب‌پذیری از این مخاطره می‌باشند (شکل۹-ب). همچنین، در جاده‌های روستایی ایراء، زره‌در، چنارشرق، تمیسیان، آردینه، سادات محله، جورد و هویر نیز نشانه‌هایی از پتانسیل رخداد لغزش وجود دارد.



شکل ۸: نقشه مناطق مستعد مخاطره در حوضه آبریز دماوند

جدول ۵: مساحت پهنه‌های مخاطره‌آمیز

پهنه	۱	۲	۳
مخاطره	مستعد لغزش	جابه‌جایی بیش از ۲۵ میلی‌متر در سال	مستعد لغزش+جابه‌جایی بیش از ۲۵ میلی‌متر در سال
مساحت (کیلومتر مربع)	۱۹۳,۹۶۰۸	۷۷,۳۳۸۸	۴۹,۵۳۷۸

نتیجه‌گیری

خلاصه نتایج پژوهش به شرح ذیل می‌باشد:

۱- پس از بررسی‌های میدانی، تفسیر عکس‌های هوایی و مطالعات کتابخانه‌ای، در مجموع ۵۰۲ زمین‌لغزش در حوضه آبریز دماوند شناسایی گردید که ۳۰ درصد (۱۵۰ لغزش) از این مقدار به‌عنوان داده‌های آزمایشی و ۷۰ درصد (۳۵۲ لغزش) به مثابه داده‌های آموزشی برای پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفت. الگوهای لغزش در این ناحیه متنوع بوده که شامل: حرکات دامنه‌ای سریع ناشی از بارندگی، ریزش سنگ، جهش[1] و غلتش[2]، لغزش‌های

[1] -Bouncing
[2] -Rolling

کم‌عمق و جریان گل و واریزه می‌باشد. این الگوهای لغزش بازتاب مستقیمی از تعامل پیچیده بین خصوصیت‌های طبیعی و انسانی در منطقه مطالعاتی است که نمایان‌گر لزوم استفاده از روش‌های ترکیبی برای تحلیل زمین‌لغزش‌ها می‌باشد.

۲- نقشه پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش با روش نسبت فراوانی (FR) مناطق مستعد و پرخطر در منطقه مطالعاتی را به خوبی مشخص کرده و نشان می‌دهد که در این روش از کل زمین‌لغزش‌ها، ۶۴/۵۴ درصد در رده‌های با خطر خیلی‌زیاد و زیاد، ۲۶/۱۰ درصد در رده با خطر متوسط و ۹/۳۶ درصد در رده‌های با خطر کم و خیلی‌کم قرار دارد. همچنین، با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده و بر اساس نحوه پراکنش زمین‌لغزش‌های پیشین، می‌توان سه عامل شاخص تراکم پوشش‌گیاهی، شیب و شاخص تری توپوگرافی را از عوامل اصلی وقوع زمین‌لغزش در منطقه دانست.



(الف)



(ب)

شکل ۹: زمین‌لغزش‌های شناسایی‌شده در: الف) شرق شهر دماوند؛ ب) جاده هراز (محور امامزاده هاشم-رودهن)

۳- برای ایجاد نقشه جابه‌جایی زمین از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) که روش بسیار دقیقی به منظور آشکارسازی حرکات دامنه‌ای در بازه زمانی مختلف است، استفاده شد. در همین راستا، در بازه زمانی ۷ اکتبر ۲۰۲۱ الی ۲۷ سپتامبر ۲۰۲۳، نقشه تغییر شکل منتج از ۱۶ تصویر راداری سنتینل-۱ ایجاد گردید. بر این اساس، در محدوده مطالعاتی به‌صورت میانگین حداکثر و حداقل میزان جابه‌جایی به‌ترتیب بین ۱ و ۶- سانتی‌متر در سال می‌باشد. بیشترین حرکات دامنه‌ای در مناطق شمالی حوضه آبریز قابل‌مشاهده است. با توجه به اینکه ناحیه مورد مطالعه در منطقه کوهستانی قرار دارد و با مسئله افت آب زیرزمینی مواجه نیست و به‌دلیل قرارگیری این محدوده در دامنه‌های جنوبی البرز، جابه‌جایی صورت‌گرفته را می‌توان به حرکات دامنه‌ای و عوامل تکتونیکی نسبت داد. نتایج

پژوهش‌های میدانی و مقایسه نقشه یادشده با زمین‌لغزش‌های پیشین (AUC=۰/۷۴۲)، صحت و دقت بسیار خوب تصاویر ماهواره‌ای را تأیید می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد که تصاویر راداری از پتانسیل خوبی برای آشکارسازی و پایش ناپایداری دامنه‌ها و محاسبه جابه‌جایی آنها برخوردارند.

