

Research Paper



Identification and Mapping of Continuous Landslide Material Movements Using Sentinel-1 Radar Images and Their Relationship with Land Use: Case Study of Salavat Abad Pass, Kurdistan Province



Farhad Khodamoradi^{1*}, Shahram Roostaei², Ali Zareyan³

1. Ph. D. student of Geomorphology, Tabriz University, Faculty of Planning and Environmental, Tabriz, Iran. Email: fkhodamoradi24@gmail.com
2. Professor, Department of Geomorphology, Tabriz University, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz, Iran. E-mail: roostaei@tabrizu.ac.ir
3. Ph.D. student of Geomorphology, Tabriz University, Faculty of Planning and Environmental, Tabriz, Iran. mail: Ali.zareyan1210@gmail.com

Keywords

Landslide, radar interferometry, Salavat Abad zoning.

A B S T R A C T

The mechanisms of landslide occurrence are influenced not only by internal and external (climatic) factors but also by anthropogenic activities. The study area, Salavatabad Pass, is located in the east of Sanandaj County, Kurdistan Province, along the Sanandaj–Hamadan transportation route. This area is highly vulnerable to frequent landslides each year. The passage of the main Sanandaj–Hamadan road and human activities, such as unregulated construction, gardening, and road construction, have exacerbated these hazards. The present study aims to identify, measure, and classify the continuous mass movements using radar interferometry and examine their relationship with land use patterns. To assess vegetation cover dynamics, eight Sentinel-2 images were utilized to derive the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which helped determine the appropriate dates for acquiring radar images. Subsequently, eight Sentinel-1 radar images from a four-year period (2016/08/20 – 2023/05/09) were processed using interferometric analysis in SNAP software. Additionally, a Landsat-8 image (2023) was used for land use classification. After applying atmospheric and radiometric corrections, a supervised classification (Maximum Likelihood Classification) was performed in ArcGIS, categorizing land use into six classes. The interferometric results revealed an annual displacement of 1.2 cm, totaling 9.5 cm over the study period. The hazard zoning indicated that 20% of the area, primarily classified as bare land and rangeland, fell into the high-risk category, while 40%, with land uses including rangeland, barren land, roads, and agricultural areas, was classified as moderate risk. The road network was separately analyzed and divided into four segments, where the first segment (900 m long) was classified as high risk, and the second segment (6.6 km long) fell into the moderate-risk category. Ultimately, 14 unstable zones were identified along the road corridor. Among them, zones 1, 2, 7, and 8 exhibited the highest displacement (-4.6 to -2 cm), while zone 12 showed the least movement (-2 to -0.6 cm). The results further indicated that slopes facing north, northwest, south, and west experienced the most significant displacements.

Received: 2024/11/30

Accepted: 2025/03/11

Published: 2025/10/20

*Correspondin Author: farhad khodamoradi E-mail: fkhodamoradi24@gmail.com

cite this article: khodamoradi, Farhad Roostaei, Shahram., & Zareyan, Ali. (2025). Identification and mapping of continuous landslide material movements using Sentinel-1 radar images and their relationship with land use: A case study of Salavat Abad Pass, Kurdistan Province.

Hydrogeomorphology, 12(44): 1 – 17.

DOI: [10.22034/hyd.2025.64092.1768](https://doi.org/10.22034/hyd.2025.64092.1768)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

Results and Discussion

The radar interferometry analysis of four Sentinel-1 images from October 2020 to September 2023 revealed an average annual displacement of 2.4 cm, with a total of 9.5 cm over the four-year period along the Salavatabad pass road. The highest displacement was observed in areas with steep slopes, especially in road sections. A land use classification using Landsat-8 and Sentinel-2 imagery showed that 14.45% of the area, mainly barren land and pasture, experienced high displacement, while 29.33% of the land, including pastures, barren land, and roads, showed moderate displacement. Two road sections, measuring 6.59 km and 6.6 km, were identified as high-risk zones, highlighting the impact of road construction on landslide susceptibility. Agricultural and grazing areas were found to be particularly vulnerable to landslides, supporting previous research on the role of land use changes in slope instability. The highest activity was recorded on the northern, northwestern, southern, and western slopes, especially during spring and autumn due to heavy rainfall and soil saturation. The analysis was validated through field surveys, confirming that areas with the highest displacements corresponded to road sections showing structural damage, such as cracks and landslide debris. These findings underscore the effectiveness of InSAR for landslide monitoring in regions with limited ground-based infrastructure. In conclusion, this study demonstrates that both natural factors and human activities, such as road construction and land use changes, significantly contribute to landslide risk in the Salavatabad pass region. The combined use of radar interferometry and land use analysis provides crucial information for identifying high-risk areas, which can guide future mitigation and infrastructure planning.

Conclusions

This study highlights the significant role of both natural and anthropogenic factors in landslide occurrences along the Salavatabad pass road. Through the application of radar interferometry (InSAR) using Sentinel-1 data and land use classification with Landsat-8 and Sentinel-2 imagery, we were able to effectively identify and map areas with ongoing slope instability over a four-year period. The results indicate that landslide displacement is most pronounced in regions with steep slopes, especially in areas impacted by road construction and agricultural activities. The study found that 14.45% of the study area, primarily barren land and pasture, experienced significant displacement, with moderate displacement observed in 29.33% of the area, including agricultural and grazing lands. Notably, high-risk road sections, totaling 13.19 km, were identified as areas of particular concern. The findings emphasize the need for targeted mitigation efforts, particularly in vulnerable land use zones, to prevent further damage and ensure the safety of infrastructure and local communities. Ultimately, this research demonstrates the potential of using InSAR and land use analysis as a robust tool for monitoring and managing landslide risks, especially in areas where traditional ground-based methods are limited. The results can inform future land use planning and risk management strategies, contributing to the development of more resilient infrastructure and the sustainable use of land resources in landslide-prone areas.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



شناسایی و پهنه بندی حرکات پیوسته مواد دامنه ای با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ و ارتباط آن با کاربری اراضی، مطالعه موردی: گردنه صلوات آباد استان کردستان



فرهاد خدامرادی^{۱*}، شهرام روستایی^۲، علی زارعیان^۳

۱. دانشجویی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. fkhodamoradi24@gmail.com

۲. استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. roostaei@tabrizu.ac.ir

۳. دانشجویی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. Ali.zareian1210@gmail.com

چکیده

سازوکارهای وقوع لغزش‌ها علاوه بر اثر فعالیت‌های درونی و بیرونی (اقلیم)، متأثر از فعالیت‌های انسانی (آنتروپوژنیک) نیز می باشد. منطقه مورد مطالعه، گردنه صلوات آباد در شرق شهرستان سنندج، استان کردستان و در مسیر ارتباطی سنندج - همدان قرار دارد. این منطقه، یکی از مناطق آسیب پذیر است که هر ساله با لغزش‌های مکرر مواجه می شود. عبور محور اصلی سنندج- همدان و فعالیت‌های انسانی مانند ساخت و سازهای بی رویه، باغداری و جاده سازی، این مخاطرات را تشدید کرده است. هدف از این تحقیق شناسایی، اندازه گیری و پهنه بندی حرکات پیوسته مواد دامنه ای به کمک روش تداخل سنجی راداری و ارتباط آن با کاربری اراضی منطقه است. در همین راستا، جهت اطلاع از وضعیت و حجم پوشش گیاهی منطقه، با استفاده از ۸ تصویر سنتینل ۲- شاخص NDVI تهیه و تاریخ مناسب تصاویر راداری انتخاب شد. با استفاده از ۴ تصویر راداری ماهواره سنتینل ۱- در طول بازه چهار ساله (۲۰۲۳/۰۸/۰۹ - ۲۰۲۰/۱۰/۱۶) تداخل سنجی راداری طی هشت مرحله در نرم افزار SNAP صورت گرفت. به منظور بررسی دقیق کاربری اراضی، از یک تصویر ماهواره ای لندست-۸ (۲۰۲۳) استفاده گردید و با اعمال تصحیحات اتمسفری و رادیومتری و اجرای طبقه بندی نظارت شده (Maximum Likelihood Classification) در نرم افزار Arc GIS نقشه کاربری اراضی منطقه به شش کلاس تقسیم و طبقه بندی شد. نتایج تداخل سنجی نشان داد که این منطقه هر ساله ۲۰۴ سانتی متر جابه جایی و در مجموع ۹۰۵ سانتی متر تغییرات دامنه ای را تجربه کرده است. به طوری که با پهنه بندی منطقه، ۱۴۰۴۵ درصد مساحت منطقه با کاربری بایر و مرتع در طبقه زیاد و ۲۹۰۳۳ درصد مساحت با کاربری مرتع، بایر، جاده و کشاورزی در طبقه متوسط قرار گرفت. کاربری جاده به طور جداگانه به ۳ قطعه تقسیم شد. قطعه یک با طول ۶۰۵۹ کیلومتر و قطعه دوم با طول ۶۰۶ کیلومتر به ترتیب در طبقه زیاد و متوسط قرار گرفتند. در آخر، ۱۸ پهنه از مناطق ناپایدار در امتداد جاده شناسایی شد. از این تعداد، ۱۶ پهنه عمدتاً در کاربری مرتع و بایر و در مواردی ترکیبی از چندین کاربری را نشان دادند. بدین ترتیب، دامنه های با جهات شمال، شمال غربی، جنوب و غرب محور گردنه بیشترین جابه جایی را تجربه کرده اند.

