

Research Paper



Landslide susceptibility assessment in a part of northern Tehran City

Majid Mohammady¹

1. Associate professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Semnan University, Semnan, Iran.
majid.mohammady@semnan.ac.ir

Keywords

Landslide, Logistic regression, ROC curve, North of Tehran, Iran.

Received: 2025/05/26

Accepted: 2025/07/02

Published: 2026/01/12

ABSTRACT

Introduction

Mass movement and landslides are important catastrophic hazards that occur in mountainous and steep regions. Landslides cause loss of human life, financial damage, and disruption of infrastructure, such as roads, railways, and bridges. The majority of deadly landslides are caused by human activity, and their frequency is steadily rising over time. Large volumes of soil and sediments can enter the river system through landslides and cause flash floods in areas that are hilly or mountainous. Because of the damage induced by mass movement and landslides, the management and control of these landslides are a major concern in Iran. Therefore, creating a susceptibility map and detecting the type of mass movement are very important. A landslide susceptibility map indicates where landslides are prone to start and develop in the future by simulating the probability of landslides, thus preparing more references for landslide hazard assessments. Because of the complex processes of landslides and the concepts of factors such as tectonics, hydrology, geology, vegetation cover, precipitation, temperature, and erosion, it is vital to apply accurate methods for investigating slope instability, considering the inaccurate nature of some of this information. Although landslide-prone areas have been mapped using a variety of methods worldwide, there is no one approach that has been found to be suitable. A model's performance varies depending on the locale and a model's efficacy varies from region to region. The development of the Tehran residential area on the steep slopes of the North Tehran Fault has increased natural dangers like mass movement and landslides. The main goal of this research is landslide susceptibility mapping using logistic regression and accuracy assessment of this model in northern Tehran.

*Correspondin Author: Majid Mohammady: majid.mohammady@semnan.ac.ir

How to cite this article: Mohammady, Majid. (2026). Landslide susceptibility assessment in a part of northern Tehran city.

Hydrogeomorphology, 12(45): 63– 79

DOI: [10.22034/hyd.2025.67496.1794](https://doi.org/10.22034/hyd.2025.67496.1794)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz (Calibri 9)

Methodology

A landslides inventory map serves as a basic tool for investigating and mitigating landslide hazards in a region. A landslides map of the northern Tehran was created using Google Earth and field surveys. Approximately 70 % of landslides were selected for mapping and 30 % were selected to validate the created map. A review of prior research and field experience led to the selection of the twelve factors that make up the spatial database of landslide conditioning factors. These factors include elevation, slope, plan curvature, profile curvature, topographic wetness index, slope length, slope aspect, geology, distance from faults, distance from streams, distance from roads, and land use. Digital elevation model (DEM) was created using a digitized topographic map with a scale of 1:25,000. The maps of slope, plan curvature, profile curvature, topographic wetness index, slope length, and slope aspect were prepared using the DEM map. A drainage network map was extracted from topographic map. The buffer technique in the ArcGIS software was used to determine the distance from streams, faults and roads. A lithology map with a scale of 1:100,000 was prepared using the geological map from the Geological Survey of Iran in the GIS environment. The land use map of the area was prepared using satellite images and Google Earth. After classifying the maps using the natural break method of pixel dispersion curves, the landslide density in each class was calculated. In the next stage, logistic regression model was used to create landslide susceptibility map in the study area. Logistic regression is a multivariate statistical model that finds the best-fitting curve to characterize the correlation between dependent variable, as the frequency of landslides and a combination of independent variables. The ROC curve and the area under the curve were used to assess the accuracy of the model.

Results and Discussion

The analysis of landslide density showed that the highest density is related to the elevation class of 2500 to 2900 meters, slope degree 25 to 40, northeast and east slope aspect, plan crvatre less than -0.1, plan crvatre of -1 to 1, slope length 35 to 130 meters, topographic wetness index 4.5 to 6, The distance between 400 to 900 meters from the road, 250 to 370 meters from the streams, less than 450 meters from the fault, geological group F (limestone, marly limestone, marl, sandstone, shale, clay stone, siltstone, dolomites, black limestone, and trilobite-bearing limestone), and forest land use. In order to evaluate the maps prepared using logistic regression, the ROC curve was used and the area under the curve was calculated. The area under the curve for logistic regression was obtained as 0.819, which, according to the provided standard, places this model in the very good category. In multivariate models such as logistic regression, the importance of each factor is also considered, and for this reason, they usually provide acceptable accuracy. The area of the susceptibility classes were calculated for susceptibility map created using regression logistic. Results show that approximately 27% of the study area is at high and very high susceptibility to landslides. The calculated area indicates that the region is highly susceptible to landslides, and paying attention to this phenomenon is very necessary. The geographical datasets and the landslide susceptibility map will be useful for sustainable hill planning in the area, land use planning, and identifying vulnerable regions.

Conclusions

Landslides are an important natural disaster in mountainous regions. Because of geological and topographic conditions, the north of Tehran is constantly facing this phenomenon. Hence, an accurate map of landslide susceptibility is essential for natural resource managers, policymakers, and land use planners to develop and apply applicable mitigation measures. The primary goal of this research is to create a landslide susceptibility map using logistic regression model and accuracy assessment of this model in northern Tehran. In order to evaluate the maps prepared using logistic regression, the ROC curve was used and the area under the curve was calculated. The area under the curve for logistic regression was obtained as 0.819, indicating the acceptable accuracy of this model in the study area. The calculated area of susceptibility classes indicates that the region is highly susceptible to landslides, and paying attention to this phenomenon is very necessary. The outcome of this research can be an instrument for infrastructural development, land use planning and road construction.



ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش در بخشی از شمال شهر تهران



مجید محمدی

دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. majid.mohammady@semnan.ac.ir

کلیدواژه‌ها

زمین‌لغزش، رگرسیون لجیستیک، منحنی ROC، شمال شهر تهران، ایران.

چکیده

زمین‌لغزش‌ها باعث از دست رفتن جان انسان‌ها، خسارت مالی و تخریب زیرساخت‌ها می‌شوند. توسعه منطقه مسکونی تهران بر روی شیب‌های تند شمال شهر تهران خطراتی مانند زمین‌لغزش را افزایش داده است. هدف این تحقیق تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با استفاده از رگرسیون لجستیک در شمال شهر تهران است. ابتدا نقشه زمین‌لغزش‌های منطقه تهیه شد. بعد از طبقه‌بندی، نقشه‌های عوامل موثر و نقشه زمین‌لغزش‌ها در محیط GIS روی هم انداخته شده و تراکم زمین‌لغزش‌ها در هر یک از طبقات محاسبه شد. مدل رگرسیون لجیستیک برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش استفاده شد. با استفاده از این مدل وزن نقشه‌ها محاسبه شد و با جمع نقشه‌های وزنی نقشه نهایی حساسیت به دست آمد. منحنی ROC و سطح زیر این منحنی برای ارزیابی دقت مدل استفاده شد. میزان سطح زیرمنحنی برای رگرسیون لجیستیک ۰/۸۱۹ به دست آمد که با توجه به استاندارد ارائه شده این مدل در طبقه خیلی خوب قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد حدود ۲۷ درصد از مساحت منطقه در طبقه حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار دارد که نشان می‌دهد که این منطقه به شدت در معرض خطر زمین‌لغزش است و توجه به این پدیده ضروری است. نتیجه این تحقیق می‌تواند ابزاری برای توسعه زیرساخت‌ها، برنامه‌ریزی استفاده از زمین و ساخت جاده باشد. توصیه می‌شود سازمان‌هایی مانند منابع طبیعی، محیط زیست و راه و شهرسازی در صورت نیاز به هرگونه توسعه در منطقه، این نقشه را به عنوان یکی از نقشه‌های پایه در بحث ناپایداری دامنه در نظر بگیرند تا از افزایش بیشتر زمین‌لغزش در این منطقه جلوگیری شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۲

*نویسنده مسئول: مجید محمدی، majid.mohammady@semnan.ac.ir (۱۴۰۴). ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش در بخشی از شمال شهر تهران. هیدروژئومورفولوژی،

۱۲(۴۵): ۶۳-۷۹.

رایانامه: majid.mohammady@semnan.ac.ir
شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/hyd.2025.67496.1794



