

Assessment and Analysis of Landslide Susceptibility Using the Random Forest Model and the Capabilities of GEE and GIS (Case Study: Navroud Watershed, Gilan Province)

Somayeh sadat Shahzeidi¹, Tayebah Babaei olam², Mousa Abedini^{3*}

1. Associate Professor of Geomorphology, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Guilan, Rasht, Iran.

2. Ph.D Student, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

3. Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

ARTICLE INFO

Research Paper

Article history:

Received: 27 December 2025

Accepted: 25 June 2026

Published online:

28 July 2026

Keywords: Landslide, Random Forest algorithm, Receiver Operating Characteristic (ROC) curve, GIS, Navroud watershed, Gilan Province



Abstract

Background and Objective: Landslides are among the most significant natural hazards in the mountainous and humid regions of northern Iran, causing substantial damage to natural resources, infrastructure, and human settlements each year. The Navroud watershed in Gilan Province is considered highly susceptible to landslide occurrence due to its complex topography, relatively high precipitation, and intensive human activities. The primary objective of this study is to assess and map landslide susceptibility and to determine the relative importance of the influencing factors using the Random Forest model in combination with the capabilities of Google Earth Engine (GEE) and Geographic Information Systems (GIS) within the Navroud watershed.

Methodology: This research adopts an applied-analytical approach, in which eleven landslide-conditioning factors including slope, aspect, elevation, geology, land use, vegetation cover, slope curvature, distance to roads, distance to drainage networks, distance to faults, and annual precipitation were selected as independent variables. The required thematic layers were generated using remote sensing data, the ALOS PALSAR digital elevation model with a spatial resolution of 12.5 m, geological maps, and meteorological data. After fuzzification and normalization, the datasets were integrated into the modeling process. A landslide inventory map comprising 150 landslide locations was prepared based on satellite imagery interpretation and field observations, and the data were divided into training (70%) and validation (30%) subsets. The Random Forest model was implemented in the Google Earth Engine environment, and the final landslide susceptibility map was produced in five classes: very low, low, moderate, high, and very high.

Results and findings: The results indicate that approximately 32% of the watershed area falls within the high and very high susceptibility classes, predominantly concentrated in the elevated and steep slopes of the northwestern and southwestern parts of the basin. Furthermore, variable importance analysis revealed that slope, elevation, precipitation, land use, and distance to roads are the most influential factors controlling landslide occurrence. Model performance evaluation using the ROC curve showed that the Area Under the Curve (AUC) value during the validation stage was 0.897, demonstrating the high accuracy and strong predictive capability of the Random Forest model in identifying landslide-prone areas.

Citation: Shahzeidi, S. S., Babaei olam, T. and Abedini, M. (2026). Assessment and Analysis of Landslide Susceptibility Using the Random Forest Model and the Capabilities of GEE and GIS (Case Study: Navroud Watershed, Gilan Province). Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS), 7(2), 560-577.

URL: https://www.srds.ir/article_248176.html?lang=en

The Author(s). Publisher: Private.



* Corresponding author: Abedini@uma.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Landslides are among the most destructive geomorphological hazards worldwide, causing severe casualties, infrastructure damage, agricultural losses, and ecological instability. In mountainous and humid regions such as northern Iran, landslide occurrence is driven by a complex interplay of active tectonics, steep topography, unstable lithologies, intense precipitation, and accelerating anthropogenic pressures like road expansion and land-use changes. Traditional knowledge-driven and static empirical models often fail to capture the complex, non-linear interactions among these dynamic triggers. To overcome these limitations, this study presents a robust data-driven framework leveraging the Random Forest (RF) machine learning algorithm within the Google Earth Engine (GEE) cloud-computing platform to map and evaluate landslide hazard susceptibility in the Navrud Watershed, Guilan Province.

Methodology

The methodology integrated field inventories, remote sensing data, GIS spatial processing, cloud computing, and statistical validation in R. A historical landslide inventory of 150 locations was compiled through aerial photo interpretation, high-resolution Google Earth imagery, and verified via handheld GPS field surveys. An equivalent number of non-landslide points were randomly sampled to balance the dataset, which was then split into a 70% training subset (105 points) and a 30% validation subset (45 points). Eleven key conditioning factors spanning topo-hydrological, geological, climatic, and anthropogenic domains were derived: *slope angle*, *slope aspect*, *elevation*, *profile slope curvature*, and

distance to streams (from 12.5 m ALOS PALSAR DEM); *lithology* and *distance to faults* (from 1:100,000 geological maps); *mean annual precipitation* (via IDW interpolation ranging from 796 to 929 mm/year); *land use/land cover (LULC)* (Landsat 8); *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* (Sentinel-2); and *distance to roads*. All raster layers were resampled to a uniform 30-meter resolution, normalized, and ingested into GEE. The RF model was executed using ensemble decision trees and bagging techniques. Model performance was evaluated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve, Area Under the Curve (AUC), overall Accuracy, and Sensitivity metrics in R:

Results and Discussion

The results revealed that the Navrud Watershed is a highly rugged catchment with a mean slope of $\sim 20^\circ$ (SD = 7.60°) and elevations ranging from 130 to 2,832 meters above sea level. The output susceptibility map classified the area into five zones: Very Low, Low, Moderate, High, and Very High. Notably, 32% of the total catchment area (83 km²) fell within the High and Very High susceptibility classes, clustered mainly in the steep, elevated northwestern and southwestern sectors characterized by weathered volcanic/pyroclastic formations (K2vs formation) and high annual rainfall. Conversely, 43% of the watershed (113 km²) was categorized as Low and Very Low risk in the central and northeastern lowlands, while the Moderate risk zone accounted for 24% (63 km²). Feature importance analysis demonstrated that slope angle was the most influential variable (18%), followed by elevation (11%) and precipitation (10%), confirming that steep, high-altitude terrain experiencing intense rainfall leads to

elevated pore-water pressures and reduced shear strength. Anthropogenic factors specifically distance to roads (8%) and land use (8%) exerted significant control by destabilizing slope toes through artificial cuts and vegetation clearance. Distance to streams (7%), distance to faults (7%), NDVI (6%), aspect (5%), curvature (5%), and geology (5%) further refined localized slope dynamics. Model validation yielded an exceptional AUC value of 0.897 on the testing dataset, demonstrating high diagnostic accuracy, sensitivity, and strong predictive capability without overfitting.

Conclusion

In conclusion, this research confirms the efficiency of combining remote sensing imagery, cloud-based GEE processing, and machine learning models for watershed-scale disaster risk reduction. The Random Forest model demonstrated outstanding reliability (AUC = 0.897) in segregating unstable slopes from stable terrain in complex mountainous catchments. Slope gradient, elevated precipitation, and road construction were established as the primary catalysts driving landslide activity in the region. The resulting susceptibility map provides an empirical, scientifically sound foundation for decision-makers involved in land-use planning, watershed management, emergency preparedness, and infrastructure hazard mitigation in Guilan Province.

Declarations

Funding: There is no funding support.

Authors' Contribution: The authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest: The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments: We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

References

1. Abedini, M., & Pasban, A. H. (2025). Assessment and comparison of Random Forest and Support Vector Machine models in landslide hazard zonation (Case study: Firozabad Watershed). *Quantitative Geomorphological Research*. Advance online publication. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.543572.1578> (In Persian)
2. Agrawal, N., & Dixit, J. (2022). Assessment of landslide susceptibility for Meghalaya (India) using bivariate (frequency ratio and Shannon entropy) and multi-criteria decision analysis (AHP and fuzzy-AHP) models. *All Earth*, 34(1), 179–201. <https://doi.org/10.1080/27669645.2022.2101256>
3. Alcántara-Ayala, I., & Sassa, K. (2023). Landslide risk management: From hazard to disaster risk reduction. *Landslides*, 20, 2031–2037. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02120-6>
4. Asadi, M. (2025). Comparison of CMIP5 and CMIP6 outputs on the trend of climatic parameters affecting almond growth (Case study: Birjand County). *Geography and Planning*, 29(92), 313–332. <https://doi.org/10.22034/gp.2024.61686.3262> (In Persian)
5. Asghari, S., & Foroutan, M. (2025). Evaluating the accuracy of machine learning algorithms in landslide hazard zonation of Samian Watershed. *Quantitative Geomorphological Research*. Advance online publication. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.551301.1583> (In Persian)
6. Atashafrooz, N. and Safaei, M. (2021). Landslide Micro-Zoning Using

DEMATEL Technique and Fuzzy AHP
(Case Study: the County of Dehdez in
Khuzestan Province). (In
Persian). *Journal of Sustainable Urban &
Regional Development Studies*
(JSURDS), 2(2), 61-81.

https://www.srds.ir/article_134524.html?lang=en

7.Babarabi, N., Lorestani, G., & Esmaili,
R. (2025). Zoning of landslide risk
occurrence using Random Forest and
Support Vector Machine models (Case
study: Talar Watershed). *Researches in
Earth Sciences*, 16(1), 152–168. (In
Persian)

8.Chang, M., Dou, X., Zhu, X., & Ma, Y.
(2024). Integrated risk assessment of
landslide in karst terrains: Advancing
landslide management in Beiliu City,
China. *International Journal of Applied
Earth Observation and Geoinformation*,
132, 104046.

<https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104046>

9.Dai, X., Chen, J., Zhang, T., & Xue, C.
(2025). Integrated landslide risk
assessment via a landslide susceptibility
model based on intelligent optimization
algorithms. *Remote Sensing*, 17(3), 545.

<https://doi.org/10.3390/rs17030545>

10.Gilanipour, A., Motevalli, S., &
Darafshi, K. (2025). Evaluation of
landslide susceptibility and determination
of effective factors using Random Forest
algorithm (Case study: Galandrood
Watershed). *Geography and
Environmental Hazards*, 14(1), 247–274.
(In Persian)

11.Heydarifar, M R , Solimani rad, E and
Hosseinisiahgoli, M. (2020). Investigating
the Role of Natural Hazards and Crisis
Management in Land Management (Case
Study: Kermanshah Province). (In
Persian). *Journal of Sustainable Urban &
Regional Development Studies*
(JSURDS), 1(1), 55-76.

https://www.srds.ir/article_122918.html?lang=en

12.Huang, W., Ding, M., Li, Z., Zhuang,
J., Yang, J., Li, X., Meng, L. E., Zhang, H.,
& Dong, Y. (2022). An efficient user-
friendly integration tool for landslide
susceptibility mapping based on support
vector machines: SVM-LSM toolbox.
Remote Sensing, 14(14), 3408.

<https://doi.org/10.3390/rs14143408>

13.Janizadeh, S., Bateni, S. M., Jun, C.,
Pal, S. C., Band, S. S., Chowdhuri, I.,
Saha, A., Tiefenbacher, J. P., & Mosavi, A.
(2023). Potential impacts of future climate
on the spatio-temporal variability of
landslide susceptibility in Iran using
machine learning algorithms and CMIP6
climate-change scenarios. *Gondwana
Research*, 124, 1–17.

<https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.05.009>

14.Jemec Auflič, M., Bezak, N., Šegina,
E., Frantar, P., Gariano, S. L., Medved, A.,
& Peternel, T. (2023). Climate change
increases the number of landslides at the
junction of the Alpine, Pannonian and
Mediterranean regions. *Scientific Reports*,
13, 23085.

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-50102-7>

15.Jiang, Z., Wang, M., & Liu, K. (2023).
Comparisons of convolutional neural
network and other machine learning
methods in landslide susceptibility
assessment: A case study in Pingwu.
Remote Sensing, 15, 798.

<https://doi.org/10.3390/rs15030798>

16.Khaledi, S , Farahmand, G and Ali
Bakhshi, A. (2021). Vulnerability analysis
and zoning of natural geomorphological
hazards (Flood and earthquake) of
Kermanshah province. *Journal of
Sustainable Urban & Regional
Development Studies (JSURDS)*, 2(1), 17-
36. (In Persian)

https://www.srds.ir/article_132471.html?lang=en

17. Moavi, M., Entezari, M., & Elmizadeh, H. (2025). Investigating the effect of geomorphological characteristics on landslide patterns using the Random Forest algorithm (Study area: Shahid Abbaspour Dam Watershed). *Environmental Hazards*. Advance online publication. <https://doi.org/10.22111/jneh.2025.51425.2107> (In Persian)
18. Moghim, H., & Nejabat, M. (2019). Technical report: Efficiency comparison of modified Nilson and relative effect models in landslide hazard zonation of Parsian Dam Watershed, Fars Province. *Watershed Engineering and Management*, 11(1), 264–272. (In Persian)
19. Negahban, S., Marhamat, M., & Alinejad, H. (2025). Evaluation and susceptibility zonation of landslides using machine learning algorithms (Case study: Margoon Watershed, Fars Zagros). *Quantitative Geomorphology*, 14(2). <https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.4748.54.1519> (In Persian)
20. Sadati, S. H., Mousavi, S. R., Vahabzadeh Kebria, G., & Roshan, S. H. (2025). Evaluation of Random Forest and Support Vector Machine models in mapping landslide susceptibility (Case study: Tajan Watershed, Mazandaran Province). *Environmental Hazards*, 14(45), 133–154. (In Persian)
21. Sepehrvand, A., & Beiranvand, N. (2024). Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms (Study area: A part of Haraz Watershed). *Water and Soil Modeling and Management*, 4(2), 261–278. (In Persian)
22. Sharifi, Z. (2025). Analysis and assessment of landslide risk using Analytic Network Process (ANP) model (Case study: Siahrood Watershed, Guilan Province). *Studies of Urban and Regional Sustainable Development*. (In Persian). https://www.srds.ir/article_226425.html .
23. Tian, N., & Lan, H. (2023). The indispensable role of resilience in rational landslide risk management for social sustainability. *Geography and Sustainability*, 4, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.12.003>
24. Wang, X., Wang, Y., Lin, Q., & Yang, X. (2023). Assessing global landslide casualty risk under moderate climate change based on multiple GCM projections. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14, 751–767. <https://doi.org/10.1007/s13753-023-00473-0>
25. Zhang, Z., & Sun, J. (2024). Regional landslide susceptibility assessment and model adaptability research. *Remote Sensing*, 16, 2305. <https://doi.org/10.3390/rs16122305>



نوع مقاله: پژوهشی

فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای

https://www.srds.ir/article_248176.html?lang=fa

دوره هفتم، شماره دوم، پیاپی (۲۴)، تابستان ۱۴۰۵

صص ۵۶۰-۵۷۷

ارزیابی و تحلیل خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل جنگل تصادفی و قابلیت‌های سامانه‌های GEE و GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز ناورود، گیلان)

سمیه سادات شاه‌زیدی: دانشیار، گروه جغرافیا، ژئومورفولوژی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

طیبه بابایی اولم: دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

موسی عابدینی*: استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

چکیده

زمینه و هدف: زمین‌لغزش یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی در مناطق کوهستانی و مرطوب شمال ایران به‌شمار می‌رود که هر ساله خسارات قابل توجهی به منابع طبیعی، زیرساخت‌ها و سکونتگاه‌های انسانی وارد می‌کند. حوضه آبخیز ناورود در استان گیلان، به دلیل شرایط توپوگرافی پیچیده، بارش‌های نسبتاً زیاد و مداخلات انسانی، از جمله مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش محسوب می‌شود. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش و تعیین اهمیت متغیرهای مؤثر با استفاده از مدل جنگل تصادفی و قابلیت‌های سامانه گوگل ارث انجین و سیستم اطلاعات مکانی در حوضه آبخیز ناورود است.