کلیدواژه ها

زمین لغزش، پهنه بندی، تداخل
سنجی راداری، صلوات آباد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸

* نویسنده مسئول: فرهاد خدامرادی

رایانامه: fkhodamoradi24@gmail.com

ارجاع این مقاله: خدامرادی، فرهاد؛ روستایی، شهرام؛ زارعیان، علی؛ (۱۴۰۳). شناسایی و پهنه بندی حرکات پیوسته مواد دامنه ای با

استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ و ارتباط آن با کاربری اراضی، مطالعه موردی: گردنه صلوات آباد استان

کردستان. هیدروژئومورفولوژی، ۱۲(۴۴): ۱۷ - ۱.

شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/hyd.2025.64092.1768



هر رویداد ژئومورفولوژیک را که اثر نامطلوب اجتماعی و اقتصادی بر سیستم زندگی انسان بر جای گذارد، می‌توان یک خطر ژئومورفیک نامید (محمودی، ۱۳۸۷). از میان انواع حرکات دامنه‌ای، زمین‌لغزش‌ها از جمله شایع‌ترین خطرات طبیعی‌اند و دارای بیشترین خسارات انسانی و زیست‌محیطی می‌باشند (مصفايي و همکاران، ۲۰۰۹). در اکثر منابع و مقالات، زمین‌لغزش را حاصل از پایین افتادن یا حرکت یکپارچه و اغلب سریع حجمی از مواد رسوبی در امتداد دامنه‌ها تعریف کرده‌اند (شیرانی و همکاران، ۲۰۰۴). مکانیسم فعالیت این پدیده بدین گونه است که در سازندهای ریزدانه (رس، مارن و شیل) در اثر جذب آب، خاصیت کلوئیدی مواد بهم می‌خورد و تا محلی که رطوبت نفوذ کرده باشد، خاک از توده اصلی جدا شده و در نتیجه نیروی ثقل در روی دامنه حرکت می‌کند (احمدزاده و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین در برخی موارد، ریزش سنگ‌ها مربوط به حرکت‌های ناگهانی یا تند بلوک‌های لق شده یا مجموعه‌هایی از سنگ‌های سخت جدا شده از دیواره‌های سنگی پرشیب می‌باشد. آنها معمولاً در امتداد سطوح لایه‌بندی درزها و مناطق گسلی یا سطوح گسلی رخ می‌دهند (قاطع و همکاران، ۲۰۲۴). از آنجا که پیش‌بینی زمان وقوع زمین‌لغزش‌ها مشکل است، شناسایی مناطق حساس بر اساس پتانسیل خطر ناشی از بروز این پدیده، اهمیت خاصی دارد (فرا تني و همکاران، ۲۰۰۸).

از اوایل دهه ۱۹۹۰، تداخل‌سنجی رادار دهانه ترکیبی^۱ (InSAR) به عنوان ابزاری کارآمد در مطالعه کلیه پدیده‌هایی که سبب تغییر سطح زمین می‌شوند، مطرح شده و مورد استفاده قرار گرفته است. بر همین اساس، در سال ۱۹۹۳، ماسونت و همکاران اولین کاربرد موفقیت‌آمیز SAR تداخل‌سنجی متمایز فضا بردی^۲ (DinSAR) را برای نقشه‌برداری تغییر شکل هم‌لرزه‌ای زلزله لندرز گزارش کردند. در زمان‌های اخیر، DInSAR رشد مستمری را تجربه کرده است که عمدتاً مربوط به افزایش تعداد مأموریت‌هایی است که به طور خاص برای تحلیل‌های تداخل‌سنجی طراحی شده‌اند (براردینو، ۲۰۰۲). اساس کار این روش، استفاده از اطلاعات فاز رادار بازتابی از زمین است؛ به گونه‌ای که تغییرات ایجاد شده در سطح زمین سبب اختلاف فاز در دو تصویر رادار از دو زمان مختلف از یک منطقه مشابه می‌شود. با بررسی و مدل‌سازی این اختلاف فاز، تغییرات سطح زمین به‌طور کمی‌سازی شده قابل ارزیابی است. تداخل‌سنجی راداری با تصاویر راداری بر مشکلاتی نظیر عدم همبستگی زمانی و هندسی، اعوجاجات هندسی، اثرات اقلیم و توپوگرافی که در روش‌های تداخل‌سنجی گذشته وجود داشت، غلبه کرده و توجه محققین را به خود جلب کرده است (آلچاندرا، ۲۰۰۲). در همین راستا، پژوهش‌های متعددی برای بررسی و شناسایی تغییرات سطح زمین به کمک تصاویر راداری در نقاط مختلف جهان صورت گرفته‌اند.

روستایی و همکاران (۱۳۹۷) در یک پژوهش با استفاده از ۲۹ تصویر راداری ماهواره ENVISAT در یک بازه زمانی ۹ ساله به پایش و شناسایی مناطق ناپایدار در حوضه آبریز طالقان پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر فعال بودن پهنه‌های لغزشی قدیمی با لغزش‌های شناسایی شده بود. قهرودی و همکاران (۱۳۹۸) جهت بررسی و ارزیابی ناپایداری دامنه‌ای در بازه زمانی ۳ ساله در ناحیه لرستان با استفاده از ۵۰ تصویر راداری سنتینل-۱ وضعیت راه آهن این ناحیه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد بیشترین میزان حرکات دامنه‌ای در طول دوره مطالعاتی که ۲۸ سانتی‌متر بوده، در فصل پاییز و بهار اتفاق افتاده است و در ادامه مشخص شد که ایستگاه تنگ هفت و تنگ پنج هر کدام در محدوده بیشترین میزان جابه‌جایی می‌باشند. روستایی و همکاران (۱۳۹۱) جهت بررسی میزان تاثیر و دقت داده‌های سنجنش از دور با بهره‌گیری از نرم‌افزار GIS به کمک داده‌های لیتولوژی، شیب دامنه‌ها، کاربری اراضی، پوشش زمین، فاصله از عوارض خطی (جاده، رودخانه و گسل) و هم‌پوشانی آنها، به شناسایی و پهنه‌بندی زمین‌لغزش در جاده تبریز-مرند پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که ساختار خاص زمین‌شناختی، شرایط اقلیم محلی و نیز تراکم نهشته‌های کواترنری (در هر دو طرف جاده) در کنار عامل گرادیان شیب، از عوامل اصلی بروز زمین‌لغزش است که ساخت‌وسازهای انسانی آن را تشدید می‌کند. در ارتباط با تاثیر تغییرات کاربری، صغری و همکاران (۲۰۲۱) با شناسایی عوامل موثر بر تشدید این پدیده به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در شهرستان گرمی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییر کاربری اراضی و افزایش زمین‌های کشاورزی و چراگاه‌های دامی، مهم‌ترین عوامل دخیل در افزایش مقدار و پتانسیل زمین‌لغزش هستند. در همین راستا، مطالعات نجفی و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و

¹ Interferometric Synthetic Aperture Radar

² Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar

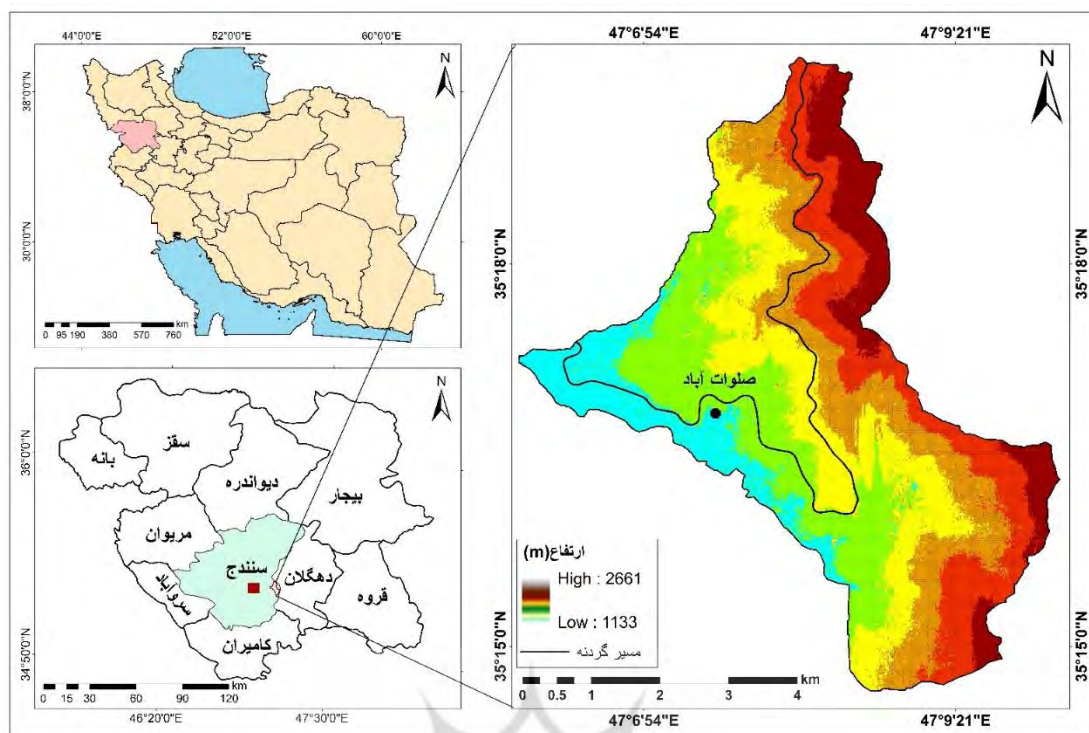
هوایی نشان دادند که عوامل زمین‌شناسی، بارش و فاصله از آبراهه به ترتیب مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز نازلو چای محسوب می‌شوند.

