Journal of Geography and Planning
Online ISSN: 2717-3534 Print ISSN: 2008-8078
Homepage: https://geoplanning.tabrizu.ac.ir

Evaluation of slope instability and landslide in Balikhlo Chay Watershed using Sentinel 1 radar images and radar interferometry

Batool Zeinali[1]✉, **Maryam Mohammadzadeh shishehgaean**[2]

1. Corresponding Author, Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Social Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: Zeynali.b@uma.ac.ir
2. PHD student, Geomorphology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: mmohamadzadeh23@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 1 June 2025
Revised: 14 December 2025
Accepted: 24 December 2025
Published: 29 July 2026

Keywords:
Saescape,
Ardabil,
Balikhlouchay,
landslide,
Radar interferometry,
Sentinel 1 images.

ABSTRACT

The purpose of land surface deformation is a dynamic process on the earth's surface, this process occurs naturally or due to human intervention. One of the forms of this deformation is landslide. Landslides are defined as extensive and deep collective movements of the entire soil layer on the surface of the mother earth that cause heavy damage every year, sometimes it is not possible to compensate for these damages and we have to spend a lot of time and money. The purpose of this article is to identify and estimate the amount of landslides in the Balikhlochay watershed in Ardabil province using the radar interferometry method in the period from 2016 to 2024 using low-pass radar images of the European Space Agency's Sentinel-1 satellite. Finally, the landslide hazard map, which will be of great help to planners, researchers and managers in terms of possible risks and finding safer places for the development of construction and road construction and the safety of people. Identifying areas prone to landslides and estimating their rate plays an important role in managing and controlling this hazard.

Radar interferometry is an efficient method for measuring ground motion. This technology allows for continuous monitoring of small ground motions with high accuracy over a wide range. This technology has become very popular in the study of natural hazards such as landslides, faults, earthquakes, and volcanic activity. This method compares two master and slave radar images taken on two different dates and, by creating an interferometry, allows for accurate measurements of the ground surface over a period of time.In this study, Sentinel 1 radar images from 2016 and 2024 were used to estimate and identify landslides. The SARSCAPE software was used to process the data.

Results The maximum landslide size measured in the study area between 2016 and 2024 is 34 cm and the minimum is 9 cm. The largest slope movements occur in the southwest and the smallest in the northeast of the Balikhlouchay basin of Ardabil.Conclusion The results of this study showed that radar images have good potential for detecting and calculating their displacement. Due to the altitude of the study area, most of the precipitation in the area is in the form of snow, there are quite resistant formations, and landslides occur on a very large scale.

Cite this article: Zeinali, B. & Mohammadzadeh shishehgaean, M. (2026). Evaluation of slope instability and landslide in Balikhlo Chay Watershed using Sentinel 1 radar images and radar interferometry. *Journal of Geography and Planning*, 30(97), 150-164. http//doi.org/10.22034/gp.2025.67355.3407

© The Author(s).
Publisher: University of Tabriz.
DOI: http//doi.org/10.22034/gp.2025.67355.3407

Introduction

Landslides are dynamic processes on the Earth's surface, occurring naturally or due to human intervention. One form of this deformation is landslides. The definition of landslides is the general and deep movements of the entire soil layer on the surface of the mother earth, which cause heavy damage every year, sometimes it is not possible to compensate for these damages and we need to spend a lot of time and money. Their speed of action and extent often create visible and sometimes catastrophic phenomena and may affect tens or hundreds of thousands of cubic meters of rock and soil at one place. This phenomenon works mostly in discrete sediments. The effects of slope instability are in the form of mass movements on a small to large scale. Slope movements may be minor and limited to the fall of a single piece of rock or very large and catastrophic. Continuous monitoring of land surface changes and identification of landslide-prone areas, especially in residential areas and communication infrastructures such as roads and railways, is one of the most effective factors in reducing human and financial losses caused by natural hazards such as landslides and landslides. So far, several methods such as the use of the Global Positioning System, geodesy and tacheometry, and lidar have been proposed to determine land surface changes. However, in addition to these methods, the radar interferometry technique, with the ability to work in all weather conditions and day and night, with the ability to cover a large area as large as a city and sometimes more, and with very high spatial and temporal resolution, is today one of the most accurate and least expensive remote sensing techniques for determining and monitoring land changes, very slow and unstable slope movements in the whole world.

Materials and Methods

This study used Sentinel-1 images, which capture images in the C-band microwave range. Further processing was performed using the SARSCAPE 5.2 extension in ENVI 5.3 software. The technique used in this study to determine the amplitude motion was the differential aperture interferometry method with a combination of two repeated or non-repeated passes. One of the most important steps in the analysis and evaluation of radar interferometry is the selection of a suitable master and slow image pair. Several factors contribute to the selection of the image pair, such as the sensor frequency, spatial baseline, temporal baseline, and spatial layers in the direction of sensor motion. In the present study, two Sentinel-1-A SLC images from 2016 and 2024 were used. An artificially gated radar signal consists of two components: amplitude and phase. Amplitude, the power of the returned signal, and phase are fractions of a perfect sine wave signal. The phase in a radar image is determined by the distance between the sensor antenna and the ground feature. Although the phase of a single image provides useful quantitative information, the phase difference between a pair of images at a specific, coherent, and recorded coordinate provides researchers with valuable information.

Results

By studying the nature and possibility of land surface displacements, it is possible to estimate the parameters affecting the land displacement process and use them in geophysical modeling and determining the necessary solutions to deal with slope movements. Among all the terrestrial and space methods for measuring land surface changes, radar interferometry is a useful tool and the best method. This graph shows the amount of displacement caused by slope movements in the study area. Positive values indicate the amount of displacement in the direction of movement of the satellite sensors and negative values indicate the amount of displacement in the opposite direction of movement of the sensors. The amount of displacement of slope materials measured in the study area between 2016 and 2024 is a maximum of 34 cm and a minimum of 9 cm. The largest slope movements occur in the southwest and the smallest in the northeast of Balikhlouchay, Ardabil.

Conclusion

The results of this study showed that radar images have a good potential for detecting slope instabilities and calculating their displacement. The maximum material displacement is 34 cm and the minimum is 9 cm. This indicates that there is active activity in the region regarding slope displacement. In certain cases, these disasters can cause severe and irreparable damage due to high population density or landslide spread. By observing and comparing slope movements and geology, it was also found that most slope movements occur in areas where the rock type is mainly composed of tuff, tuffaceous sandstone, shear lava, and pyroxene-andesite lavas. The most important factors for slope movements in the study area include illegal construction of villas on the slopes and construction of access roads along unstable road pits, loss of slope supports, very steep slope slopes and very good rainfall in most months of the year due to favorable weather conditions in the area. Due to the altitude of the study area, most of the precipitation in the area is in the form of rain, there are quite resistant formations and slope movements occur on a very large scale. On the other hand, the road under study is the most important

access road for heavy traffic. The large number of heavy machinery passing through this area causes significant vibrations that increase the possibility of landslides on very unstable slopes.

Keywords: Saescape, Ardabil, Balikhlouchay, landslide, Radar interferometry, Sentinel 1 images.

جغرافیا و برنامه ریزی
شاپا چاپی: ۲۰۰۸-۸۰۷۸ شاپا الکترونیکی: ۲۷۱۷-۳۵۳۴
Homepage: https://geoplanning.tabrizu.ac.ir

ارزیابی زمین‌لغزش حوضه آبریز رود بالیخلوچای با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ و تداخل سنجی رادار

بتول زینالی[۱]✉، مریم محمدزاده شیشه‌گران[۲]

۱. نویسنده مسئول، استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: Zeynali.b@uma.ac.ir
۲. دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: mmohamadzadeh23@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷

کلیدواژه‌ها:
ساراسکیب،
اردبیل،
بالیخلوچای،
حرکات دامنه‌ای،
تصاویر سنتینل ۱،
تداخل‌سنجی راداری.

چکیده

هدف تغییر شکل سطح زمین یک فرآیند پویا در سطح زمین است، این فرآیند به طور طبیعی یا به دلیل دخالت انسان رخ می دهد. یکی از اشکال این تغییر شکل، زمین‌لغزش است. تعریف زمین لغزش ها حرکات جمعی گسترده و عمیق کل لایه خاک در سطح زمین مادر هستند که هر ساله خسارات سنگینی را به بار می آورند، گاهی جبران این خسارات امکان پذیر نیست و باید وقت و هزینه زیادی صرف کنیم. هدف این مقاله شناسایی و برآورد میزان زمین لغزش در حوضه آبریز بالیخلوچای در استان اردبیل با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ با استفاده از تصاویر راداری پایین گذر ماهواره سنتینل۱ سازمان فضایی اروپا استفاده شده است. در نهایت نقشه خطر زمین لغزش، که کمک شایانی به برنامه‌ریزان، پژوهشگران و مدیران در راستای خطرات احتمالی و یافتن مکان‌های امن‌تر جهت توسعه ساخت و ساز و احداث جاده و امنیت مردم شود. شناسایی مناطق در معرض زمین‌لغزش و تخمین نرخ آن، نقش مهمی در مدیریت و کنترل این مخاطره دارد.