روش شناسی: این پژوهش از نوع تحلیلی-کاربردی بوده و در آن ۱۱ عامل مؤثر شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، انحنای دامنه، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل و بارش سالانه به‌عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شدند. لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از داده‌های سنجنش از دور، مدل رقومی ارتفاعی آلوپالاسار با قدرت تفکیک مکانی ۱/۵ متر، نقشه‌های زمین‌شناسی و داده‌های هواشناسی تهیه و پس از فازی‌سازی و نرمال‌سازی، وارد فرآیند مدل‌سازی شدند. نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها شامل ۱۵۰ نقطه لغزشی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات میدانی تهیه و داده‌ها به دو بخش آموزشی (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) تقسیم شدند. مدل جنگل تصادفی در محیط Google Earth Engine اجرا و نقشه نهایی خطر زمین‌لغزش در پنج کلاس بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تولید شد.

نتایج و یافته‌ها: نتایج نشان داد که حدود ۳۲ درصد از مساحت حوضه در طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد قرار دارد که عمدتاً در بخش‌های مرتفع و دامنه‌های پرشیب شمال‌غربی و جنوب‌غربی متمرکز هستند. همچنین تحلیل اهمیت متغیرها نشان داد که شیب، ارتفاع، بارش، کاربری اراضی و فاصله از جاده بیش‌ترین نقش را در وقوع زمین‌لغزش دارند. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از منحنی ROC نشان داد که مقدار AUC در مرحله اعتبارسنجی برابر با ۰/۸۹۷ است که بیانگر دقت و توان پیش‌بینی بسیار خوب مدل جنگل تصادفی در شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش می‌باشد.

واژگان کلیدی: زمین لغزش، الگوریتم جنگل تصادفی، منحنی مشخصه عملکرد گیرنده، GIS، حوضه ناورود، گیلان.

*مسئول مکاتبات: Abedini@uma.ac.ir

ارجاع به این مقاله: شاه‌زیدی، سمیه سادات، بابایی اولم، طیبه و عابدینی، موسی. (۱۴۰۵). ارزیابی و تحلیل خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل جنگل تصادفی و قابلیت‌های سامانه‌های GEE و GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز ناورود، گیلان). فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای، ۷(۲)، ۵۶۰-۵۷۷.

مقدمه و بیان مسأله

زمین لغزش‌ها یکی از مهم‌ترین و شایع‌ترین مخاطرات زمین‌شناسی در سطح جهان محسوب می‌شوند (Wang et al., 2023). این پدیده‌ها به‌طور گسترده در سطح جهان توزیع شده‌اند و با ویژگی‌هایی همچون فراوانی بالا، وقوع ناگهانی، سرعت زیاد حرکت و دامنه وسیع تخریب شناخته می‌شوند و به‌طور مستقیم امنیت انسانی، ثبات معیشت، تولیدات کشاورزی، بقای دام‌ها و تعادل اکولوژیکی جنگل‌ها را تهدید می‌کنند (Tian, 2023). بر اساس گزارش دفتر هماهنگی امور بشردوستانه سازمان ملل متحد^۱ از ۶ تا ۱۳ اوت ۲۰۱۹، کشورهای متعددی در منطقه آسیا-اقیانوسیه شاهد زمین‌لغزش‌های متوالی بودند که منجر به تلفات انسانی، مفقود شدن افراد، تخریب خانه‌ها و محصولات کشاورزی و خسارات اقتصادی شدید شد (Afulic et al., 2023). آمارها نشان می‌دهند که از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶، ۴۸۶۲ زمین‌لغزش در سراسر جهان رخ داده که ۵۵۹۹۷ کشته برجای گذاشته است (Ayala and Sassa, 2023). علاوه بر این، تعداد بلایای جدید زمین‌لغزش به سرعت در حال افزایش است. با توجه به تأثیر عظیم این مخاطرات، زمین‌لغزش‌ها به محور تحقیقات جهانی در حوزه مخاطرات زمین‌شناختی تبدیل شده و شناسایی و ارزیابی ریسک زمین‌لغزش پایه‌ای اساسی برای پی‌شگیری و مدیریت اضطراری آن به شمار می‌رود (Jiang et al., 2023; Janizadeh et al., 2023).

ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی ویژه خود که بخش عمده‌ای از آن را مناطق کوهستانی تشکیل می‌دهد، با چالش جدی زمین‌لغزش مواجه است. وجود فعالیت‌های گسترده زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی، در کنار تنوع شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی، این کشور را مستعد بروز انواع زمین‌لغزش‌ها کرده است. این پدیده هر ساله خسارات جانی و مالی قابل‌توجهی به کشور وارد می‌کند و هزینه‌های سنگینی را برای بازسازی مناطق آسیب‌دیده بر بودجه تحمیل می‌نماید (سپهوند، ۱۴۰۴). از دیدگاه آبخیزداری و مدیریت منابع طبیعی، زمین‌لغزش آثار مخربی بر حوزه‌های آبخیز بر جای می‌گذارد و با توجه به دشواری پیش‌بینی دقیق زمان و مکان وقوع آن، تعیین میزان حساسیت مناطق مختلف نسبت به زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از راهکارهای اساسی کاهش خسارات، از اهمیت بالایی برخوردار است (آتش‌افروز و صفایی‌پور، ۱۴۰۰؛ مقیم و نجابت، ۱۳۹۸). از این‌رو ارزیابی آسیب‌پذیری زمین‌لغزش یکی از جنبه‌های کلیدی پی‌شگیری و کاهش ریسک مخاطرات زمین‌شناختی است (Chang et al., 2024).

با استفاده از روش‌های دقیق و قابل اعتماد، مناطق دارای آسیب‌پذیری بالا شناسایی می‌شوند و مبنای علمی برای پی‌شگیری و کاهش خسارات ارائه می‌گردد. روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری زمین‌لغزش عمدتاً به دو دسته مبتنی بر دانش^۲ و مبتنی بر داده^۳ تقسیم می‌شوند. روش‌های مبتنی بر دانش بر تجربه کارشناسان متکی هستند و ترکیبی از داوری ذهنی و تحلیل کیفی برای ارزیابی ارائه می‌کنند. این روش‌ها معمولاً با مسئله ذهنی بودن و عدم قابلیت بازتولید مواجه هستند، که نمونه‌های معمول آن شامل فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و ارزیابی جامع فازی (FCE) هستند. در مقابل، روش‌های مبتنی بر داده با بهره‌گیری از تحلیل آماری مدرن و تکنیک‌های یادگیری ماشین، الگوها و ویژگی‌های پنهان وقوع زمین‌لغزش را از داده‌های بزرگ استخراج کرده و ارزیابی‌های عینی‌تر و دقیق‌تری ارائه می‌دهند (Dai et al., 2025). در سال‌های اخیر، با رشد سریع هوش مصنوعی، روش‌های مبتنی بر داده کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند و منجر به ارائه مدل‌های آماری و روش‌های ارزیابی مبتنی بر یادگیری ماشین شده‌اند. از جمله روش‌های آماری پرکاربرد می‌توان به ارزش اطلاعات (IV)، نسبت فراوانی (FR) و وزن شواهد (WOE) اشاره کرد. با این حال، به دلیل پیچیدگی مکانیزم‌های تشکیل زمین‌لغزش، دقت این روش‌های سنتی محدود است (Zhang et al., 2024). برای ارتقای عملکرد پیش‌بینی، پژوهشگران مدل‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی (RF)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN) را معرفی کرده‌اند. این مدل‌ها با قابلیت یادگیری تطبیقی بالا، روابط غیرخطی پیچیده بین وقوع زمین‌لغزش و عوامل مؤثر را به‌طور مؤثر شناسایی می‌کنند (Badappali et al., 2025).

¹ - United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (UNOCHA)

² Knowledge-driven

³ Data-driven

حوضه آبخیز ناورود در استان گیلان به دلیل فعالیت‌های زمین‌ساختی، لیتولوژی متنوع و ناپایدار، شیب‌های تند، بارش‌های فراوان و متمرکز و همچنین گسترش فعالیت‌های انسانی نظیر توسعه راه‌ها، ایجاد سکونتگاه‌ها و تغییرات کاربری اراضی، از جمله مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در شمال ایران محسوب می‌شود. با وجود این شرایط بحرانی، بخش عمده‌ای از مطالعات پیشین انجام شده در منطقه ناورود یا به بررسی‌های توصیفی و کیفی محدود بوده‌اند یا صرفاً بر عوامل ایستای مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش تمرکز داشته و از به کارگیری روش‌های پیشرفته یادگیری ماشین و تلفیق داده‌های چندمنبعی و پویا غفلت کرده‌اند. از سوی دیگر، تغییرپذیری زمانی عوامل محرک، به‌ویژه بارش‌های حدی و تغییرات تدریجی پایداری دامنه‌ها، سبب شده است که نقشه‌های سنتی پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش از دقت و کارایی لازم برای مدیریت و کاهش ریسک برخوردار نباشند. بنابراین هدف از این پژوهش پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز ناورود با استفاده از مدل جنگل تصادفی در محیط سامانه گوگل ارث انجین می‌باشد. تاکنون مطالعات متعددی در این زمینه در داخل و خارج از کشور انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

پیشینه پژوهش

نگهبان و همکاران (۱۴۰۴)، پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در حوضه آبخیز مارگون را با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که فاصله از جاده به‌عنوان تأثیرگذارترین عامل در لغزش زمین در مدل ماشین بردار پشتیبان و مدل جنگل تصادفی و در مدل خطی تعمیم‌یافته شیب به‌عنوان تأثیرگذارترین عامل شناخته شد. همچنین مدل جنگل تصادفی براساس ROC و AUC به‌عنوان برترین مدل (۰/۷۳۹، ۰/۹۸) در بین سایر مدل‌ها انتخاب شد. معاوی و همکاران (۱۴۰۴)، جهت بررسی ویژگی‌های ژئومورفیکی بر الگوی زمین لغزش حوضه آبریز سد شهید عباسپور از مدل جنگل تصادفی استفاده کرده‌اند. سازندهای زمین‌شناسی (با تأثیر ۲۳/۷ درصد)، شیب (۱۹/۵ درصد) و فاصله از رودخانه (۱۵/۲) به‌عنوان مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده الگوی زمین‌لغزش در منطقه عمل می‌کنند. براساس خروجی مدل، حدود ۳۰/۴ درصد از مساحت حوضه (۷۵/۳۷ کیلومتر مربع) در کلاس خطر زیاد قرار دارد که عمدتاً در بخش‌های جنوبی و جنوب شرقی حوضه متمرکز شده‌اند. ارزیابی دقت مدل با معیارهای آماری نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم با دقت کلی ۰/۹۸۶، ضریب کاپای ۰/۹۷۲ و RMSE برابر ۰/۱۰۱ می‌باشد.

بابایی و همکاران (۱۴۰۴)، پهنه‌بندی زمین لغزش در حوضه آبخیز تالار را با استفاده از مدل جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان مورد مطالعه قرار داده‌اند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که در مدل RF بیش‌ترین طبقه خطر به خطر خیلی کم با ۵۴ درصد فراوانی تعلق دارد و طبقه خطر زیاد در این مدل معادل ۴/۱۸ درصد می‌باشد. اما در مدل SVM طبقه خیلی کم با فراوانی ۶/۴۰ درصد بیش‌ترین گسترش را نشان می‌دهد و طبقه خطر خیلی زیاد معادل ۱۱ درصد کل حوضه را به خود اختصاص داده است.