در ارتباط با پژوهش‌های خارج از کشور، کونفورتو و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی حرکات زمین‌لغزش ناشی از بارش را با استفاده از ترکیب روش تداخل‌سنجی راداری و تحلیل ژئوتکنیکی در منطقه کوهستانی پاپانیس در جنوب ایتالیا بررسی کردند. آنها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ترا در بازه زمانی اکتبر ۲۰۱۳ تا اکتبر ۲۰۱۴ و تکنیک همبستگی پیکسل‌ها و روش ژئوتکنیکی مانند اندازه‌گیری تراز آب‌های زیرزمینی، میزان سرعت حرکات مواد دامنه‌ای که پس از بارش شدید (۱۸۵ میلی‌متری) در تاریخ ۲۳ فوریه ۲۰۱۲ در جنوب ایتالیا رخ داده بود را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که مواد دامنه‌ای با سرعت ۳۰ تا ۴۰ میلی‌متر در سال در بازه مورد نظر در جهت خط دید ماهواره حرکت داشته‌اند که نشست ساختمان‌ها و خرابی خطوط انتقال نیرو و جاده‌ها در منطقه مورد نظر تصدیق بر ادعای آنها بوده است. دی مارتیر و همکاران (۲۰۱۶) در مقاله‌ای با عنوان "سیستم یکپارچه تشخیص زمین‌لغزش بر پایه داده‌های مکانی و روش تداخل‌سنجی راداری" با استفاده از ترکیب روش میدانی و تکنیک تداخل‌سنجی راداری بر مبنای الگوریتم پراکنش‌گرهای پایدار (PSI) و همبستگی پیکسل‌ها (CPT) با استفاده از تصاویر راداری ماهواره (COSMO-SkyMed) در یک بازه سه ساله از سال ۲۰۰۸ تا سال ۲۰۱۱ به شناسایی حرکات مواد دامنه‌ای شهرستان پالرمو در منطقه سیسیل ایتالیا پرداختند. نتایج داده‌های تداخل‌سنجی رنج حرکت مواد دامنه‌ای از ۳ تا ۴۶ سانتی‌متر را در بازه سه ساله مورد مطالعه نشان داد که صحت آنها در بازدیدهای میدانی مورد کنترل و تأیید قرار گرفت. همچنین می‌توان به کارهایی که در مورد زلزله (آزوری، ۲۰۱۳)، آتشفشان (لوجیوس و همکاران، ۲۰۱۳)، یخچال‌ها (استروزی و همکاران)، فرونشست (سنابریا و همکاران، ۲۰۱۴) و ناپایداری دامنه‌ای (دانگ و همکاران، ۲۰۱۸)، (فیاجی و همکاران، ۲۰۱۶)، (اینفانته و همکاران، ۲۰۱۶)، (نوویلینو و همکاران، ۲۰۱۴)، (بردونی و همکاران، ۲۰۱۸)، (دوانتری و همکاران) اشاره کرد.

هدف اصلی این پژوهش شناسایی و پهنه‌بندی حرکات پیوسته مواد دامنه‌ای در طول ۱۴ کیلومتر از جاده گردنه صلوات‌آباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری است. در این راستا، بررسی ارتباط این حرکات با کاربری اراضی منطقه از جمله اهداف کلیدی تحقیق می‌باشد. این منطقه که در اثر عوامل مختلف ژئومورفولوژیکی، اقلیمی و فعالیت‌های انسانی مانند ساخت و سازهای بی‌رویه، باغداری و جاده‌سازی، با زمین‌لغزش‌های مکرر مواجه است، به‌عنوان یکی از نواحی آسیب‌پذیر شناخته می‌شود. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ و سنتینل-۲ در بازه زمانی ۴ ساله (۲۰۲۳-۲۰۲۰)، تداخل‌سنجی راداری و تحلیل کاربری اراضی با کمک تصویر لندست ۸ انجام شد. در نهایت مناطق ناپایدار شناسایی و به ارتباط آن با کاربری اراضی منطقه پرداخته شد.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

گردنه صلوات‌آباد در شرق شهرستان سنندج در استان کردستان و در بین مختصات جغرافیایی "۴۸°، ۰۷'، ۴۷" تا "۵۷°، ۰۸'، ۴۷" طول شمالی و "۱۶°، ۱۵'، ۳۵" تا "۴۰°، ۱۹'، ۳۵" عرض شرقی واقع شده است (شکل ۱). مساحت منطقه مورد مطالعه ۲۳.۲۲ کیلومتر مربع ومسیر ارتباطی مهم سنندج - همدان در این گردنه قرار گرفته است. ارتفاع متوسط محدود ۲۰۰۰ متر از سطح دریا و طبقه ارتفاعی ۱۹۰۰-۲۰۰۰ متر بیشترین مساحت و ۲۶۰۰ متر بالاترین طبقه ارتفاعی است. اقلیم این منطقه از نوع مدیترانه‌ای با ۴۷۰ میلی متر میانگین بارندگی و با توپوگرافی شکل محدب غالب در محدوده حوزه آبریز خلیج فارس می‌باشد. روستای صلوات‌آباد در جنوب شرقی شهرستان سنندج و در ۱۵ کیلومتری جاده ی سنندج - همدان قرار دارد این روستا از بزرگترین روستاهای استان کردستان می باشد. جمعیتی بالغ بر ۵۰۰۰ نفر را دارد. در جنوب این روستا رودخانه ای در حال جریان است به نام «رودخانه صلوات‌آباد» که تا چند سال پیش رودخانه ای دائمی به حساب می آمد. آب آشامیدنی روستا از چشمه ای به نام «کانی درویش» تامین می شود. و شغل عمده روستا کشاورزی و باغداری می‌باشد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Figure (1): Geographical location of the study area

داده‌ها و روش مورد استفاده

در این پژوهش، به منظور بررسی وضعیت پوشش گیاهی منطقه و انتخاب تاریخ مناسب برای دانلود تصاویر راداری، به دلیل واکنش پذیری تصاویر راداری به درختان و پوشش گیاهی بلند، شاخص نرمال شده پوشش گیاهی ($NDVI^1$) با استفاده از ۸ تصویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در نرم افزار ArcGIS تهیه شد. بعد از پیش پردازش و تصحیحات اولیه یک تصویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ در نرم افزار ArcGIS، کاربری اراضی با روش طبقه‌بندی نظارت شده و الگوریتم (حداکثر احتمال^۲) به ۶ کلاس تقسیم و نقشه آن تهیه شد. این تصویر از سایت داده‌های پایانه‌های رصد منابع طبیعی سازمان نقشه‌برداری زمین‌شناسی ایالت متحده آمریکا ($USGS^3$) دانلود شد. در نهایت برای محاسبه نرخ جابه‌جایی از میان ۳۲ تصویر سنتینل-۱ هشت تصویر با مشخصات مطلوب در بازه زمانی ۴ سال (۲۰۲۳/۰۸/۰۹ - ۲۰۲۰/۱۰/۱۶) از درگاه اینترنتی^۴ سایت زمین‌شناسی آمریکا دریافت شد. در نهایت، نرخ جابه‌جایی و کاربری اراضی منطقه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و نتایج این تحلیل‌ها نشان داده شد. در این تحقیق، تصحیحات اتمسفری تصاویر راداری سنتینل-۱ با استفاده از مدل‌های جوی دقیق و ابزارهای موجود در نرم افزار Snap انجام شد. این تصحیحات شامل حذف اثرات ناشی از تغییرات فشار، دما و رطوبت جو بود تا دقت داده‌های راداری بهبود یابد. تمامی مراحل تصحیح به صورت دقیق در محیط نرم افزار اسنپ پیاده‌سازی و اجرا شدند. همچنین با استفاده از دو تصویر راداری سنتینل-۱ مدل رقومی ارتفاعی^۵ (DEM) ۱۳ متر به کمک نرم افزار اسنپ استخراج و بکار برده شد. جداول ۱، ۲ و ۳ مشخصات ماهواره، تصاویر دریافتی سنتینل-۱ و ۲ و لندست ۸ را نشان می‌دهد.

¹ Normalized Difference Vegetation Index² Maximum Likelihood Classification³ United States Geological Survey⁴ <https://earthexplorer.usgs.gov>⁵ (Digital Elevation Model)

جدول (۱): مشخصات تصاویر سنتینل-۱

Table (1): Specifications of Sentinel-1 images

Number	Data	Pair	Track	Pass	Baseline	Polarization	Modeled coherency	Mster/slave
1	2020/10/16	1	6	A	-9	VV	0.95	Master
2	2021/10/11		6	A	19	VV	1	Slave
3	2022/07/19	2	6	A	75	VV	0.94	Slave
4	2023/08/09		6	A	167	VV	1	Master

جدول (۲): مشخصات تصاویر سنتینل-۲

Table (2): Specifications of Sentinel-2 images

NUMBER	APPLICATION	Date	sensor	band
1	Ndvi	2020/08/19	S2B	b4 – b5
2	Ndvi	2020/07/19	S2B	b4 – b5
3	Ndvi	2021/05/19	S2B	b4 – b5
4	Ndvi	2021/05/31	S2B	b4 – b5
5	Ndvi	2022/10/17	S2B	b4 – b5
6	Ndvi	2022/08/15	S2B	b4 – b5
7	Ndvi	2022/06/22	S2B	b4 – b5
8	Ndvi	2023/07/12	S2B	b4 – b5

جدول (۳): مشخصات تصاویر راداری سنتینل-۱ جهت استخراج مدل رقومی ارتفاعی

Table (3): Specifications of Sentinel-1 radar images for DEM extraction

Number	Data	Pair	Track	Pass	Baseline	Polarization	Modeled coherency	Mster/slave
1	21/06/2023	1	6	D	167	VV	1	Master
2	08/07/2023		6	D	198	VV	0.76	Slave

