

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

Milad Davari Sarem¹, Jafar Hassanpour^{2*} , Maedeh Roshan Liarajdameh³

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), 13-74. 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

INTRODUCTION

Iran, having vast mountainous areas, high tectonic and seismic activity, and diverse geological and climatic conditions, has most of the natural conditions for creating a wide range of landslides. Therefore, identifying areas with landslide potential and zoning them is one of the fundamental steps in natural hazard management and reducing the damages caused by this phenomenon. The wide range of landslide phenomena makes it difficult to define a specific method for identifying and mapping them to determine and assess the associated hazards. However, experiences gained from experiments and surveys conducted in many parts of the world have shown that various strategies and combinations of methods and techniques are employed (Guzzetti et al., 1999; Kanungo et al., 2006; Zhang et al., 2018; Devara et al., 2021; Kouhartsiouk and Perdikou., 2021; Entezari and Kordavani., 2022; Liu et al., 2023; Davari Sarem et al., 2024). In this regard, this study utilizes a combination of two methods: landslide susceptibility mapping and Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) for monitoring areas with landslide potential. The innovation of this research compared to similar studies lies in the combined approach, whereby the region is divided into zones with varying degrees of hazard based on two factors: ground displacement and landslide susceptibility.

DATA AND METHODS

The study area, located 55 kilometres east of Tehran, lies on the southern slopes of the central Alborz in a mountainous region with a mild climate. The study region is situated at the northeastern end of the Salt Lake basin, within Tehran province (a small part of this area extends into Mazandaran province), and is one of Iran's sub-basins (the Damavand sub-basin), covering an area of 757.8 square kilometres. In the first step, a total of 502 landslides were identified within the area, which was divided into two groups: 30% (testing) and 70% (training). Next, using ArcGIS 10.8 software, maps of the effective factors (including elevation, slope, aspect, lithology, Normalized Differential Vegetation Index (NDVI), rainfall, distance from the fault, distance from the road, distance from the river, Topographic Wetness Index (TWI) [amount of water accumulated in different areas], curvature [geometric features of the land surface], plan curvature, and profile curvature) identified in the region were prepared. In the third step, the FR value was calculated for each subclass, which resulted in the preparation of a landslide susceptibility zoning map of the area with five risk classes: very high, high, moderate, low, and very low. In the final step, the results obtained from the intersection of the landslide occurrence zoning maps with the landslide distribution map and the calculation of the Density ratio (D_r) and Quality Index (Q_s) were presented for the proposed model. Also, using ESA-SNAP Desktop 9.0 software, a displacement map was created from 16 Sentinel-1 radar images in the satellite's line of sight for the period from October 7, 2021, to September 27, 2023. Finally, to evaluate and determine the accuracy of the landslide susceptibility and displacement maps, 30% (150 landslides) of the landslide data, which were randomly selected as test data, were used.

RESULTS AND DISCUSSION

According to studies conducted on landslide occurrence, normalized differential vegetation index, slope, topographic wetness index, elevation, and rainfall, in that order, have the greatest influence on landslide susceptibility zoning using the frequency ratio method. The results of the landslide susceptibility map evaluation indicate that the zoning map prepared using the FR method, with an area under the curve of 81.7%, has desirable and appropriate accuracy. Additionally, the ground displacement map, with an area under the curve of 74.2%, demonstrates high accuracy. The assessment of slope movement in the area indicates that the average maximum and minimum displacement rates in this region are between 1 and -6 centimetres per year, respectively. Also, the results from zoning landslide-prone areas using the frequency ratio and differential interferometric synthetic aperture radar methods show that the northern parts of the area have a very high potential for

landslide occurrence. To identify hazardous zones, the study area was therefore divided into three zones.

CONCLUSION

1- The landslide patterns in this area are diverse and include rapid slope movements induced by rainfall, rockfalls, bouncing and rolling, shallow landslides, and mudflows and debris flows. These landslide patterns are a direct reflection of the complex interaction between natural and human characteristics in the study area, highlighting the necessity of using combined methods for landslide analysis.

2- In the Frequency Ratio (FR) method, 64.54% of all landslides fall into the very high and high-risk classes, 26.10% fall into the moderate-risk class, and 9.36% fall into the low and very low-risk classes.

3- Considering that the study area is located in a mountainous region and does not face the problem of groundwater depletion, and due to its location on the southern slopes of the Alborz Mountains, the observed displacements can be attributed to slope movements and tectonic factors. The results of this research showed that radar images have good potential for detecting and monitoring slope instability and calculating their displacements.

4- The very high accuracy of the ground displacement maps and landslide susceptibility zoning using the frequency ratio method, along with the concern for identifying hazardous areas, led to the division of the study area into three zones: areas with very high and high potential for landslide occurrence, areas with a displacement exceeding 25 millimetres per year, and areas with overlapping coverage of both previous zones (areas with very high and high landslide susceptibility + areas with a displacement of 25 millimetres per year). Accordingly, these three zones account for 42.35% of the total basin area, with the northern regions having the largest share.