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

حرکت توده‌ای و زمین‌لغزش خطرات فاجعه‌باری هستند که در مناطق کوهستانی و شیب‌دار رخ داده و باعث جابجایی حجم زیادی رسوب می‌شوند. زمین‌لغزش‌ها باعث از دست رفتن جان انسان‌ها، خسارت مالی و تخریب زیرساخت‌ها، مانند جاده‌ها، راه‌آهن و پل‌ها می‌شوند (وانگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۳: ۳). ایران به دلیل داشتن شرایط کوهستانی، لرزه‌خیزی و شرایط متنوع اقلیمی شرایط مساعدی برای وقوع زمین‌لغزش دارد. اهمیت زمین‌لغزش زمانی که به سکونت‌گاه‌های انسانی و زیرساخت‌ها نزدیک باشد بسیار زیاد است (آقایاری و همکاران، ۱۴۰۳: ۴). این پدیده همه ساله در اکثر استان‌های کشور موجب خسارت‌های اقتصادی به راه‌ها، خطوط آهن، خطوط انتقال نیرو و ارتباطات، کانال‌های آبیاری و آبرسانی، تأسیسات معدنی، تأسیسات استخراج و پالایش نفت و گاز، شبکه شریان‌های حیاتی داخل شهرها، کارخانه‌ها و مراکز صنعتی، سدها و دریاچه‌های مصنوعی و طبیعی، جنگل‌ها و مراتع و منابع طبیعی، مزارع و مناطق مسکونی و روستاها گشته و یا آنها را مورد تهدید قرار می‌دهد (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲: ۷۴). عوامل طبیعی و انسانی بر وقوع زمین‌لغزش‌ها موثرند ولی اکثر زمین‌لغزش‌های مرگبار ناشی از فعالیت‌های انسانی هستند و فراوانی آن‌ها به طور پیوسته در حال افزایش است (فرود^۲ و پتلی^۳، ۲۰۱۸: ۲۱۶۴). بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که زمین‌لغزش‌ها ۵/۰۸ درصد از بلایای محیط‌زیستی رخ داده در جهان را تشکیل می‌دهند. همچنین آمار نشان می‌دهد که ۵۳/۸۸ درصد از تمام زمین‌لغزش‌های جهان در آسیا رخ می‌دهند (چودوری^۴ و همکاران، ۲۰۲۴: ۳). مناطق شیب‌دار به لحاظ زمین‌شناسی و بوم‌شناسی حساس و شکننده بوده وقوع زمین‌لغزش این منطقه را در برابر بسیاری از خطرات آسیب‌پذیرتر می‌کند. مردمی که در مناطق کوهستانی زندگی می‌کنند همواره با این پدیده روبه‌رو بوده و به همین دلیل به زیرساخت‌های پایدارتر نیاز دارند که آن‌ها را در معرض خطر کمتری قرار دهد (رای^۵ و همکاران، ۲۰۲۴: ۴). حجم زیادی از خاک و رسوبات می‌توانند از طریق زمین‌لغزش‌ها به سیستم رودخانه وارد شده و در مناطق تپه‌ای یا کوهستانی باعث سیلاب‌های ناگهانی شوند (فنگ^۶ و همکاران، ۲۰۲۰: ۲). آسیب به جنبه‌های اقتصادی جامعه انسانی ناشی از حمل و نقل آسان مواد جابجا شده از زمین‌لغزش‌ها در جهت شیب است (شکست سیستم‌های گاز، آب و فاضلاب، سکونتگاه، خطوط ارتباطی و غیره) (سحا^۷ و همکاران، ۲۰۲۳: ۳). بهترین استراتژی‌ها برای کاهش خطرات زمین‌لغزش شامل پایش مناسب، ارزیابی دقیق و شناسایی مکان‌های آسیب‌پذیر در برابر زمین‌لغزش هستند (آذرآزاد^۸ و همکاران، ۲۰۲۱: ۵). به دلیل خسارات ناشی از حرکات توده‌ای و زمین‌لغزش، مدیریت و کنترل این زمین‌لغزش‌ها در ایران یک نگرانی عمده است. بنابراین، تهیه نقشه حساسیت‌پذیری و شناسایی نوع حرکت توده‌ای بسیار مهم است. می‌توان گفت بررسی خطرات زمین‌لغزش یک اقدام کلیدی برای کاهش ریسک است، زیرا احتمال وقوع زمین‌لغزش را بسته به شرایط محلی نشان می‌دهد (مارتینلو^۹ و همکاران، ۲۰۲۴: ۳). در واقع نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با شبیه‌سازی احتمال زمین‌لغزش نشان می‌دهد که کجا زمین‌لغزش احتمال شروع و توسعه در آینده را دارد و بدین ترتیب منابع بیشتری برای ارزیابی خطر زمین‌لغزش فراهم می‌کند (لیو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۴: ۱۶). توسعه‌های اخیر در تکنیک‌های GIS و سنسجس از دور، ترکیب داده‌های مکانی و غیرمکانی جمع‌آوری شده با استفاده از تکنیک‌ها و منابع مختلف را تسهیل می‌کند و برای مطالعات حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش در مقیاس‌های مختلف مفید است (رای و همکاران، ۲۰۲۴: ۵). باید به این نکته توجه داشت که ارزیابی ناپایداری دامنه‌ها، مشابه سایر بلایای طبیعی، به دلیل تنوع عواملی که بر وقوع و توسعه زمین‌لغزش‌ها تأثیر می‌گذارند، پیچیده است. فرآیندهای زمین‌لغزش و مفاهیم عوامل تأثیرگذار بر آن مانند تکتونیک، هیدرولوژی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، بارش، دما و فرسایش بسیار پیچیده است. به همین دلیل ضروری است در مناطق مختلف مدل‌های مختلف برای بررسی ناپایداری شیب استفاده شده و روش دقیق‌تر مشخص شود (فاطمی عقدا^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۸: ۹۱۹). تاکنون نقشه مناطق مستعد زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های مختلف در سطح جهانی تهیه شده‌اند ولی هیچ روشی که کاملاً برای همه مناطق مناسب باشد معرفی نشده است. عملکرد یک مدل بسته به محل متفاوت بوده و کارایی یک مدل از منطقه‌ای به منطقه دیگر تغییر می‌کند. برای یک منطقه مطالعاتی خاص، نرخ خطاهای چندین مدل مقایسه می‌شوند تا این محدودیت را برطرف کنند و مدل

¹ Wang² Froude³ Petley⁴ Chowdhury⁵ Rai⁶ Fang⁷ Saha⁸ Azarafza⁹ Martinello¹⁰ Liu¹¹ Fatemi Aghd

بهینه برای منطقه مورد مطالعه مشخص، مدلی است که بالاترین دقت را داشته باشد (چودوری و همکاران، ۲۰۲۴: ۴). برخی از مدل‌های مورد استفاده در بررسی حساسیت و خطر زمین‌لغزش عبارت از شاخص انتروپی (ووبالم^۱ و همکاران، ۲۰۲۲)، نسبت فراوانی (بیش^۲ و همکاران، ۲۰۲۴؛ یوواراج^۳ و دولوی^۴، ۲۰۲۳)، وزن رویداد (السبحان^۵ و همکاران، ۲۰۲۲؛ محمدی و همکاران، ۲۰۱۲)، ارزش اطلاعات (وانگ^۶ و همکاران، ۲۰۲۴)، رگرسیون لجیستیک (چودوری و همکاران، ۲۰۲۴؛ لومباردو^۷ و مارتین^۸، ۲۰۱۸)؛ منطق فازی (ارکانوگلو^۹ و گوکگلو^{۱۰}، ۲۰۰۲)، تحلیل سلسله مراتبی (اسماره^{۱۱}، ۲۰۲۳) و تکنیک‌های داده‌کاوی (چودوری و همکاران، ۲۰۲۴؛ گیو^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۳) است. رگرسیون لجیستیک از جمله مدل‌هایی است که در بسیاری از تحقیقات مرتبط با زمین‌لغزش استفاده شده و دقت آن نیز مورد تأیید قرار گرفته است. اسفندیاری درآباد و همکاران (۱۴۰۳) از رگرسیون لجیستیک و ماشین بردار پشتیبان در حوزه زمکان استان کرمانشاه برای ارزیابی خطر زمین‌لغزش استفاده نمودند. نتایج تحقیق دقت هر دو مدل را در منطقه مورد مطالعه تأیید کرد. ادیتیان^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۸) در بخشی از اندونزی از مدل‌های نسبت فراوانی، رگرسیون لجیستیک و شبکه عصبی مصنوعی برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش استفاده نمودند. نتایج نشان داد مدل رگرسیون لجیستیک کارایی قابل قبولی در منطقه مورد مطالعه دارد. گیو و همکاران (۲۰۲۳) از رگرسیون لجیستیک و چند تکنیک داده‌کاوی برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش در بخشی از چین استفاده کردند. ارزیابی دقت مدل‌های سطح زیر منحنی ROC برای مدل رگرسیون لجیستیک را ۰/۸۸ نشان داد که این مدل را در طبقه خیلی خوب قرار می‌دهد. چودوری و همکاران (۲۰۲۴) برای تحلیل حساسیت زمین‌لغزش در بنگلادش از مدل‌های رگرسیون لجیستیک، جنگل تصادفی و درخت تصمیم‌گیری استفاده نمودند. بررسی دقت مدل‌ها با استفاده از منحنی ROC نشان داد که دقت مدل‌های رگرسیون لجیستیک، جنگل تصادفی و درخت تصمیم‌گیری به ترتیب برابر با ۰/۹۴۳، ۰/۹۱۷ و ۰/۹۴۷ است که بیانگر دقت بالای این مدل‌ها در منطقه مورد مطالعه است. ژانگ^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل‌های رگرسیون لجیستیک، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان نقشه حساسیت زمین‌لغزش در قسمتی از چین را تهیه نمودند. نتایج ارزیابی دقت میزان سطح زیر منحنی برای رگرسیون لجیستیک را ۰/۷۵ نشان داد که بیانگر دقت خوب این مدل در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش است.