اصغری و فروتن (۱۴۰۴)، به ارزیابی دقت الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه آبخیز سامیان پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که عامل شیب با سهم تأثیر ۱۶/۱۰ درصد، مهم‌ترین متغیر در بروز زمین‌لغزش است. از نظر مکانی، نواحی مرکزی با گرایش شرقی کم‌ترین خطر لغزش و نواحی پیرامونی حوضه بیش‌ترین خطر را نشان دادند. تمرکز بالای خطر در این نواحی عمدتاً ناشی از ارتفاع و شیب زیاد، رطوبت بالای خاک، بارش فراوان، هم‌پوشانی مسیر گسل‌ها با جاده‌ها و رودخانه‌ها و گسترش اراضی کشاورزی و بایر در دامنه‌های سبلان است. براساس نتایج پهنه‌بندی، به ترتیب ۵۳، ۴۰ و ۴۵ درصد از کل منطقه توسط مدل‌های SVM، RF و KNN در طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفتند. مقدار شاخص AUC برای مدل‌های مذکور به ترتیب ۰/۹۰۶، ۰/۸۶۴ و ۰/۸۴۸ به‌دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل SVM در تفکیک نواحی لغزشی و پایدار است. عابدینی و پاسبان (۱۴۰۴)، در پژوهشی جهت ارزیابی و مقایسه مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش حوضه آبخیز فیروزآباد پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که در نقشه پهنه‌بندی مدل RF، حدود ۱۰۵۹/۷۲ کیلومتر مربع (۶۶ درصد) از مساحت حوضه در کلاس خطر بسیار زیاد و ۱۳۲/۳۲ کیلومتر مربع (۸ درصد) در کلاس زیاد قرار دارد، در حالی که مدل SVM به ترتیب ۸۹/۱۰۵۹ کیلومتر مربع (۶۶ درصد) و

۵۳/۱۳۳ کیلومتر مربع (۸ در صد) را در همین طبقات نشان داد. برر سی اهمیت متغیرها بیانگر آن بود که در مدل RF عامل شیب (۱۴ درصد) و ارتفاع (۱۱ درصد) بیشترین نقش را در وقوع لغزش دارند، در حالی که در مدل SVM شیب (۳۴ درصد) و بارش (۱۰ درصد) اهمیت بیشتری داشته‌اند. ارزیابی نهایی با شاخص ROC و مقدار AUC نشان داد که مدل RF با مقدار ۰/۸۹۵ نسبت به مدل SVM با مقدار ۰/۷۹۸ از دقت بالاتری در پیش‌بینی مناطق مستعد لغزش برخوردار است.

گیلانی‌پور و همکاران (۱۴۰۴)، در مطالعه‌ای به ارزیابی حساسیت زمین لغزش و تعیین عوامل مؤثر در وقوع آن در حوضه گلندرود با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی پرداخته‌اند. یافته‌ها حاکی از این بود که بیش از ۳۰ درصد منطقه در کلاس خطر بسیار زیاد، ۱۹ درصد در کلاس خطر زیاد، ۱۳ درصد در کلاس خطر متوسط، ۱۹ درصد در کلاس خطر کم و ۱۶ درصد از حوضه مطالعاتی نیز در کلاس خطر زمین لغزش خیلی کم قرار دارد.

شریفی (۱۴۰۴)، در پژوهشی به تحلیل و ارزیابی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل تحلیل فرایند شبکه‌ای در حوضه آبخیز سیاه رود، استان گیلان پرداخت. ساداتی و همکاران (۱۴۰۴)، در پژوهشی به ارزیابی مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش حوضه تجن، در استان مازندران پرداخته‌اند. نتایج حاصل از مدل RF نشان می‌دهد که مؤثرترین عوامل شامل جهت شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، درجه شیب و شاخص موقعیت توپوگرافی هستند. همچنین نتایج مدل SVM نشان داد که پتانسیل طبقه حساسیت زیاد در حوضه بیش‌تر از RF است و نمرات AUC به ترتیب ۰/۹۰۶ و ۰/۸۳۱ به دست آمد. نتایج مدل SVM نشان داد که پتانسیل طبقه حساسیت زیاد در حوضه نسبت به پیش‌بینی مدل RF بیش‌تر شده است. از طرفی نتایج نشان داد که مدل SVM در مقایسه با مدل RF عملکردی ضعیفی در پیش‌بینی نقشه حساسیت زمین لغزش دارد.

Agrawal and Dixit (۲۰۲۲)، نیز در پژوهشی به ارزیابی حساسیت زمین لغزش در ایالت مگالایا واقع در هند پرداختند. آن‌ها با بهره‌گیری از مدل‌های دوبعدی آماری و روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (Fuzzy AHP) و سنتی (AHP) نقشه پهنه‌بندی منطقه را تهیه کردند. نتایج حاکی از آن بود که منطقه مورد مطالعه به چهار سطح حساسیت از بسیار کم تا بسیار زیاد تقسیم شد و حدود ۲۰ درصد از مساحت آن در طبقه‌های با خطر زیاد تا خیلی زیاد قرار داشت.

Huang و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در منطقه سیچوان چین با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری عمیق پرداختند. آن‌ها از مدل Conv-SE-LSTM استفاده کرده و تعداد ۱۶۶۹ زمین لغزش را در منطقه شناسایی کردند.

Li و همکاران (۲۰۲۳)، به مقایسه عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در جهت تهیه نقشه زمین لغزش در شهرستان اینجه کره جنوبی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل‌های جنگل تصادفی و XGB با بالاترین مقدار PCC و F1 به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۹۴ دارای بیش‌ترین عملکرد می‌باشند.

Tuyen و همکاران (۲۰۲۴)، با تلفیق RS و GIS با روش‌های یادگیری ماشین جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون لجستیک اقدام به تهیه نقشه زمین لغزش در استان نه‌آن در ویتنام کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شیب و ارتفاع از جمله عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش بودند. همچنین مدل RF با مقدار همبستگی ۰/۹۷ بیش‌ترین کارایی و دقت را نسبت به مدل‌های دیگر دارا بود. جمع‌بندی پیشینه پژوهش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان، در پهنه‌بندی حساسیت و خطر زمین لغزش در اغلب مطالعات داخلی و خارجی با دقت بالا و نتایج قابل اعتماد همراه بوده است و شاخص‌هایی مانند AUC، ROC و دقت کلی عملکرد مناسب این مدل‌ها را تأیید می‌کنند. نتایج تحقیقات بیانگر آن است که عوامل توپوگرافیکی و محیطی نظیر شیب، ارتفاع، فاصله از جاده و رودخانه، سازندهای زمین‌شناسی و بارش، مهم‌ترین متغیرهای کنترل‌کننده وقوع زمین لغزش محسوب می‌شوند و نقش آن‌ها بسته به شرایط منطقه‌ای متفاوت است. در مجموع، مرور مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه مدل جنگل تصادفی در اکثر پژوهش‌ها عملکرد برتری نسبت به سایر روش‌ها داشته، اما انتخاب مدل بهینه وابسته به ویژگی‌های منطقه، نوع داده‌ها و اهداف مطالعه بوده و تلفیق روش‌ها و داده‌های مکانی می‌تواند دقت پهنه‌بندی خطر زمین لغزش را به‌طور معناداری افزایش دهد. بنابراین انجام

پژوهشی جامع با هدف پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش در حوضه آبخیز ناورود، مبتنی بر رویکردهای نوین مدل سازی مکانی، یادگیری ماشین و بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و GIS ضرورتی انکارناپذیر به شمار می‌رود. در سطح بین‌المللی، پژوهش‌ها بیشتر بر توسعه شاخص‌های زیست‌پذیری، کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و ارتقای کیفیت زندگی شهری تمرکز دارند. Parvathy و همکاران (۲۰۲۵) در هند نشان دادند که شاخص‌های کالبدی و اجتماعی بیشترین تأثیر را بر زیست‌پذیری دارند. Ekawati و همکاران (۲۰۲۴) در باندونگ تأثیر توسعه فضای سبز و مدیریت پسماند بر کاهش اثرات اقلیمی و ارتقای زیست‌پذیری را مورد بررسی قرار دادند.

در سنگاپور، Mohamed (۲۰۲۲) با تحلیل ابعاد محیط‌زیست، اقتصاد و رفاه اجتماعی نشان داد که سیاست‌های کاربری مختلط زمین، توسعه حمل‌ونقل عمومی، افزایش فضاهای سبز و مشارکت بخش خصوصی موجب افزایش زیست‌پذیری شده‌اند. همچنین پژوهش ElSerafi & AbouBakr (۲۰۲۳) در هلیوپولیس قاهره تأکید دارد که اقدامات توسعه‌ای باید با اتخاذ رویکردهای پایدار و مشارکتی صورت گیرد تا هم زیست‌پذیری و هم کیفیت محیط حفظ شود. همچنین تجارب جهانی نشان می‌دهد که شهرهای موفق در زیست‌پذیری مانند کپنهاگ، دارای دسترسی گسترده به خدمات، زیرساخت‌های کارآمد، ریسک پایین و محیط‌های سالم هستند؛ این موارد در گزارش‌های شاخص جهانی قابلیت زندگی واحد اطلاعات اقتصادی اکونومیست^۱ (۲۰۲۵) به‌وضوح دیده می‌شود.

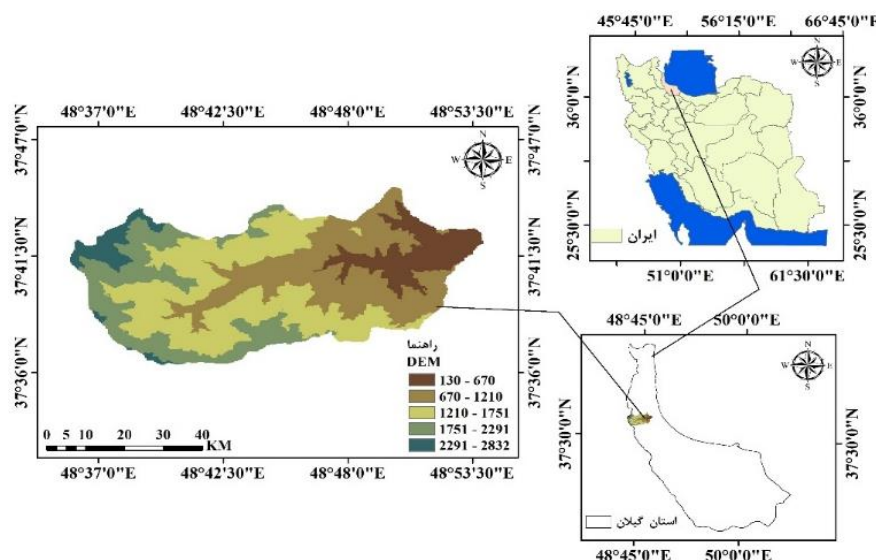
مرور نظام‌مند پیشینه پژوهش نشان می‌دهد مطالعات صورت‌گرفته در حوزه زیست‌پذیری، به‌ویژه در ایران، عمدتاً در مقیاس یک شهر یا حداکثر یک شهرستان انجام شده‌اند؛ برای نمونه Yeganeh در سال ۲۰۲۶ صرفاً به سطح‌بندی مناطق پنج‌گانه شهر رشت پرداخته، Mobaraki در سال ۲۰۲۶ پیشران‌های زیست‌پذیری را تنها در محدوده شهر بناب شناسایی کرده‌اند و Naderi Mayvan در سال ۲۰۲۵ تأثیر آلاینده‌گی بر زیست‌پذیری را منحصراً در شهر اراک بررسی نموده است. حتی پژوهش‌های صورت‌گرفته در استان تهران (Akbari et al., 2024؛ Khorasani et al., 2014) نیز به بررسی موردی بخشی از استان یا مقایسه محدود چند شهرستان بسنده کرده‌اند و سنجش هم‌زمان و جامع تمامی شهرستان‌های یک استان در قالب یک شاخص ترکیبی واحد در آن‌ها دیده نمی‌شود. این الگو در سطح بین‌المللی نیز تکرار می‌شود؛ نمونه‌های مرور شده نظیر Parvathy و همکاران (۲۰۲۵) در هند، Ekawati و همکاران (۲۰۲۴) در باندونگ و Mohamed (۲۰۲۲) در سنگاپور نیز هر یک به یک شهر واحد محدود بوده‌اند. این محدودیت مقیاس از نظر روش‌شناختی نیز اهمیت دارد، زیرا زیست‌پذیری مفهومی نسبی و وابسته به زمینه مکانی است (Wheeler, 2001؛ Baslas, 2004؛ Heylen, 2006) و تفاوت‌های میان شهرستان‌ها تنها با مقایسه هم‌زمان همه شهرستان‌ها بر اساس یک چارچوب واحد قابل شناسایی است.

شکاف دوم، به روش‌شناسی سنجش باز می‌گردد. بخش قابل‌توجهی از گویه‌های زیست‌پذیری (نظیر دسترسی به حمل‌ونقل عمومی، خدمات بهداشتی - درمانی و آموزشی، مدیریت پسماند و مصرف، و سرانه‌ها) با استفاده از داده‌های کتابخانه‌ای و آماری رسمی، به‌صورت دقیق و تکرارپذیر قابل اندازه‌گیری‌اند (al et al 2024، Deng et al 2024، Zhang et al 2024)؛ حال آنکه بخشی از مطالعات پیشین همین گویه‌ها را از طریق پرسشنامه و ادراک ذهنی ساکنان سنجیده‌اند که به دلیل خطای سوگیری پاسخ‌گو، از پایایی و تکرارپذیری کمتری برخوردار است.