روش پژوهش تداخل‌سنجی راداری روشی کارآمد برای اندازه‌گیری جابجایی سطح زمین است. این فناوری امکان پایش مداوم حرکات کوچک سطح زمین را با دقت بالا و در محدوده وسیعی فراهم می‌کند. این فناوری در مطالعه مخاطرات طبیعی از جمله زمین‌لغزش، گسل، زمین لرزش و فعالیت آتشفشانی بسیار محبوب شده است. این روش دو تصویر مستر و اسلیو تصاویر راداری را که در دو تاریخ متفاوت برداشت شده است را باهم مقایسه می‌کند و با ایجاد یک تداخل‌سنجی، امکان اندازه‌گیری دقیق سطح زمین را در در بازه زمانی فراهم می‌کند.
در این مطالعه، از تصاویر راداری Sentinel 1 مربوط به سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ برای تخمین و شناسایی زمین‌لغزش استفاده شد. و از نرم‌افزار SARSCAPE برای پردازش اطلاعات استفاده شد.

نتایج میزان زمین‌لغزش که در منطقه مورد مطالعه بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ اندازه‌گیری شده است، حداکثر ۳۴ سانتی‌متر و حداقل ۹ سانتی‌متر است. بزرگترین حرکات دامنه‌ای در جنوب غربی و کوچکترین آنها در شمال شرقی حوضه آبریز بالیخلوچای اردبیل رخ می‌دهد.

نتیجه‌گیری نتایج این مطالعه نشان داد که تصاویر راداری پتانسیل خوبی برای تشخیص و محاسبه جابجایی آنها دارند.. با توجه به ارتفاع منطقه مورد مطالعه، بیشتر بارش منطقه به صورت برف است، سازندهای کاملاً مقاوم وجود دارد و زمین‌لغزش در مقیاس بسیار وسیعی رخ می‌دهد.

استناد: زینالی، بتول و محمدزاده شیشه‌گران، مریم (۱۴۰۵). ارزیابی زمین‌لغزش حوضه آبریز رود بالیخلوچای با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ و تداخل سنجی رادار. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۳۰ (۹۷)، ۱۵۰-۱۶۴.
http//doi.org/10.22034/gp.2025.67355.3407

ناشر: دانشگاه تبریز.
© نویسندگان.

مقدمه

مخاطره زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی جز مهمترین مخطراتی به شمار می‌روند که می‌توانند اقتصاد جهانی و محلی و سکونتگاه‌های انسانی را تحت تاثر قرار دهند (لی [1] و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۱۰۸). زمین لغزش، که به عنوان حرکت خاک، گل، آوار یا سنگ تعریف می‌شود، یکی از متداول‌ترین و مخرب‌ترین مخاطرات ژئومورفوژیکی در مناطق کوهستانی بوده و خسارات جانی و مالی زیادی به بار می‌آورد (دانگ [2] و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۱۸). خسارات مالی و جانی پس از زمین‌لغزش نشان می‌دهد که مناطق پرخطر باید دارای یک برنامه مدیریت بلایا و ریسک سازماندهی شده باشند. زمین‌لغزش معمولا در اثر رویدادهای طبیعی مانند زلزله یا بارندگی شدید در محیط‌های مستعد زمین‌شناسی، ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی رخ می‌دهد. با این وجود، سایر عوامل کلیدی موثر بر مکانیسم‌های گسیختگی زمین‌لغزش، مانند تنش‌های درجا، هوازدگی و ارتفاع نیز بسیار مهم هستند. در مناطق کوهستانی، زمین‌لغزش می‌تواند اثرات قابل توجهی بر ویژگی‌های توپوگرافی، جنگل‌ها، ویژگی‌های خاک مانند انسجام، ساختار، تراکم و دماو همچنین بر زیرساخت‌ها مانند جاده‌ها و زمین‌های کشاورزی داشته باشد که میزان این اثرات به بزرگی زمین‌لغزش‌ها بستگی دارد (ساها [3] و همکاران، ۲۰۲۱: ۲۶۶۴).

عواملی که منجر به زمین‌لغزش می‌شوند عبارتند از ساختار زمین‌شناسی، فعالیت زمین‌ساختی، سنگ‌شناسی، ناهمواری توپوگرافیک، زلزله، بارندگی، هوازدگی، آب و هوا و فعالیت‌های انسانی (تانیاس [4]، ۲۰۱۹ :۱۲۷) تکامل زمینلغزش تحت تأثیر متقابل عوامل فعالیتهای انسانی داخلی و خارجی است. شناسایی خطر زمین‌لغزش یک کار چالش‌برانگیز برای دولت‌های محلی و تصمیم‌گیران بوده برای ارزیابی حساسیت یک منطقه نسبت به زمین‌لغزش ارزشمند است (قربانی و همکاران، ۲۰۲۳ :۲۰).

یک سیگنال رادار با گیت مصنوعی از دو مؤلفه تشکیل شده است: دامنه و فاز. دامنه، قدرت سیگنال برگشتی و فاز، کسری از یک سیگنال موج سینوسی کامل است. فاز در یک تصویر رادار با فاصله در میان آنتن حسگر و عارضه سطح زمین تعیین می‌شود. اگرچه فاز یک تصویر واحد اطلاعات مفید ماهیت کمی ارائه می‌دهد، اما اختلاف فاز بین یک جفت تصویر در یک مختصات مشخص و منسجم و ثبت شده، اطلاعات ارزشمندی را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد. تداخل‌سنجی راداری، اختلاف فاز بین دو تصویر از یک منطقه زمانی و خط پایه خاص را تعیین می‌کند (دهقانی بیدگلی و همکاران، ۲۰۱۹). روش تداخل‌سنجی راداری امکان ایجاد یک مدل دیجیتالی از ناهمواری زمین را فراهم می‌کند که دقت ارتفاع بهینه آن برای داده‌های باند C با طول موج ۵٫۶ سانتی‌متر حدود پنج متر است (چاترجی [5] و همکاران، ۲۰۰۶). این روش اولین بار توسط گلدشتاین و زیبکر در سال ۱۹۸۹ معرفی شد. این اصطلاح به روشی اطلاق می‌شود که در آن پارامترهایی مانند توپوگرافی، تغییرات و جابجایی‌های سطح زمین با استفاده از تداخل فاز دو یا چند تصویر راداری با روزنه مجازی

دو تصویر از یک منطقه زمانی خاص و خط مبنا تعیین می‌شوند (دهقانی بیدگلی و همکاران، ۲۰۱۹). تداخل‌سنجی راداری امکان ایجاد یک مدل رقومی زمین با دقت ارتفاعی بهینه تقریباً پنج متر برای داده‌های باند C با طول موج ۵٫۶ سانتی‌متر را فراهم می‌کند (چاترجی و همکاران، ۲۰۰۶). این روش اولین بار توسط گلدشتاین و سیبکر در سال ۱۹۸۹ معرفی شد. این اصطلاح به روشی اشاره دارد که در آن معیارهایی مانند توپوگرافی، تغییرات و جابجایی‌های زمین از طریق تداخل فاز دو یا چند تصویر راداری با یک روزنه مجازی که از یک مکان واحد تخمین زده و اندازه گیری می‌شوند.

هدف این مقاله شناسایی و برآورد میزان زمین لغزش در بالیخلوچای در استان اردبیل با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ با استفاده از تصاویر راداری پایین گذر ماهواره سنتینل۱ سازمان فضایی اروپا استفاده شده است. در

1. Li
2. Dong
3. Saha
4. Tanyas
5. Chatterjee

نهایت نقشه خطر زمین لغزش، که کمک شایانی به برنامه‌ریزان، پژوهشگران و مدیران در راستای خطرات احتمالی و یافتن مکان‌های امن‌تر جهت توسعه ساخت و ساز و احداث جاده و امنیت مردم شود.