جدول (۴): مشخصات تصویر لندست ۸

Table (4): Specifications of Landsat-8 image

Application	Date	Sensor	Landsat	Band
Landuse	2023/05/12	OLI	8	B1....b7

بحث و یافته‌ها

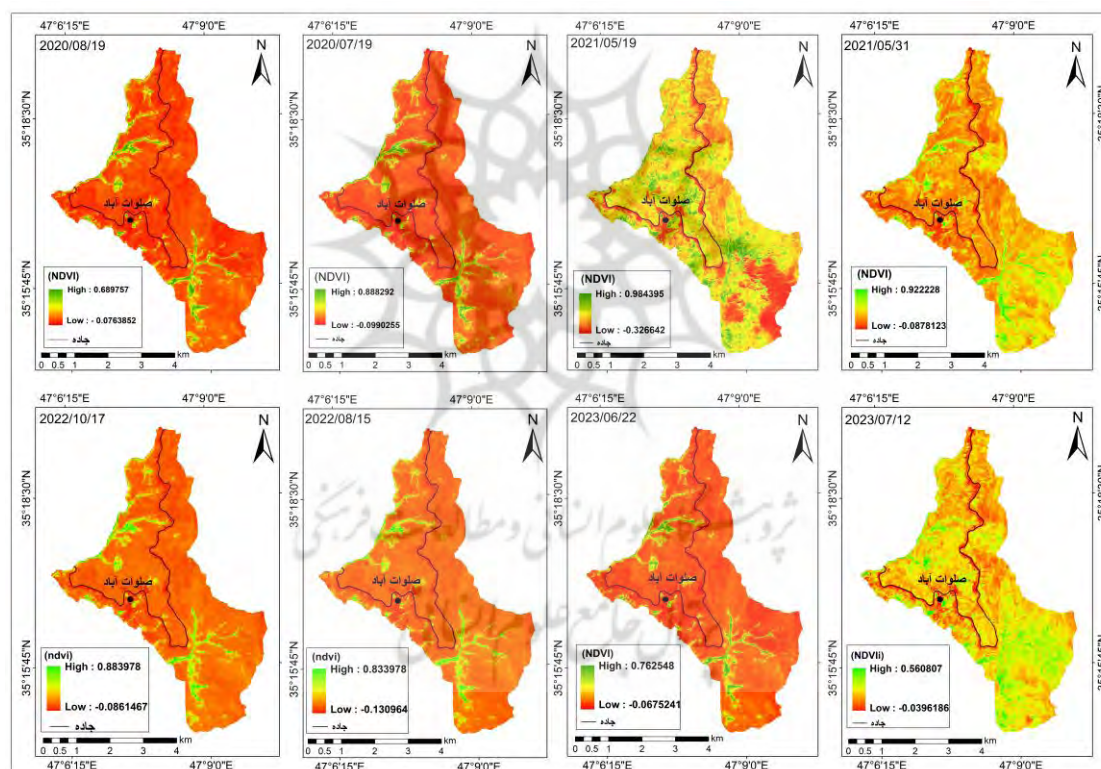
شاخص NDVI

شاخص NDVI منطقه نشان دهنده پوشش گیاهی ضعیف بوده و بیشترین و کمترین پوشش به ترتیب ۱۱ و ۳ درصد از مساحت منطقه را شامل شده که این مقدار خود بیشتر در دره‌ها و ارتفاعات پایین منطقه قرار دارد. در نتیجه در این بازه زمانی و با توجه به قرار گیری

مسیر جاده صلوات آباد در ارتفاع بالاتر تداخل سنجی راداری با دقت بیشتری صورت گرفته و نرخ بدست آمده صحت قابل قبول را در بر می‌گیرد. جدول ۵ مشخصات بیشترین و کمترین درصد مربوط به دو سال را نشان می‌دهد که در این میان ۶ تصویر دیگر در بین این دامنه از شاخص قرار داشتند و شکل ۲ هشت نقشه شاخص NDVI منطقه مربوط به دامنه‌ی تاریخ تصاویر سنتینل-۱ را نشان می‌دهد.

جدول (۵): مشخصات شاخص NDVI
Table (5): Specifications of NDVI index

درصد	مساحت (h)	نوع کاربری	شاخص (NDVI)	سنتینل ۲
۴۴.۴۳	۱۰۲۹.۲	زمین بایر یا سنگی	-۰.۰۷ - ۰.۰۸	۲۰۲۰/۰۸/۱۹
۴۶.۴۹	۱۰۸۷.۸۴	اراضی با پوشش گیاهی طبیعی تنک	۰.۰۸ - ۰.۱۹	
۵.۹۱	۱۳۶.۸	پوشش گیاهی متوسط	۰.۱۹ - ۰.۳۷	
۳.۱۸	۷۳.۶۱	پوشش گیاهی انبوه یا جنگل متراکم	۰.۳۷ - ۰.۶۸	
۱۵.۰۹	۳۴۹.۶۱	زمین بایر یا سنگی	-۰.۰۳ - ۰.۱۱	۲۰۲۳/۰۷/۱۲
۴۰.۵۵	۹۳۹.۳۷	اراضی با پوشش گیاهی طبیعی تنک	۰.۱۱ - ۰.۱۹	
۳۳.۳۷	۷۶۸.۳۵	پوشش گیاهی متوسط	۰.۱۹ - ۰.۲۷	
۱۱.۱۹	۲۵۹.۱۲	پوشش گیاهی انبوه یا جنگل متراکم	۰.۲۷ - ۰.۵۶	



شکل (۲): نقشه شاخص NDVI گردنه صلوات آباد در بازه زمانی تاریخ تصاویر سنتینل-۱
Figure (2): NDVI map of Salavat Abad Pass during Sentinel-1 image acquisition period

کاربری اراضی، ارتفاع

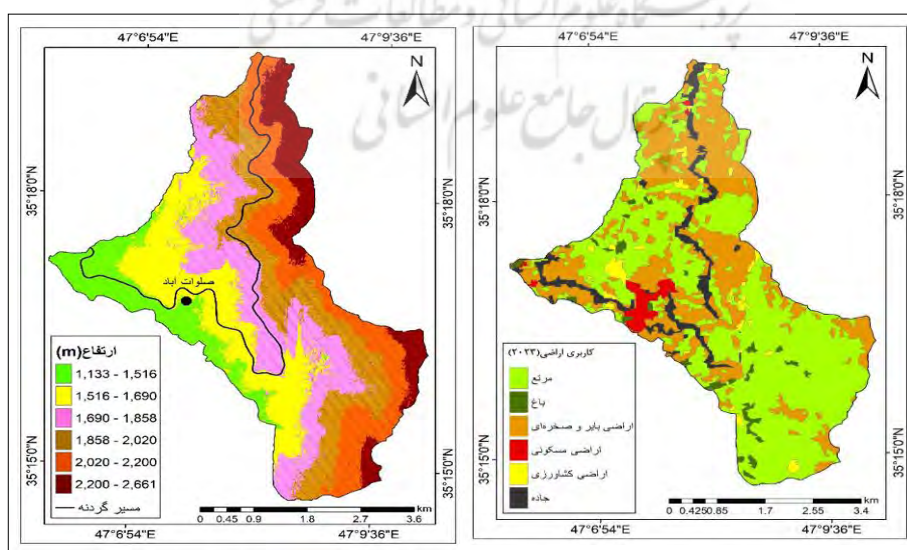
به منظور تهیه نقشه‌های کاربری اراضی منطقه، تمامی پیش‌پردازش‌های اولیه (اتمیسفیری و رادیومتریکی) انجام شد. در ادامه، با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت شده و الگوریتم حداکثر احتمال، نقشه کاربری منطقه در نرم‌افزار ARCGIS نسخه ۱۰.۷ تهیه گردید. به این ترتیب، کلاس‌های کاربری منطقه به ۶ کلاس تقسیم شد و در آخر، تمامی کلاس‌ها توسط نقاط کنترل زمینی و همچنین با کمک نرم‌افزار گوگل ارث مطابقت داده شدند. جهت نمایش بهتر و کامل‌تر، نقشه نهایی (dissolve) شد و در پایان ضریب کاپا ۰.۹۵ به عنوان

نمایانگر دقت کلاس‌ها نشان داده شد. لذا در این تحقیق، مشاهدات مزرعه‌ای و همچنین گزارش‌هایی که درباره کاربری‌های منطقه در ادوار مختلف ارائه شده بود، برای تکمیل اطلاعات به کار گرفته شد. جدول ۶ مشخصات ترکیب باندی مورد استفاده جهت طبقه بندی کاربری اراضی را نشان می‌دهد. یافته‌های نقشه کاربری اراضی در جدول ۷ نشان داد که کاربری مرتع و پوشش گیاهی تنک با ۵۴ درصد بیشترین مساحت و اراضی مسکونی با ۲ درصد کمترین مساحت را به خود اختصاص داده است. کاربری‌های باغ و اراضی کشاورزی ۴ و ۸ درصد را پوشش داده و کاربری بایر یا صخره و مسیر جاده با هم نزدیک به ۴۴ درصد را شامل شده که عمدتاً بین ارتفاع ۱۷۰۰ تا ۲۶۰۰ متر قرار دارند. به این صورت، در مناطق مرتفع به دلیل شیب زیاد و عدم حضور خاک عمیق و حاصلخیز، سنگ اصلی و سنگریزه وجود داشته و پوشش گیاهی و مرتع در این ارتفاعات عمدتاً ضعیف و تنک می‌باشند. اراضی باغی از نوع باغات میوه (سیب، زردآلو، گیلان، گردو و انگور) عمدتاً در ارتفاعات پایین‌تر و داخل دره قرار دارند. اما نکته‌ی حائز اهمیت این‌که در چند دهه‌ی اخیر با احداث جاده و باغ در دامنه‌های پرشیب و ارتفاعات بالاتر در قسمت شرق، جنوب شرق و جنوب منطقه، تغییرات عمده‌ای به وجود آمده است. به نوعی که با شخم زدن و انجام عملیات باغداری و انتقال آب به ارتفاعات بالاتر، تغییرات عمده‌ای به وجود آمده است. شکل ۳ نقشه کاربری اراضی و ارتفاع گردنه صلوات‌آباد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳، بیشترین ارتفاع منطقه ۲۶۶۱ متر و کمترین آن ۱۱۳۳ متر می‌باشد. عمده کاربری اراضی سنگی در ارتفاعات بالای ۱۶۰۰ متر در شمال شرق و غرب قرار دارد. کاربری اراضی جاده در نوار ارتفاعی ۱۱۳۳ تا ۲۲۰۰ متر جای دارد و منطقه مسکونی صلوات‌آباد در ارتفاع ۱۱۳۳ متر واقع شده است. به این ترتیب، کاربری اراضی مرتع و پوشش گیاهی در تمامی طبقات ارتفاعی به نسبت کم یا زیاد وجود دارد.