شکاف سوم، فقدان پیوند نظام‌مند میان تشخیص وضعیت و تدوین راهبرد است؛ غالب مطالعات مرور شده (Yeganeh, 2026؛ Mobaraki et al., 2026؛ Wang, Naderi Mayvan, 2025) صرفاً به تحلیل وضع موجود زیست‌پذیری بسنده کرده و از تدوین راهبردهای عملیاتی مبتنی بر ریشه‌یابی نظام‌مند چالش‌ها غفلت کرده‌اند. با توجه به سه خلأ اصلی در مطالعات پیشین، شامل تمرکز بر مقیاس تک‌شهری، استفاده از داده‌های ادراکی به‌جای داده‌های عینی و رسمی و نبود پیوند میان ارزیابی وضعیت و تدوین راهبرد، پژوهش حاضر با سطح‌بندی هم‌زمان ۱۶ شهرستان استان تهران بر پایه داده‌های عینی و رسمی و اتصال نتایج به تدوین راهبرد از طریق چارچوب PESTEL، این خلأها را برطرف می‌کند.

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز ناورود (شکل ۱) با مساحت ۲۷۴ کیلومتر مربع واقع در کوه‌های تالش است که بین ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۴ دقیقه شرقی و ۳۷ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی قرار گرفته است. این حوضه دارای مساحت حدود ۲۷۰ کیلومتر مربع بوده و پوشش گیاهی آن از دو تیپ جنگل و مرتع تشکیل شده است. حوضه آبخیز ناورود به دلیل قرار گرفتن در دامنه شمالی رشته کوه‌های البرز و نیز موقعیت کوهستانی آن دارای بارندگی‌های نسبتاً خوبی در طول سال است که میانگین بارش سالانه در کل حوضه ۸۳۶ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالانه ۱۰/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (اسدی و همکاران، ۱۳۹۷).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
Figure 1. Geographical location of the study area

مواد و روش‌ها

این پژوهش از نوع تحلیلی - کاربردی و با هدف پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل جنگل تصادفی (RF) در حوضه آبخیز ناورود واقع در استان گیلان انجام شد. در گام نخست، با مرور منابع علمی معتبر، گزارش‌های سازمان منابع طبیعی و بازدیدهای میدانی، مهم‌ترین عوامل موثر در بروز زمین‌لغزش شناسایی گردید. از این‌رو، ۱۱ عامل شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی نرمال‌شده^۱ (NDVI)، انحنا^۲ (Curvature)، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل و بارش به عنوان متغیرهای کلیدی انتخاب شدند. هر یک از این عوامل با استفاده از داده‌ها و تصاویر مختلف تهیه شدند. بدین ترتیب لایه شیب و جهت شیب و ارتفاع از مدل رقومی ارتفاعی^۳ (DEM) با دقت ۱۲/۵ متری (Alos Palsar) استخراج گردید. لایه زمین‌شناسی بر اساس نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور فراهم شد. نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی نیز در محیط سامانه گوگل ارث انجین تهیه شدند. انحنا^۲ دامنه نیز از تحلیل‌های ثانویه مدل رقومی ارتفاعی به دست آمدند. برای تعیین فاصله از جاده‌ها از داده‌های شبکه راه‌های استان استفاده شد، در حالی که فاصله از آبراهه‌ها با استخراج شبکه زهکشی از DEM و فاصله از گسل‌ها با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی کشور محاسبه گردید. در نهایت داده‌های بارش سالیانه از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه جمع‌آوری شد و با روش درون‌یابی معکوس^۴ (IDW) به نقشه بارش پیوسته تبدیل

1- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

2- Curvature

3- Digital Elevation Model (DEM)

4- Inverse Distance Weighted (IDW)

گردید. تمامی این لایه‌ها در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی^۱ (GIS) به صورت رستری و با وضوح مکانی ۳۰ متر بازنمونه‌برداری شدند و به منظور همگن‌سازی مقادیر، در بازه ۰ تا ۱ فازی‌سازی و نرمال‌سازی شدند تا قابلیت مقایسه‌پذیری در مدل‌سازی فراهم گردد.

یکی از مراحل کلیدی در فرآیند پژوهش، تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه بود. از این‌رو بر اساس تفسیر تصاویر هوایی و بررسی‌های میدانی اولیه تهیه شده بود. سپس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth، اطلاعات محلی و برداشت میدانی به کمک دستگاه موقعیت‌یاب جهانی^۲ (GPS)، این نقشه اصلاح و تکمیل گردید. در نهایت تعداد ۱۵۰ نقطه زمین‌لغزش در محدوده حوضه شناسایی شد. این داده‌ها به‌عنوان متغیر وابسته در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند و به منظور آموزش و آزمون مدل‌ها به دو بخش تقسیم شدند، به‌طوری‌که ۷۰ درصد از داده‌ها به‌عنوان داده آموزشی^۳ و ۳۰ درصد باقی‌مانده به‌عنوان داده اعتبارسنجی^۴ مورد استفاده قرار گرفت. همچنین به‌منظور ایجاد تعادل در داده‌ها، نقاط غیرلغزشی نیز به تعداد متناسب استخراج شدند و به‌صورت کلاس صفر وارد مدل شدند. در مرحله بعدی، کلیه داده‌ها به محیط سامانه گوگل ارث انجین GEE انتقال‌گردید. الگوریتم جنگل تصادفی با تعریف تعداد درخت‌های کافی و پارامترهای مناسب و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با انتخاب هسته بهینه اجرا شدند. در این فرآیند، لایه‌های فازی‌شده به همراه داده‌های لغزشی و غیرلغزشی به‌عنوان ورودی در اختیار مدل‌ها قرار گرفت و خروجی هر مدل، نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش بود. برای سهولت در تفسیر و تحلیل، نقشه‌های خروجی در پنج طبقه شامل بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد طبقه‌بندی شدند که نمایانگر سطوح متفاوت خطر وقوع لغزش در سطح حوضه است. در گام نهایی، به منظور ارزیابی و مقایسه کارایی مدل از شاخص‌های آماری معتبر استفاده شد. مهم‌ترین معیار، منحنی مشخصه عملکرد گیرنده^۵ (ROC) و مساحت زیر منحنی^۶ (AUC) بود که بیانگر دقت و توان پیش‌بینی مدل‌ها در تفکیک مناطق مستعد لغزش از مناطق پایدار است. محاسبات مربوط به منحنی ROC و مقادیر AUC با استفاده از نرم‌افزار R و داده‌های اعتبارسنجی انجام شد. مقایسه مقادیر AUC به‌دست‌آمده امکان تعیین دقت نسبی و برتری هر یک از دو مدل مورد بررسی را فراهم ساخت. بدین ترتیب، با ترکیب داده‌های مکانی، روش‌های پردازش GIS، الگوریتم یادگیری ماشین در محیط Google Earth Engine و تحلیل‌های آماری در نرم‌افزار R، چارچوبی جامع برای ارزیابی مدل RF در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز ناورود ارائه شد.

آماده‌سازی عوامل جهت مدل‌سازی و تهیه نقشه خطر وقوع زمین لغزش

در این پژوهش پس از تعیین عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش و تهیه لایه‌های مربوطه اقدام به فازی‌سازی نقشه‌ها گردید تا در یک فرمت یکسان بین ۰ و ۱ قرار گیرند. سپس به همراه لایه زمین لغزش‌های موجود در منطقه مورد مطالعه و تهیه بانک اطلاعاتی اقدام به تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (RF) در محیط سامانه گوگل ارث انجین شد. همچنین در گام بعد به منظور تعیین عوامل موثر در زمین لغزش منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل RF در محیط سامانه GEE شناسایی شدند.

الگوریتم جنگل تصادفی (RF)

الگوریتم جنگل تصادفی یکی از روش‌های قدرتمند یادگیری نظارت‌شده و گروهی است که با استفاده از تعداد زیادی درخت تصمیم‌گیری و تکنیک Bagging همراه با انتخاب تصادفی متغیرها، به طبقه‌بندی و رگرسیون می‌پردازد. در این روش، زیرمجموعه‌هایی از داده‌های آموزشی به‌طور تصادفی انتخاب شده و هر زیرمجموعه برای آموزش یک درخت تصمیم استفاده

^۱- Geographic Information System (GIS)

^۲- Global Positioning System (GPS)

^۳- Training Data

^۴- Validation Data

^۵- Receiver Operating Characteristic (ROC)

^۶- Area Under the Curve (AUC)

می‌شود. سپس نتایج درخت‌ها با هم ترکیب شده و خروجی نهایی به دست می‌آید. این الگوریتم ضمن کاهش واریانس و افزایش دقت، قابلیت مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی را دارد و امکان اندازه‌گیری اهمیت متغیرها را نیز فراهم می‌کند. همچنین استفاده از داده‌های خارج از نمونه (OOB) برای ارزیابی مدل باعث بهبود کارایی آن می‌شود. جنگل تصادفی به دلیل دقت بالا و توانایی در شناسایی عوامل مؤثر، در زمینه‌هایی چون تحلیل خطر زمین‌لغزش به‌طور گسترده‌ای به کار گرفته شده است. در این پژوهش نیز، برای پیاده‌سازی و اجرای الگوریتم جنگل تصادفی از محیط گوگل ارث انجین استفاده شده که به دلیل دسترسی به پایگاه داده‌های عظیم سنجش از دور و قابلیت پردازش ابری، بستری مناسب برای طبقه‌بندی، تحلیل مکانی و ارزیابی اهمیت متغیرها فراهم کرده و امکان اجرای هم‌زمان مدل بر روی داده‌های وسیع و پیچیده را مهیا می‌سازد. الگوریتم رشد RF با K درخت تصمیم به‌صورت رابطه (۱) عمل می‌کند (Ceh et al., 2018; Hoang et al., 2019; Mersha and Meten, 2020).

For $i = 1$ to $k - 1$

(۱)

الف) رسم زیرمجموعه: یک زیرمجموعه از داده‌های آموزشی با جایگزینی (دو سوم) و همچنین یک زیرمجموعه تصادفی از متغیرهای ورودی برای هر گره ترسیم می‌شود. داده‌های خارج از نمونه (OOB) برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده می‌شوند. ب) رشد درخت: درخت‌ها با استفاده از زیرمجموعه داده و متغیرها رشد می‌کنند. در هر گره، بهترین متغیر به‌صورت تصادفی از میان متغیرهای موجود انتخاب می‌شود.

اعتبار سنجی مدل مورد استفاده

برای سنجش میزان دقت و توان پیش‌بینی مدل‌ها در این تحقیق، از دو شاخص کلیدی شامل منحنی ROC دقت (Accuracy) بهره گرفته شد. منحنی ROC امکان ارزیابی عملکرد نسبی مدل‌ها را در تفکیک صحیح نقاط وقوع و عدم وقوع زمین‌لغزش، در مقیاس پیکسلی، فراهم می‌سازد. در این منحنی، پیش‌بینی‌های درست روی محور عمودی و پیش‌بینی‌های نادرست روی محور افقی قرار می‌گیرند. مساحت زیر این منحنی که به اختصار AUC نامیده می‌شود، معیاری معتبر برای ارزیابی دقت کلی مدل محسوب می‌گردد؛ به‌گونه‌ای که مقدار AUC برابر با یک به‌معنای پیش‌بینی کاملاً صحیح و مقدار ۰/۵ نشان‌دهنده عملکردی مشابه انتخاب تصادفی است. هرچه مقدار AUC به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت و عملکرد بهتر مدل خواهد بود. همچنین، در خصوص معیار دیگر یعنی Accuracy نیز هرچه نتایج به مقدار یک نزدیک‌تر باشند، می‌توان نتیجه گرفت که مدل از کارایی بالاتری برخوردار است و توانسته با دقت بیش‌تری پدیده زمین‌لغزش را پیش‌بینی و تفکیک کند (Obuchowski and Bullen, 2018; Chang et al., 2023).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تحلیل متغیرهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش حوضه آبخیز ناورود

در پژوهش حاضر، عامل شیب به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین و مؤثرترین متغیرهای کنترل‌کننده ناپایداری دامنه‌ها و رخداد زمین‌لغزش در حوضه آبخیز ناورود مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، نقشه شیب از مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر استخراج و در محیط نرم‌افزار ArcGIS پردازش شد. نتایج حاصل از لایه شیب نشان داد که میانگین شیب حوضه آبخیز ناورود حدود ۲۰ درجه و انحراف معیار آن برابر با ۷/۶۰ درجه است. این مقادیر بیانگر آن است که ناورود حوضه‌ای عمدتاً کوهستانی با دامنه‌های نسبتاً تند بوده و در عین حال از تغییرپذیری مکانی قابل توجهی در عامل شیب برخوردار است؛ موضوعی که به‌وضوح در نقشه شیب منطقه (شکل ۳) قابل مشاهده می‌باشد. بر اساس بررسی الگوی مکانی شیب، اراضی با شیب‌های کم عمدتاً در بخش‌های پایین‌دست حوضه و در امتداد دشت‌های آبرفتی و سطوح هموار تجمع یافته‌اند. این نواحی به‌طور مستقیم از نظر وقوع زمین‌لغزش دارای حساسیت پایینی هستند؛ با این حال، به دلیل قرارگیری در مسیر انتقال مواد ناپایدار از دامنه‌های بالادست، می‌توانند به‌صورت غیرمستقیم تحت تأثیر فرایندهای حرکتی و انباشت رسوبات لغزشی قرار گیرند. در مقابل، بخش‌های وسیعی از حوضه آبخیز ناورود دارای شیب‌های متوسط تا زیاد بوده و بیش‌ترین تمرکز رخدادهای زمین‌لغزش نیز در همین دامنه‌های پرشیب مشاهده می‌شود. از دیدگاه ژئومکانیکی، افزایش شیب دامنه موجب افزایش مؤلفه برشی نیروی

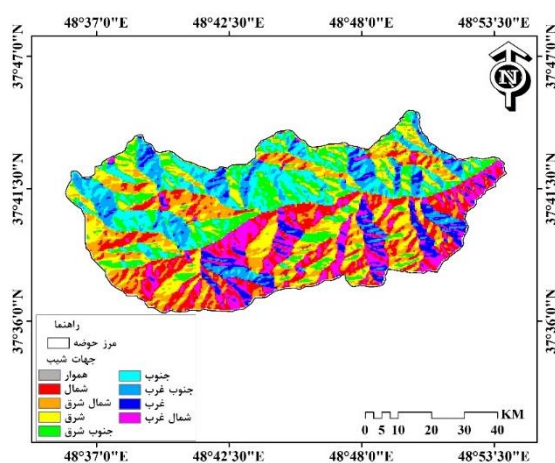
وزن و کاهش پایداری تعادل دامنه می‌شود. در شرایط اقلیمی مرطوب منطقه ناورود، بارش‌های شدید و متمرکز سبب افزایش فشار آب حفره‌ای، کاهش مقاومت برشی خاک و سنگ و در نهایت تشدید ناپایداری دامنه‌ها می‌گردد. این شرایط به‌ویژه در دامنه‌های پرسیب که اغلب با لیتولوژی‌های ناپایدار و پوشش خاک کم‌عمق همراه هستند، زمینه را برای وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی و عمیق فراهم می‌سازد. بنابراین، نتایج این مطالعه تأیید می‌کند که عامل شیب نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوی مکانی زمین‌لغزش‌های حوضه آبخیز ناورود ایفا کرده و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین لایه‌های ورودی در مدل پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه محسوب می‌شود.