کلان‌شهر تهران در کوه‌های البرز واقع شده و توسط گسل‌های مشاء، شمال تهران و طالقان احاطه شده است. توسعه منطقه مسکونی تهران بر روی شیب‌های تند گسل شمال تهران خطرات طبیعی مانند سیلاب، زلزله، فرسایش شدید، حرکت توده‌ای و زمین‌لغزش را افزایش داده است (قاعدی ونانی^{۱۵} و همکاران، ۲۰۲۴: ۷۱۶۳). وجود زمین‌لغزش، قیمت بالای زمین در این منطقه، و افزایش روزافزون جمعیت از دلایل اصلی این مطالعه بودند. وجود زمین‌لغزش به عنوان یک خطر بالقوه مناطق مسکونی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و به طور کلی هر سازه‌ای در این منطقه را تهدید می‌کند. بدون شک داشتن نقشه‌ای که مناطق با حساسیت بیشتر را نشان دهد نقش زیادی در مدیریت بهینه منطقه داشته و مدیران مرتبط را در تصمیم‌گیری در منطقه یاری می‌کند. با توجه به اهمیت موضوع زمین‌لغزش در شمال شهر تهران، این منطقه برای تحقیق انتخاب شد. در واقع هدف اصلی این تحقیق نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با استفاده از رگرسیون لجیستیک و ارزیابی دقت این مدل در شمال شهر تهران است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحتی حدود ۳۰۵ کیلومتر مربع بین عرض‌های ۳۵° ۴۷' تا ۳۵° ۵۸' شمالی و طول‌های ۵۱° ۲۸' تا ۴۸° ۵۱' شرقی در شمال شهر تهران واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع منطقه از ۱۶۱۹ تا ۳۶۴۵ متر از سطح دریا متغیر بوده و بارش متوسط

¹ Wubalem

² Bisht

³ Yuvaraj

⁴ Dolui

⁵ Alsabhan

⁶ Wang

⁷ Lombardo

⁸ Martin

⁹ Ercanoglu

¹⁰ Gokceoglu

¹¹ Asmare

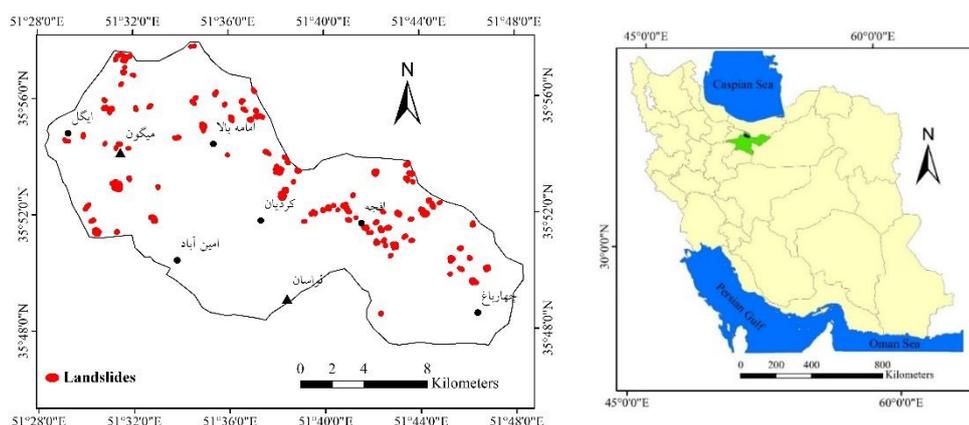
¹² Guo

¹³ Aditian

¹⁴ Zhang

¹⁵ Ghaedi Vanani

سالانه حدود ۷۰۰ میلی‌متر است (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۸۶۳). کاربری اراضی منطقه شامل زمین‌های کشاورزی و باغ، مرتع، جنگل، مسکونی و پهنه آب است. به دلیل آب و هوای مطبوع‌تر نسبت به شهر تهران، توسعه مناطق مسکونی و باغ‌ها بویژه در منطقه لواسان و در نتیجه افزایش جاده‌ها در این منطقه رخ داده است که منجر به افزایش وقوع زمین‌لغزش‌ها شده است. به همین دلیل توجه به موضوع زمین‌لغزش و تهیه نقشه حساسیت آن در این منطقه جهت مدیریت منطقه و جلوگیری از افزایش زمین‌لغزش‌ها ضروری به نظر می‌رسد. به طور کلی، شرایط پیچیده زمین‌شناسی، گسل‌های فعال و شیب‌های تند شرایط مساعدی برای وقوع زمین‌لغزش در شمال شهر تهران فراهم می‌کنند.



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه در تهران و ایران
Figure (1): Location of the study area in Tehran and Iran

تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها

نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها به عنوان ابزاری اساسی برای بررسی و کاهش خطرات زمین‌لغزش در یک منطقه عمل می‌کند (اسماره، ۲۰۲۳: ۳). نقشه زمین‌لغزش‌های شمال تهران با استفاده از گوگل ارث و بررسی‌های میدانی تهیه شد. زمین‌لغزش‌های بزرگ از روی گوگل ارث و تصاویر ماهواره‌ای قابل تشخیص است ولی در این روش تعدادی از زمین‌لغزش‌های کوچک ثبت نمی‌شود. به این منظور با کمک ساکنان محلی و همراهی آنها پیمایش زمینی در کل منطقه انجام شد تا کلیه زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه ثبت شود. برای این کار موقعیت زمین‌لغزش‌های رخ داده با استفاده از GPS ثبت و به محیط GIS وارد شد. (شکل ۱). در حدود ۷۰ درصد از زمین‌لغزش‌ها برای تهیه نقشه و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی نقشه تهیه شده استفاده شد.

عوامل موثر بر ایجاد زمین‌لغزش

هیچ دستورالعمل مشخصی برای تعیین تعداد متغیرهای مورد نیاز برای پیش‌بینی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش وجود ندارد و این بستگی به اندازه، نوع زمین‌لغزش، چشم‌انداز و دسترسی به داده‌ها دارد (مسروبه و همکاران، ۲۰۲۴: ۵). مروری بر تحقیقات قبلی و تجربیات میدانی منجر به انتخاب دوازده عاملی شد که پایگاه داده مکانی عوامل موثر بر زمین‌لغزش را تشکیل می‌دهند. این عوامل شامل ارتفاع، شیب، انحناء سطح، انحناء نیمرخ، شاخص رطوبت توپوگرافی، طول شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و کاربری اراضی هستند. نقشه توپوگرافی از سازمان نقشه‌برداری کشور در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه و نقاط و خطوط ارتفاعی از آن استخراج شد. نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM)، شیب، انحناء سطح، انحناء نیمرخ، شاخص رطوبت توپوگرافی، طول شیب و جهت شیب از ترکیب نقشه‌های نقاط ارتفاعی و خطوط تراز و با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS10.3 و SAGA-GIS تهیه شد. برای تهیه نقشه طول شیب از رابطه ۱ زیر در محیط GIS استفاده می‌شود:

$$LS = [fl \times (\frac{\text{pixel size}}{22.13})^{0.6} \times (\frac{\sin(\theta)}{0.0896})^{1.3}] \quad (1)$$

در این رابطه fl شاخص جریان تجمی است که از نقشه DEM به دست می‌آید. در اینجا اندازه پیکسل ۱۰ بوده و θ نشان‌دهنده درجه شیب است.

نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه از سازمان زمین‌شناسی کشور در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ تهیه و در محیط GIS رقومی شد. بعد از استخراج نقشه گسل از نقشه زمین‌شناسی نقشه فاصله از گسل نیز تهیه شد. نقشه شبکه آبراه‌ها و جاده‌ها نیز از نقشه توپوگرافی استخراج و نقشه فاصله از این عوارض تهیه شد. کاربری اراضی منطقه نیز از روی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۳ و گوگل ارث تهیه شد. به دلیل تنوع بالای سازندهای زمین‌شناسی، سازندهای مشابه در یک گروه قرار گرفتند که در مجموع ۷ گروه تشکیل شد (شکل ۲). جدول ۱ خصوصیات سازندهای زمین‌شناسی را نشان می‌دهد.

جدول (۱): لیتولوژی شمال تهران

Table (1): Lithology of the northern Tehran

سن زمین‌شناسی	خصوصیات لیتولوژی	گروه
کواترنری	تراس‌ها و مخروط‌افکنه‌های جوان، تراس‌ها و مخروط‌افکنه‌های قدیمی،	A
کواترنری	سنگریزه‌های قدیمی و جدید، نهشته‌های سنگلاخی	
کواترنری	مخروط‌افکنه‌های جوان، قدیمی و نامتمایز، تراس‌ها، آبرفت، نهشته‌های سطحی خاک	
کواترنری	تراس‌های جوان، تراس‌های قدیمی	
پلیستوسن	کنگلومرا، ماسه‌سنگ، گل‌سنگ	B
میوسن	نهشته‌های میوسن شامل مارن‌های شنی، سیلتستون، کنگلومرا، ژپس، گلسنگ‌های میلیودیس	
اوسن	ماسه‌سنگ، کنگلومرا، توف‌های سبز، ماسه‌سنگ روشن،	
اوسن	کنگلومرای قرمز ماسه‌سنگ با ترکیبات بین‌لایه‌ای سنگ آهک	
اوسن	گلسنگ‌های اهکی با لایه‌های سبز تا خاکستری، شیل، توف، ژپس	C
اوسن	توف‌های سبز ضخیم، شیل توفی، لاوا، نهشته‌های آتشفشانی، برش	
اوسن	شیل‌های سیاه کلسیت‌دار و سیلیس‌دار، توف، نهشته‌های آتشفشانی	
اوسن	شیل با ترکیبات بین‌لایه‌ای توف و ماسه‌سنگ توفی	
اوسن	توف برشی سبز و سفید، توف خاکستری	D
اوسن	توف ریولیت با ترکیبات شیل	
اوسن	سیلتستون قیری و شیل، توف‌های کلسیتی	
اوسن	ماسه‌سنگ توفی، توف سبز	
اوسن	شیل و سیلتستون	E
پالنوسن	ژپس	
پالنوسن	مارن، ماسه‌سنگ، کنگلومرا، ژپس	
پالنوسن	کنگلومرای پلی‌ژنتیک ضخیم تا توده‌ای، ماسه‌سنگ، نهشته‌های سنگ آهک	
پالنوسن	سنگ‌های آندزیتی-داسیتی، کنگلومرای قرمز-بنفش، نهشته‌های آتشفشانی، توف	F
سنونین	سنگ‌های آهک ضخیم	
ژوراسیک	سنگ آهک ضخیم تا توده‌ای، بخش‌هایی پوشیده با سازند دالیهای	
ژوراسیک	سنگ آهک مارنی ضخیم، مارن،	
تریاس	شیل، ماسه‌سنگ، سیلتستون، رس	G
تریاس	دولومیت‌های ضخیم تا توده‌ای، دولومیت آهکی	
تریاس	سنگ آهک ضخیم تا توده‌ای	
تریاس	صفحه‌های آهک مارنی، سنگ آهک اولیتی	
تریاس	سنگ آهک مارنی	G
پرمین	سنگ آهک با ضخامت متوسط	
کربونیفر	سنگ آهک دولومیتی ضخیم خاکستری روشن	
کربونیفر	سنگ آهک سیاه، رس با ترکیبات بین‌لایه‌ای مارنی	
میوسن	سنگ آهک دولومیتی	G
دونین	ماسه‌سنگ، شیل	
اوسن	سنگ آهک تریلوبیت، مارن	
اوسن	کوارتزیت سفید، ماسه سنگ کوارتزیتی	
اوسن	ماسه سنگ آرکوزی قرمز	G
اوسن	سیلتستون رنگی و شیل	
اوسن	دولومیت ضخیم سیاه	
اوسن	دایک‌های داسیتی	