پیشینه پژوهش

مطالعات داخلی

مطالعات مختلفی در حوزه علوم زمین در سراسر جهان انجام شده است، از جمله مطالعه‌ای شهیدی و همکاران (۱۳۹۴) که در آن خطر رانش زمین در جاده سراب–نیر با استفاده از عوامل مختلفی که در وقوع زمین لغزش نقش داشتند، ارزیابی شد. در این میان، عوامل ریخت شناسی زمین‌شناسی، آب‌های زیرزمینی و بارندگی مورد بررسی قرار گرفتند. برای بررسی عوامل مهم در وقوع رانش زمین، از بررسی‌های میدانی، آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی استفاده شد. نتایج نشان داد که شرایط مورفولوژیکی محلی و وجود یک منطقه پست باعث زهکشی آب از منطقه مرتفع به سمت توده رانش زمین شده است. با توجه به میزان بارندگی‌های بهاری و زمستانی، می‌تواند عامل اصلی رانش زمین باشد. خدایی روستایی و همکاران (۱۳۹۵) این مطالعه با عنوان «ارزیابی موقعیت سکونتگاه‌های تحت تأثیر مخاطرات طبیعی با استفاده از تداخل‌سنجی تفاضلی (مطالعه موردی روستای گوگرد)» نشان داد که نتایج بررسی و نقشه جابجایی نهایی نشان می‌دهد که محل انتخاب شده از نظر پایداری شرایط مطلوبی نداشته و در معرض حرکات شیب قابل توجهی قرار دارد. این محل به طور متوسط ۱۲ سانتی‌متر در سال جابجایی در امتداد خط دید ماهواره ثبت کرده است. به منظور ثبت دقیق شیب‌های منطقه مورد مطالعه در رابطه با حرکات شیب، ارزیابی درجه پایداری محل و درک بهتر تکامل آن، نمودار جابجایی سری زمانی برای شش نقطه در اطراف محل انتخاب شده رسم شد. این نمودارها نشان‌دهنده وجود حرکت رو به پایین در سراسر منطقه مورد مطالعه در امتداد خط دید حسگر، از ۸ تا ۱۴ سانتی‌متر است. قشلاق و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای با عنوان پایش زمین‌لغزش‌ها با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری InSAR (مطالعه موردی: منطقه اهر تا ورزقان) بر اساس نتایج پردازش تصاویر راداری، بیشترین میزان اختلاف جابجایی صورت گرفته در منطقه مورد بررسی بیشترین میزان مربوط به قسمتهای شرق و غرب به صورت ناپایدار بوده است. نتایج این پژوهش حاکی از فعّال بودن حرکا ت دامنه ای تنها قسمتی از زمین‌لغزش‌های موجود در جنوب منطقه در طول مدت زمان اخذ تصاویر راداری است. همچنین نتایج نشان داد که داده‌های ماهواره ای و روش پردازش تداخل سنجی InSAR در تعیین و شناسایی و تحلیل، پایش زمین‌لغزش‌ها پتانسیل بسیار خوب و مناسبی دارد. و جهت دستیابی به نتایج صریح و قاتع دقیق‌تر استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر در این زمینه بسیار به صرفه سودمندتر خواهد بود. ذاکری نژاد و عموشاهی (۱۴۰۱) در پژوهشی با عنوان ارزیابی خطر حرکات دامنه ای با استفاده از داده های سنجش از دور و مدل حداکثر آنتروپی (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبخیز اصفهان) نتایج این مطالعه نشان داد که مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مدل خطر زمین‌لغزش، فاصله از آبراهه (۱۷/۱٪)، زمین‌شناسی (۱۴/۱٪) و فاصله از جاده (۱۳٪) بودند. علاوه بر این، نتایج سطح زیر منحنی AUC برای داده‌های آموزشی۰/۹۳۱ و ۰/۸۸۷ بود که نشان می‌دهد قدرت تشخیص مدل بسیار بالا بوده و مدل می‌تواند مناطق خطر زمین‌لغزش را به خوبی از یکدیگر تشخیص دهد. بر اساس نتایج، از کل منطقه مورد مطالعه، ۱۳۹۷۶۰ هکتار (۸۴/۶۹٪) در معرض خطر خیلی کم، ۱۵۴۴۹,۵ هکتار (۳۶/۹٪) در معرض خطر کم، ۶۹۰۳,۳۹ هکتار (۱۸/۴٪) در معرض خطر نسبتاً کم، ۲۴۵۶,۸۵ هکتار (۴۸/۱٪) در معرض خطر زیاد و ۴۴۵,۹۱ هکتار (۲۷/۰٪) در طبقه خطر خیلی زیاد قرار دارند. انتظاری و کردوانی (۱۴۰۱) در مطالعه ای با عنوان پهنه‌بندی خطر حرکات دامنه‌ای با استفاده از روش‌های مبتنی بر GIS و داده‌های راداری در فریدون شهر پرداخت نتایج نشان دهنده این بود که علاوه بر نقشه مناطق پرخطر و بسیار پرخطر در منطقه پوشش مشترک ۶۷ درصدی مناطق در نقشه‌های پهنه‌بندی میزان خطر با سلول‌های جابجایی سطحی، پردازش لازم در تصاویر رادار سنتینل با بیشترین جابجایی را نشان می‌دهد؛ که نشان‌دهنده احتمال وقوع یا خطر حرکات دامنه‌ای در این مناطق باشد. اسفندیاری و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه ای با عنوان ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه آبریز زمکان با استفاده از ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون لجستیک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر این است که فاکتورهای شیب با ضریب ۰/۲۸، بارش با ضریب ۰/۲۷، لیتولوژی با ضریب ۰/۲۶ و ارتفاع با ضریب

۰/۲۲ کنترل‌کننده‌های اصلی وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز زمکان هستند. توابع مدل SVM و هم‌چنین رگرسیون لجستیک نیز اثرات قطعی فاکتورهای انتخابی بر وقوع زمین‌لغزش را تائید کردند. براساس نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش حدود ۳۵ درصد مساحت حوضه مطالعاتی در کلاس خطرپذیری زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته است. عابدینی و پیروزی (۱۴۰۳) در مطالعه ای با عنوان تعیین مناطق مستعد وقوع خطر زمین‌لغزش در مسیرارتباطی نیر- با توجه به خروجیِ روش CODAS، به‌ترتیب ۱۲۱/۲۵ و ۱۸۷/۹۶ کیلومترمربع از مساحت محدوده و مطابق با نتایجِ به‌کارگیری روشMARCOS، ۳۲/۸۵ و ۲۰۱/۷۶ کیلومترمربع از مساحت محدوده، در طبقهٔ پرخطر و بسیار پرخطر قرار دارد. با توجه به اعتبارسنجی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ استفاده‌شده، با بهره‌گیری از روش منحنی ROC بیانگرِ دقت خیلی‌خوب روش CODAS، با مساحت زیر منحنی ۰/۷۶ و دقت عالی روشMARCOS، با مساحت زیر منحنی ۰/۸۷ است. به نظر می‌رسد که نتایج این مطالعه، در انتخاب روش مناسب در راستای پتانسیل‌سنجی خطر زمین‌لغزش در مناطق مشابه با محدودهٔ محور ارتباطی نیر-سراب، می تواند بسیار مفید باشد و مورد توجه پژوهشگران، مسئولان و سیاست‌گذاران قرار گیرد. توسط ابراهیمی و عینالو (۱۴۰۴) در مطالعه ای با عنوان پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از تکنیک مدل‌سازی الگوریتم یادگیری ماشین (نمونهٔ موردی: شهرستان ایذه) نتایج مدل‌سازی نشان داد که در میان عوامل مؤثر شناسایی‌شده، فاصله از جاده‌ها (با ضریب اهمیت ۰/۷۳)، شیب (۰/۶۲)، زمین‌شناسی (۰/۵۴) و فاصله از رودخانه (۰/۴۲) بیشترین تأثیر را در وقوع لغزش‌های زمین داشته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که بخش بزرگی از منطقه به‌خصوص مناطق جنوبی دارای حساسیت زیاد به زمین‌لغزش است که ضرورت اقدامات مدیریتی پیشگیرانه را دوچندان می‌کند.

مطالعات خارجی

دی مارتیر[1] و همکاران (۲۰۱۶)، در مقاله‌ای با عنوان «سامانه مدرن ارزیابی رانش زمین بر پایه داده‌های مکانی و روش اینترفروگرام راداری»، او با استفاده از ادغام و ترکیبی از روش‌های میدانی و GPS و تکنیک اینتروفروگرام را در شهر پالرمو، در منطقه سیسیل ایتالیا، شناسایی کرد. نتایج تحقیقات، دامنه ی طولانی از ریزش به سمت پایین مواد زمین لغزش را از ۳ تا ۴۶ سانتی‌متر در بازه سه ساله مورد مطالعه قرار دادند. دقت مطالعات آنها در تحقیقات میدانی بررسی و تأیید شد. کنفورتو[2] و همکاران (۲۰۱۷) در مورد بررسی حرکات دامنه ای که ناشی از بارندگی است با استفاده از ادغامی از اینترفروگرام و تحلیل نتایج ژئوتکنیکی در مناطق کوهستانی پاپانیس در جنوب ایتالیا مطالعه کردند. آنها با پردازش تصاویر ماهواره‌ای InTerra از اکتبر ۲۰۱۳ تا اکتبر ۲۰۱۴، تکنیک‌های همبستگی پیکسلی و روش‌های ژئوتکنیکی مانند اندازه‌گیری سطح آب‌های زیرزمینی و اندازه‌گیری‌ها، میزان حرکت مواد ناشی از رانش زمین را که پس از بارندگی شدید (۱۸۵ میلی‌متر) در ۲۳ فوریه ۲۰۱۲ در جنوب ایتالیا رخ داد، کمّی‌سازی کردند. نتایج بررسی های آنها نشان داد که مواد رسوبی با سرعت ۳۰ تا ۴۰ میلی متر در سال در منطقه مورد نظر به سمت خط دید خاص ماهواره در حال گردش هستند که زمین لغزش در دامنه ها و آسیب به خطوط برق و راه‌های ارتباطی در منطقه وجود این نوع مخاطره را تأیید کردند. هاماند[3] و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تصاویر راداری در منطقه بالوان در روسیه، زمین‌لغزش را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تغییر شکل زمین در طول دوره پژوهش در امتداد خط دید راداری در نزدیکی جاده اصلی در منطقه سد بالوران با مقدار ۲۰ سانتی‌متر را نشان داد. براگنانو[4] و همکاران (۲۰۲۰)، در بررسی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و با بهره‌گیری از عوامل ژئومورفولوژیکی (ارتفاع، جنبه، شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحنای مشخصات)، زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی) و کاربری اراضی زمین‌لغزش در دو شهر بزرگ برزیل (پورتو آلگره و ریودوژانیر) را بررسی کردند. و نتایج نشان داد که روش ANN، ابزاری مؤثر برای کمک به توسعه نقشه‌های مستعد لغزش زمین می‌تواند باشد.