جهت شیب یکی از مهم‌ترین متغیرهایی است که در وقوع زمین‌لغزش نقش قابل توجهی دارد. به‌طور کلی، دامنه‌های با شیب زیاد از جمله فاکتورهای اصلی مستعد زمین‌لغزش محسوب می‌شوند. در این پژوهش، لایه شیب به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در تحلیل وقوع زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور، شیب سطح حوضه آبخیز سیاه‌رود ناورود از روی تصویر DEM با تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر در محیط نرم‌افزار ArcGIS استخراج شد. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، اراضی با شیب کم عمدتاً در بخش‌های میانی و جنوب‌شرقی حوضه، به‌ویژه در پایین‌دست، پراکنده شده‌اند. در این مناطق احتمال وقوع زمین‌لغزش بسیار پایین است، هرچند ممکن است تحت تأثیر حرکت مواد از دامنه‌های بالادست قرار گیرند، زیرا جابجایی مواد معمولاً از بالا به پایین رخ می‌دهد. در مقابل، بخش‌هایی از شمال و جنوب حوضه دارای شیب‌های نسبتاً زیاد هستند و بنابراین می‌توان آن‌ها را به‌عنوان پهنه‌های مستعد وقوع زمین‌لغزش در نظر گرفت. در شکل (۴) نیز لایه جهت شیب ارائه شده است. به‌طور کلی، نقشه جهت شیب نمایانگر جهت غالب دامنه‌ها در منطقه است و تأثیر قابل توجهی بر الگوهای فرسایش، رطوبت خاک، تابش خورشید و در نتیجه پتانسیل وقوع زمین‌لغزش دارد. در حوضه‌های کوهستانی و مرطوب مانند حوضه آبخیز ناورود، دامنه‌های با جهت شمالی و شمال‌شرقی معمولاً دارای رطوبت بالاتر و پوشش گیاهی متراکم‌تر هستند که می‌تواند تا حدودی پایداری شیب را افزایش دهد، در حالی که دامنه‌های جنوبی و جنوب‌غربی که بیش‌تر در معرض تابش مستقیم خورشید قرار دارند، معمولاً خشک‌تر و ناپایدارتر بوده و احتمال وقوع لغزش در آن‌ها بالاتر است.

ارتفاع از جمله متغیرهای کلیدی است که بر شرایط طبیعی یک حوضه آبخیز تأثیر قابل توجهی دارد. این تأثیرات شامل تغییر میزان و نوع بارش، دمای هوا، یخبندان، نحوه ذوب برف و در نهایت فرسایش خاک می‌شود. به همین دلیل، برای تهیه نقشه طبقات ارتفاعی، از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) استفاده شد. این مدل با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای آلوس پالسار و با تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر تولید گردید و ارتفاعات حوضه را در بازه ۱۳۰ تا ۲۸۳۲ متر از سطح دریا نشان می‌دهد (شکل ۵). نتایج نشان می‌دهد که بخش‌های شمال‌غرب و جنوب‌غرب حوضه بیش‌ترین ارتفاع را دارند، در حالی که نواحی مرکزی و شمال‌شرقی منطقه نسبتاً هموار هستند. همچنین، متوسط ارتفاع کل حوضه برابر با ۱۳۵۹ متر برآورد شده است. از نظر تحلیلی، توزیع ارتفاعات نشان می‌دهد که بخش‌های مرتفع حوضه احتمالاً در معرض فرآیندهای شدید فرسایش و ریزش مواد دامنه‌ای قرار دارند، در حالی که مناطق هموار مرکزی و شمال‌شرقی بیش‌تر مستعد رسوب‌گذاری و تجمع آب‌های سطحی هستند. این تفاوت ارتفاعی می‌تواند به‌طور مستقیم بر توزیع پوشش گیاهی، رطوبت خاک و پتانسیل وقوع زمین‌لغزش تأثیر بگذارد، بنابراین استفاده از لایه ارتفاعی در تحلیل‌های مکانی و مدل‌سازی خطر زمین‌لغزش اهمیت بالایی دارد.

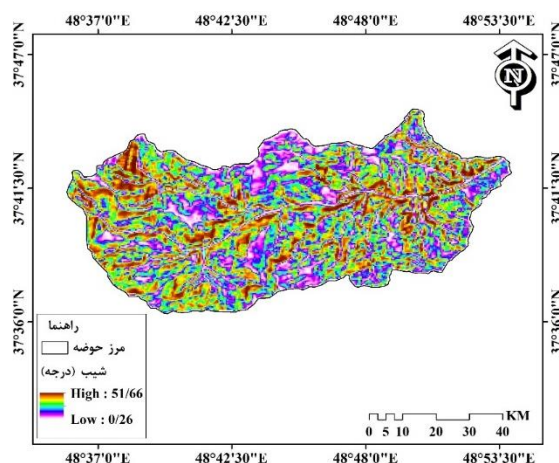
بررسی نقشه سازندهای زمین‌شناسی حوضه آبخیز ناورود (شکل ۶) نشان می‌دهد که این حوضه از نظر لیتولوژی دارای تنوع قابل توجهی بوده و واحدهای زمین‌شناسی مختلفی شامل Ga, K1.2ls, K2vs, C و pgrt را در بر می‌گیرد. این تنوع لیتولوژیکی نقش مهمی در کنترل ویژگی‌های ژئومکانیکی خاک و سنگ، میزان هوازدگی، نفوذپذیری، توسعه درزه‌ها و در نهایت پایداری دامنه‌ها ایفا می‌کند. بر اساس نتایج، سازند K2vs که بخش وسیعی از حوضه را به خود اختصاص داده است، به‌عنوان یکی از واحدهای حساس به ناپایداری شناخته می‌شود. این سازند که عمدتاً شامل سنگ‌های آتشفشانی و آذرآوری است، به دلیل شدت هوازدگی، وجود شکستگی‌های فراوان و نفوذپذیری ناهمگن، مستعد نفوذ آب و افزایش فشار منفذی در دامنه‌ها می‌باشد. این شرایط موجب کاهش مقاومت برشی و افزایش احتمال لغزش، به‌ویژه در شیب‌های متوسط تا تند می‌شود. گسترده‌گی فضایی این سازند بیانگر نقش غالب آن در الگوی مکانی زمین‌لغزش‌های منطقه است. سازند K1.2ls که عمدتاً شامل سنگ‌های آهکی

می‌باشد، در بخش‌هایی از حوضه گسترش یافته است. اگرچه این واحدها در حالت سالم از مقاومت نسبتاً بالایی برخوردارند، اما توسعه سیستم‌های کارستی، درزه‌ها و شکاف‌های انحلالی در آن‌ها می‌تواند باعث افزایش نفوذپذیری و تمرکز جریان‌های زیرسطحی شود. این ویژگی‌ها، به‌ویژه در شرایط بارندگی شدید، زمینه را برای ناپایداری موضعی دامنه‌ها فراهم می‌سازد. واحد C که وسعت محدودی در حوضه دارد، اغلب شامل رسوبات سست‌تر و کم‌تحکیم‌تر بوده و به دلیل انسجام پایین، حساسیت بیش‌تری نسبت به فرسایش و لغزش‌های سطحی از خود نشان می‌دهد. حضور این واحد در دامنه‌های شیب‌دار، خطر بروز زمین‌لغزش‌های کم‌عمق را افزایش می‌دهد. سازند Ga که در بخش‌های محدودی از حوضه مشاهده می‌شود، به دلیل ویژگی‌های لیتولوژیکی خاص خود (نظیر دانه‌درشتی، هوازدگی متفاوت و شرایط ساختاری)، نقش موضعی اما قابل توجهی در ناپایداری دامنه‌ها دارد. این واحدها معمولاً در ترکیب با شیب و عوامل انسانی می‌توانند به‌عنوان کانون‌های بالقوه لغزش عمل کنند. در نهایت، واحد pgrt که کوچک‌ترین سطح پوشش را در حوضه دارد، عمدتاً شامل سنگ‌های آذرین نفوذی با مقاومت مکانیکی بالا است. این سازندها به دلیل انسجام زیاد، نفوذپذیری کم و مقاومت برشی بالا، از پایداری نسبی بیش‌تری برخوردار بوده و کم‌ترین سهم را در وقوع زمین‌لغزش‌ها دارند، مگر در مواردی که شکستگی‌های ساختاری شدید یا تغییرات کاربری انسانی بر آن‌ها تحمیل شده باشد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که سازندهای زمین‌شناسی حوضه آبخیز ناورود نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل الگوی مکانی زمین‌لغزش‌ها ایفا می‌کنند. واحدهای آتشفشانی و آذرآواری هوازده به‌ویژه K2vs بیش‌ترین حساسیت را به ناپایداری دامنه‌ها دارند، در حالی که سازندهای آذرین نفوذی و آهکی سالم از پایداری بیش‌تری برخوردارند.