جدول (۶): مشخصات ترکیبات باندی مورد استفاده جهت استخراج کاربری اراضی منطقه

Table (6): Specifications of band combinations used for land use extraction in the study area

سنجنده	کلاس کاربری اراضی	نام ترکیب باندی	باند مورد استفاده	نتایج
(OLI)	مرتع	ترکیب رنگی کاذب (FCC)	۳-۴-۵	تشخیص پوشش گیاهی طبیعی
	باغات	ترکیب مادون قرمز کوتاه (SWIR)	۷-۶-۴	تشخیص باغات از پوشش گیاهی
	اراضی بایر و صخره‌ای	ترکیب مادون قرمز کوتاه (SWIR)	۷-۶-۴	تشخیص مناطق خاکی و سنگی
	اراضی مسکونی	ترکیب رنگی کاذب (FCC)	۵-۴-۳	تشخیص ساخت و سازها
	اراضی کشاورزی	ترکیب مادون قرمز-آبی (NIR-B)	۵-۴-۲	تشخیص فعالیت‌های کشاورزی
	جاده	ترکیب مرئی (R-G-B)	۴-۳-۲	تشخیص آسفالت



شکل (۳): نقشه کاربری اراضی و ارتفاعی گردنه صلوات آباد

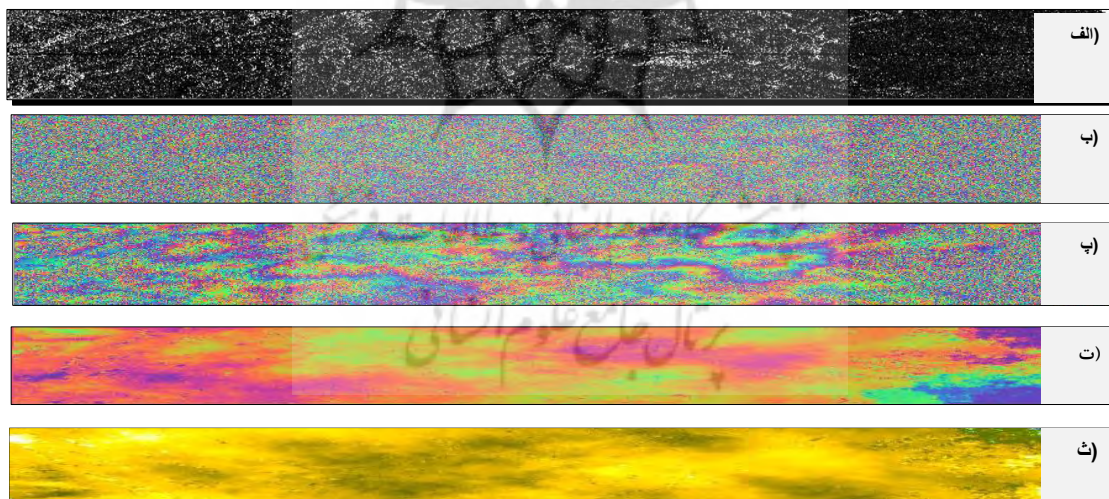
Figure (3): Land use and elevation map of Salavat Abad Pass

جدول (۷): مساحت کاربری اراضی منطقه
Table (7): Area of land use in the study area

ردیف	نوع کاربری اراضی	مساحت کاربری (h)	درصد مساحت
۱	اراضی کشاورزی	۴۰	۸/۱
۲	باغ	۲۸	۴/۱
۳	اراضی مسکونی	۴۷	۲
۴	بایر و صخره‌ای	۷۹۷	۳۵
۵	مرتع	۱۲۳۲	۵۴
۶	جاده و مسیر خاکی	۱۳۲	۸/۵

تداخل سنجی

در این تحقیق، به منظور محاسبه نرخ جابه‌جایی از تصاویر سنتینل-۱ راداری با فرمت (SLC)^۱ تک منظر) با پالاریزاسیون ۷۷ استفاده شد. بنابراین مهمترین نکات در زمینه انتخاب تصاویر راداری که شامل: انتخاب تصاویر در بازه زمانی مناسب، بررسی وضعیت پوشش گیاهی (NDVI)، انتخاب baseline مناسب، حداقل فاصله زمانی در زوج تصاویر (۴۵ روز) و در آخر وجود تناسب استاندارد در تصاویر Master و slave رعایت شد. به این ترتیب ۴ تصویر نزولی^۲ منطقه برای بازه زمانی ۴ سال مورد نظر (۲۰۲۰ - ۲۰۲۳) دانلود، و در ادامه فرایند تداخل سنجی توسط نرم افزار SNAP در هشت مرحله شامل: انتقال داده‌ها به نرم افزار snap، دریافت اطلاعات مدار، انتخاب IW و burst مناسب منطقه، تبدیل آنها به داده‌های مختلط منفردنگر، ثبت هندسی تصاویر به صورت خودکار، تهیه تداخل نگار، حذف اثر توپوگرافی، فیلتر گلدشتاین، مالتی لوک کردن تصویر فیلتر شده، برآورد فاز، انجام مراحل سه گانه unwrapping، تهیه تصویر جابه‌جایی و در نهایت زمین مرجع کردن تصویر انجام شد. شکل ۴ مراحل انجام تداخل سنجی را نشان می‌دهد.



شکل (۴): (الف) تصویر خام stack شده (ب) تصویر تداخل نگار (پ) تصویر تداخل نگار deburst شده (ت) تصویر با فیلتر گلدشتاین (ث) تصویر نهایی زمین مرجع شده

Figure (4): (a) Raw stacked image, (b) Interferogram image, (c) Debursting interferogram image, (d) Goldstein-filtered image, (e) Final georeferenced image

مقادیر مثبت نشان‌دهنده میزان جابه‌جایی در جهت سنسورهای ماهواره و مقادیر منفی نشان‌دهنده میزان جابه‌جایی در خلاف جهت سنسور می‌باشد. مجموع نرخ جابه‌جایی مواد دامنه‌ای اندازه‌گیری شده در محدوده مورد مطالعه حداکثر ۹.۵ سانتی‌متر و حداقل ۰.۳

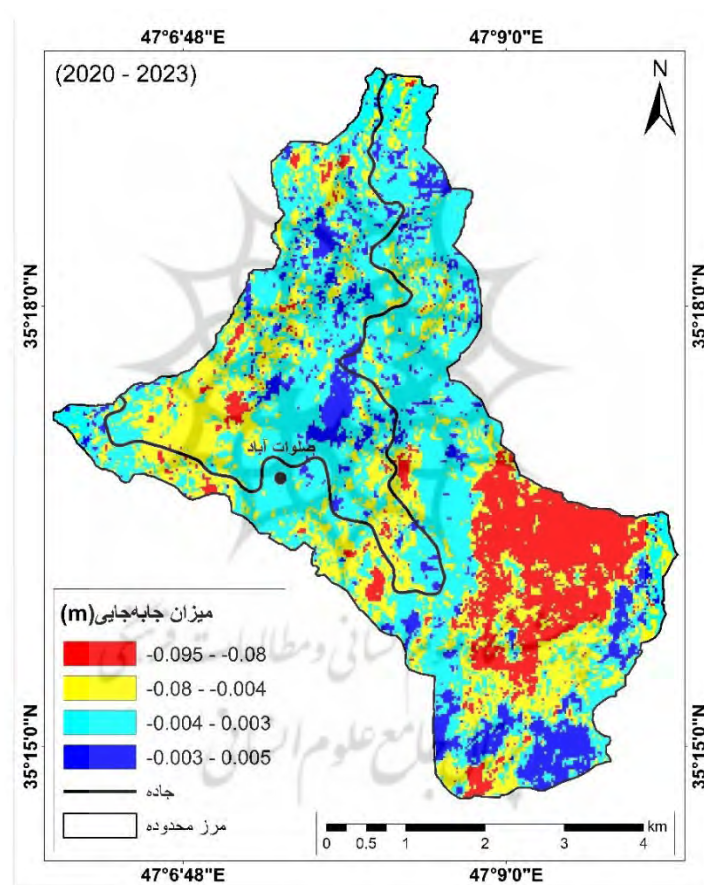
¹ Single Look Complex

² Descending

سانتی متر می باشد. بیشترین میزان حرکات دامنه‌ای در شرق، جنوب شرقی، جنوب، غرب و و کمترین مقدار مربوط شمال و مرکز می باشد. به این ترتیب، بیشترین میزان جابه‌جایی برای زوج اول ۰.۰۰۶-، زوج دوم ۰.۰۳۵- متر می باشد. جدول ۸ مشخصات میزان جابه‌جایی ۲ زوج تصویر را نشان می دهد.