1. DiMartire
2. Conforto
3. Hammad
4. Bragagnolo

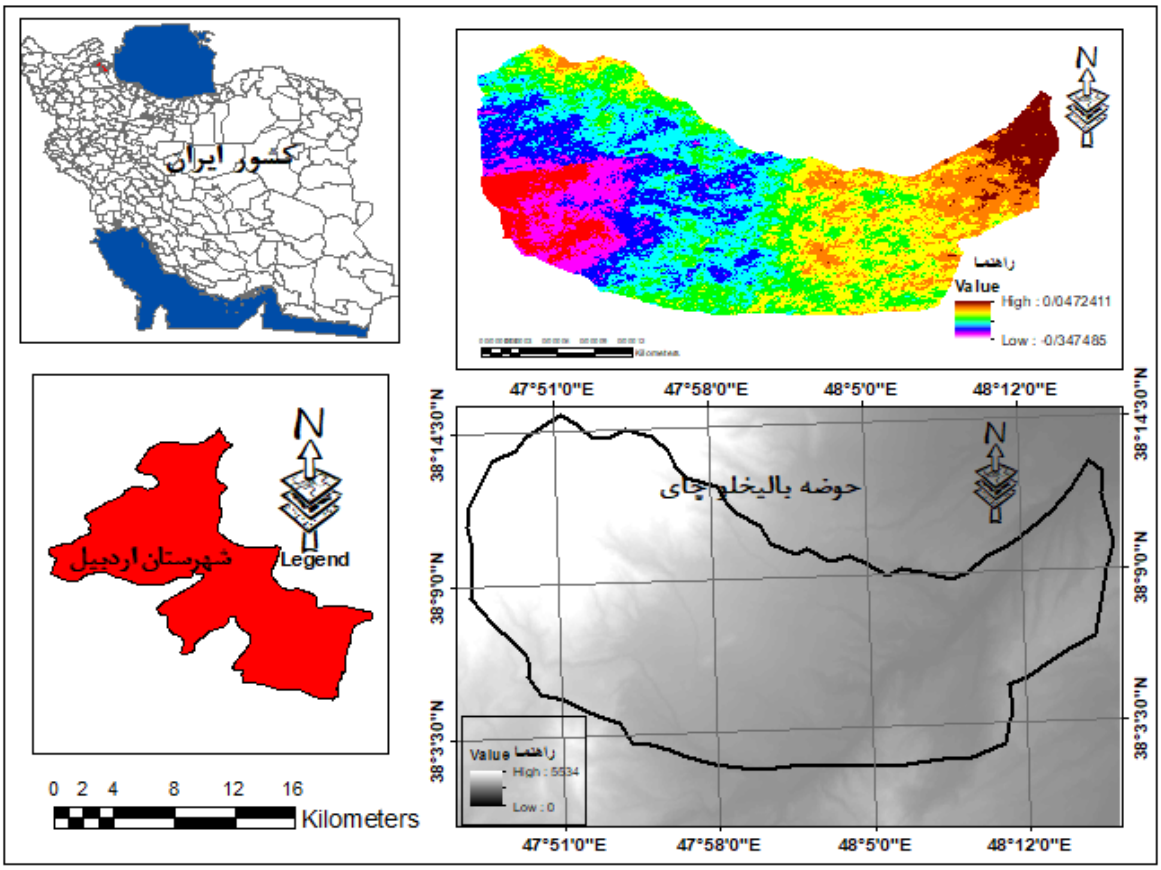
وجتکووا[1] و وجتک (۲۰۲۰)، با استفاده از روش AHP، به ارزیابی و مطالعه استعداد لغزش زمین، در شهر هاندلوا اسلواکی پرداختند. با توجه به نتایج بررسی‌ها، مهم‌ترین عامل شیب شناخته شده و ۵۱/۹ درصد از کل منطقه مورد مطالعه دارای طبقه بندی حساسیت بالا و بسیار بالا است. همچنین، با توجه به مقایسه نتایج مطالعه با تقشه پراکنش لغزش موجود، صحت نتایج مورد تأیید قرار گرفت. . کومار[2] و همکاران (۲۰۲۲)، به پیش‌بینی فضایی خطر زمین لغزش در منطقه کولو هیماچال پرادش هند، با استفاده از روش AHP، پرداختند. نتایج مطالعه نشان داده است که ۶۸ درصد از مساحت محدوده مطالعاتی دارای پتانسیل بالای لغزش می‌باشد. همچنین با توجه به نقشه پراکنش لغزش‌های موجود، دقت پیش بینی ۹۰ درصدی برای این پژوهش، محاسبه شده است. ساها[3] و همکاران (۲۰۲۳)، با بهره‌گیری از روش AHP، خطر زمین‌لغزش در بخشی از ناحیه دارجلینگ در شمال شرقی هند را مورد ازیابی قرار دادند و نتایج به دست آمده بیانگر این موضوع است که ۳۷/۸۶ درصد از منطقه در پهنه‌های پرخطر قرار دارد و با توجه به سطح زیر منحنی ۹۶/۸ ٪، کارایی مدل مورد تأیید قرار گرفته است.

روش پژوهش

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز بالیخلوچای از زیرحوضه‌های حوضه آبریز دریای خزر یکی از حوضه‌های آبریز کشور است. این حوضه از جنوب غربی شهر نیر سرچشمه می‌گیرد، از میان دو رشته کوه سبلان در دامنه جنوبی آن و دامنه شمال غربی بزغوش عبور می‌کند و در نهایت به رودخانه قره سو می‌پیوندد. حوضه آبریز بالیخلوچای بین ۴۷ درجه ۴۶ دقیقه تا ۴۸ درجه ۶ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه ۵۲ دقیقه تا ۳۸ درجه ۱۵ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. مساحت حوضه آبریز آن ۱۰۹۳ کیلومتر مربع، طول اصلی آن ۶۵ کیلومتر و ظرفیت ذخیره آب آن تقریباً ۸۰ میلیون متر مکعب است. حوضه آبریز بالیخلوچای با وسعت ۵۶۷ کیلومتر مربع و محیط ۱۷۴ کیلومتر در منطقه کوهستانی واقع شده و تغییرات ارتفاع آن بین ۱۵۵۷ تا ۴۳۸۳ متر می‌باشد. همچنین ضریب گراویلیوس حوضه ۲/۰۵، شیب متوسط حوضه برابر ۶/۱ درصد و طول کل آبراهه‌ها به ۴۱۹ کیلومتر و طول شاخه اصلی به ۴۴ کیلومتر می‌رسد (رئوف علی‌اوغلی، ۱۳۹۹: ۳۰۱). حوضه آبریز بالیخلوچای از کوه‌های بزغوش و سبلان سرچشمه می‌گیرد و پس از آبیاری زراعی شهرستان نیر و اردبیل به مخزن سد ذخیره خاکی یامچی تخلیه می‌شود. ایستگاه هیدرومتری پل الماس درپایین دست سد یامچی واقع شده است. مساحت بالادست ایستگاه مذکور حدود ۱۰۷۰ کیلومتر مربع با اقلیم نیمه خشک سرد است که تامین کننده ذخیره سد یامچی با حجم مخزن مفید ۸۰ میلیون متر مکعب بوده و به مصرف شرب و کشاورزی شهر اردبیل می‌رسد. متوسط بارش سالانه محدوده ۳۰۰ میلی‌متر است. میانگین دبی طولانی مدت ایستگاه هیدرومتری در بخش پل الماس حوضه ۳/۱۹ متر مکعب بر ثانیه گزارش شده است (نصیری خیاوی و همکاران، ۲۰۱۹: ۸۵۵).

1. Vojtekova
2. komar
3. Saha



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز بالیخلوچای شهرستان اردبیل

تصاویر ماهواره ای راداری

در این مقاله از تصاویر Sentinel-1 استفاده شد که تصاویر را در طیف مایکروویو باند C برداشت می‌کند. پردازش بیشتر با استفاده از افزونه SARSCAPE 5.2 نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام شد. تداخل‌سنجی تفاضلی با دیافراگم مرکب در دو مرحله‌ای تکراری یا غیر تکراری برای تجزیه و براورد میزان تغییرات دامنه استفاده شد. یکی از مراحل مهم و اساسی در تجزیه اینترفروگرام راداری، انتخاب یک جفت تصویر اصلی و مستر و تکمیلی یا اسلیو است. عواملی هم چون فرکانس اصلی و خط پایه مکانی و زمانی در انتخاب جفت تصویر و لایه های مکانی در جهت حرکت حسگر نقش دارند. در مطالعه حاضر، از دو تصویر Sentinel-1-A SLC مربوط به سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ استفاده شد.

این روش امکان ثبت تغییرات سطحی روی زمین را که در فواصل زمانی مختلف رخ می‌دهند، با دقت میلی‌متری و با استفاده از حداقل دو تصویر مدل ارتفاعی رقومی یا تعداد بیشتری تصویر راداری فراهم می‌کند. اصول اساسی برای اندازه‌گیری تغییرات سطحی در پوسته زمین با استفاده از تداخل‌سنجی راداری عبارتند از: P نشان دهنده یک ناحیه خاص روی سطح است که به صورت یک پیکسل تصویربرداری می‌شود.

سنجنده تصویر اول (تصویر مستر)[1] T0 ثبت و تعیین فاز را (Φm) انجام میدهد.