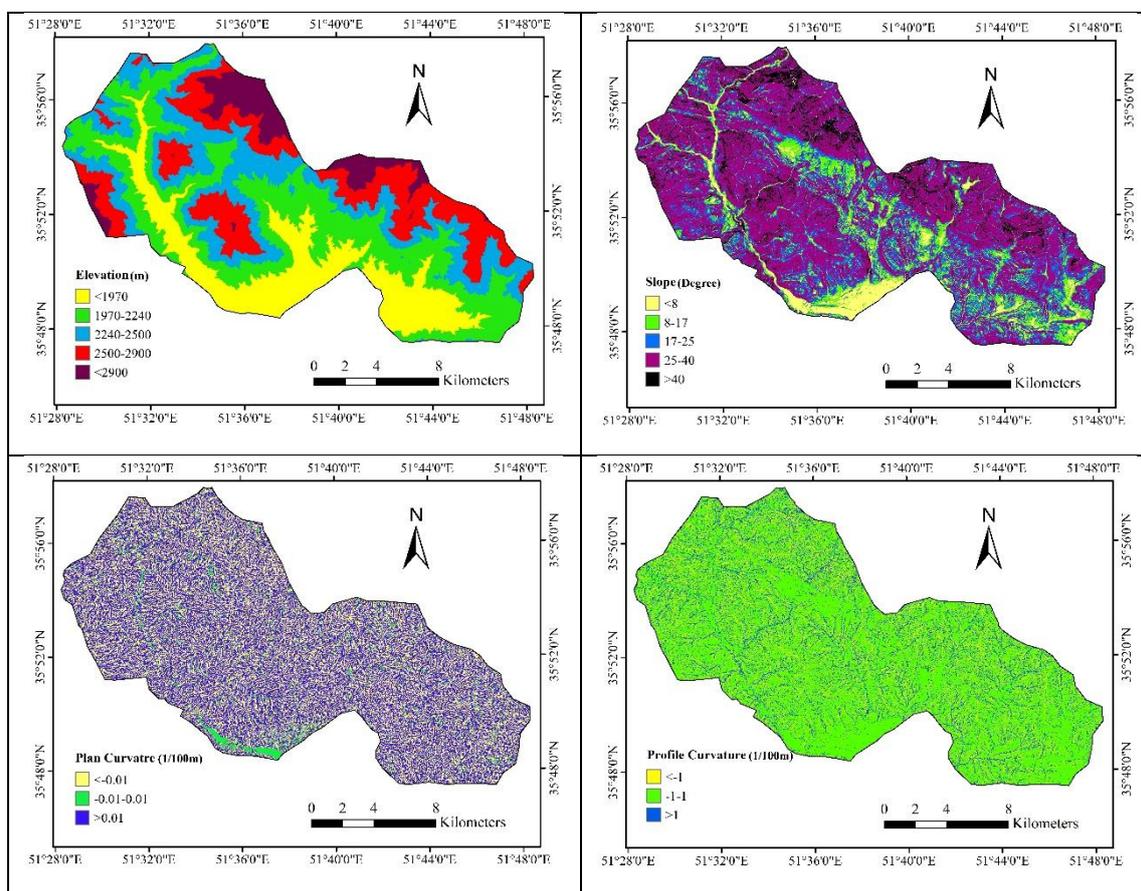
اوسن زیرین

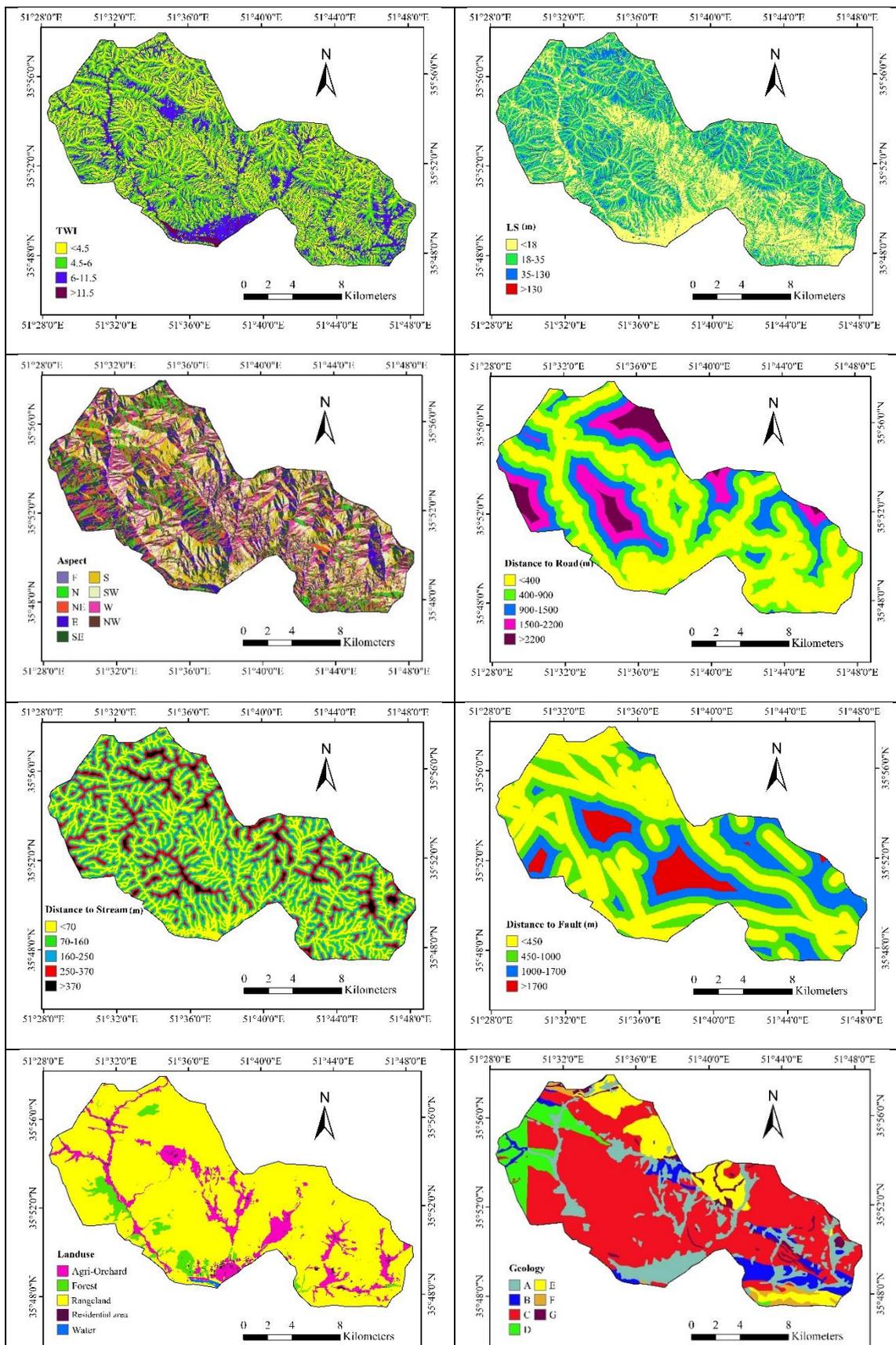
محاسبه تراکم زمین‌لغزش‌ها

برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با استفاده از رگرسیون لجیستیک نیازی به طبقه‌بندی نقشه‌ها نیست ولی برای بررسی هریک از عوامل به صورت جداگانه، نقشه‌ها طبقه‌بندی شدند. بعد از طبقه‌بندی نقشه‌ها با استفاده از روش شکست طبیعی منحنی پراکنش پیکسل‌ها، تراکم زمین‌لغزش‌ها در هر یک از طبقات محاسبه شد. برای این کار ابتدا نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها با هر یک از نقشه‌های عوامل موثر در محی GIS روی هم گذاری شده و طبق رابطه زیر تراکم زمین‌لغزش در طبقات مختلف محاسبه و مقایسه شد.

$$FR = \frac{Ni}{N0} / \frac{Si}{S0} \quad (2)$$

در این رابطه Ni تعداد زمین‌لغزش‌ها در یک طبقه از نقشه عوامل موثر، $N0$ تعداد کل زمین‌لغزش‌های منطقه، Si مساحت طبقه مربوط به عامل موثر و $S0$ مساحت کل منطقه مورد مطالعه است (گیو و همکاران، ۲۰۲۳: ۶). لازم به ذکر است پلی‌گون‌های مربوط به زمین‌لغزش‌ها به نقطه تبدیل شده تا محاسبه فرآیند بررسی تراکم و همچنین استخراج وزن‌ها برای رگرسیون لجیستیک به درستی انجام شود.