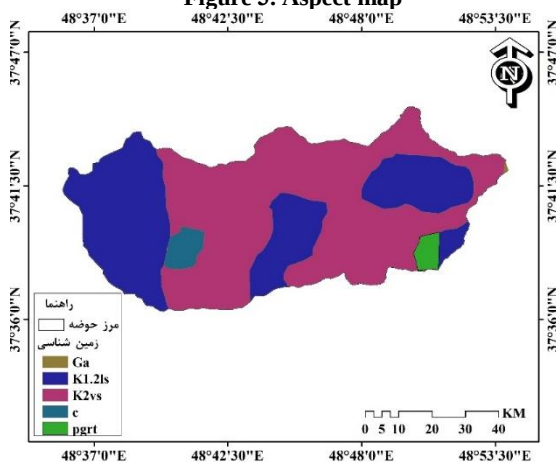
شکل ۳. نقشه جهت شیب

Figure 3. Aspect map



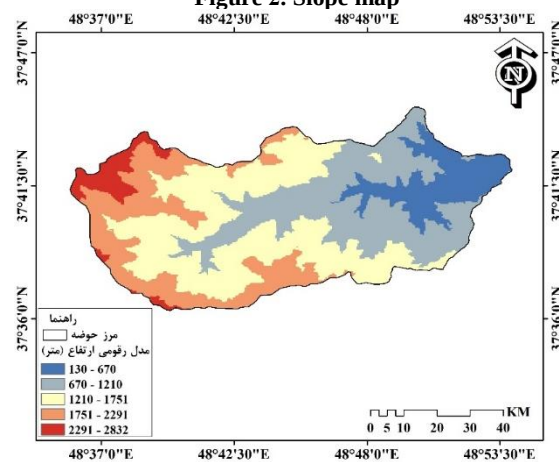
شکل ۲. نقشه شیب

Figure 2. Slope map



شکل ۵. نقشه زمین‌شناسی

Figure 5. Geology map



شکل ۴. نقشه ارتفاع

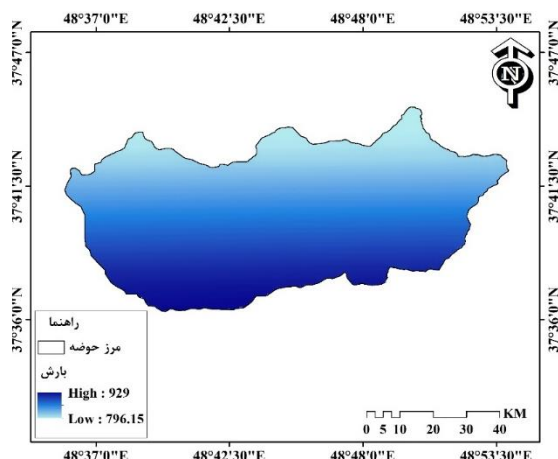
Figure 4. Elevation map

در پژوهش حاضر، عامل فاصله از آبراهه‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین معیارهای هیدرواقليمی مؤثر بر ناپایداری دامنه‌ها و رخداد زمین لغزش در حوضه آبخیز ناورود مورد بررسی قرار گرفت. آبراهه‌ها به عنوان عوامل محرک زمین لغزش شناخته می‌شوند، زیرا از طریق فرایندهای فرسایش کناری و عمقی، شست و شوی مصالح پای دامنه و تغییر در تعادل ژئومکانیکی شیب‌ها، نقش مؤثری در تضعیف پایداری دامنه‌ها ایفا می‌کنند. از این رو، لحاظ کردن این متغیر در فرآیند پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش، امری ضروری به شمار می‌رود. بدین منظور، ابتدا شبکه آبراهه‌های حوضه آبخیز ناورود با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه استخراج شد. در این مرحله از ابزارهای تحلیل هیدرولوژیکی نرم‌افزار ArcGIS بهره گرفته شد که امکان تعیین مسیر جریان، تجمع رواناب و استخراج دقیق شبکه زهکشی را فراهم می‌سازد. پس از استخراج شبکه آبراهه‌ها، لایه فاصله از آبراهه با استفاده از تابع فاصله اقلیدسی در محیط ArcGIS تولید گردید. نقشه حاصل در پنج طبقه فاصله‌ای طبقه‌بندی شد که الگوی مکانی فاصله از آبراهه‌ها را در سطح حوضه به خوبی نمایش می‌دهد (شکل ۶). از دیدگاه فرایندی، مجاورت با آبراهه‌ها سبب افزایش فرسایش پای دامنه، ایجاد اختلاف شیب موضعی، تمرکز جریان‌های سطحی و افزایش رطوبت خاک می‌شود که همگی به کاهش مقاومت برشی مصالح و افزایش احتمال لغزش منجر می‌گردند. در شرایط اقلیمی مرطوب حوضه آبخیز ناورود، بارش‌های شدید و متمرکز باعث افزایش دبی جریان در آبراهه‌ها و تشدید فرسایش کناری و عمقی می‌شود. این فرایندها به‌ویژه در دامنه‌های پرشیب و دارای پوشش خاک کم عمق یا لیتولوژی ناپایدار، نقش مؤثری در فعال‌سازی زمین لغزش‌ها ایفا می‌کنند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که پهنه‌های مجاور آبراهه‌ها، در شرایط برابر، از پتانسیل بالاتری برای ناپایداری دامنه‌ای و وقوع زمین لغزش در حوضه آبخیز ناورود برخوردار هستند و این عامل به عنوان یکی از متغیرهای کلیدی در مدل پهنه‌بندی خطر زمین لغزش منطقه شناخته می‌شود.

بارش، به‌ویژه در مناطق مرطوب شمال کشور، از اصلی‌ترین عوامل محرک زمین لغزش محسوب می‌شود، زیرا با افزایش رطوبت خاک، بالا بردن فشار آب حفره‌ای و کاهش مقاومت برشی مصالح دامنه‌ای، شرایط لازم برای فعال‌سازی لغزش‌ها را فراهم می‌سازد. نقشه توزیع مکانی بارش سالانه در سطح حوضه ناورود (شکل ۷) بیانگر ناهمگنی قابل توجه بارش در سطح منطقه مطالعاتی است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، میانگین بارش سالانه در سطح حوضه آبخیز ناورود در بازه‌ای حدود ۷۹۶ تا ۹۲۹ میلی‌متر تغییر می‌کند که نشان‌دهنده حاکمیت اقلیم مرطوب و مستعد فرایندهای دامنه‌ای در منطقه است. بررسی الگوی مکانی بارش نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقادیر بارندگی در نواحی مرتفع حوضه متمرکز شده‌اند، در حالی که مقادیر کم‌تر بارش عمدتاً در بخش‌های کم‌ارتفاع و پایین دست مشاهده می‌شود. این الگو حاکی از وجود رابطه مستقیم و معنادار بین تغییرات مکانی بارش و تغییرات ارتفاعی در منطقه است؛ به گونه‌ای که افزایش ارتفاع موجب تشدید بارش سالانه شده است. از منظر فرایندی، تمرکز بارش‌های شدید و مداوم در نواحی مرتفع، به‌ویژه در دامنه‌های پرشیب، باعث افزایش نفوذپذیری آب در خاک، اشباع لایه‌های سطحی و تضعیف پیوند ذرات خاک می‌شود. این شرایط، در کنار سایر عوامل مؤثر نظیر شیب زیاد، لیتولوژی ناپایدار و فرسایش پای دامنه‌ها، نقش بسزایی در افزایش حساسیت دامنه‌ها به وقوع زمین لغزش ایفا می‌کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات مکانی شدید بارش سالانه در حوضه آبخیز ناورود، که بازتابی از ناهمواری‌ها و اختلافات ارتفاعی منطقه است، به عنوان یکی از عوامل کلیدی در الگوی مکانی زمین لغزش‌های منطقه عمل کرده و باید به عنوان متغیری اساسی در فرآیند پهنه‌بندی خطر زمین لغزش مورد توجه قرار گیرد.

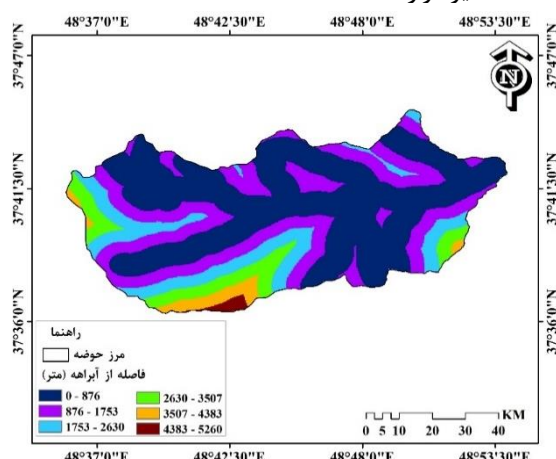
در شکل‌های (۸) و (۹) نقشه‌های فاصله از گسل و جاده ارائه شده‌اند. برای تولید این لایه‌ها، از تحلیل فاصله اقلیدسی استفاده شد؛ این روش فاصله مستقیم هر پیکسل تا نزدیک‌ترین عارضه، شامل گسل یا جاده، را محاسبه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که نواحی نزدیک به گسل‌ها به دلیل فعالیت‌های تکتونیکی، شکستگی‌های سنگ‌بستر و ناپایداری‌های ساختاری، در معرض خطر بالاتر زمین لغزش قرار دارند. به عبارت دیگر، هرچه فاصله از گسل کم‌تر باشد، احتمال وقوع لغزش به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، زیرا این مناطق تحت تأثیر تنش‌های زمین‌شناسی و فرایندهای فرسایشی فعال هستند. علاوه بر این، مناطق مجاور جاده‌ها به‌ویژه در شیب‌های تند، به دلیل ایجاد برش‌های مصنوعی، خاک‌برداری و تغییر تعادل طبیعی دامنه‌ها، دارای پتانسیل بالاتری برای زمین لغزش هستند. این موضوع نشان می‌دهد که فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه احداث و توسعه راه‌ها، می‌تواند به‌طور

مستقیم بر پایداری دامنه‌ها و افزایش خطر لغزش تأثیرگذار باشد. با افزایش فاصله از این عوارض، میزان خطر به‌طور نسبی کاهش می‌یابد، هرچند اثرات غیرمستقیم، مانند جریان آب‌های سطحی و انتقال مواد دامنه‌ای، ممکن است همچنان نواحی دورتر را تحت تأثیر قرار دهد. در نتیجه، شاخص‌های فاصله از گسل و جاده نه تنها نقش مهمی در تعیین پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش دارند، بلکه امکان شناسایی نقاط بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات مدیریت خطر را نیز فراهم می‌کنند. تحلیل فضایی این لایه‌ها نشان می‌دهد که ترکیب اثرات طبیعی و انسانی می‌تواند به‌طور قابل توجهی توزیع و شدت خطر زمین‌لغزش را در حوضه آبخیز ناورود تحت تأثیر قرار دهد.



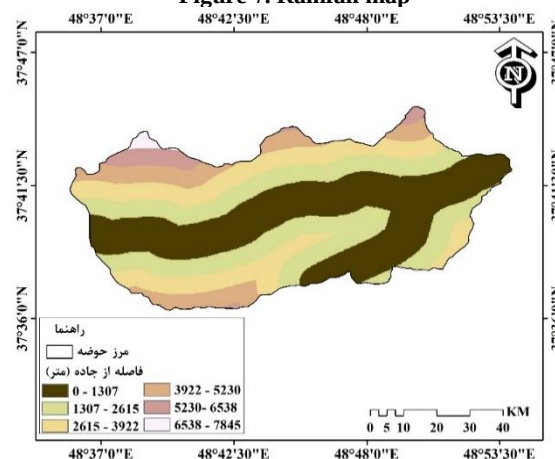
شکل ۷. نقشه بارش

Figure 7. Rainfall map



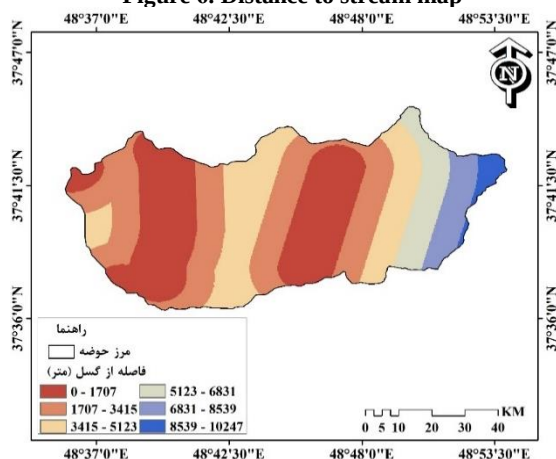
شکل ۶. نقشه فاصله از آبراهه

Figure 6. Distance to stream map



شکل ۹. نقشه فاصله از جاده

Figure 9. Distance to road map



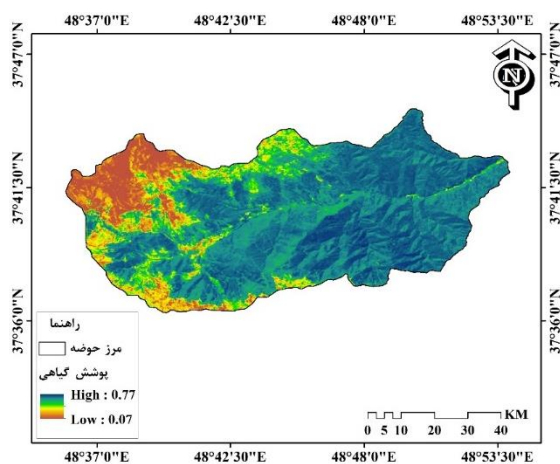
شکل ۸. نقشه فاصله از گسل

Figure 8. Distance to fault map

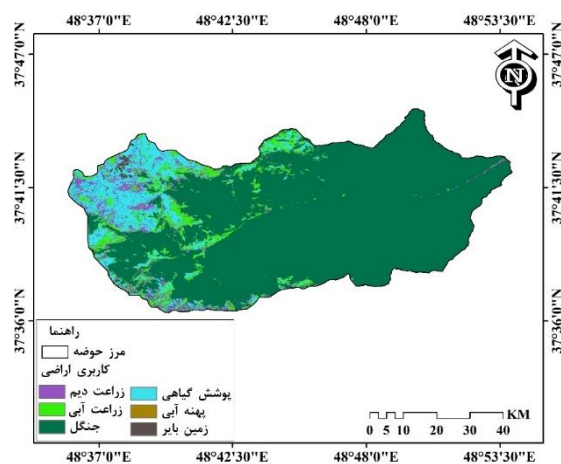
در پژوهش حاضر، به‌منظور ارزیابی پوشش زمین و نقش آن در ناپایداری دامنه‌ها و وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه، از دو لایه کاربری اراضی و پوشش گیاهی استفاده شد. این دو لایه، به همراه عامل فاصله از جاده‌ها، در قالب معیارهای انسانی-محیطی وارد فرآیند پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شدند. کاربری اراضی به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی، نقش مستقیمی در تغییر شرایط فیزیکی و مکانیکی خاک، الگوی رواناب سطحی و میزان نفوذپذیری ایفا می‌کند و از این رو، تأثیر قابل توجهی بر پایداری شیب‌ها دارد. نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز ناورود (شکل ۱۰) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ تهیه شد و در شش کلاس شامل اراضی دیم، اراضی آبی، جنگل، پوشش گیاهی، پهنه‌های آبی و اراضی بایر طبقه‌بندی گردید. بررسی توزیع مکانی این کاربری‌ها نشان می‌دهد که بخش‌های وسیعی از حوضه تحت پوشش جنگل‌ها و پوشش‌های گیاهی طبیعی قرار دارند. این پهنه‌ها به دلیل وجود سیستم ریشه‌ای متراکم، از مقاومت برشی بالاتر، پایداری بیش‌تر خاک و نرخ فرسایش سطحی کم‌تر برخوردار

هستند. ریشه گیاهان با تثبیت ذرات خاک و کاهش سرعت رواناب سطحی، نقش مؤثری در تعدیل نفوذ آب و جلوگیری از اشباع سریع خاک ایفا می‌کنند؛ از این رو، پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در این نواحی نسبتاً پایین‌تر ارزیابی می‌شود. در مقابل، اراضی کشاورزی، به‌ویژه اراضی آبی، به دلیل تغییر در ساختار طبیعی خاک ناشی از شخم‌زنی، کاهش انسجام خاک و افزایش رطوبت ناشی از آبیاری، مستعد ناپایداری بیش‌تری هستند. این شرایط موجب افزایش وزن واحد حجم خاک و کاهش مقاومت برشی آن شده و در نتیجه، احتمال وقوع زمین‌لغزش را به‌ویژه در دامنه‌های شیب‌دار افزایش می‌دهد. مناطق مسکونی، هرچند از نظر سطح اشغال گسترده نیستند، اما به دلیل تغییرات مصنوعی در شیب دامنه، قطع پوشش گیاهی، تمرکز زیرساخت‌ها و افزایش بارگذاری موضعی، به‌عنوان پهنه‌های بحرانی با ریسک بالای خسارت‌پذیری در صورت وقوع زمین‌لغزش شناخته می‌شوند. همچنین، اراضی بایر که فاقد هرگونه پوشش گیاهی تثبیت‌کننده هستند، بیش‌ترین پتانسیل را برای بروز ناپایداری‌های سطحی و حتی لغزش‌های عمیق از خود نشان می‌دهند. به‌منظور تکمیل تحلیل کاربری اراضی، لایه پوشش گیاهی به‌عنوان متغیری مکمل مورد استفاده قرار گرفت.