مقدار لغزش عبارت‌اند از فاصله ای است که در یک لحظه واحد P تا P1 با میزان سرعت و در یک زمان از قبل تعیین شده انجام شده است (Dt). برای ارزیابی و برآورد این میزان لغزش، سنجنده تصویر دومی (تصویر اسلیو)[2] در زمان ثابت t و با زاویه

1. Master
2. Slave

چرخش و میدان تصویر برداری شبیه به تصویر اول تصویربرداری شده، مقدار فاز (Φm) را برای آن اندازه‌گیری می‌کند. روش تداخل‌سنجی تفاضلی، تفاضل فاز Φs و Φm را در فرم تداخل نگار فازی نمایش می‌دهد (ΔΦint). که در صورت پایداری و ثبات سطح، تفاضل فاز این دو اول و دوم تصویر ناشی از تغییر موقعیت این دو سنجنده و مقدار آن به کمک رابطه شماره(۱) به وجود می‌آید.

$$\Delta\emptyset_{int} = 4\pi \frac{SP - MP}{\lambda} \quad (۱)$$

که در آن **SP** فاز حاصله از تصویر مستر، MP فاز حاصله از تصویر اسلیو، یک عدد پی با مقدار ثابت ۳/۱۴ و λ طول موج کوتاه و بلند می‌باشد. در اندازه‌گیری میزان حرکات دامنه‌ای در این روش، سطح ناپایدار تصور می‌شود، به صورتی که سطح از Pبه P1 به شدت کاهش یافته است. تخمین و برآورد مقدار حاصل شده حرکات دامنه‌ای دریک فاصله زمانی بین دو تصویر (Dt) تابع یک اختلاف فاز حاصل شده دو تصویر ($\Delta\emptyset_{int}$) به طوری که این فاز ناشی از مدل رقومی زمین و این فاز حاصل از فضای جو می‌باشد (دینگ[1] و همکاران، ۲۰۰۴، ۱۱۵۴).

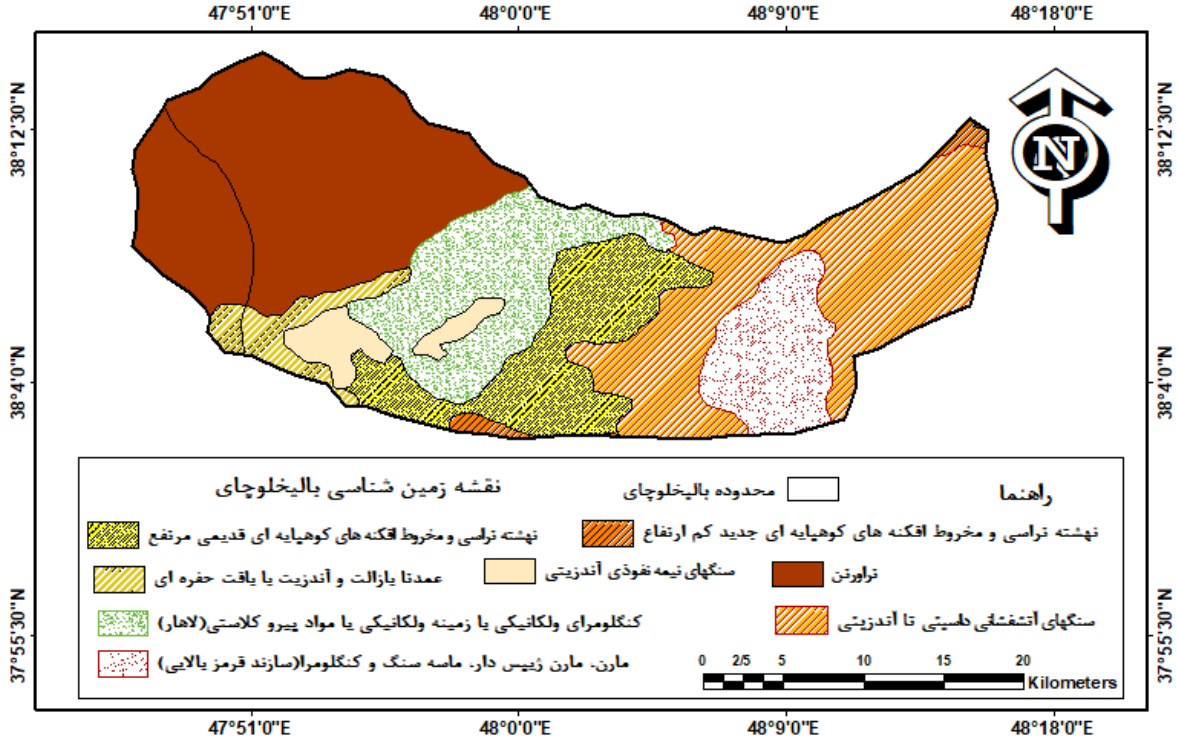
$$\Delta\emptyset_{int} = 4\pi \frac{SP - MP}{\lambda} = \emptyset Top + \emptyset Mov + \emptyset Atm \quad (۲)$$

مدل ارتفاعی رقومی: فاز تداخل‌نگار شامل اثرات توپوگرافی، خطاهای مداری و اثرات آنموسفری می‌باشد. برای به دست آوردن نقشه جابجایی در سطح زمین در یک زمان مشخص شده، باید خطاهای حاصل شده مدار، اثرات حاصله توپوگرافی و نویز درجوی از اینتروفروگرام حذف شوند. برای اصلاحات و نیز حذف تاثیرات مستقیم توپوگرافی، از مدل رقومی ارتفاعی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر که بسیار قابل قبول در ایران است استفاده شد (شکل ۳). خطاهای حاصل شده از مدار با تطبیق روشی با مناطقی که جابجایی در آنها کم است و کم کردن آنها از تداخل‌نگار مورد نظر، مدل‌سازی شدند. خطاهای جوی را می‌توان با استفاده از داده‌های جوی و مدل‌های جوی اصلاح کرد.

نتایج

واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه از توف، بازالت، آندزیت، تراکیت و پومیس تشکیل شده‌اند که در برخی مناطق واحدهای کواترنری آنها را پوشانده‌اند (شهیدی و همکاران، ۱۳۹۴). این منطقه عمدتا از سنگ‌های آذرین و آذرآواری تشکیل شده است. قدیمی‌ترین سنگ‌ها، سنگ‌های آهکی متمایل به قرمز و آهک‌های خاکستری به سن پرمین است، این سنگ‌ها به شدت هوازده شده و روی سنگ توسط مواد تخریبی نسبتاً ضخیمی پوشیده شده است. این سنگ‌ها توسط آب‌های گرم زیرزمینی متاثر شده و در حال دگرگون شدن هستند. سنگ‌های پامیس به سن الیگومیوسن قسمت مرکزی و شرق محدوده پوشانده است. این سنگ‌ها طبیعتاً سست بوده و نسبت به سنگ‌های مجاور (آندزیت و بازالت) بیشتر تحت تاثیر فرسایش قرار گرفته‌اند (شکل ۲).