۴- دقت بسیار بالا نقشه‌های جابه‌جایی زمین و پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش به روش نسبت فراوانی و همچنین، دغدغه شناسایی نواحی مخاطره‌آمیز سبب شد تا منطقه مورد مطالعه به سه پهنه که شامل: مناطق با پتانسیل خیلی‌زیاد و زیاد جهت وقوع لغزش، مناطق با جابه‌جایی بیش از ۲۵ میلی‌متر در سال و مناطق با پوشش مشترک هر دو پهنه قبلی (مناطق با پتانسیل خیلی‌زیاد و زیاد استعداد زمین‌لغزش+ مناطق با جابه‌جایی ۲۵ میلی‌متر در سال) می‌باشد، تقسیم شود. بر این اساس، سه پهنه مورد اشاره ۴۲/۳۵ درصد از کل مساحت حوضه آبریز را به خود اختصاص می‌دهند که مناطق شمالی بیشترین سهم را دارا می‌باشد. نقشه نهایی را می‌توان به‌عنوان چهارچوبی برای پایش، برنامه‌ریزی و اتخاذ استراتژی مناسب جهت توسعه پایدار در مناطق حساس مورد استفاده قرارداد.

۵- بر اساس هدف پژوهش و با توجه به نقشه نواحی مخاطره‌آمیز، شهرهای آردینه، دماوند و آبعلی، محورهای امامزاده هاشم - رودهن (جاده هراز) و آبعلی - گیلاوند و جاده‌های روستایی ایراء، زره‌در، چنارشرق، تمیسیان، آردینه، سادات محله، جورد و هویر در معرض وقوع لغزش و آسیب‌پذیری از این مخاطره می‌باشند.

استفاده از سایر روش‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش و مقایسه میزان دقت آنها با این پژوهش به همراه افزایش بازه زمانی اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین (بیشتر از دو سال)، از مسیرهای تحقیقاتی است که می‌توانند به ادامه و تکمیل این پژوهش کمک نمایند. در انتها پیشنهاد می‌شود که حریم جاده‌های روستایی و آبراهه‌ها بر اساس نتایج حاصل از نواحی مخاطره‌آمیز در این پژوهش تعیین و بازبینی گردد. همچنین به جهت اهمیت پوشش‌گیاهی در مطالعات صورت‌گرفته، توصیه می‌گردد که در حوضه آبریز دماوند گیاهان سازگار با منطقه (دارای ریشه زیاد، گسترده و عمیق) جهت ممانعت از وقوع لغزش، کاشته شود.

منابع

اشرفی‌فینی، زهرا؛ روستایی، شهرام؛ مختاری، داود؛ معتق، مهدی. (۱۳۹۷). شناسایی و پایش ناپایداری دامنه‌ای به روش پردازش اینترفرومتری تفاضلی در حوضه آبریز طالقان، پایان‌نامه، دانشگاه تبریز، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی.

اصغری سراسکانرود، صیاد؛ محمدزاده شیشه‌گران، مریم؛ زالی‌کرده مهینی، عادل. (۱۴۰۰). ارزیابی ناپایداری دامنه‌ای جاده‌های اردبیل- سرعین - سراب با استفاده از تداخل‌سنجی رادار. جغرافیا و پایداری محیط، دوره۱۱، شماره۲، صفحه ۱۰۴-۹۱.

انتظاری، مژگان؛ کردوانی، موسی. (۱۴۰۱). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های مبتنی بر GIS و داده‌های راداری (مطالعه موردی: فریدون شهر)، مخاطرات محیط طبیعی، دوره۱۱، شماره۳۳.

سفیدگری، رضا؛ غیومیان، جعفر؛ فیض نیا، سادات. (۱۳۸۴). ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش درمقیاس ۱:۵۰۰۰۰ (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دماوند). همایش ملی فرسایش و رسوب. تهران، ایران. https://civilica.com/doc/8332

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. (۱۳۹۷). نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش ایران، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰.