شکل (۲): نقشه‌های عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش در شمال تهران
 Figure (2): Conditioning factors Maps of landslide occurrence in the north of Tehran

مدل رگرسیون لجیستیک

رگرسیون لجیستیک یک مدل آماری چندمتغیره است که بهترین منحنی را برای توصیف همبستگی بین متغیر وابسته، مانند فراوانی زمین‌لغزش‌ها و ترکیبی از متغیرهای مستقل پیدا می‌کند (ایالو^۱ و یاماگیشی^۲، ۲۰۰۵: ۲۲). رگرسیون لجیستیک یک مدل بسیار مناسب برای توصیف و ارزیابی روابط غیرخطی بین متغیر وابسته (وجود یا عدم وجود زمین‌لغزش) و متغیرهای پیش‌بینی (عوامل موثر) است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۴: ۱۰۹). برای استفاده از رگرسیون لجیستیک ابتدا نقاط لغزشی در منطقه به عنوان وزن یک در نظر گرفته شد. در مرحله بعد تعدادی نقطه به صورت تصادفی در کل منطقه از مناطق بدون لغزش استخراج شد و به آنها وزن صفر به معنی عدم وجود زمین‌لغزش داده شد. در مرحله بعد وزن مربوط به هر یک از نقاط با وزن صفر و یک را در نقشه عوامل موثر استخراج و به نرم‌افزار SPSS منتقل شده و طبق رابطه ۳ وزن مربوط به عوامل مختلف محاسبه شد.

$$\text{Log} \left(\frac{P_i}{1 - P_i} \right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (3)$$

در این رابطه P_i احتمال یک سلول برای وقوع زمین‌لغزش و X ها، عوامل موثر هستند (چانگ^۳ و همکاران، ۲۰۲۳). در واقع بر اساس رابطه رگرسیون برای هر نقشه یک ضریب به دست آمد که با ضرب کردن آن در نقشه، نقشه وزنی مربوط به آن فاکتور تهیه شد. با جمع وزنی همه نقشه‌های مربوط به عوامل موثر، نقشه نهایی خطر زمین‌لغزش به دست آمد. ضمناً در این روش نقشه‌ها طبقه‌بندی نمی‌شوند و وزن هر فاکتور در نقشه اصلی قبل از طبقه‌بندی ضرب می‌شود. برای طبقه‌بندی نقشه تهیه شده از روش شکست طبیعی منحنی پراکنش پیکسل‌ها استفاده شد. (سحا و همکاران، ۲۰۲۳: ۶).

ارزیابی دقت نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش

منحنی ROC و سطح زیر این منحنی برای اعتبارسنجی و ارزیابی کیفیت مدل استفاده شدند (نفسلیوگلو^۴ و همکاران، ۲۰۰۸: ۴۱۱). همانطور که بیان شد ۷۰ درصد از زمین‌لغزش‌ها برای مدل‌سازی و ۳۰ درصد باقیمانده برای اعتبارسنجی و ارزیابی دقت مدل در نظر گرفته شد. سطح زیر منحنی ROC، بیان‌گر مقدار پیش‌بینی سامانه از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (رخداد زمین‌لغزش) و عدم وقوع رخداد (عدم رخداد زمین‌لغزش) آن است. برای رسم منحنی ROC وزن نهایی به دست آمده در نقشه نهایی حساسیت‌پذیری برای تعدادی از نقاط لغزشی (وزن ۱) و تعدادی نقطه غیرلغزشی (وزن ۰) به صورت تصادفی استخراج می‌شود. با قرار دادن وزن‌های نقاط لغزشی و غیرلغزشی در کنار وزن‌های استخراج شده از نقشه حساسیت‌پذیری، منحنی ROC در نرم‌افزار SPSS تهیه می‌شود. طبقه‌بندی میزان سطح زیرمنحنی به صورت عالی (۱-۰/۹)، خیلی خوب (۰/۸-۰/۹)، خوب (۰/۷-۰/۸)، متوسط (۰/۶-۰/۷) و ضعیف (۰/۵-۰/۶) است (راسید^۵ و همکاران، ۲۰۱۶: ۵).

نتایج و بحث

همان‌طور که بیان شد نقشه هریک از عوامل موثر با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها روی هم گذاشته شده و تراکم زمین‌لغزش‌ها در هر طبقه از عوامل محاسبه شد (جدول ۲).

¹ Ayalew² Yamagishi³ Chang⁴ Nefeslioglu⁵ Rasyid

جدول (۲): تراکم زمین لغزش‌ها در طبقات مختلف عوامل موثر
Table (2): Landslide density in conditioning factors classes

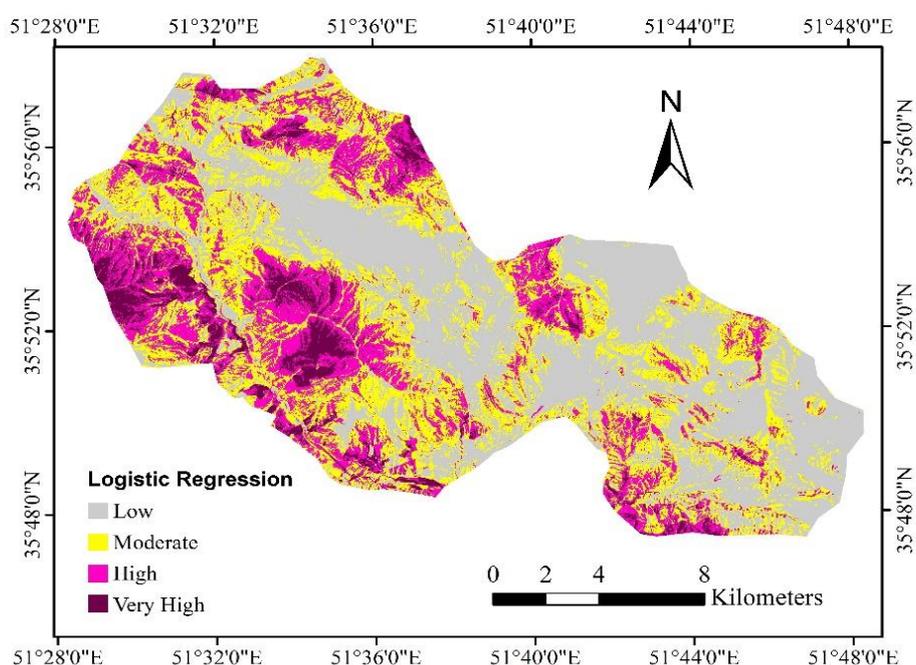
عامل	طبقه	تعداد زمین لغزش‌ها در یک طبقه	مساحت طبقه	تراکم زمین لغزش
ارتفاع (متر)	کمتر از ۱۹۷۰	۲۶۰	۶۰۲۵۰۲	۰/۳۰۵
	۱۹۷۰-۲۲۴۰	۱۰۱۸	۹۲۴۴۶۵	۰/۷۸۰
	۲۲۴۰-۲۵۰۰	۱۲۶۰	۷۰۹۰۸۸	۱/۲۵۹
	۲۵۰۰-۲۹۰۰	۱۲۹۱	۵۸۸۱۶۹	۱/۵۵۵
درجه شیب	بیشتر از ۲۹۰۰	۴۷۴	۲۲۵۱۹۶	۱/۴۹۲
	کمتر از ۸	۷	۱۸۹۵۰۲	۰/۰۲۶
	۸-۱۷	۹۹	۳۶۳۶۶۸	۰/۱۹۳
	۱۷-۲۵	۶۵۵	۵۸۳۴۸۳	۰/۷۹۶
جهت شیب	۲۵-۴۰	۳۱۵۸	۱۶۶۸۸۰۹	۱/۳۴۱
	بیشتر از ۴۰	۲۸۴	۲۴۳۹۵۸	۱/۱۱۵
	مسطح	۷	۶۲۲۳	۰/۷۹۷
	شمال	۲۵۸	۲۶۰۴۵۸	۰/۷۰۲
انحناء سطح	شمال شرق	۶۷۵	۲۹۹۳۲۵	۱/۵۹۸
	شرق	۶۹۰	۳۵۳۹۰۷	۱/۳۸۲
	جنوب شرق	۶۶۵	۴۲۳۲۶۹	۱/۱۱۳
	جنوب	۶۰۵	۵۰۲۱۴۱	۰/۸۵۴
انحناء نیمرخ	جنوب غرب	۴۷۶	۵۱۶۹۰۴	۰/۶۵۳
	غرب	۵۷۹	۳۸۲۸۶۹	۱/۰۷۲
	شمال غرب	۳۴۴	۳۰۴۴۲۴	۰/۸۰۱
	کمتر از ۰/۰۱	۲۱۲۱	۱۳۸۰۱۴۶	۱/۰۸۹
طول شیب	۰/۰۱ تا ۰/۰۱	۲۱۲	۱۴۶۸۶۵	۱/۰۲۳
	بیشتر از ۰/۰۱	۱۹۷۰	۱۵۲۲۴۰۹	۰/۹۱۷
	کمتر از ۱	۶۱۱	۴۶۱۳۵۰	۰/۹۳۹
	۱ تا ۱	۳۰۰۷	۲۱۰۳۴۹۴	۱/۰۱۳
فاصله از جاده	بیشتر از ۱	۶۸۵	۴۸۴۵۷۶	۱/۰۱۲
	کمتر از ۱۸	۶۵۵	۱۱۸۴۲۰۰	۰/۳۹۲
	۱۸-۳۵	۲۴۲۲	۱۲۸۱۴۶۷	۱/۳۴۵
	۳۵-۱۳۰	۱۲۰۸	۵۵۷۸۸۱	۱/۵۳۵
شاخص رطوبت توپوگرافی	بیشتر از ۱۳۰	۸	۲۵۸۷۲	۰/۲۱۹
	کمتر از ۴/۵	۷۹۲	۸۸۵۹۷۹	۰/۶۳۴
	۴/۵-۵	۲۲۹۱	۱۳۲۵۵۵۷	۱/۲۲۵
	۱۱-۶/۵	۱۲۱۷	۷۶۷۷۴۹	۱/۱۲۳
فاصله از آبراهه	بیشتر از ۱۱/۵	۳	۷۰۱۳۵	۰/۰۳۰
	کمتر از ۴۰۰	۱۶۴۷	۱۳۰۲۵۹۰	۰/۸۹۶
	۴۰۰-۹۰۰	۱۳۲۶	۷۸۷۴۷۵	۱/۲۰۷
	۹۰۰-۱۵۰۰	۷۵۱	۵۱۱۳۹۴	۱/۰۱۴
فاصله از گسل	۱۵۰۰-۲۲۰۰	۲۹۸	۳۰۶۰۴۷	۰/۶۹۰
	بیشتر از ۲۲۰۰	۲۸۱	۱۵۰۹۱۴	۱/۱۲۰
	کمتر از ۷۰	۶۹۸	۹۵۴۶۹۲	۰/۵۱۸
	۷۰-۱۶۰	۱۳۶۳	۹۹۸۱۶۴	۰/۹۶۸
واحد لیتولوژی	۱۶۰-۲۵۰	۱۱۵۷	۵۹۷۹۷۰	۱/۳۷۱
	۲۵۰-۳۷۰	۹۹۶	۴۰۷۷۸۸	۱/۷۳۱
	بیشتر از ۳۷۰	۸۹	۹۰۸۰۶	۰/۶۹۵
	کمتر از ۴۵۰	۲۱۱۶	۱۳۴۰۳۲۲	۱/۱۱۹
	۴۵۰-۱۰۰۰	۱۱۵۶	۸۸۶۰۷۸	۰/۹۲۵
	۱۰۰۰-۱۷۰۰	۹۲۹	۶۰۸۸۶۴	۱/۰۸۱
	بیشتر از ۱۷۰۰	۱۰۲	۲۱۴۱۵۶	۰/۳۳۸
	A	۷۴۹	۵۱۶۸۰۷	۱/۰۲۷
	B	۲۴۳	۱۷۰۲۹۰	۱/۰۱۱
	C	۲۲۸۶	۱۷۲۸۳۶۴	۰/۹۳۷
	D	۲۸۲	۲۰۱۵۲۰	۰/۹۹۲
	E	۴۹۰	۳۰۷۹۱۵	۱/۱۲۸