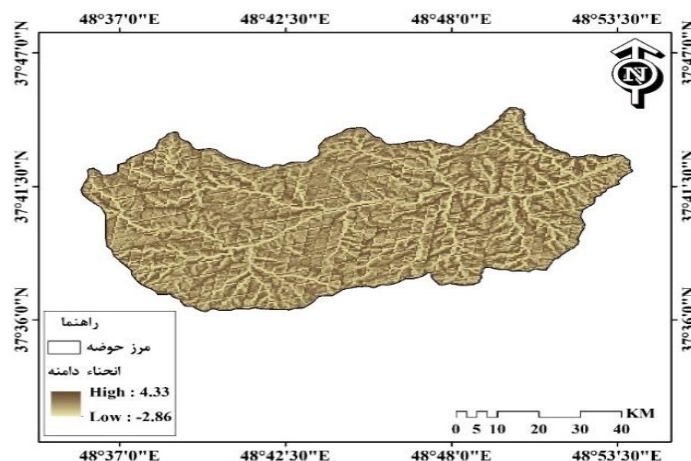
نقشه توزیع فضایی پوشش گیاهی حوضه آبخیز ناورود با استفاده از شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ تهیه شد (شکل ۱۱). نتایج نشان داد که پهنه‌هایی با مقادیر بالای NDVI (حدود ۰/۷۷)، عمدتاً در بخش‌های مرکزی، شمال‌شرقی و جنوب‌شرقی حوضه قرار دارند که بیانگر پوشش گیاهی متراکم و شرایط مناسب پایداری دامنه است. در مقابل، مقادیر پایین NDVI (حدود ۰/۰۷)، عمدتاً در بخش‌های جنوب‌غربی و شمال‌غربی حوضه مشاهده می‌شود. این الگوی فضایی بیانگر آن است که مجموعه‌ای از عوامل شامل شرایط خاک‌شناسی نامناسب، شیب‌های تند، خردشدگی بالای سنگ‌ها، محدودیت‌های رطوبتی موضعی و ویژگی‌های اقلیمی، امکان استقرار پوشش گیاهی انبوه را در این نواحی کاهش داده است. فقدان یا ضعف پوشش گیاهی در این پهنه‌ها موجب افزایش رواناب سطحی، تشدید فرسایش و کاهش پایداری دامنه‌ها شده و زمینه را برای وقوع زمین‌لغزش فراهم می‌سازد. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب کاربری اراضی و پوشش گیاهی، نقشی تعیین‌کننده در الگوی مکانی زمین‌لغزش‌های حوضه آبخیز ناورود ایفا کرده و باید به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معیارها منطقه مورد توجه قرار گیرد. انحنای دامنه (محدب یا مقعر بودن)، یکی از عوامل مهم در پیش‌بینی حساسیت به زمین‌لغزش است، زیرا با فرسایش و نفوذ آب ارتباط دارد. این شاخص نیز با استفاده از نقشه DEM منطقه مورد مطالعه تهیه شد (شکل ۱۲).



شکل ۱۱. نقشه پوشش گیاهی
Figure 11. Vegetation cover map



شکل ۱۰. نقشه کاربری اراضی
Figure 10. Land use map

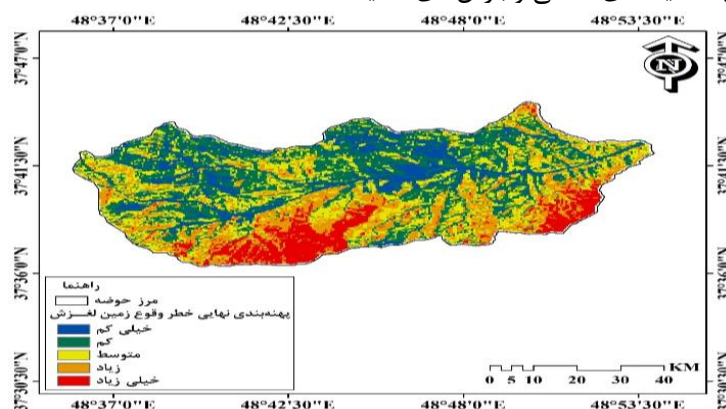


شکل ۱۲. نقشه انحناء دامنه

Figure 12. Slope curvature map

پهنه‌بندی نهایی خطر وقوع زمین لغزش و تعیین اهمیت متغیرهای مورد استفاده

تحلیل پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز ناورود (شکل ۱۳)، نشان می‌دهد که این حوضه تحت تأثیر ویژگی‌های طبیعی و فعالیت‌های انسانی قرار دارد. نتایج نشان می‌دهد (جدول ۱)، که حدود ۳۲ درصد از مساحت حوضه (۸۳ کیلومتر مربع) در گروه خطر «زیاد» و «خیلی زیاد» قرار دارند و عمدتاً در مناطق مرتفع شمال غربی و جنوب غربی حوضه با دامنه‌های تند و زمین‌های حساس قرار گرفته‌اند. در مقابل، پهنه‌های با خطر «کم» و «خیلی کم» که ۴۳ درصد مساحت حوضه (۱۱۳ کیلومتر مربع) را شامل می‌شوند، در مناطق مرکزی و کم‌ارتفاع حوضه واقع شده‌اند، و کلاس خطر متوسط با ۲۴ درصد مساحت، نقش یک ناحیه انتقالی را دارد که در صورت تغییر کاربری اراضی یا افزایش بارش، ممکن است به مناطق پرخطر تبدیل شود. در بررسی عوامل مؤثر (شکل ۱۴ و جدول ۲) شیب با ۱۸ درصد اهمیت مهم‌ترین عامل است؛ دامنه‌های تند وزن مواد را افزایش داده و باعث کاهش پایداری می‌شوند. ارتفاع (۱۱ درصد) و بارش (۱۰ درصد) نیز نقش مهمی دارند، زیرا مناطق مرتفع بارش بیش‌تری دریافت می‌کنند و خاک بیش‌تر اشباع می‌شود. جهت شیب (۵ درصد) و پوشش گیاهی (۶ درصد) بر توزیع لغزش‌ها تأثیر دارند؛ به‌طور مثال دامنه‌های جنوبی و جنوب غربی که خشک‌تر و با تغییر دمای زیاد هستند، کم‌تر پایدارند. از نظر زمین‌شناسی (۵ درصد)، سازندهای حساس مانند K2vs مستعد لغزش هستند، در حالی که سنگ‌های مقاوم‌تر مانند pglt کم‌تر تحت تأثیر قرار می‌گیرند. فعالیت‌های انسانی شامل کاربری اراضی (۸ درصد) و نزدیک بودن به جاده‌ها (۸ درصد) با ایجاد برش‌ها و کاهش پوشش گیاهی، خطر لغزش را افزایش می‌دهند. همچنین فاصله از آبراهه (۷ درصد) و گسل‌ها (۷ درصد) و انحنای دامنه (۵ درصد) نیز بر نقاط بحرانی تأثیر دارند. مجموع این عوامل نشان می‌دهد که وقوع زمین لغزش در ناورود نتیجه ترکیب شیب‌های تند، زمین حساس، فعالیت‌های انسانی و بارش‌های شدید است.



شکل ۱۳. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل جنگل تصادفی

Figure 13. Landslide hazard zonation map using the Random Forest model

جدول ۱. مساحت و درصد طبقات خطر زمین لغزش حوضه آبخیز ناورود

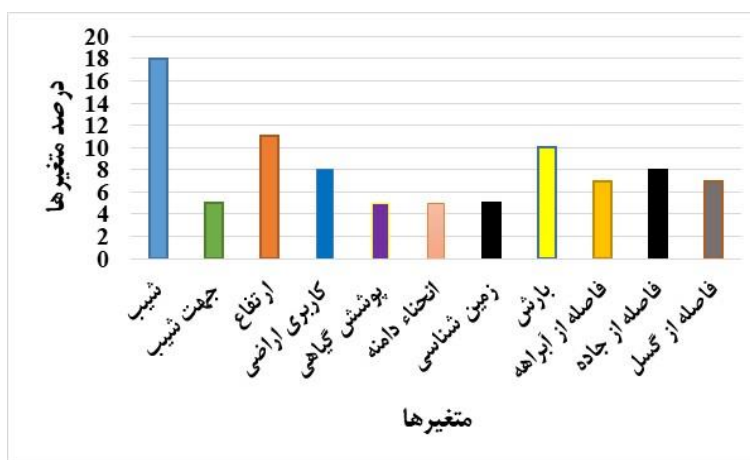
Table 1. Area and percentage of landslide risk classes in the Navrud watershed

طبقات خطر	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
خیلی کم	۳۲	۱۲/۳۵
کم	۸۱	۳۱/۲۷
متوسط	۶۳	۲۴/۳۲
زیاد	۵۴	۲۰/۸۴
خیلی زیاد	۲۹	۱۱/۱۹

جدول ۲. درصد متغیرهای موثر در زمین‌لغزش حوضه آبخیز ناورود با استفاده از مدل جنگل تصادفی

Table 2. Percentage of effective variables in Navrud watershed landslides using the Random Forest model

ردیف	اهمیت متغیرها	درصد	ردیف	اهمیت متغیرها	درصد
۱	شیب	۱۸	۶	انحناء دامنه	۵
۲	جهت شیب	۵	۷	زمین شناسی	۵
۳	ارتفاع	۱۱	۸	بارش	۱۰
۴	کاربری اراضی	۸	۸	فاصله از آبراهه	۷
۵	پوشش گیاهی	۶	۹	فاصله از جاده	۸
۱۰	فاصله از گسل		۷		



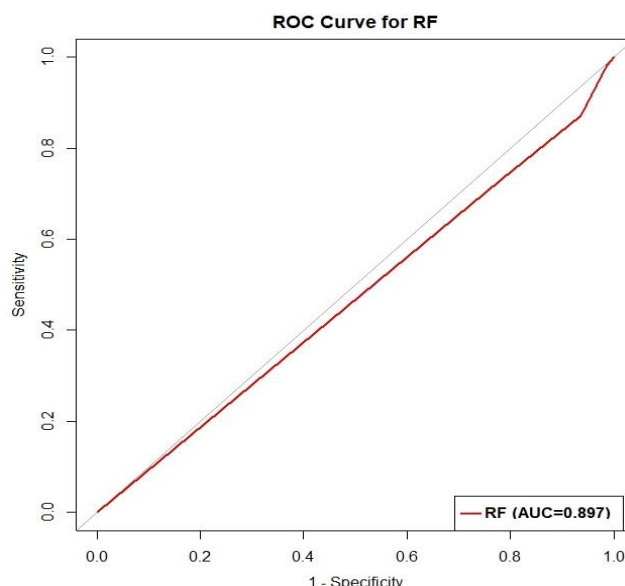
شکل ۱۴. درصد اهمیت متغیرهای موثر در زمین‌لغزش حوضه آبخیز ناورود با استفاده از مدل جنگل تصادفی

Figure 14. Percentage importance of effective variables in Navrud watershed landslides using the Random Forest model

ارزیابی نتایج مدل جنگل تصادفی (RF)

برای ارزیابی عملکرد مدل، از منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) و محاسبه سطح زیر منحنی (AUC) در نرم‌افزار R استفاده شد. نتایج مربوط به مرحله آموزش و اعتبارسنجی مدل در شکل (۱۵) نشان داده شده است. مقدار سطح زیر منحنی ROC در مرحله اعتبارسنجی برای مدل جنگل تصادفی برابر با ۰/۸۹۷ به دست آمد، که نشان‌دهنده توانایی بسیار خوب مدل در شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز ناورود است. علاوه بر این، دقت کلی مدل (Accuracy) و شاخص حساسیت (Sensitivity) نیز مقادیر بالایی داشته‌اند، که نشان می‌دهد مدل توانسته است بخش عمده‌ای از نقاط

مستعد و پرخطر را به درستی تشخیص دهد. نتایج همچنین بیانگر این است که مدل جنگل تصادفی نسبت به تغییرات داده‌های ورودی حساسیت مناسبی دارد و می‌تواند با اعتماد بالا برای مدیریت و برنامه‌ریزی در حوضه مورد استفاده قرار گیرد. به طور کلی، ترکیب معیارهای ROC، AUC و دقت مدل، قابلیت اطمینان بالای مدل جنگل تصادفی را در تحلیل خطر زمین‌لغزش تأیید می‌کند و نشان می‌دهد این مدل ابزار موثری برای تصمیم‌گیری در برنامه‌های کاهش خطر و مدیریت زمین است.