5- Based on the research objective and considering the map of hazardous areas, the cities of Ardineh, Damavand, and Abali, the Emamzadeh Hashem–Rudehen (Haraz Road), Abali–Gilavand axes, and the rural roads of Ira, Zerehdar, Chenar Shargh, Tamisan, Ardineh, Sadat Mahalleh, Javard, and Havir are exposed to landslide occurrence and vulnerability to this hazard.

REFERENCES

References (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]

References (in English)

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.

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.

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.

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.



مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۵، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۴

شناسایی پهنه‌های احتمالی زمین لغزش با استفاده از داده‌های DInSAR و

استعداد زمین لغزش: مطالعه موردی حوضه آبریز دماوند

میلااد داوری صارم^۱، جعفر حسن پور^{۲*} ID، مائده روشن لیارجدمه^۳

۱. پژوهشگر، معاونت پژوهش و فناوری، دانشگاه تهران

۲. دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول)

۳. دانشجوی دکتری، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	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 پوشش گیاهی، شیب و شاخص تری توپوگرافی (TWI) که نشان‌دهنده میزان آب انباشته‌شده در مناطق مختلف است، بیشترین تأثیر 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.
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.	

استناد: داوری صارم، میلااد، 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



© میلااد داوری صارم، جعفر حسن پور*، مائده روشن لیارجدمه.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

مقدمه

ایران با توپوگرافی اغلب کوهستانی، شرایط متنوع اقلیمی و زمین‌شناسی، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، بیشتر شرایط طبیعی برای ایجاد گستره وسیعی از زمین‌لغزش‌ها را دارا می‌باشد. 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. طیف گسترده پدیده زمین‌لغزش، تعیین یک روش خاص برای شناسایی و به نقشه درآوردن آنها، جهت تعیین و ارزیابی مخاطرات همراه را مشکل می‌سازد. ولی تجربیات بدست آمده از آزمایش‌ها و بررسی‌های انجام شده در بسیاری از نقاط جهان نشان داده است که استراتژی‌های مختلف و ترکیبی از روش‌ها و تکنیک‌ها به کار گرفته می‌شود (گازتی^۱ و همکاران، ۱۹۹۹؛ کانونگو^۲ و همکاران، ۲۰۰۶؛ ژانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۸؛ دوارا^۴ و همکاران، ۲۰۲۱؛ کوهارتسیوک و پردیکو^۵، ۲۰۲۱؛ انتظاری و کردوانی، ۱۴۰۱؛ لیو^۶ و همکاران، ۲۰۲۳؛ داوری صارم و همکاران، ۲۰۲۴). در همین راستا این مطالعه از ترکیب دو روش تهیه نقشه استعداد زمین‌لغزش^۷ و تداخل‌سنجی تفاضلی راداری^۸ برای پایش پهنه‌های دارای پتانسیل لغزش بهره می‌برد. نوآوری این پژوهش نسبت به تحقیقات مشابه استفاده از روش ترکیبی است، به نحوی که منطقه به پهنه‌هایی با درجات خطر مختلف بر اساس دو عامل جابجایی زمین و استعداد زمین‌لغزش تقسیم می‌شود.

داده‌ها و روش‌ها

گستره مورد بررسی با فاصله ۵۵ کیلومتر شرق تهران در دامنه جنوبی البرز مرکزی در منطقه‌ای کوهستانی با آب و هوای ملایم قرار گرفته‌است. منطقه مطالعاتی در انتهای شمال‌شرقی حوضه آبریز دریاچه نمک، در استان تهران (بخش کوچکی از این محدوده در استان مازندران واقع شده‌است) و یکی از زیرحوضه‌های آبخیز ایران (زیرحوضه دماوند) به وسعت ۷۵۷/۸ کیلومتر مربع می‌باشد.

در گام اول مجموعاً ۵۰۲ مورد لغزش در محدوده شناسایی گردید که به دو گروه ۳۰ درصد (آزمایشی) و ۷۰ درصد (آموزشی) تقسیم شدند. سپس در بستر نرم‌افزار ArcGIS 10.8، نقشه‌های عوامل موثر (شامل ارتفاع، شیب، جهت‌شیب، سنگ‌شناسی، شاخص تراکم پوشش گیاهی^۹، بارندگی، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، شاخص تری توپوگرافی^{۱۰} (میزان آب انباشته شده در مناطق مختلف)، انحناء (ویژگی‌های هندسی سطح زمین)، انحناء سطح و انحناء نیم‌رخ) شناسایی شده در منطقه ترسیم گردید. در گام سوم، مقدار FR 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 خیلی کم شده است. در گام نهایی نتایج حاصل از تلاقی نقشه‌های پهنه‌بندی وقوع زمین‌لغزش با نقشه پراکنش و