۱/۴۶۳	۵۳۷۵۲	۱۱۱	F	
۱/۳۸۲	۷۰۷۶۵	۱۳۸	G	
۰/۴۰۷	۳۳۹۴۲۳	۱۹۵	کشاورزی-باغ	
۲/۸۴۶	۱۱۷۵۱۲	۴۷۲	جنگل	
۱/۰۰۳	۲۵۵۵۹۵۱	۳۶۱۷	مرتع	کاربری اراضی
۰/۳۶۵	۳۹۱۰۸	۱۵	مسکونی	
۰/۰۰۱	۷۴۲۶	۰/۰۱	پهنه آبی	

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود بیشترین تراکم زمین‌لغزش‌ها در ارتفاع ۲۵۰۰ تا ۲۹۰۰ متر مشاهده شده است. در منطقه مورد مطالعه ارتفاعات کم دارای شیب کمی بوده و احتمال وقوع زمین‌لغزش در آنها کم است. در ارتفاعات خیلی زیاد (بیشتر از ۲۹۰۰) بارش معمولاً به صورت برف بوده و غالب بودن پدیده یخبندان در بخش بزرگی از سال باعث کندی پدیده خاکزایی شده و همچنین عدم وجود آب کافی برای اشباع سازندها در ارتفاعات بالا از دلایل کاهش زمین‌لغزش در ارتفاعات خیلی زیاد است. در ارتفاعات بالا دخالت‌های انسانی مانند تغییرات کاربری و جاده‌سازی نیز محدودتر بوده که خود موجب کاهش حساسیت این مناطق شده است. به طور کلی ارتفاع عامل مهمی در وقوع زمین‌لغزش بوده و در مطالعات مختلفی از جمله مطالعات چن^۱ و لی^۲ (۲۰۲۰) و گیو و همکاران (۲۰۲۳) نیز به اهمیت آن در وقوع زمین‌لغزش اشاره شده است. بررسی تراکم زمین‌لغزش‌ها در نقشه شیب نشان داد شیب‌های ۲۵ تا ۴۰ درجه بیش‌ترین تراکم زمین‌لغزش را داشته‌اند. شیب‌های ملایم، به خاطر تنش برشی کم‌تر، معمولاً حساسیت کم‌تری به وقوع زمین‌لغزش دارند (محمدی و همکاران، ۲۰۱۲: ۲۳۰) و با افزایش شیب میزان خطر زمین‌لغزش بیشتر می‌شود. البته در شیب‌های خیلی زیاد دوباره حساسیت به وقوع زمین‌لغزش کم می‌شود که دلیل آن ضخامت کم خاک است. به همین دلیل شیب یک فاکتور کلیدی در مطالعه خطر زمین‌لغزش در نظر گرفته می‌شود (رای و همکاران، ۲۰۲۴؛ شارما^۳ و همکاران، ۲۰۲۴). محققین دیگری نیز در مطالعات خود شیب‌های بالای ۲۵ درجه را مستعد وقوع زمین‌لغزش معرفی نموده‌اند (هانتز^۴ و فل^۵، ۲۰۰۳: ۱۱۳۶). در بین جهت‌های جغرافیایی، شمال شرق و شرق بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است. این شیب‌ها معمولاً رطوبت کمتری دریافت می‌کنند که منجر به ضعیف بودن پوشش گیاهی و در نتیجه وقوع بیشتر زمین‌لغزش‌ها می‌شود. به طور کلی جهت شیب به دلیل کنترل و ایجاد میکروکلیم در یک منطقه و تاثیر روی دما، میزان بارش، میزان جذب تابش خورشیدی و باد روی فرسایش و زمین‌لغزش موثر است (یوواراج و دولوی، ۲۰۲۳: ۶). میزان تراکم زمین‌لغزش‌ها در فاکتورهای توپوگرافی دیگر نیز بررسی شد. نتایج نشان داد انحناء سطح کمتر از ۰/۱-، انحناء نیم‌رخ ۱- تا ۱، طول شیب ۳۵ تا ۱۳۰ متر، شاخص رطوبت توپوگرافی ۴/۵ تا ۶ بیشترین تراکم زمین‌لغزش را داشته است. این فاکتورها نگر داشت آب روی دامنه‌ها و تشکیل رواناب و در نتیجه وقوع زمین‌لغزش را تحت تاثیر قرار می‌دهند. محققین دیگری از جمله فاطمی عقدا و همکاران (۲۰۱۸) گیو و همکاران (۲۰۲۳) و چودوری و همکاران (۲۰۲۴) نیز به اهمیت این فاکتورها بر وقوع زمین‌لغزش تاکید کرده‌اند. بررسی تراکم زمین‌لغزش‌ها در اطراف آبراهه‌ها نشان می‌دهد با افزایش فاصله از آبراهه تراکم زمین‌لغزش‌ها نیز کمتر می‌شود و فاصله ۱۶۰ تا ۳۷۰ متری آبراهه بیشترین حساسیت به وقوع زمین‌لغزش را نشان داده است. شبکه آبراهه باعث تجمع بیش‌تر رواناب و بویژه رواناب سطحی شده، در نتیجه فرسایش و زمین‌لغزش را افزایش می‌دهد (بیش^۶ و همکاران، ۲۰۲۴: ۶). به همین دلیل در بسیاری از مطالعات مربوط به زمین‌لغزش به عنوان یک فاکتور کلیدی در نظر گرفته شده است (گیو و همکاران، ۲۰۲۳؛ لی و همکاران، ۲۰۲۴ و رای و همکاران، ۲۰۲۴). در بین طبقات فاصله از جاده، طبقه ۴۰۰ تا ۹۰۰ متری بیشترین تراکم زمین‌لغزش را دارد. جاده وضعیت فیزیوگرافی دامنه را تغییر داده و همچنین با افزایش وزن از طریق تردد وسایل نقلیه ناپایداری دامنه را افزایش می‌دهد. جاده‌ها همچنین بر خصوصیات هیدرولوژیک مانند میزان و سرعت رواناب نیز موثر است (محمدی و داودی راد، ۲۰۲۴: ۲۵۳). در واقع جاده را می‌توان نماد تغییر در طبیعت معرفی کرد چراکه جاده جایی احداث می‌شود که تغییرات دیگری مانند ایجاد سکونت‌گاه، افزایش زمین‌های کشاورزی و غیره نیز ایجاد شده است. به همین دلیل معمولاً در نزدیکی جاده‌ها به دلیل هم‌افزایی احداث جاده و سایر تغییرات بوجود آمده فراوانی