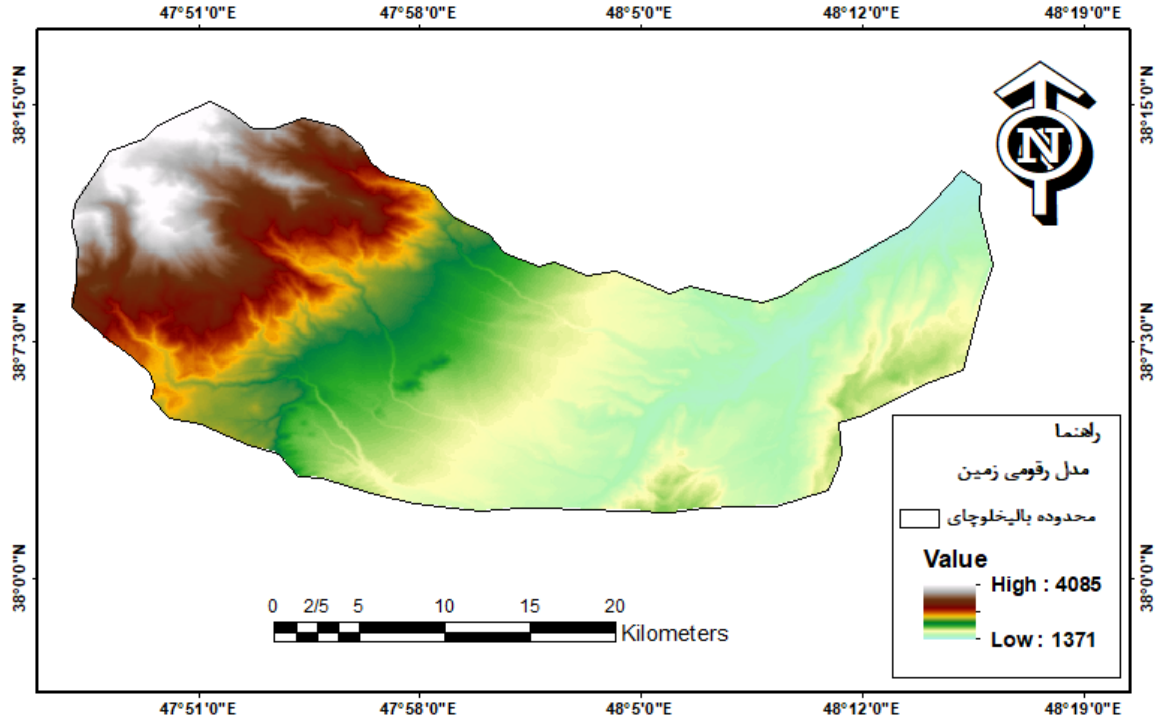
1 Ding



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز بالیخلوچای شهرستان اردبیل

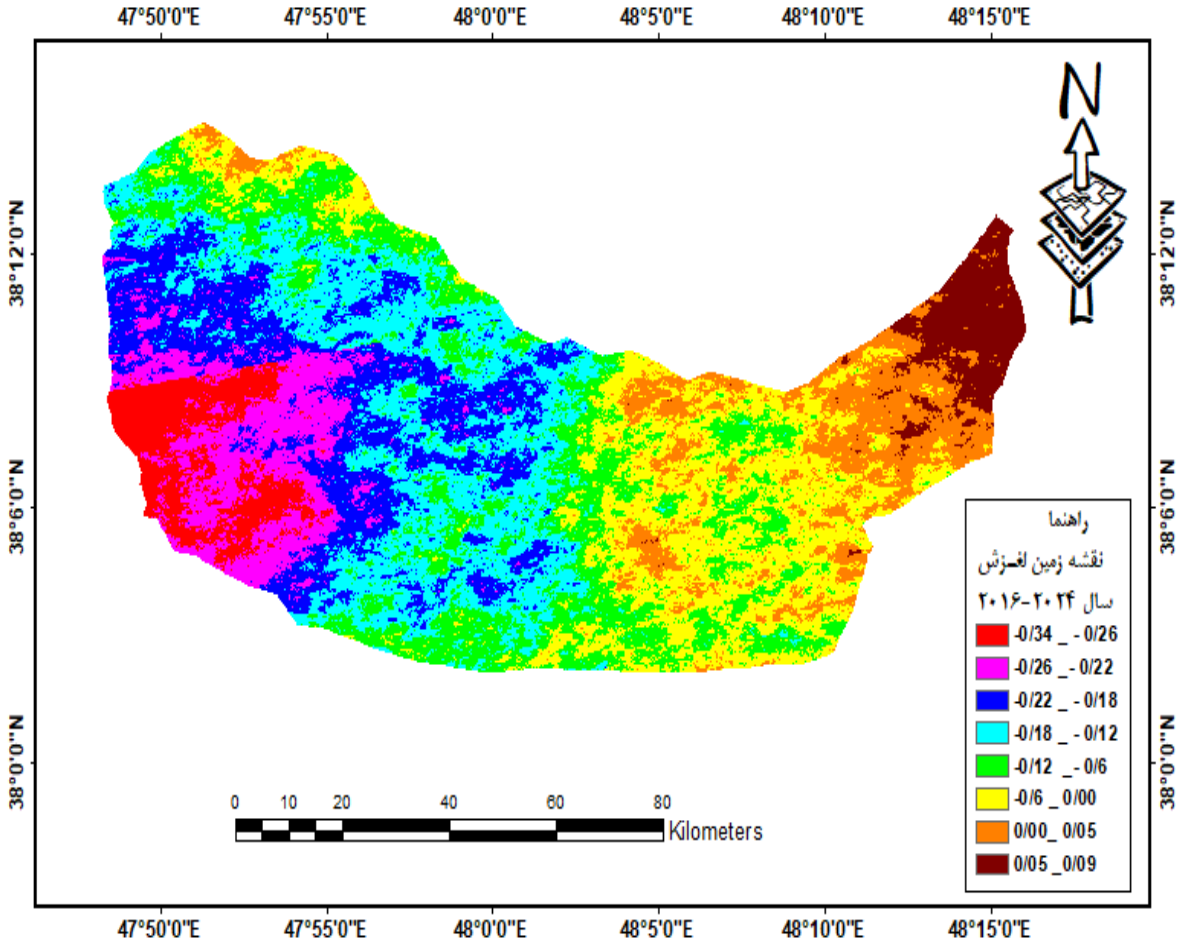
تاثیر خصوصیات توپوگرافی بر وقوع زمین لغزش بسیار مهم می‌باشد. همپوشی عامل ارتفاع از سطح دریا با پهنه‌های لغزشی نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین نسبت فراوانی‌ها به ترتیب به ترتیب ۲۴۰۰ تا ۲۸۰۰ اختصاص دارد. در ارتفاعات بالای ۳۰۰۰ متر، نسبت فراوانی زمین‌لغزش‌ها تقریبا با ارتفاعات پایین ۲۰۰۰ برابری می‌کند. با این احتساب معلوم می‌شود که نظم یکنواختی در فراوانی وقوع زمین‌لغزش‌ها با افزایش و کاهش ارتفاع از سطح دریا در حوضه بالیخلوچای وجود ندارد. مقادیر نسبت فراوانی زمین‌لغزش‌ها در طبقات شیب مختلف حوضه نشان می‌دهد هر چند طبقه شیب بالای ۴۰ درجه تنها یک درصد مساحت حوضه را شامل می‌شود، اما بالاترین نسبت در همین طبقه دیده می‌شود. در مقابل شیب پایین‌تر از ۵ درجه کمترین نسبت فراوانی زمین‌لغزش‌ها در به خود اختصاص داده است.

در کنار متغیرهای اولیه توپوگرافی، متغیرهای ثانویه نیز وجود دارد با عنوان انحناء زمین، سنجه‌ای از شکل چشم انداز هستند که میزان تقعر و تحدب سطح زمین را در جهات مختلف تعیین می‌نماید. مقادیر نسبت فراوانی طبقات انحنا زمین در حوضه مورد مطالعه نشانگر این است که زمین‌های مقعر بالاترین فراوانی زمین‌لغزش‌ها را دارند. این نتیجه به دلیل انباشت بیشتر رطوبت و فرسایش متمرکز خطی در این نقاط، منطبق بر هیدروژئومورفیکی پذیرفته شده است و در مقابل، کمترین فراوانی زمین‌لغزش‌ها در زمین‌های نسبتا هموار تا نسبتا محدب مشاهده می‌شود (شکل۳).



شکل ۳. نقشه مدل رقومی ارتفاعی حوضه آبریز بالیخلوچای شهرستان اردبیل

با مطالعه ماهیت و امکان جابجایی‌های سطح زمین، می‌توان پارامترهای مؤثر بر فرآیند جابجایی زمین را تخمین زد و از آنها در انواع روش‌های مدل‌سازی ژئومورفولوژی و تهیه بهترین راهکار را برای پیشگیری با حرکات دامنه‌ای استفاده کرد. از بین تمام روش‌های زمینی، میدانی و مدل‌های حاصله از فضا برای برآورد تغییرات سطح زمین، تصاویر راداری ابزاری ارزشمند و روش به علت ماهیت فعال بودن ماهواره با دقت بسیار زیاد محسوب می‌شود. این نمودار میزان جابجایی ناشی از زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت نشان دهنده میزان جابجایی در جهت حرکت حسگرهای ماهواره و مقادیر منفی نشان دهنده میزان زمین‌لغزش در خلاف جهت حرکت حسگرها هستند. میزان زمین‌لغزش که در منطقه مورد مطالعه بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ اندازه‌گیری شده است، حداکثر ۳۴ سانتی‌متر و حداقل ۹ سانتی‌متر است. بزرگترین حرکات دامنه‌ای در جنوب غربی و کوچکترین آنها در شمال شرقی حوضه آبریز بالیخلوچای اردبیل رخ می‌دهد (شکل ۴).



شکل ٤. میزان جابه جایی مواد دامنه‌ای اندازه‌گیری شده توسط پردازش تداخل‌سنجی راداری حوضه آبریز بالیخلوچای شهرستان اردبیل

بحث و نتیجه‌گیری

تداخل‌سنجی راداری روشی بسیار دقیق است که می‌تواند برای تعیین زمین‌لغزش با استفاده از دو تصویر از یک منطقه در فواصل زمانی مختلف با دقت بسیار بالا در محدوده سانتی‌متر و حتی میلی‌متر استفاده شود. نتایج به دست آمده محققان که به صورت میدانی برداشت شده است. و نیز صحت نتایج به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای را تأیید می‌کند. این روش سهولت پایش زمانی دقیق بر جابه جایی بسیار کم سطح زمین را با دقت زیاد و در یک منطقه بسیار بزرگ را در بر می‌گیرد. تصاویر راداری، زمین لغزش را در بالیخلوچای در استان اردبیل را با دقت بسیار بالایی شناسایی کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که تصاویر راداری پتانسیل خوبی برای تشخیص زمین‌لغزش و محاسبه جابجایی آنها دارند. حداکثر جابجایی مواد ۳۴ سانتی‌متر و حداقل آن ۹ سانتی‌متر است. این نشان می‌دهد که در رابطه با جابجایی دامنه‌ها، فعالیت فعالی در منطقه وجود دارد. در موارد خاص، این بلایا می‌توانند به دلیل تراکم بالای جمعیت یا گسترش رانش زمین، خسارات شدید و جبران‌ناپذیری را به بار آورند. با مشاهده و مقایسه حرکات دامنه‌ای و زمین‌شناسی، همچنین مشخص شد که بیشتر حرکات دامنه‌ای در مناطقی رخ می‌دهد که نوع سنگ عمدتاً از توف، ماسه‌سنگ توفی، گدازه برشی و گدازه‌های پیروکسن–آندزیت تشکیل شده است. عوامل بسیار مهم برای حرکات دامنه‌ای در منطقه مورد مطالعه شامل ساخت و ساز غیرقانونی ویلاها در دامنه‌ها و احداث جاده‌های ارتباطی در امتداد گودال‌های ناپایدار جاده، از بین رفتن تکیه‌گاه‌های دامنه، شیب‌های بسیار تند دامنه و وقوع بارندگی بسیار مناسب در اکثر ماه‌های سال به دلیل شرایط آب و هوایی مساعد در منطقه است. با توجه به ارتفاع منطقه مورد مطالعه، بیشتر بارش منطقه به صورت باران است، سازندهای کاملاً مقاوم وجود دارد و زمین‌لغزش در مقیاس بسیار وسیعی رخ می‌دهد.