شکل ۱۵. منحنی ROC مدل RF در پیش‌بینی خطر وقوع زمین‌لغزش حوضه آبخیز ناورود

Figure 15. ROC curve of the RF model in predicting landslide susceptibility/risk in the Navrud watershed

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی، همواره تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و انسانی رخ می‌دهد و شناسایی دقیق این عوامل و نحوه تأثیرگذاری آن‌ها، نقش کلیدی در مدیریت و کاهش خطر دارد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از قابلیت‌های سامانه Google Earth Engine، پردازش‌های GIS و الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی، الگوی مکانی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز ناورود مورد بررسی قرار گرفت. رویکرد به‌کاررفته امکان تحلیل همزمان عوامل متعدد و پیچیده را فراهم کرده و نسبت به روش‌های سنتی، از دقت و انعطاف‌پذیری بالاتری برخوردار است. در این راستا با توجه به مرور مطالعات گذشته و همچنین شناسایی عوامل مهم تأثیرگذار در منطقه مورد مطالعه نهایتاً از متغیرهای شیب، جهت شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی، بارش، فاصله از آبراهه، جاده، گسل، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و انحناء دامنه نسبت به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه مورد مطالعه استفاده شد.

نتایج پهنه‌بندی نشان داد که خطر زمین‌لغزش در سطح حوضه به‌صورت ناهمگن توزیع شده و حدود یک سوم از مساحت حوضه در طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد قرار دارد. این پهنه‌ها عمدتاً در مناطق مرتفع شمال‌غربی و جنوب‌غربی حوضه متمرکز شده‌اند که با دامنه‌های پرشیب، لیتولوژی حساس و بارش‌های بیش‌تر همراه هستند. در مقابل، مناطق مرکزی و کم‌ارتفاع حوضه که از شیب کم‌تر، پوشش گیاهی مناسب‌تر و فعالیت‌های انسانی محدودتری برخوردارند، در طبقات خطر کم و بسیار کم قرار گرفته‌اند. کلاس خطر متوسط نیز به‌عنوان یک ناحیه انتقالی، بخش قابل توجهی از حوضه را در بر می‌گیرد که در صورت تشدید بارش‌ها یا تغییرات نادرست کاربری اراضی، می‌تواند به مناطق پرخطر تبدیل شود. تحلیل اهمیت متغیرها نشان داد که عامل شیب با ۱۸ درصد، مهم‌ترین متغیر مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در حوضه ناورود است. این نتیجه با ماهیت کوهستانی حوضه و میانگین شیب نسبتاً بالا کاملاً همخوانی دارد. افزایش شیب باعث کاهش پایداری دامنه‌ها می‌شود و در شرایط اقلیمی مرطوب منطقه، این اثر تشدید می‌گردد. پس از شیب، عوامل ارتفاع و بارش به‌ترتیب با ۱۱ و ۱۰ درصد اهمیت، نقش تعیین‌کننده‌ای در فعال‌سازی زمین‌لغزش‌ها دارند. تمرکز بارش‌های شدید در نواحی مرتفع، باعث اشباع خاک، افزایش فشار آب حفره‌ای و کاهش مقاومت برشی می‌شود که این موضوع در دامنه‌های پرشیب و دارای خاک کم‌عمق، احتمال وقوع لغزش را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

عوامل انسانی نیز سهم قابل توجهی در افزایش خطر زمین لغزش داشته‌اند. کاربری اراضی و فاصله از جاده هر کدام با ۸ درصد اهمیت، نشان‌دهنده تأثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی بر ناپایداری دامنه‌ها هستند. ایجاد جاده‌ها در شیب‌های تند، خاک‌برداری و حذف پوشش گیاهی طبیعی، تعادل دامنه‌ها را برهم زده و زمینه را برای وقوع لغزش فراهم کرده است. همچنین تبدیل اراضی جنگلی به کشاورزی و اراضی بایر، با کاهش انسجام خاک و افزایش نفوذ آب، خطر زمین لغزش را تشدید کرده است.

پوشش گیاهی و شاخص NDVI نیز با ۶ درصد اهمیت، نقش حفاظتی قابل توجهی در کاهش خطر داشته‌اند؛ به‌طوری‌که مناطق با پوشش گیاهی متراکم از پایداری بیش‌تری برخوردار بوده‌اند. عوامل زمین‌شناسی، فاصله از آبراهه و فاصله از گسل نیز هر چند اهمیت کم‌تری نسبت به شیب و بارش داشته‌اند، اما در ترکیب با سایر عوامل، نقش مهمی در شکل‌گیری الگوی مکانی زمین لغزش ایفا کرده‌اند. فرسایش کناری آبراهه‌ها، خرد شدگی سنگ‌ها در مجاورت گسل‌ها و ویژگی‌های لیتولوژیکی سازندهای حساس، نقاط بحرانی حوضه را مشخص کرده‌اند.

ارزیابی عملکرد مدل جنگل تصادفی با استفاده از منحنی ROC نشان داد که مقدار AUC برابر با ۰/۸۹۷ است که بیانگر توان پیش‌بینی بسیار خوب مدل می‌باشد که با نتایج عابدینی و پاسبان (۱۴۰۴) همسو است. این مقدار بالا نشان می‌دهد که مدل قادر است با دقت قابل قبول، مناطق مستعد زمین لغزش را از مناطق پایدار تفکیک کند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در کنار داده‌های سنجش از دور و GIS، چارچوبی کارآمد برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش فراهم می‌آورد.

در مجموع، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که زمین لغزش در حوضه آبخیز ناورود نتیجه هم‌افزایی عوامل طبیعی مانند شیب، ارتفاع، بارش و زمین‌شناسی با عوامل انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی و توسعه راه‌ها است. نقشه‌های خطر تولید شده می‌توانند به‌عنوان ابزار مؤثری برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی، مدیریت منابع طبیعی و کاهش خسارات ناشی از زمین لغزش در منطقه مورد استفاده قرار گیرند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی نتایج مدل جنگل تصادفی با روش‌های کلاسیک و سایر الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌صورت تطبیقی مقایسه گردد. همچنین از قابلیت‌های گوگل ارث انجین برای تحلیل داده‌های چندمنبعی و چندزمانه به‌منظور کاهش عدم قطعیت و افزایش کارایی محاسباتی بهره‌گیری شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید آنهاست.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله توضیح داده شده و از سوی مجله مورد تأیید نویسندگان این مقاله است.

تعارض منافع

بنا به اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر فاقد حمایت مالی است.

سپاسگزاری

از کلیه کسانی که در مراحل مختلف نوشتن این مقاله با نظرات خود ما را یاری دادند سپاس‌گزاری می‌کنیم.

References:

1. Abedini, M., & Pasban, A. H. (2025). Assessment and comparison of Random Forest and Support Vector Machine models in landslide hazard zonation (Case study: Firozabad Watershed). *Quantitative Geomorphological Research*. Advance online publication. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.543572.1578> (In Persian)
2. Agrawal, N., & Dixit, J. (2022). Assessment of landslide susceptibility for Meghalaya (India) using bivariate (frequency ratio and Shannon entropy) and multi-criteria decision analysis

- (AHP and fuzzy-AHP) models. *All Earth*, 34(1), 179–201. <https://doi.org/10.1080/27669645.2022.2101256>
3. Alcántara-Ayala, I., & Sassa, K. (2023). Landslide risk management: From hazard to disaster risk reduction. *Landslides*, 20, 2031–2037. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02120-6>
 4. Asadi, M. (2025). Comparison of CMIP5 and CMIP6 outputs on the trend of climatic parameters affecting almond growth (Case study: Birjand County). *Geography and Planning*, 29(92), 313–332. <https://doi.org/10.22034/gp.2024.61686.3262> (In Persian)
 5. Asghari, S., & Foroutan, M. (2025). Evaluating the accuracy of machine learning algorithms in landslide hazard zonation of Samian Watershed. *Quantitative Geomorphological Research*. Advance online publication. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.551301.1583> (In Persian)
 6. Atashafrooz, N. and safaee, M. (2021). Landslide Micro-Zoning Using DEMATEL Technique and Fuzzy AHP (Case Study: the County of Dehdez in Khuzestan Province). (In Persian). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 2(2), 61–81. https://www.srds.ir/article_134524.html?lang=en
 7. Babarabi, N., Lorestani, G., & Esmacili, R. (2025). Zoning of landslide risk occurrence using Random Forest and Support Vector Machine models (Case study: Talar Watershed). *Researches in Earth Sciences*, 16(1), 152–168. (In Persian)
 8. Chang, M., Dou, X., Zhu, X., & Ma, Y. (2024). Integrated risk assessment of landslide in karst terrains: Advancing landslide management in Beiliu City, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 132, 104046. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104046>
 9. Dai, X., Chen, J., Zhang, T., & Xue, C. (2025). Integrated landslide risk assessment via a landslide susceptibility model based on intelligent optimization algorithms. *Remote Sensing*, 17(3), 545. <https://doi.org/10.3390/rs17030545>
 10. Gilanipour, A., Motevalli, S., & Darafshi, K. (2025). Evaluation of landslide susceptibility and determination of effective factors using Random Forest algorithm (Case study: Galandrood Watershed). *Geography and Environmental Hazards*, 14(1), 247–274. (In Persian)
 11. Heydarifar, M. R., Solimani rad, E. and Hosseiniashgoli, M. (2020). Investigating the Role of Natural Hazards and Crisis Management in Land Management (Case Study: Kermanshah Province). (In Persian). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 1(1), 55–76. https://www.srds.ir/article_122918.html?lang=en
 12. Huang, W., Ding, M., Li, Z., Zhuang, J., Yang, J., Li, X., Meng, L. E., Zhang, H., & Dong, Y. (2022). An efficient user-friendly integration tool for landslide susceptibility mapping based on support vector machines: SVM-LSM toolbox. *Remote Sensing*, 14(14), 3408. <https://doi.org/10.3390/rs14143408>
 13. Janizadeh, S., Bateni, S. M., Jun, C., Pal, S. C., Band, S. S., Chowdhuri, I., Saha, A., Tiefenbacher, J. P., & Mosavi, A. (2023). Potential impacts of future climate on the spatio-temporal variability of landslide susceptibility in Iran using machine learning algorithms and CMIP6 climate-change scenarios. *Gondwana Research*, 124, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.05.009>
 14. Jemec Auflič, M., Bezak, N., Šegina, E., Frantar, P., Gariano, S. L., Medved, A., & Peternel, T. (2023). Climate change increases the number of landslides at the juncture of the Alpine, Pannonian and Mediterranean regions. *Scientific Reports*, 13, 23085. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50102-7>
 15. Jiang, Z., Wang, M., & Liu, K. (2023). Comparisons of convolutional neural network and other machine learning methods in landslide susceptibility assessment: A case study in Pingwu. *Remote Sensing*, 15, 798. <https://doi.org/10.3390/rs15030798>

16. Khaledi, S., Farahmand, G. and Ali Bakhshi, A. (2021). Vulnerability analysis and zoning of natural geomorphological hazards (Flood and earthquake) of Kermanshah province. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 2(1), 17-36. (In Persian) https://www.srds.ir/article_132471.html?lang=en
17. Moavi, M., Entezari, M., & Elmizadeh, H. (2025). Investigating the effect of geomorphological characteristics on landslide patterns using the Random Forest algorithm (Study area: Shahid Abbaspour Dam Watershed). *Environmental Hazards*. Advance online publication. (In Persian). <https://doi.org/10.22111/jneh.2025.51425.2107>
18. Moghim, H., & Nejabat, M. (2019). Technical report: Efficiency comparison of modified Nilson and relative effect models in landslide hazard zonation of Parsian Dam Watershed, Fars Province. *Watershed Engineering and Management*, 11(1), 264–272. (In Persian)
19. Negahban, S., Marhamat, M., & Alinejad, H. (2025). Evaluation and susceptibility zonation of landslides using machine learning algorithms (Case study: Margoon Watershed, Fars Zagros). *Quantitative Geomorphology*, 14(2). <https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.474854.1519> (In Persian)
20. Sadati, S. H., Mousavi, S. R., Vahabzadeh Kebria, G., & Roshan, S. H. (2025). Evaluation of Random Forest and Support Vector Machine models in mapping landslide susceptibility (Case study: Tajan Watershed, Mazandaran Province). *Environmental Hazards*, 14(45), 133–154. (In Persian)
21. Sepehrvand, A., & Beiranvand, N. (2024). Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms (Study area: A part of Haraz Watershed). *Water and Soil Modeling and Management*, 4(2), 261–278. (In Persian)
22. Sharifi, Z. (2025). Analysis and assessment of landslide risk using Analytic Network Process (ANP) model (Case study: Siahrood Watershed, Guilan Province). *Studies of Urban and Regional Sustainable Development*. https://www.srds.ir/article_226425.html (In Persian)
23. Tian, N., & Lan, H. (2023). The indispensable role of resilience in rational landslide risk management for social sustainability. *Geography and Sustainability*, 4, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.12.003>
24. Wang, X., Wang, Y., Lin, Q., & Yang, X. (2023). Assessing global landslide casualty risk under moderate climate change based on multiple GCM projections. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14, 751–767. <https://doi.org/10.1007/s13753-023-00473-0>
25. Zhang, Z., & Sun, J. (2024). Regional landslide susceptibility assessment and model adaptability research. *Remote Sensing*, 16, 2305. <https://doi.org/10.3390/rs16122305>