¹ Chen² Li³ Sharma⁴ Hunter⁵ Fell⁶ Bisht

زمین لغزش‌ها بیشتر است. فاصله کمتر از ۴۵۰ متر تا گسل بیشترین حساسیت به وقوع زمین لغزش را نشان داده است. شکاف‌های ناشی از وجود گسل، نه تنها جدا شدن و جابجایی در سازندها را آسان‌تر می‌کند بلکه موجب افزایش لرزه‌خیزی نیز می‌شود. روباک^۱ و همکاران (۲۰۱۷: ۱۳۰) بیان کرد که وقوع زمین لغزش به شدت وابسته به تعداد و تراکم گسل‌ها در یک منطقه است. لی و همکاران (۲۰۲۴: ۹) نیز وجود گسل‌ها را به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش معرفی کردند. در بین سازندهای زمین‌شناسی نیز سازندهای گروه F شامل سنگ آهک، سنگ آهک مارنی، مارن، ماسه‌سنگ، شیل، سنگ رسی، سیلت، دولومیت‌ها، سنگ آهک سیاه، و سنگ آهک حاوی تریلوبیت بیشترین تراکم زمین لغزش را نشان دادند. این سازندها به دلیل نفوذپذیری بیشتر موجب ورود آب بیشتر به سازندها و در نتیجه اشباع آنها می‌شوند. همچنین وجود لایه‌های رسی در این سازندها منجر به لغزنده بودن آنها و در نتیجه افزایش زمین لغزش می‌شود. با توجه به اینکه نوع سنگ‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی مانند استحکام و نفوذپذیری تأثیر می‌گذارد، لیتولوژی یک عامل بسیار مهم بوده (کمپ^۲ و همکاران، ۲۰۰۸: ۶۳۹) و در بسیاری از مطالعات مربوط به زمین لغزش از آن استفاده می‌شود (رای و همکاران، ۲۰۲۴). بررسی ارتباط کاربری اراضی و زمین لغزش‌ها نشان داد بیشتر زمین لغزش‌ها در کاربری جنگل اتفاق افتاده است. با توجه به اینکه جنگل‌ها بیشتر در مناطق شیب‌دار واقع شده‌اند که شرایط دیگر نیز برای وقوع زمین لغزش فراهم است، این نتیجه منطقی به نظر می‌رسد. در این مناطق هم‌افزایی شیب و کاربری وجود داشته که منجر به وقوع زمین لغزش می‌شود. همچنین در این مناطق دخالت‌های انسان تأثیر بیشتری نشان می‌دهد که منجر به تحریک بیشتر زمین لغزش‌ها می‌شود. به عنوان مثال ساخت جاده در مناطق با شیب بیشتر که معمولاً کاربری آن نیز جنگل است، وضعیت توپوگرافی و نیمخ دامنه را بیشتر تغییر داده و شرایط برای وقوع زمین لغزش فراهم می‌شود. همان‌طور که بیان شد از روش رگرسیون لجیستیک برای پهنه‌بندی حساسیت‌پذیری زمین لغزش در شمال تهران استفاده شد. نقشه تهیه شده با استفاده از روش شکست طبیعی منحنی پراکنش به چهار طبقه تقسیم شدند (شکل ۳). جدول ۳ مساحت هر یک از طبقات حساسیت را نشان می‌دهد.



شکل (۳): نقشه‌های حساسیت زمین لغزش در شمال تهران

Figure (3): Landslide susceptibility maps in the north of Tehran

¹ Roback

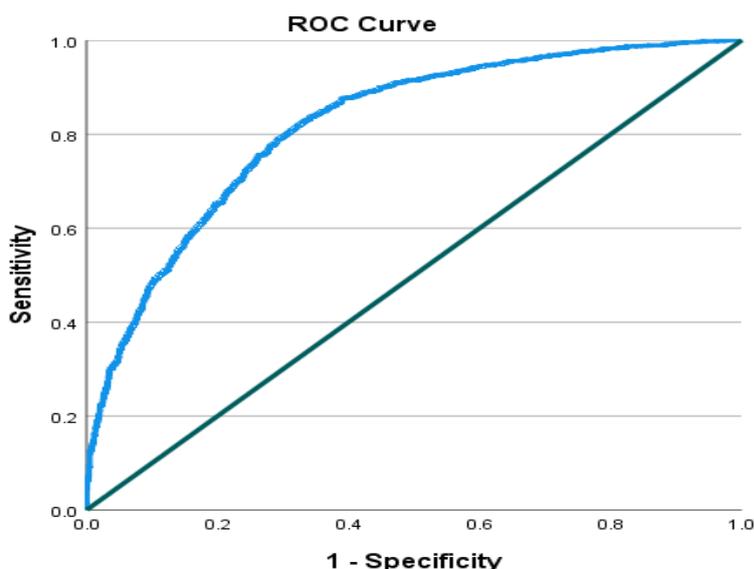
² Kamp

جدول (۳): مساحت طبقات حساسیت زمین‌لغزش

Table (3): The areas of the landslide susceptibility classes

طبقه حساسیت	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
کم	۱۲۸	۴۱/۹
متوسط	۹۳	۳۰/۵
زیاد	۶۴	۲۱
خیلی زیاد	۲۰	۶/۵

به‌منظور ارزیابی نقشه‌های تهیه شده با استفاده از رگرسیون لجیستیک از منحنی ROC استفاده شده و سطح زیرمنحنی محاسبه شد (شکل ۴).



شکل (۴): منحنی تشخیص عملکرد نسبی برای مدل رگرسیون لجیستیک

Figure (4): ROC curve of logistic regression model

میزان سطح زیرمنحنی برای رگرسیون لجیستیک ۰/۸۱۹ به‌دست آمد که با توجه به استاندارد ارائه شده در بخش‌های قبل این مدل در طبقه خیلی خوب قرار می‌گیرد. در مدل‌های چندمتغیره مانند رگرسیون لجیستیک اهمیت هر یک از عوامل نیز در نظر گرفته می‌شود (زی و همکاران، ۲۰۲۲: ۱۱) و به این دلیل معمولاً دقت قابل قبولی ارائه می‌کنند. همچنین رگرسیون لجیستیک مدل مناسبی برای بررسی روابط غیرخطی بین زمین‌لغزش‌ها و عوامل موثر است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۴: ۱۰۸). برای بررسی وضعیت کلی حساسیت منطقه به وقوع زمین‌لغزش مساحت هر یک از طبقات حساسیت‌پذیری نیز محاسبه شد. محاسبه مساحت طبقه‌ها نشان داد که طبقات با خطر کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۱۲۸، ۹۳، ۶۴ و ۲۰ کیلومتر مربع از منطقه را اشغال کرده است. نتایج نشان داد حدود ۲۷ درصد از مساحت منطقه در طبقه حساسیت زیاد و خیلی زیاد نسبت به زمین‌لغزش قرار می‌گیرد. مساحت محاسبه‌شده نشان می‌دهد که این منطقه به شدت در معرض خطر زمین‌لغزش است و توجه به این پدیده بسیار ضروری است. بدون شک برای هرگونه توسعه از قبیل راه‌سازی، معدن، توسعه مناطق کشاورزی و مسکونی باید به پهنه‌های خطر زمین‌لغزش توجه شده و تا حد امکان از دست‌کاری در پهنه‌های با حساسیت زیاد جلوگیری شود. داده‌های مکانی و نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش برای برنامه‌ریزی پایدار دامنه‌ها در منطقه، برنامه‌ریزی استفاده از زمین و شناسایی مناطق آسیب‌پذیر مفید خواهند بود. این مطالعه مورد استفاده دینفعان، سیاست‌گذاران و جامعه علمی خواهد بود. این مطالعه و نقشه حساسیت تهیه شده می‌تواند مورد استفاده سازمان منابع طبیعی، سازمان محیط زیست، مسکن و شهرسازی و وزارت نیرو قرار گیرد. هریک از ارگان‌های مذکور بهتر است در صورت نیاز به هرگونه توسعه، این نقشه را به عنوان یکی از

نقشه‌های پایه در بحث ناپایداری دامنه در نظر بگیرند تا از افزایش بیشتر زمین‌لغزش در این منطقه و آسیب به زیرساخت‌ها جلوگیری شود.

نتیجه‌گیری

به دلیل شرایط زمین‌شناسی و توپوگرافی، شمال تهران به طور مداوم با زمین‌لغزش مواجه است. بنابراین، یک نقشه دقیق از حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش برای مدیران منابع طبیعی، سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان استفاده از زمین ضروری است. هدف اصلی این تحقیق تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و ارزیابی دقت این مدل در شمال تهران است. به‌منظور ارزیابی نقشه‌های تهیه شده با استفاده از رگرسیون لجستیک از منحنی ROC استفاده شد و سطح زیرمنحنی محاسبه شد. میزان سطح زیرمنحنی برای رگرسیون لجستیک ۰/۸۱۹ به‌دست آمد که با توجه به استاندارد ارائه شده در بخش‌های قبل این مدل در طبقه خیلی خوب قرار می‌گیرد. زمانی که دقت مدل قابل قبول است می‌توان به نتایج به دست آمده و پهنه‌های حساسیت مشخص شده در منطقه اعتماد کرده و در تصمیم‌گیری‌ها این نقشه را ملاک قرار داد. همچنین برای هر یک از نقشه‌های عوامل موثر طبقه‌ای که بیشترین تراکم زمین‌لغزش و در نتیجه بیشترین حساسیت را داشت مشخص شد. این نتایج کاربرد زیادی در مدیریت این مناطق و جلوگیری از تحریک بیشتر آنها از طریق کاهش فعالیت‌های انسانی و کاهش دست‌کاری در طبیعت دارد. مساحت طبقه‌های حساسیت‌پذیری محاسبه شده نشان می‌دهد که این منطقه به شدت در معرض خطر زمین‌لغزش است و توجه به این پدیده بسیار ضروری است. در واقع ارزیابی خطر زمین‌لغزش به‌عنوان ابزاری سودمند به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه کمک می‌کند. مدل‌های کاربردی به دلیل محدودیت داده‌ها نمی‌توانند با دقت ۱۰۰٪ عمل کنند ولی دقت به دست آمده در این تحقیق قابل قبول بوده و می‌توان این روش را برای مناطق مشابه نیز پیشنهاد داد. البته توصیه می‌شود از مدل‌های دیگر نیز در منطقه استفاده شده و در نهایت دقیق‌ترین مدل برای منطقه انتخاب شود. نتیجه این تحقیق می‌تواند ابزاری برای توسعه زیرساخت‌ها، برنامه‌ریزی استفاده از زمین و ساخت جاده باشد. توصیه می‌شود شرکت‌های خصوصی و سازمان‌های دولتی مانند منابع طبیعی، سازمان محیط زیست، مسکن و شهرسازی و وزارت نیرو برای انجام هرگونه فعالیت توسعه‌ای و زیرساختی به حساسیت منطقه نسبت به وقوع زمین‌لغزش توجه داشته و این نقشه را به عنوان یک نقشه پایه در ارزیابی‌های خود از منطقه قرار دهند.