جدول (۸): مشخصات میزان جابه‌جایی ۴ زوج تصویر سال (۲۰۲۰-۲۰۲۳)
Table (8): Specifications of displacement for four image pairs (2020 – 2023)

زوج تصاویر	تاریخ	میزان جابه‌جایی (m)	مجموع جابه‌جایی (cm)
۱	۲۰۲۰/۱۰/۱۶	(۰.۰۰۳ - -۰.۰۰۶)	۹.۵
	۲۰۲۱/۱۰/۱۱		
۲	۲۰۲۲/۰۷/۱۹	(۰.۰۰۴ - -۰.۰۳۵)	۹.۵
	۲۰۲۳/۰۸/۰۹		



شکل (۵): نقشه مجموع نرخ جابه‌جایی در گردنه صلوات آباد در بازه زمانی ۴ ساله

Figure (5): Map of cumulative displacement rate in Salavat Abad Pass over a four-year period

پهنه‌بندی میزان جابه‌جایی

به این ترتیب، جابجایی طبقه زیاد (۰.۰۸- - ۰.۰۹۵-) که در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی، غرب و به صورت پراکنده در طول جاده قرار دارد، حدود ۱۴.۴۵ درصد از مساحت را شامل می شود. طبقه متوسط (۰.۰۰۴- - ۰.۰۰۸-) عمدتاً در غرب و در مرکز منطقه در طول جاده و همچنین در جنوب شرقی ۲۹ درصد از منطقه را دربر گرفته است طبقه با جابه‌جایی کم که در ارتفاع بین ۱۵۰۰ تا ۱۷۵۰ متر قرار دارد، حدود ۲۵ درصد از مساحت گردنه را در بر گرفته است. در نهایت، طبقه با جابه‌جایی خیلی کم (۰.۰۰۳- - ۰.۰۰۴-) با بیشترین مساحت ۱۰۶۲ هکتار حدود ۴۶ درصد منطقه را در بر گرفته، این طبقه به جز جنوب در تمامی منطقه قرار دارد و روستای صلوات آباد در این طبقه قرار گرفته است. در نهایت طبقه

خیلی کم با دامنه‌ی (۰.۰۰۵ - ۰.۰۰۳) عمدتاً در مرکز منطقه و جنوب متمرکز می‌باشد. جدول ۹ مشخصات مساحت و درصد طبقات نقشه پهنه‌بندی شده را نشان می‌دهند.

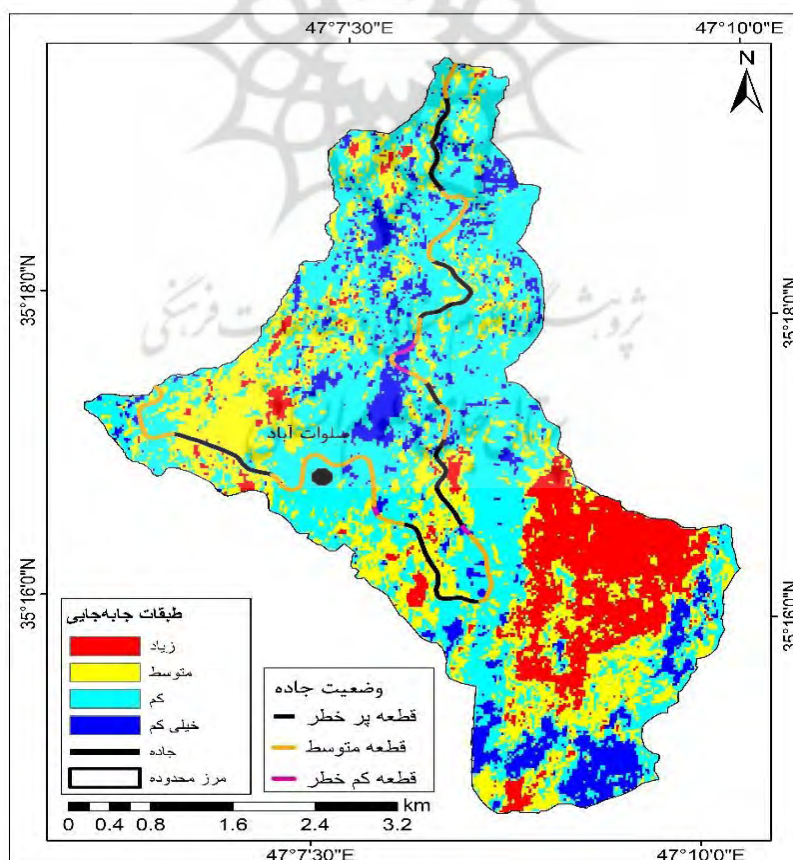
جدول (۹): مساحت و درصد طبقات جابه‌جایی

Table (9): Area and percentage of displacement classes

تعداد	کلاس	مجموع جابه‌جایی ۸ ساله	مساحت	درصد
۱	زیاد	(-۰.۰۰۸ - -۰.۰۰۹۵)	۳۳۳.۴۷	۱۴.۴۵
۲	متوسط	(-۰.۰۰۸ - -۰.۰۰۰۴)	۶۷۴.۹۶	۲۹.۲۳
۳	کم	(-۰.۰۰۰۴ - -۰.۰۰۰۳)	۱۰۶۲.۶۷	۴۶.۰۱
۴	خیلی کم	(-۰.۰۰۰۳ - ۰.۰۰۰۵)	۲۳۸	۱۰.۳۱

وضعیت جاده در نقشه پهنه‌بندی

نتایج تحلیل داده‌های تداخل‌سنجی راداری در بازه زمانی چهار سال، وضعیت جابه‌جایی مواد دامنه‌ای در طول ۱۴ کیلومتر از جاده گردنه صلوات‌آباد را مشخص کرده است. بر اساس این تحلیل، حدود ۶.۵۹ کیلومتر از جاده (۴۷.۰۷ درصد) در پهنه زیاد قرار می‌باشد. که دامنه جابه‌جایی آن بین ۰.۰۰۸ - تا ۰.۰۰۹۵ سانتی‌متر متغیر است. این بخش به دلیل پایداری پایین دامنه‌ها بیشترین خطر را دارد. همچنین، ۶.۶۲ کیلومتر از جاده (۴۷.۲۸ درصد) در پهنه متوسط قرار گرفته است که دامنه جابه‌جایی آن بین ۰.۰۰۰۴ - تا ۰.۰۰۰۸ سانتی‌متر است. در نهایت، ۰.۷۹ کیلومتر از جاده (۵.۶۴ درصد) در طبقه کم‌خطر با دامنه جابه‌جایی بین ۰.۰۰۰۳ - تا ۰.۰۰۰۴ سانتی‌متر قرار دارد. در مجموع، حدود ۹۴.۳۵ درصد از طول جاده در معرض خطر متوسط تا زیاد قرار دارد که بر اهمیت برنامه‌ریزی جامع برای مدیریت خطرات دامنه‌ای، بهبود پایداری جاده و کاهش ریسک‌های مرتبط تأکید می‌کند. جدول ۱۰ مشخصات سه قطعه مشخص شده را نشان می‌دهد.



شکل (۷): نقشه پهنه‌بندی جابه‌جایی مواد در گردنه صلوات‌آباد

Figure (7): Zoning map of material displacement in Salavat Abad Pass

جدول (۱۰): طول و درصد محور قطعات جاده در نقشه طبقات جابه‌جایی

Table (10): Length and percentage of road segments in displacement class map

دانه جابه‌جایی (cm)	درصد	طول جاده (km)	قطعه (جاده)
(-۰,۰۹۵ - -۰,۰۸)	۴۷,۰۷	۶,۵۹	پر خطر
(-۰,۰۸ - -۰,۰۰۴)	۴۷,۲۸	۶,۶۲	متوسط
(-۰,۰۰۴ - -۰,۰۰۳)	۵,۶۴	۰,۷۹	کم خطر

رابطه کاربری ارضی با نقشه جابه‌جایی

انطباق نقشه حرکات دامنه‌ای با کاربری ارضی نشان می‌دهد که در طول دوره زمانی مورد مطالعه، حرکات دامنه‌ای در مناطقی با کاربری مرتع، پوشش گیاهی تنک و اراضی بایر صخره‌ای افزایش یافته است. به طوری که دامنه‌ی جابه‌جایی (-۰,۰۹۵ - -۰,۰۸) در این کاربری‌ها بیشتر مشاهده شده است. بخش عمده این اراضی در شرق و جنوب شرقی نقشه قرار دارد و بخش دیگری از آن در شمال منطقه در ارتفاعات بالا واقع شده است. یکی از علل مهم همخوانی قسمت جنوب شرقی منطقه با جابه‌جایی بیشتر، تسهیل نفوذ و هدایت آب بارش‌ها به طبقات سست زیرین، احداث جاده‌های متنوع باغی، ساخت و ساز، کشت و زرع و تخریب در این اراضی می‌باشد. در اراضی بایر و سنگی به دلیل ارتفاع زیاد، شیب تند و افزایش نیروی گرانشی بر روی دامنه‌ها و اعمال فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی که باعث تخریب این سنگ‌ها و در ادامه حرکت این اراضی در امتداد جریان‌های کوچک فصلی و بهاری به پایین دست می‌باشد، جابه‌جایی بیشتری رخ می‌دهد. کمترین میزان حرکات (-۰,۰۰۳ - -۰,۰۰۴) در این منطقه به صورت پراکنده در انواع کاربری و بین ارتفاع ۱۷۰۰ تا ۱۵۰۰ متر قرار دارند. جاده‌ها معمولاً از مناطق مختلفی عبور می‌کنند که شامل ارتفاعات مختلف و کاربری‌های متفاوتی مانند مراتع، باغات، اراضی بایر و صخره‌ای و اراضی مسکونی است. در نقشه جابه‌جایی، دامنه‌های غربی که به جاده نزدیک‌تر هستند، میزان جابه‌جایی بیشتری را نشان می‌دهند. این جابه‌جایی‌ها عمدتاً در مناطقی با کاربری مرتع و ارتفاع بالا مشاهده می‌شوند در نقشه کاربری، جاده و مسیل خاکی ۱۳۲ هکتار از مساحت منطقه را شامل شده که باتوجه به اجرای طرح دو باند کردن و عریض کردن این محور در دو طرف کوهستان و دره، میزان تخریب و برداشت از دامنه اطراف جاده بسیار بیشتر شده و این عوامل روی هم رفته باعث قرارگیری ۱۳ کیلومتر از طول این محور در طبقه جابه‌جایی زیاد و متوسط شده است. در ادامه، کاربری مسکونی در پهنه کم با مقدار جابه‌جایی (-۰,۰۰۳ - -۰,۰۰۴) قرار داشته و کاربری باغ که به‌طور پراکنده در طبقات ارتفاعی ۲۰۰۰ تا ۱۱۱۳ متر قرار گرفته، در سه طبقه جابه‌جایی اول دیده می‌شود.