از سوی دیگر، جاده مورد بررسی، مهمترین جاده ارتباطی برای ترافیک سنگین است. تعداد زیاد ماشین‌آلات سنگین که از این منطقه عبور می‌کنند، باعث ارتعاشات قابل توجهی می‌شود که احتمال رانش زمین را در دامنه‌های بسیار ناپایدار افزایش می‌دهد.

در منطقه مورد مطالعه نشان داد که بارندگی، ساخت و ساز بیش از حد، ساخت جاده‌های ارتباطی در امتداد شیب، ساخت ویلاهای غیرمجاز و ارتفاع از سطح دریا تأثیر بیشتری در پیدایش مناطق پرخطر نسبت به سایر عوامل دارند. نتایج مطالعه نشان داد که از بین عوامل ذکر شده، شیب و ارتفاع، کاربری اراضی و زمین‌شناسی نقش اصلی را ایفا می‌کنند. مطالعه حاضر حرکات دامنه استخراج‌شده و لایه زمین‌شناسی را بررسی کرد و دریافت که قوی‌ترین حرکات دامنه در مناطقی رخ می‌دهد که نوع سنگ عمدتاً از توف، ماسه‌سنگ توفی، گدازه برشی و گدازه‌های پیروکسن–آندزیتی تشکیل شده است.

مقایسهٔ نتایج پژوهش حاضر با نتایج پیشین (شهیدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ مددی، ۱۳۸۹) در منطقهٔ مورد مطالعه نشان داد که میزان بارش و ارتفاع نسبت به سایر عوامل تأثیر بیشتری در ایجاد نواحی پرخطر ایفا می‌کنند. نتایج پژوهش سه روش نشان داد که در بین عوامل یادشده، عوامل بارش، شیب و زمین‌شناسی نقش پررنگ‌تری ایفا می‌کند. نوشتار پیش رو با بررسی حرکات دامنه‌ای استخراج‌شده و بررسی لایهٔ زمین‌شناسی مشاهده شد که بیشترین حرکات دامنه‌ای در مناطقی که جنس سنگ‌ها بیشتر آندزیت‌های آتش‌فشانی و مازالتی بوده‌اند، رخ داده و لغزش‌های اندکی در مناطقی که دارای رسوبات آبرفتی و نهشته‌های رودخانه‌ای هستند، اتّفاق افتاده است. بیشترین درصد مربوط به طبقات سنگ‌های رسوبی همراه با کوهپایه‌ای مرتفع است؛ همچنین نتایج حاصل از مدل رقومی ارتفاعی و حرکات دامنه‌ای نشان می‌دهد که ارتفاعات بیش از ۲۰۰۰ متر بیشترین سهم حرکات دامنه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند. در ارتفاع ۱۵۰۰ متر نیز حرکات دامنه‌ای قابل توجّه بوده است که دلیل آن ناپایداری دامنه‌ها دربرابر عوامل اقلیمی و محیطی است که نتایج پژوهش‌های پیشین را که تحت تأثیر این عوامل بودند، کاملاً تأیید می‌کند؛ همچنین با توجّه به ارتفاع زیاد منطقهٔ مورد مطالعه، عمدهٔ بارش‌های منطقه به‌شکل برف است که ماندگاری برف در سطح دامنه بسیارزیاد است، این عامل اجازهٔ نفوذ آب به طبقات زیرین را می‌دهد و درادامه با توجّه به وجود تشکیلات کاملاًمستعد، حرکات دامنه‌ای در حجم بسیارزیادی تقریباً در همهٔ سال‌ها اتّفاق می‌افتد؛ از دیگرسو با توجّه به اینکه جادهٔ مورد مطالعه مهم‌ترین مسیر ارتباطی به اردبیل است، حجم بسیارزیاد عبور ماشین‌آلات سنگین باعث ایجاد تکانش‌های مهم در منطقه می‌شود که تشدیدکنندهٔ وقوع حرکات دامنه‌ای در دامنه‌های شدیداً ناپایدار است. به‌نظر می‌رسد که پایش منظّم حرکات دامنه‌ای منطقهٔ مورد مطالعه می‌تواند موجب شناسایی دامنه‌های ناپایدار شود که قادر است از وقوع خسارت‌های بسیار سنگین به مناطق مسکونی و تأسیسات جلوگیری کند که این امر با استفاده از تصاویر راداری با رزولوشن بالا و روش تداخل‌سنجی راداری بهترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین گزینه در پایش حرکات آهستهٔ موادّ دامنه‌ای به‌ویژه در مناطق وسیع، مانند منطقهٔ کوهستانی منطقهٔ مورد مطالعه است.

منابع

اسفندیاری، فریبا؛ رستمی، قباد؛ مصطفی‌زاده، رئوف و عابدینی، موسی (۱۴۰۳). ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه آبریز زمکان با استفاده از ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون لجستیک. *هیدرودرژئومورفولوژی*، ۱۱(۴۰)، ۱۲۳–۱۰۲.
doi: 10.22034/hyd.2024.61467.1737

اصغری سراسکانرود، صیاد؛ پالیزبان، دلنیا؛ امامی، هادی و قلعه، احسان (۱۳۹۹). تحلیل مدل‌های تحلیل شبکه و منطق فازی برای تهیه نقشه پهنه بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش مطالعه موردی: (جاده سراب – نیر). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۴(۷۳)، ۱–۲۲. doi: 10.22034/gp.2020.10792

انتظاری، مژگان و کردوانی، موسی (۱۴۰۱). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش‌های مبتنی بر GIS و داده‌های راداری (مطالعه موردی: فریدون شهر). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۱(۳۳)، ۱۷۷–۱۹۶. doi: 10.22111/jneh.2022.38660.1810

خدائی قشلاق، لیلا؛ روستایی، شهرام؛ مختاری، داود و ولیزاده کامران، خلیل (۱۴۰۰). پایش زمین‌لغزش‌ها با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری InSAR (مطالعه موردی: منطقه اهر تا ورزقان). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۵(۷۵)، ۱۱۳–۱۲۶. doi: 10.22034/gp.2021.10847

دهقانی بیدگلی، رضا؛ کوهبنانی، حمیدرضا و یزدانی، محمدرضا (۱۳۹۹). پهنه‌بندی فرونشست دشت سمنان ناشی از برداشت بی‌رویه آبهای زیرزمینی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تصاویر Sentinel-1A. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۰(۳)، ۱۷۵–۱۸۷. doi: 10.22125/iwe.2020.107100

عابدینی، موسی و پیروزی، الناز (۱۴۰۳). تعیین مناطق مستعد وقوع خطر زمین‌لغزش در مسیرارتباطی نیر– سراب. *مجله جغرافیا و توسعه*، ۲۲(۷۴)، ۸۲–۱۱۰. doi: 10.22111/gdij.2024.8147

فیضی‌زاده، بختیار و هلالی، حمید (۱۳۸۹). مقایسه روش‌های پیکسل پایه، شیءگرا و پارامترهای مؤثر در طبقه‌بندی پوشش کاربری اراضی در استان آذربایجان غربی. *مجله تحقیقات جغرافیایی*، (۷۱)، ۷۳–۸۴. https://journal.ut.ac.ir/article_21550.html

قربانی، امیرحسین؛ مصطفی‌زاده، رئوف؛ ذبیحی، محسن و جعفری رودسری، مسعود (۱۴۰۲). تعیین مناطق بحرانی وقوع زمین‌لغزش با استفاده از شاخص Getis-Ord در محیط GIS، مطالعه موردی: حوضه آبریز قرناوه، استان گلستان. *هیدروژئومورفولوژی*، ۱۰(۳۶)، ۱–۱۸. doi: 10.22034/hyd.2023.55449.1679

Abedini, M. & Pirouzi, E. (2024). Determining Areas Prone to the Occurrence of Landslides in the Nir-Sarab Communication Route. *Geography and Development*, *22*(74), 82-110 (In Persian). doi: 10.22111/gdij.2024.8147

Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bull. Eng. *Geol. Environ*, 58 (1), 21–44. https://link.springer.com/article/10.1007/-s100640050066

Alipour, S., Motgah, M., Sharifi, M. A. & Walter, T. R. (2008). InSAR time series investigation of land subsidence due to groundwater overexploitation in Tehran, Iran. *Second Workshop on Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas*, *track*, *414*, 1-5. https://doi.org/10.1109/USEREST.2008.4740370 (In Persian).