تشکر و قدردانی

مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی بوده و این طرح تحقیقاتی با استفاده از اعتبار ویژه پژوهشی (پژوهانه) دانشگاه سمنان با شماره طرح ۱۴۰۲۶ انجام شده است.

References

- Adition, A., Kubota, T., Shinohara, Y. (2018). Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia. *Geomorphology* 318, 101–111.
- Aghayary, L., Asghari Saraskanrood, S., Zeynali, B. (2024). Identification and zoning of landslide prone areas in Germi city. *Hydrogeomorphology* 11(39), 1-18.
- Alsabhan, A.H., Singh, K., Sharma, A., Alam, S., Pandey, D.D., Rahman, S.A.S., Khursheed, A., & Munshi, F.M. (2022). Landslide susceptibility assessment in the Himalayan range based along Kasauli–Parwanoo road corridor using weight of evidence, information value, and frequency ratio. *Journal of King Saud University - Science*, 34(2), 101759.
- Asmare, D. (2023). Application and validation of AHP and FR methods for landslide susceptibility mapping around choke mountain, northwestern Ethiopia. *Scientific African* 19, e01470.
- Ayalew, L., Yamagishi, H. (2005). The Application of GIS – based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda–Yahiko Mountains, central Japan. *Geomorphology*, 65, 15-31.

- Azarafza, M., Azarafza, M., Akgün, H., Atkinson, P.M., & Derakhshani, R. (2021). Deep learning-based landslide susceptibility mapping, *Scientific Reports* 11 (1): 24112. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03585-1>.
- Bisht, S., Rawat, K.S., & Singh, S.K. (2024). Earth observation data and GIS based landslide susceptibility analysis through frequency ratio model in lesser Himalayan region, India. *Quaternary Science Advances*. 13,100141.
- Chang, Z., Catani, F., Huang, F., Liu, G., Meena, S., Huang, J., & Zhou, C. (2023). Landslide susceptibility prediction using slope unit-based machine learning models considering the heterogeneity of conditioning factors, *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 15 (5),1127–1143.
- Chen, W., & Li, Y. (2020). GIS-based evaluation of landslide susceptibility using hybrid computational intelligence models. *Catena* 195, 104777. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104777>.
- Chowdhury, S., Rahman, N., Sheikh, S., Sayeid, A., Mahmud, K.H., & Hafsa, B. (2024). GIS-based landslide susceptibility mapping using logistic regression, random forest and decision and regression tree models in Chattogram District, Bangladesh. *Heliyon* 10, e23424. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23424>.
- Ercanoglu, M., & Gokceoglu, C. (2002). Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environ. Geol* 41 (6), 720–730.
- 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. *Hydrogeomorphology*, 11(40), 102-123.
- Fang, Z., Wang, Y., Peng, L., & Hong, H. (2020). Integration of convolutional neural network and conventional machine learning classifiers for landslide susceptibility mapping. *Comput. Geosci* 139: 104470 <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104470>.
- Fatemi Aghda, S.M., Bagheri, V., & Razifard, M. (2018). Landslide Susceptibility Mapping Using Fuzzy Logic System and Its Influences on Mainlines in Lashgarak Region, Tehran, Iran. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, 915–937.
- Froude, M., & Petley, D. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci* 18, 2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>.
- Ghaedi Vanani, A.A., Shoaiei, M., & Zare, M. (2024). Landslide Susceptibility Mapping in North Tehran, Iran: Linear Regression, Neural Networks, and Fuzzy Logic Approaches. *Geotechnical and Geological Engineering* 42: 7159–7186. <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02920-3>.
- Guo, Z., Guo, F., Zhang, U., He, J. Li, G., Yang, Y., & Zhang, X. (2023). A python system for regional landslide susceptibility assessment by integrating machine learning models and its application. *Heliyon*. 9, e21542.
- Hunter, G., & Fell, R. (2003). Travel distance angle for “rapid” landslides in constructed and natural soil slopes. *Can. Geotech. J* 40: 1123–1141. <https://doi.org/10.1139/t03-061>.
- Kamp, U., Growley, B.J., Khattak, G.A., & Owen, L.A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region. *Geomorphology* 101 (4): 631–642.
- Li, M., Wang, H., Chen, J., & Zheng, K. (2024). Assessing landslide susceptibility based on the random forest model and multi-source heterogeneous data. *Ecological Indicators* 158:111600. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111600>.
- Liu, X.D., Xiao, T., Zhang, S.H., Sun, P.H., Liu, L.L., & Peng, Z.W. (2024). Comparative study of sampling strategies for machine learning-based landslide susceptibility assessment. *Stoch Env Res Risk Assess* 38,4935–4957.
- Lombardo, L., Martin, & Mai. P. (2018). Presenting logistic regression-based landslide susceptibility results". *Eng. Geol* 244, 14–24.
- Martinello, C., Delchiaro, M., Iacobucci, G., Cappadonia, C., Rotigliano, E., & Piacentini, D. (2024). Exploring the geomorphological adequacy of the landslide susceptibility maps: A test for different types of landslides in the Bidente river basin (northern Italy). *Caena* 238, 107835. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107835>.

- Masruroh, H., Irawan, L.Y.C., & Anam, C. (2024). Comprehensive spatial analysis landslide susceptibility modelling, spatial cluster analysis and priority zoning for environment analysis. *Int J Environ Sci Technol*. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05950-9>.
- Mohammady, M., & Davudirad, A. (2024). Gully Erosion Susceptibility Assessment Using Different Machine Learning Algorithms: A Case Study of Shazand Watershed in Iran. *Environmental Modeling & Assessment*. 29,249–261.
- Mohammady, M., Pourghasemi, H.R., Pradhan, B. (2012). Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: A comparison between frequency ratio, Dempster–Shafer, and weights-of-evidence models. *Journal of Asian Earth Sciences*. 61,221–236.
- Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., & Durmaz, S. (2008). Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Easten Black Sea Region of Turkey). *Geomorphology*. 94,401–418.
- Pourghasemi, H.R., Mohammady, M., Pradhan, B. (2012). Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena* 97, 71–84.
- Pourghasemi, H.R., Moradi, H.R., Fatemi Aghda, S.M., Gokceoglu, C., Pradhan, B. (2014). GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). *Arab J Geosci*. 7, 1857–1878.
- Rai, S.C., Pandey, V.K., Sharma, K.K., Sharma, S. (2024). Landslide susceptibility analysis in the Bhilangana Basin (India) using GIS-based machine learning methods. *Geosystems and Geoenvironment* 3, 100253. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2024.100253>.
- Rasyid, A.R., Bhandary, N.P., Yatabe, R. (2016). Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain. *Indonesia Geoenviron Disasters*. 3,19. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0053>.
- Roback, K., Clark, M.K., West, A.J., Zekkos, D., Li, G., Gallen, S.F., Chamlagain, D., & Godt, J.W. (2017). The size, distribution, and mobility of landslides caused by the 2015 M w 7.8 Gorkha earthquake Nepal. *Geomorphology* 301: 121–138. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.030>.
- Saha, S., Majumdar, P., & Bera, B. (2023). Deep learning and benchmark machine learning based landslide susceptibility investigation, Garhwal Himalaya (India). 10: 100075. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2023.100075>.
- Sharma, N., Saharia, M., & Ramana, G.V. (2024). High resolution landslide susceptibility mapping using ensemble machine learning and geospatial big data. *Catena* 235, 107653. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107653>.
- Wang, L.Q., Xiao, T., Liu, S.L., Zhang, W.G., Yang, B.B., & Chen, L.C. (2023). Quantification of model uncertainty and variability for landslide displacement prediction based on Monte Carlo simulation. *Gondwana Res*. 123, 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.03.006>.
- Wang, Y., Kang, L., & Wang, J. (2024). Landslide risk assessment combining kernel extreme learning machine and information value modeling-A case study of Jiaxian Country of loess plateau, China. *Heliyon* 10, e37352. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37352>.
- Wubalem, A., Getahun, B., Hailemariam, Y., Mesele, A., Tesfaw, G., Dawit, Z., & Goshe, E. (2022). Landslide susceptibility modeling using the index of entropy and frequency ratio method from nefas-mewcha to weldiya road corridor, northwestern Ethiopia. *Geotech. Geol. Eng* 40 (10), 5249–5278.
- Xi, C. Han, M. Hu, X. Liu, B. He, K. Luo, G. & Cao, X. (2022). Effectiveness of Newmark-based sampling strategy for coseismic landslide susceptibility mapping using deep learning, support vector machine, and logistic regression, *Bull. Eng. Geol. Environ*. 81 (5), 1–21.
- Yuvaraj, R.M., & Dolui, B. (2023). Geographical assessment of landslide susceptibility using statistical approach. *Quaternary Science Advances* 11, 100097. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2023.100097>.
- Zhang, A., Zhao, X.W., Zhao, X.Y., Zheng, X.Z., Zeng, M., Huang, X., Wu, P., Jiang, T., Wang, S.C., He, J., & Li, Y.Y. (2024). Comparative study of different machine learning models in landslide susceptibility assessment: A case study of Conghua District, Guangzhou, China. *China Geology* 7, 104–115.