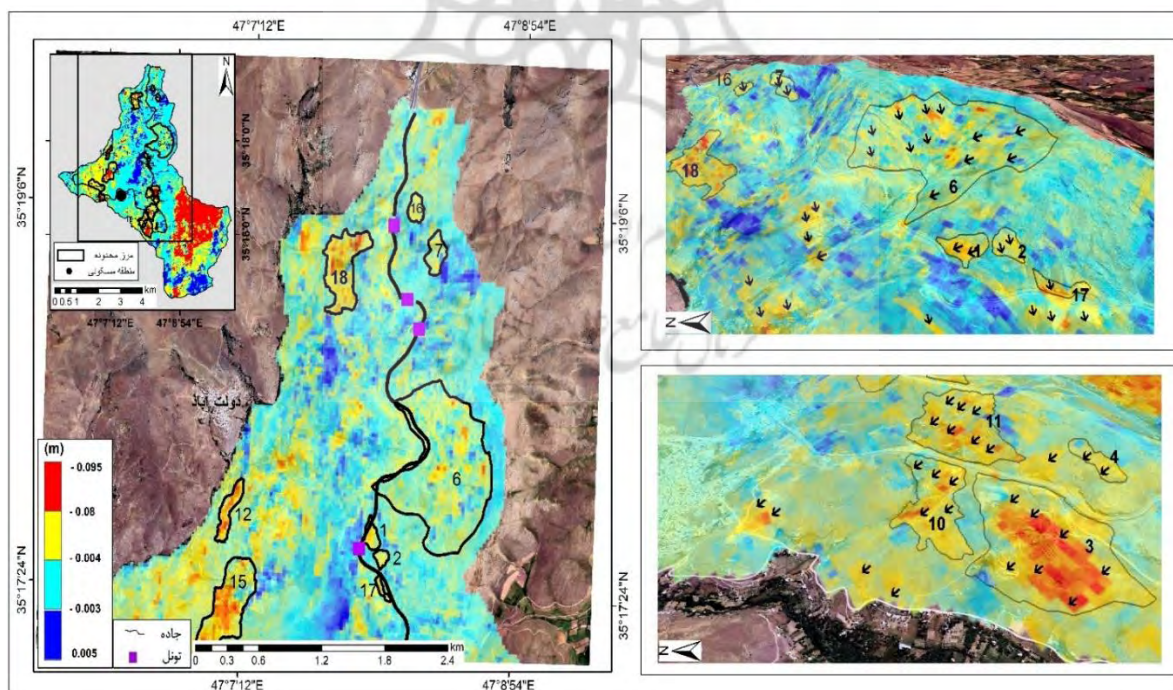
مشاهدات میدانی و تصاویر google earth

با توجه به هدف و پژوهش تحقیق، ۱۸ پهنه ناپایدار از مناطقی که در آن جابه‌جایی اتفاق افتاده در طول جاده گردنه صلوات‌آباد شناسایی و با تصاویر حقیقی گوگل ارث مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفت. با توجه به قرارگیری مسیر جاده در طبقه کاربری اراضی مرتع و بایر، بیشترین سهم به این کاربری‌ها اختصاص یافته است. همانطور که در نقشه مجموع جابه‌جایی مواد دامنه‌ای نشان داده شد، بیشترین سهم از لحاظ نوع کاربری، نرخ جابه‌جایی و مساحت به مناطق شرق و جنوب شرقی محدوده اختصاص یافته است. در کنار این پهنه‌ها، مناطق و نقاط دیگری نیز وجود دارند که میزان جابه‌جایی مواد دامنه‌ای آن‌ها با توجه به طیف رنگی مشخص نشان داده شده است. به‌طور کلی، ۸۵ درصد از این ناحیه (امتداد جاده) در زون و طبقه منفی قرار گرفته است. این بررسی‌ها نشان می‌دهند که میزان جابه‌جایی مواد دامنه‌ای در مناطق با شیب بالا و اراضی مرتع و بایر به دلیل افزایش نیروی گرانشی و تسهیل نفوذ و هدایت آب بارش‌ها به طبقات سست زیرین بیشتر است. جدول ۱۱ مشخصات و موقعیت ۱۸ پهنه ناپایدار را در طول جاده نشان می‌دهد.

جدول (۱۱): موقعیت و مشخصات ۱۴ منطقه استخراج شده از نقشه مجموع جابه‌جایی سال ۲۰۲۳

Table (11): Location and specifications of 14 extracted areas from the 2023 cumulative displacement map

شماره پهنه	UTM		مساحت (h)	دامنه جابه‌جایی (cm)	نوع کاربری
	x	y			
۱	۱۴۸۷۵۱	۳۹۱۱۱۸۲	۸.۸۱	(-۰.۰۹۵ - -۰.۰۸)	اراضی مرتعی و صخره‌ای
۲	۱۴۸۵۰۷	۳۹۱۱۱۰۱	۶.۹	(-۰.۰۹۵ - -۰.۰۸)	اراضی مرتع، صخره‌ای و جاده
۳	۱۴۸۳۸۲	۳۹۰۹۶۹۸	۱۷.۲	(-۰.۰۹۵ - -۰.۰۸)	اراضی مرتع و جاده
۴	۱۴۸۷۳۵	۳۹۰۹۷۸۰	۱.۳۵	(-۰.۰۹۵ - -۰.۰۸)	اراضی مرتع
۵	۱۴۸۵۵۰	۳۹۱۲۱۴۷	۱.۰۸	(-۰.۰۸ - -۰.۰۰۴)	اراضی مرتع، صخره‌ای و جاده
۶	۱۴۹۰۲۲	۳۹۱۳۱۴۵	۸۰.۱۱	(-۰.۰۹۵ - -۰.۰۰۴)	اراضی مرتعی و صخره‌ای
۷	۱۴۸۹۸۱	۳۹۱۴۸۵۱	۴۰.۳	(-۰.۰۹۵ - -۰.۰۰۴)	صخره‌ای و مرتع
۸	۱۴۶۷۲۰	۳۹۱۱۰۰۲	۵۰.۶	(-۰.۰۸ - -۰.۰۰۳)	اراضی مرتع، کشاورزی، صخره‌ای و جاده
۹	۱۴۶۵۴۹	۳۹۱۱۴۶۳	۱۵.۱۶	(-۰.۰۹۵ - -۰.۰۸)	اراضی مرتع، کشاورزی، صخره‌ای و جاده
۱۰	۱۴۸۲۳۷	۳۹۱۰۰۷۳	۱۰.۰۸	(-۰.۰۹۵ - -۰.۰۸)	اراضی مرتع، کشاورزی، صخره‌ای و جاده
۱۱	۱۴۸۵۷۵	۳۹۱۰۳۶۹	۱۵.۹۳	(-۰.۰۹۵ - -۰.۰۰۴)	اراضی مرتع، کشاورزی، صخره‌ای و جاده
۱۲	۱۴۷۰۶۱	۳۹۱۲۷۵۳	۵.۶۵	(-۰.۰۹۵ - -۰.۰۸)	اراضی مرتع
۱۳	۱۴۸۵۳۱	۳۹۱۲۴۰۰	۱.۴۷	(-۰.۰۹۵ - ۰.۰۰۵)	اراضی بایر و صخره‌ای
۱۴	۱۴۸۴۳۶	۳۹۱۲۵۹۷	۲.۴۶	(-۰.۰۸ - -۰.۰۰۴)	اراضی مرتعی و صخره‌ای
۱۵	۱۴۷۰۶۹	۳۹۱۱۹۷۰	۲۳.۷۳	(-۰.۰۹۵ - ۰.۰۰۵)	اراضی مرتع، کشاورزی، باغ
۱۶	۱۴۸۷۹۹	۳۹۱۵۲۲۰	۲.۴۷	(-۰.۰۸ - -۰.۰۰۴)	اراضی مرتعی و صخره‌ای
۱۷	۱۴۸۷۶۱	۳۹۱۰۸۰۲	۵.۲۸	(-۰.۰۹۵ - -۰.۰۸)	اراضی مرتع، صخره‌ای و جاده
۱۸	۱۴۸۱۶۶	۳۹۱۴۷۶۶	۱۷.۶۱	(-۰.۰۹۵ - -۰.۰۰۵)	اراضی مرتع، صخره‌ای و باغ



شکل (۸): وضعیت نرخ تغییر شکل جابه‌جایی دامنه‌ای گردنه صلوات آباد در تصاویر google earth

Figure (8): Slope displacement deformation rate in Salavat Abad Pass using Google Earth images