1 -Guzzetti

2 -Kanungo

3 -Zhang

4 -Devara

5 -Kouhartsiouk and Perdikou

6 -Liu

7 -Landslide Susceptibility Map (LSM)

8 -Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR)

9 -Normalized Differential Vegetation Index (NDVI)

10 -Topographic Wetness Index (TWI)

محاسبه شاخص‌های نسبت تراکم و مجموع کیفیت برای مدل ارائه شده است. همچنین با استفاده از نرم‌افزار ESA-SNAP Desktop 9.0 در بازه زمانی ۷ اکتبر ۲۰۲۱ الی ۲۷ سپتامبر ۲۰۲۳، نقشه تغییرشکل منتج از ۱۶ تصویر راداری سنتینل-۱ در راستای دید ماهواره ایجاد شد. در انتها نیز جهت ارزیابی و تعیین دقت نقشه‌های استعداد زمین‌لغزش و جابجایی، از ۳۰ درصد (۱۵۰ لغزش) داده‌های لغزشی آزمایشی که به صورت تصادفی انتخاب شده بودند، استفاده گردید.

نتایج و بحث

طبق مطالعات صورت گرفته در خصوص وقوع زمین‌لغزش، به ترتیب عوامل شاخص تراکم پوشش گیاهی، شیب، شاخص تری توپوگرافی، ارتفاع و بارندگی، بیشترین تاثیرگذاری را در پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش به روش نسبت فراوانی دارا می‌باشند. نتایج ارزیابی نقشه استعداد زمین‌لغزش گویای آن است که نقشه پهنه‌بندی تهیه شده با استفاده از روش FR با سطح زیر منحنی ۸۱/۷ درصد، دارای دقت مطلوب و مناسبی می‌باشد. همچنین نقشه جابجایی زمین با سطح زیر منحنی ۷۴/۲ درصد، دقت بالایی را نشان می‌دهد. بررسی وضعیت میزان حرکات دامنه‌ای منطقه بیانگر این است که در این محدوده به صورت میانگین حداکثر و حداقل میزان جابجایی به ترتیب بین ۱ و ۶- سانتی‌متر در سال می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش به روش‌های نسبت فراوانی و تداخل‌سنجی تفاضلی راداری گویای آن است که نواحی شمالی محدوده، پتانسیل خیلی زیادی جهت رخداد زمین‌لغزش دارند. بدین منظور برای شناسایی نواحی مخاطره‌آمیز، منطقه مورد مطالعه به سه پهنه تقسیم گردید.

نتیجه‌گیری

۱- الگوهای لغزش در این ناحیه متنوع بوده که شامل: حرکات دامنه‌ای سریع ناشی از بارندگی، ریزش سنگ، جهش^۱ و غلتش^۲، لغزش‌های کم‌عمق و جریان گل و واریزه می‌باشد. این الگوهای لغزش بازتاب مستقیمی از تعامل پیچیده بین خصوصیات طبیعی و انسانی در منطقه مطالعاتی است که نمایانگر لزوم استفاده از روش‌های ترکیبی برای تحلیل زمین‌لغزش‌ها می‌باشد.

۲- در روش نسبت فراوانی (FR) از کل زمین‌لغزش‌ها، ۶۴/۵۴ درصد در رده‌های با خطر خیلی زیاد و زیاد، ۲۶/۱۰ درصد در رده با خطر متوسط و ۹/۳۶ درصد در رده‌های با خطر کم و خیلی کم قرار دارد.

۳- با توجه به اینکه ناحیه مورد مطالعه در منطقه کوهستانی قرار دارد و با مسئله افت آب زیرزمینی مواجه نیست و به دلیل قرارگیری این محدوده در دامنه‌های جنوبی البرز، جابجایی صورت گرفته را می‌توان به حرکات دامنه‌ای و عوامل تکنونیکي نسبت داد. نتایج این پژوهش نشان داد که تصاویر راداری از پتانسیل خوبی برای آشکارسازی و پیش‌نابایداری دامنه‌ها و محاسبه جابه‌جایی آنها برخوردارند.

1 -Bouncing

2 -Rolling

۴- دقت بسیار بالا نقشه‌های جابجایی 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 خیلی زیاد و زیاد جهت وقوع لغزش، مناطق با جابجایی بیش از ۲۵ میلیمتر در سال و مناطق با پوشش مشترک هر دو پهنه قبلی (مناطق با پتانسیل خیلی زیاد و زیاد استعداد زمین‌لغزش+ مناطق با جابجایی 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.

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.

منابع

- انتظاری، مزگان؛ کردوانی، موسی. (۱۴۰۱). پهنه بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های مبتنی بر GIS و داده‌های راداری (مطالعه موردی: فریدون شهر)، مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۱، شماره ۳۳.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.