علیخانی، حمید؛ شهابی، هیمن؛ محمدی، ایوب. (۱۴۰۰). شناسایی و پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌های جاده کوهستانی سنندج - مریوان با استفاده از داده‌های راداری و الگوریتم های پیشرفته داده کاوی، پایان‌نامه، دانشگاه کردستان، دانشکده منابع طبیعی.

فیض نیا، سادات؛ محمدی، علی اصغر. (۱۳۸۷). پهنه‌بندی حرکت‌های لغزشی با بهره‌گیری از درون‌یابی ویژه و درصددهی به هر یک از زیرعامل‌ها در حوزه آبخیز دماوند. منابع طبیعی ایران، ۶۱ (۱)، ۲۹-۴۲.

یوسفی، فاطمه؛ کرم، امیر؛ کیانی، طیبه. (۱۳۹۶). تحلیل مخاطرات ژئومورفیک شهرستان دماوند به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌ها، پایان‌نامه، دانشگاه خوارزمی، گروه جغرافیای طبیعی.

Anbalagan, R. (1992). Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. Engineering geology, 32(4), 269-277.

Arsyad, A., & Muhiddin, A. B. (2023). Landslide Susceptibility Mapping for Road Corridors Using Coupled InSAR and GIS Statistical Analysis. Natural Hazards Review, 24(3), 05023007.

Davari Sarem, M., Habibi, A., & Roshan Liarajdameh, M. (2022). Application of digital elevation model in preparation of hazard maps: a case study of Paveh county, Kermanshah province, Iran, The Second International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Planning, Environment and Horizons of Islamic Art, Tabriz, Iran. https://civilica.com/doc/1613642

Davari Sarem, M., Hassanpour, J., Roshan Liarajdameh, M., & Habibi, A. (2024). Investigating the impacts of effective factors on Sipey village landslide occurrence (Savadkuh County, Mazandaran province), 3rd International Conference on Quaternary Sciences, Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/2110601/

Devara, M., Tiwari, A., & Dwivedi, R. (2021). Landslide susceptibility mapping using MT-InSAR and AHP enabled GIS-based multi-criteria decision analysis. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 12(1), 675-693.

Fall, M., Azzam, R., & Noubactep, C. (2006). A multi-method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping. Engineering geology, 82(4), 241-263.

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 39(1), 8-20.

Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B7), 9183-9191.

Gee, M. D. (1992). Classification of a river basin, central Italy. Environmental management, 25, 247-263.

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(1-4), 181-216.

Kanungo, D. P., Arora, M. K., Sarkar, S., & Gupta, R. P. (2006). A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas. Engineering geology, 85(3-4), 347-366.

Kouhartsiouk, D., & Perdikou, S. (2021). The application of DInSAR and Bayesian statistics for the assessment of landslide susceptibility. Natural Hazards, 105(3), 2957-2985.

Liu, M., Xu, B., Li, Z., Mao, W., Zhu, Y., Hou, J., & Liu, W. (2023). Landslide susceptibility zoning in Yunnan Province based on SBAS-InSAR technology and a random forest model. Remote Sensing, 15(11), 2864.

Polcari, M., Palano, M., Fernández, J., Samsonov, S. V., Stramondo, S., & Zerbini, S. (2016). 3D displacement field retrieved by integrating Sentinel-1 InSAR and GPS data: the 2014 South Napa earthquake. European journal of remote sensing, 49(1), 1-13.

WP/WLI (International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory), (1993a). A suggested method for describing the activity of a landslide. Bulletin International Association of Engineering Geology, 47, 53–57.

Zhang, Y., Meng, X., Jordan, C., Novellino, A., Dijkstra, T., & Chen, G. (2018). Investigating slow-moving landslides in the Zhouqu region of China using the InSAR time series. Landslides, 15, 1299-1315.