Asghari, S., palizban, D., Emami, H. & ghaleh, E. (2020). Evaluation of Fuzzy Logic and Network Analysis Models for Mapping Landslide Sensitivity Case Study: (Sarab - Nir Road), *Geography and Planning*, *24*(73), 1-22(In Persian). doi: 10.22034/gp.2020.10792

Bragagnolo, L. daSilva, R.V, Grzybowsk, J.M.V. (2020). Artificial neural network ensembles applied to the mapping of landslide susceptibility, CATENA, Vol 184, 10424: 1-19. DOI:10.1016/j.-catena.2019.104240

Bondur, V. G., Chimitdorzhiev, T. N., Dmitriev, A. V., & Dagurov, P. N. (2022, February). Assessment of the Bureya River Landslide Reactivation Using the Persistent Scatterer https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022DokES.502...31B/abstractInterferometry. In Doklady Earth Sciences (Vol. 502, No. 1, pp. 31-36). Pleiades Publishing. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022-DokES.502...31B/abstract

Bernardino, P., Constantine, G., Franceschetti, G., Iodice, L., Pietranera, L., & Rizzo, V. (2003). Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Matera (Basilicata, Italy). *Eng. Geol, 68* (1–2), 31–51. Doi:10.1016/S0013-7952(02)00197-7

Chatterjee, R.S., Fruneau, B., Rudan, J.P., Roy, P.S., Frison, P., Lakhera, R.C., Dadlhwal, V.K., & Saha R. (2006). Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990 as observed from

space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) technique. *Remote Sensing of Environment*, 13(102). 176-185. https://2024.sci-hub.se/383/a23c23981d5e5adb95bed-dd247bb5db3/10.1016@j.rse.2006.02.006

Dang, V. H., Hoang, N. D., Nguyen, L. M. D., Bui, D. T., & Samui, P. (2020). A novel GIS-based random forest machine algorithm for the spatial prediction of shallow landslide susceptibility. *Forests*, 11(1), 118. https://www.mdpi.com/1999-4907/11/1/118

Dehghani Bidgoli, R., Koohbanani, H., & Yazdani, M. (2020). Subsidence Mapping caused by over exploitation of Underground Water in Semnan Plain Using Sentinel-1A *.IW TOPS Interferometry. Irrigation and Water Engineering*, 10(3), 175-187. (In Persian). doi: 10.22125/iwe.2020.107100

Di Martire,D., Tessitore,S., Brancato, D., Grazia Ciminelli,M., Costabile,S., Costantini,M., Vito Graziano,G., Minati,F., Ramondini,M., & Calcaterra,D. (2016). Landslide detection integrat)ed system (LaDIS) based on in-situ and satellite SAR interferometry measurements. *Catena,* 5 (137) ,406–421. http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.002.

Ding, X.L., Liu, G.X., Li, Z.W., Li, Z.L., & Chen, Q.Y. (2004). Ground subsidence monitoring in Hong Kong with satellite SAR interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 70*(10), 1151−1156.

Dong,J., Liao,M., Xu,Q., Zhang,L., Tang,M.,& Gong,J. (2018). Detection and displacement characterization of landslides using multitemporal satellite SAR interferometry: A case study of Danba County in the Dadu River Basin. *Engineering Geology,* (240), 95–109. https://doi.org/10.-1016/j.enggeo.2018.04.015.

Hammad, M.; Mucsi, L.; & Leeuwen, B.V. (2019). "Landslide InvestigationUsing Differential Synthetic Aperture Radar Interferomentry: a Case Study OfBalloran Dam Area in Syria", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-3/W8, 2019 Gi4DM 2019 – *GeoInformation for Disaster Management*, 3–6 September 2019, Prague, Czech Republic.

Ebrahimi, L. & Ilanloo, M. (2025). Landslide Risk Zoning Using Machine Learning Algorithm Modeling Technique (Case Study: Izeh County). *Environmental Management Hazards*, *12*(1), 51-64. doi: 10.22059/jhsci.2025.394488.879.

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. doi: 10.22111/jneh.2022.38660.1810.

Esfandyari Darabad, F. , Rostami, G. , Mostafazadeh, R. & Abedini, M. (2024). Spatial assessment and zoning of landslide risk in Zamkan watershed using support vector machine and logistic regression. *Journal of Hydrogeomorphology*, 11(40), 123-102. doi: 10.22034/hyd.2024.61467.-1737.

Faizizadeh, B., & Hilali, H. (2010). Comparison of base pixel, object-oriented and effective parameters in land use coverage classification in West Azarbaijan Province. *Geographical Research Journal*, (71), 73-84(In Persian).

Ghorbani, A., Mostafazadeh, R., Zabihi, M., & Jafari Roodsari, M. (2023). GIS-based Determining the Landslide Hotspot Occurrence using Getis-Ord Index in Gharnaveh Watershed, Golestan Province. *Hydrogeomorphology*, 10(36), 18-1. doi: 10.22034/hyd.2023.55449.1679

Khodaei Geshlag, L. , roostaei, S. , Mokhtari, D. & Valizadeh Kamran, K. (2021). Application of the Interferometry Synthetic Aperture Radar (InSAR) in monitoring and evaluating landslides (case study: Ahar-Varzeghan region). *Journal of Geography and Planning*, 25(75), 113-126. doi: 10.22034/gp.2021.10847. https://doi.org/10.22034/gp.2021.10847.

Lazecky, M., Canaslan, C., Hlavacova, I., & Gurboga, S. (2015). Practical Application of Satellite-Based SAR Interferometry for the Detection of Landslide Activity. *procedia earth and Planetry Science*, 10 (15), 613-618. doi: 10.1016/j.proeps.2015.08.113.

Li, Y., Liu, X., Han, Z., & Dou, J. (2020). Spatial proximity-based geographically weighted regression model for landslide susceptibility assessment: a case study of Qingchuan area, China. Applied Sciences, 10(3), 1107. https://www.mdpi.com/2076-3417/10/3/1107

Raoof, M. , Azizi Mobaser, J. & Salahshour, A. (2017). Estimating Hydrological and Hydrogeological Parameters of Watershed Using SWAT Model (Case study: Balukhlu-chay Basin). *Water and Soil Science*, *26*(4.2), 173-185. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_5895.html?lang=en

Raoof, M. & Alioghli, S. (2020). Estimation of environmental flow of the Balikhlochai River and evaluation impact of Yamchi dam operation on hydrological and environmental regime of the river. *Journal of Natural Environment*, *73*(2), 299-312. doi: 10.22059/jne.2020.295047.1880.

Roustaei, S. , Ahmadzadeh, H. , nikju, M. & dehgani, M. (2016). Evaluation of Site Selection for Settlements That Affected by Natural Hazards Using D-InSAR Techniques (Case Study: Googerd Village). *Journal of Geography and Planning*, *20*(55), 145-160. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/-article_4736.html?lang=en

Nasiri Khiavi, A., Mostafazadeh, R., Esmali Ouri, A., Ghafarzadeh, O., & Golshan, M. (2019). Alteration of hydrologic flow indicators in Ardabil Balikhlouchai River under combined effects of change in climatic variables and Yamchi Dam construction using range of variability approach. Watershed Engineering and Management, 11(4), 851-865. https://jwem.areeo.ac.ir/article_119563.-html?lang=en

Madadi, A., (2010). A Study on GgA Study on Ggeomorphologic Instability in Saien Defile (between, Nir and Sarab, Azarbyjan area) by Using of Anbalagan Method. *Geography and Environmental Planning*, *21*(1), 77-94(In Persian). https://gep.ui.ac.ir/article_18457.html?lang=en

Massonnet, D., & K,L. Feigl. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earths surface. *Reviews of Geophysics*, *36*(4), 441-500. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/-10.1029/97rg03139

Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J. & Zschau, J. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35 (16), L16403. (In Persian). https://doi.org/10.1029/2008GL033-814

Prati, C., Ferretti, A., & Perissin, D. (2010). Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. *Journal of Geodynamics*, *49* (10), 161–170. http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2009.10.011.

Saha, A. Villuri, VGK. Bhardwaj, A., Kumar, S.A. (2023). Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Approach for Landslide Susceptibility Mapping of a Part of Darjeeling District in North-East Himalaya, India., Applied Sciences; 13(8), 5062, 1-23. DOI:10.3390/app13085062

Saha, S., Roy, J., Hembram, T. K., Pradhan, B., Dikshit, A., Abdul Maulud, K. N., & Alamri, A. M. (2021). Comparison between deep learning and tree-based machine learning approaches for landslide susceptibility mapping. Water, 13(19), 2664-2672. https://www.mdpi.com/2073-4441/-13/19/2664

Shahidi, F., Shoaei, G., & Mohammadi Vavsari, M. (2015). Investigation on the mechanism of Saein Strait Landslide (Nir-Sarab Road) in regard to the hydrological and geomorphological conditions. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 8(Number 1 & 2), 13-33. (In Persian). https://www.jiraeg.ir/article_68356.html?lang=en

Tanyas, H., Rossi, M., Alvioli, M., van Westen, C. J., & Marchesini, I. (2019). A global slope unit-basedmethod for the near real-time prediction of earthquake-induced landslides. Geomorphology, 327, 126-146. https://ris.utwente.nl/ws/files/127162522/global.pdf

Vojtekova, J., Vojtek, M., (2020). Assessment of landslide susceptibility at a localspatial scale applying the multi-criteria analysisand GIS: a case study from Slovaki, Geomatics, Natural Hazards and Risk, Vol 11, Issue 1, Pp 131–148. DOI:10.1130/G33217.1

Wang, Z.; Xu, J.; Shi, X.; Wang, J.; Zhang, W.; & Zhang, B. (2022).“Landslide Inventory in the Downstream of the Niulanjiang River with ALOSPALSAR and Sentinel-1 Datasets”, Remote Sensing, 14(12), 2873. https://www.mdpi.com/2072-4292/14/12/2873

zakerinejad, R., &Amoshahi, N. (2022). Assessment of Landslide Hazard Using Remote sensing data and the Maximum Entropy Model (Case Study: Kome watershed, in south of Isfahan Province). *Quantitative Geomorphological Research, 11*(2), 128-149. doi: 10.22034/gmpj.2022.340900.1349