نتیجه گیری

در این تحقیق، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) و به کمک نرم افزار اسنپ، جابه جایی مواد دامنه ای در طول ۱۴ کیلومتر از گردنه صلوات آباد در جاده سنندج-همدان در بازه زمانی چهار ساله (۲۰۲۳/۰۸/۰۹ - ۲۰۲۰/۱۰/۱۶) شناسایی و پهنه بندی شد. نتایج نشان داد که تصاویر راداری سنتینل-۱ با وضوح بالا، قابلیت بالایی در آشکارسازی ناپایداری دامنه ها دارند. در ادامه، تأثیر عامل کاربری اراضی در ارتباط با پهنه های جابه جایی مواد دامنه ای مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین میزان جابه جایی، معادل ۶ سانتی متر، مربوط به زوج دوم و کمترین میزان جابه جایی، معادل ۳.۵ سانتی متر، مربوط به زوج اول است. بدین ترتیب، منطقه در هر سال ۲.۳۷ سانتی متر جابه جایی داشته و در مجموع ۹.۵ سانتی متر جابه جایی را در طول این چهار سال تجربه کرده است. این تغییرات بیشتر در مناطق شرق، جنوب شرق و غرب مشاهده شد و به طور نقطه ای و پراکنده در مرکز و در طول جاده نیز وجود دارد. با توجه به نقشه ها و جداول مربوط به کاربری اراضی، ۵۴ درصد از مساحت منطقه مربوط به کاربری مرتع و پوشش گیاهی تنک است، در حالی که کمترین مساحت، معادل ۲ درصد، به کاربری مسکونی اختصاص دارد. با هم پوشانی و بررسی رابطه کاربری اراضی با نقشه جابه جایی، کاربری جاده به سه قطعه تقسیم شد. از این سه قطعه، ۶.۵۹ کیلومتر از طول جاده در طبقه جابه جایی زیاد، ۶.۶۲ کیلومتر در طبقه جابه جایی متوسط و نزدیک به ۱ کیلومتر در وضعیت مناسب قرار دارد. همچنین، ۱۸ پهنه ناپایدار از مناطق مختلف در طول گردنه شناسایی شد. این پهنه ها عموماً در جهت های شرقی-غربی و شمالی-جنوبی قرار دارند و دامنه جابه جایی آن ها از ۰.۰۳ تا ۹.۵ سانتی متر متغیر است. این مناطق عمدتاً با کاربری اراضی مرتع و بایر در طول جاده هم راستا هستند. کاربری اراضی مرتع، به ویژه در نواحی شرق و جنوب شرقی دارای بیشترین میزان جابه جایی مواد دامنه ای بود. این امر بیانگر تسهیل نفوذ و هدایت آب بارش ها به طبقات سست زیرین توسط این کاربری است. در این قسمت از محدوده، بیشترین تغییرات انسانی شامل احداث جاده های متنوع، باغ سازی، ساخت و ساز، کشت و زرع و تخریب در اراضی مرتع است. در مقابل، اراضی مسکونی با توجه به قرارگیری در ارتفاعات پایین تر و شیب ملایم تر، کمترین میزان جابه جایی را داشته و در طبقه جابه جایی کم قرار گرفته اند. مقایسه یافته های این تحقیق با نتایج تحقیقات قهرودی و همکاران (۱۳۹۸)، ملک زاده و همکاران (۱۴۰۲)، نگهبان و همکاران (۱۳۹۸) و دی مارتیر و همکاران (۲۰۱۶) از نظر وجود رابطه معنادار در شناسایی مناطق ناپایدار توسط تصاویر راداری و همچنین تأثیر عامل کاربری بر این ناپایداری، نشان دهنده مطابقت این نتایج با تحقیقات قبلی است. این امر به وضوح کارایی بالای تکنیک تداخل سنجی راداری در شناسایی و پهنه بندی ناپایداری دامنه ها را تأیید می کند.

پیشنهادهای

کنترل زمین لغزش در حال وقوع، اغلب امکان پذیر نبوده و در صورت امکان بسیار پر هزینه می باشد. اما وقوع آن را در مناطق مستعد می توان پیشگیری نمود. در این حالت نوع و عامل زمین لغزش و حرکات دامنه ای (طبیعی و انسانی) در پیشگیری حائز اهمیت است. بنابراین برای بهبود پهنه بندی و درک بهتر ناپایداری دامنه ها، پیشنهاد می شود که پایش مستمر مناطق با استفاده از داده های چندزمانه راداری و انجام تحلیل های دوره ای صورت گیرد. این روش می تواند به شناسایی دقیق تر الگوهای جابه جایی و تأثیرات تغییرات انسانی مانند احداث جاده ها و ساخت و سازها کمک کند. همچنین، اتخاذ راهکارهایی نظیر مدیریت صحیح آب و خاک و نظارت بر فعالیت های انسانی می تواند به کاهش خطرات ناپایداری و جابه جایی دامنه ها منجر شود.

References

- Afshari, A., Ghahroudi Tali, M., Sadough, H., & Ehteshami Moin abadi, M. (2020). Assessment slope instability around Lorestan railway by using differential synthetic aperture radar interferometry (DInSAR). *Quantitative Geomorphological Research*, 8(3), 183-202.
- Ahmadzadeh, H., Roostai, S., Nikjo, M., & Dehghani, M. (2018). Estimating the area and volume of the landslide mass using InSAR techniques and GPS observations (case study of the landslide zone of Gogurd village). *Quantitative Geomorphology Research*, 4(2), 18-28.
- Alcántara-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47(2-4), 107-124.
- Barra, A., Monserrat, O., Crosetto, M., Cuevas-Gonzalez, M., Devanthéry, N., Luzi, G., & Crippa, B. (2017). Sentinel-1 data analysis for landslide detection and mapping: first experiences in Italy and Spain. In *Advancing Culture of Living with Landslides: Volume 3 Advances in Landslide Technology* (pp. 201-208). Springer International Publishing.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40(11), 2375-2383.
- Bordoni, M., Boni, R., Colombo, A., Lanteri, L., & Meisina, C. (2018). A methodology for ground motion area detection (GMA-D) using A-DInSAR time series in landslide investigations. *Catena*, 163, 89-110.
- Bovenga, F., Wasowski, J., Nitti, D. O., Nutricato, R., & Chiaradia, M. T. (2012). Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. *Remote Sens. Environ.*, 119, 272-285.
- Chau, K. T., Wong, R. H. C., Liu, J., & Lee, C. F. (2003). Rockfall hazard analysis for Hong Kong based on rockfall inventory. *Rock Mech. Rock Eng.*, 36(5), 383-408.
- Dhakal, A. S., Amada, T., & Aniya, M. (2000). Landslide hazard mapping and its evaluation using GIS: an investigation of sampling schemes for a grid-cell based quantitative method. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 66(8), 981-989.
- Di Martire, D., Tessitore, S., Brancato, D., Grazia Ciminelli, M., Costabile, S., Costantini, M., Graziano, G. V., Minati, F., Ramondini, M., & Calcaterra, D. (2016). Landslide detection integrated system (LaDIS) based on in-situ and satellite SAR interferometry measurements. *Catena*, 137, 406-421.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39(1), 8-20.
- Frattoni, P., Crosta, G., Carrara, A., & Agliardi, F. (2008). Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology*, 94(3-4), 419-437.
- Ghateh, S., Malekzadeh, T., & Pourghasemi, E. (2024). Landslide risk zoning using satellite images (case study: Balharud watershed, Garmsi city). *Geography and Human Relationships*, 6(3), 145-164. doi: 10.22034/gahr.2023.394638.1860.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.*, 31(23).
- Jafari, G. H., & Khodaei, R. (2024). Zoning land surfaces of Shahroud Basin against the occurrence of landslides using the Shannon model. *Geogr. Environ. Hazards*, 12(4).
- Jamalabadi, J., Safari, F., Borabadi, A., & Al-Mohammad, M. (2021). Identification and zoning of susceptible area of landslide in the Javroud rural district. *Emergency Management*, 10(2), 47-55.
- Mahmoudi, F. (2008). *Dynamic geomorphology*. Print two. Payam Noor Publications.

Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., & Rabaute, T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364(6433).

Mosaffaie, J., Ownegh, M., Mesdaghi, M., & Shariat, J. M. (2009). Comparing the efficiency of statistical and empirical landslide hazard zonation models in Alamout watershed.

Najafi Eigdir, A., Roostaei, S., Hejazi, A., Rajabi, M., & Jalali, N. (2021). Landslide hazard zonation using the bivariate statistical models in Nazlo-Chay basin. *Hydrogeomorphology*, 8(27), 17-1. doi: 10.22034/hyd.2021.25375.1376.

Roostaei, S., Ahmadzadeh, H. (2018). Landslide hazard zonation in the Tabriz-Marand road using RS and GIS. *Quantitative Geomorphological Research*, 1(1), 47-58.

Roostaei, S., Mokhtari, D., & Ashrafi Fini, Z. (2019). Identification and monitoring of domain instability by differential intermetal processing in the Taleghan watershed. *Quantitative Geomorphological Research*, 7(3), 18-30.

Roostaei, S., Roustaei, M., Sharifikia, M., & Yarahmadi, J. (2013). Application of differential synthetic aperture radar interferometry (D-InSAR) for detection and monitoring of landslides, Case study: Garm Chay Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 5(3), 190-198. doi: 10.22092/ijwmse.2013.101841.

Shirzadi, A., Solaimani, K., Habibnejad Roshan, M., Kaviani, A., & Ghasemian, B. (2016). Comparison of logistic regression, frequency ratio and AHP in rock fall susceptibility mapping (Case study: Kurdistan Province, Salavat Abad Saddle). *J. Watershed Manage. Res.*, 6(12), 193-204.