University of Sistan and Baluchestan
Journal of Natural Environment Hazards
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

References

References (in Persian)

Alikhani, A., Shahabi, H., Mohammadi, A., (2021). Identification and zoning of Sanandaj-Marivan mountain road landslides using radar data and advanced data mining algorithms. Thesis, University of Kurdistan, Faculty of Natural Resources. [In Persian]

Asghari Sareskanrood, S., Mohammadzadeh Shishegaram, M., & Asghari Sareskanrood, S. (2022). Zoning and estimation of range movements in Hashtroud city using radar interferometry and MABAC model. Environmental Management Hazards, 9(2), 133-150. [In Persian]

Ashrafi Fini, Z., Roostaei, Sh., Mokhtari, D., Motagh, M., (2018). Identification and monitoring of domain instability by differential intermetal processing in the Taleghan watershed. Thesis, University of Tabriz, Faculty of Planning & Environmental Sciences. [In Persian]

Entezari, M., & Kordavani, M. (2022). Landslide hazard zoning using GIS-based methods and radar data (Case study: Fereydoon Shahr). Journal of Natural Environmental Hazards, 11(33), 177-196. [In Persian]

Faiz Nia, S., Mohammadi, A. A., (2008). Landslide hazard zonation using specific interpolation and giving a percentage to each subfactor in the Damavand Drainage basin. Journal of Natural Resources, 61(1), 29-42. [In Persian]

Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. (2018). Landslide hazard zoning map of Iran, scale 1:1000000. [In Persian]

Sefidgari, R., Ghoumian, J., Faiz Nia, S., (2005). Evaluation of landslide hazard zoning methods on a scale of 1:50000 (case study: Damavand watershed). 3rd national conference on erosion and sedimentation, Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/8332 [In Persian]

Yousefi, F., Karam, A., Kiani, T., (2017). Geomorphic hazards analysis of Damavand County to settlements vulnerability assessment. Thesis, University of Kharazmi, Faculty of Geography. [In Persian].

References (in English)

Anbalagan, R. (1992). Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. Engineering geology, 32(4), 269-277.

Arsyad, A., & Muhiddin, A. B. (2023). Landslide Susceptibility Mapping for Road Corridors Using Coupled InSAR and GIS Statistical Analysis. Natural Hazards Review, 24(3), 05023007.

Davari Sarem, M., Habibi, A., & Roshan Liarajdameh, M. (2022). Application of digital elevation model in preparation of hazard maps: a case study of Paveh county, Kermanshah province, Iran, The Second International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Planning, Environment and Horizons of Islamic Art, Tabriz, Iran. https://civilica.com/doc/1613642

Davari Sarem, M., Hassanpour, J., Roshan Liarajdameh, M., & Habibi, A. (2024). Investigating the impacts of effective factors on Sipey village landslide occurrence (Savadkuh County, Mazandaran province), 3rd International Conference on Quaternary Sciences, Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/2110601/

Devara, M., Tiwari, A., & Dwivedi, R. (2021). Landslide susceptibility mapping using MT-InSAR and AHP enabled GIS-based multi-criteria decision analysis. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 12(1), 675-693.

Fall, M., Azzam, R., & Noubactep, C. (2006). A multi-method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping. Engineering geology, 82(4), 241-263.

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 39(1), 8-20.

Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B7), 9183-9191.

Gee, M. D. (1992). Classification of a river basin, central Italy. Environmental management, 25, 247-263.

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(1-4), 181-216.

Kanungo, D. P., Arora, M. K., Sarkar, S., & Gupta, R. P. (2006). A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas. Engineering geology, 85(3-4), 347-366.

Kouhartsiouk, D., & Perdikou, S. (2021). The application of DInSAR and Bayesian statistics for the assessment of landslide susceptibility. Natural Hazards, 105(3), 2957-2985.

Liu, M., Xu, B., Li, Z., Mao, W., Zhu, Y., Hou, J., & Liu, W. (2023). Landslide susceptibility zoning in Yunnan Province based on SBAS-InSAR technology and a random forest model. Remote Sensing, 15(11), 2864.

Polcari, M., Palano, M., Fernández, J., Samsonov, S. V., Stramondo, S., & Zerbini, S. (2016). 3D displacement field retrieved by integrating Sentinel-1 InSAR and GPS data: the 2014 South Napa earthquake. European journal of remote sensing, 49(1), 1-13.

WP/WLI (International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory), (1993a). A suggested method for describing the activity of a landslide. Bulletin International Association of Engineering Geology, 47, 53–57.

Zhang, Y., Meng, X., Jordan, C., Novellino, A., Dijkstra, T., & Chen, G. (2018). Investigating slow-moving landslides in the Zhouqu region of China using the InSAR time series. Landslides, 15, 1299-1315.