Vol. 15, No. 3, Autumn 2026, p. 68-91 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2026.97294.1638 OPEN ACCESS

# Assessment of Landslide Susceptibility Using the CRITIC Model in the Lanbaran Chay Watershed, Varzeqan County, Iran

**Shahram Roostaei[1]*, Seyyed Asadullah Hejazi[1], Seyyed Hossein Faqih Khaljani[1]**

[1] Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

## ARTICLE INFO

**Article History:**

**Received:** 31 December 2025

**Revised:** 13 May 2026

**Accepted:** 17 May 2026

**Available Online:**

17 May 2026

**Keywords:**

Landslide Susceptibility

CRITIC Model

Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)

Landslide Hazard Assessment

Northwest Iran

## ABSTRACT

Landslide hazard mapping is one of the most essential tools for crisis management and environmental planning in watershed areas. The Lenbran Chay watershed, located on the eastern flank of the Ahar Chay River and covering an area of 8,226 hectares, represents one of its most important headwater basins. Owing to its topographic and geological characteristics, the watershed is highly susceptible to landslide occurrence. The aim of the present study is to identify the factors influencing landslide occurrence and to delineate susceptibility zones within this watershed. For this purpose, a set of natural, anthropogenic, and morphologic variables—including distance from drainage networks, lithology, soil type, slope, aspect, elevation classes, precipitation, land use, and distance from transportation routes—was selected as the conditioning factors. The CRITIC multi criteria decision making model was then employed to determine the relative weight of each factor, based on which the final landslide hazard map was produced. The results indicated that slope is the most influential factor in landslide occurrence, followed by distance from drainage networks and lithology. Model performance assessment using training and validation datasets showed that CRITIC, with coefficients of 89.13 and 83.3 respectively, provides an acceptable level of accuracy and reliability in landslide hazard zonation. Overall, the findings suggest that the CRITIC model can be effectively utilized for risk assessment and optimal land use planning in landslide prone areas.

* Corresponding author: Shahram Roostaei E-mail address: roostaei@tabrizu.ac.ir

**How to cite this article:** Roostaei, S., Hejazi, S. A., & Faqih, S. H. (2026). Assessment of Landslide Susceptibility Using the CRITIC Model in the Lanbaran Chay Watershed, Varzeqan County, Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 15*(3), 68-91. https://doi.org/10.22067/geoeh.2026.97294.1638

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

## Extended Abstract

### Introduction

Landslides are major geomorphological processes that play a critical role in shaping landscape evolution in mountainous regions and have been responsible for numerous catastrophic events worldwide. Although landslides are natural phenomena that contribute to terrain formation and erosion, they remain among the most destructive natural hazards after earthquakes and floods, causing extensive damage to infrastructure, human settlements, and natural resources. In recent decades, rapid population growth and the expansion of human activities such as deforestation, overgrazing, agricultural land degradation, and unregulated construction have significantly increased both the frequency and severity of landslide occurrences.

These developments highlight the urgent need for effective natural hazard management strategies aimed at reducing local vulnerability and mitigating broader environmental and socio-economic impacts. Such strategies must be embedded within long-term planning frameworks through preventive measures, preparedness initiatives, and integrated risk management approaches. Addressing landslide hazards therefore requires the application of robust analytical frameworks capable of capturing the complex interactions among geomorphological, climatic, hydrological, and anthropogenic factors that govern slope instability.

In this context, the present study applies the CRITIC multi-criteria decision-making model to assess and map landslide hazard in the Lanbran-Chai Watershed. This approach, which has not previously been implemented in this watershed, provides a transparent and objective mechanism for weighting and integrating diverse conditioning factors within a spatial modeling environment. By enhancing the precision of landslide susceptibility assessment, the proposed framework offers reliable, evidence-based support for identifying high-risk areas and guiding targeted mitigation measures and sustainable land-use planning.

### Material and Methods

The Lenbran-Chai sub-Watershed is located on the eastern side of the Ahar-Chai River and covers an area of 8226 hectares within the defined study boundary. It represents one of the main headwater branches contributing to the Ahar-Chai River system. Geographically, the watershed lies between 46°20′07″ to 46°30′00″ E longitude and 38°28′17″ to 38°33′52″ N latitude.

To analyze landslide hazard in the watershed, available spatial and environmental datasets were first collected and examined. Based on theoretical principles, previous research, and expert knowledge, nine conditioning factors representing geological, geomorphological, climatic, environmental, and anthropogenic characteristics were selected for analysis. These factors include:

distance from drainage networks, lithology, soil type, slope gradient, slope aspect, elevation classes, precipitation, land use, and distance from roads.

Because these datasets originally had different units and measurement scales, all layers were standardized prior to integration. Continuous variables were converted into discrete classes using GIS-based reclassification rules. Each layer was categorized into five susceptibility classes very high, high, moderate, low, and very low based on its contribution to landslide occurrence. Standardization was performed using the Reclassify tool in ArcGIS.

After preparing the layers, the CRITIC model was used to calculate the objective weight of each conditioning factor. These weights were subsequently applied to the standardized layers within ArcMap to generate the final landslide hazard map for the Lenbran-Chay Watershed.

### Results and Discussion

Standardization and integration of the conditioning factors made it possible to conduct a consistent multi-criteria assessment of landslide susceptibility. Each layer slope, aspect, lithology, precipitation,

elevation, distance to roads, distance to drainage networks, and land use was classified into five hazard levels, ensuring comparability across all criteria.

The landslide hazard zonation map produced using the CRITIC model indicates that 5.4, 14.7, 25.8, 22.16, and 13.6 square kilometers of the watershed fall within the very high, high, moderate, low, and very low hazard classes, respectively. These spatial patterns show that the most vulnerable areas are typically located on steep slopes, in lithologically weak zones, and in areas close to drainage channels.

Weighting results reveal that slope (26%), distance from drainage networks (13%), and lithology (11%) are the most influential factors in landslide occurrence. This is consistent with the geomorphological characteristics of the region, where steep gradients and active runoff processes, combined with susceptible rock formations, significantly increase the likelihood of slope failure.

Model validation using the Area Under the ROC Curve (AUC) demonstrates strong predictive performance. The CRITIC-based model achieved AUC values of 0.83 (training dataset) and 0.89 (validation dataset), confirming its reliability and accuracy in identifying landslide-prone areas within the watershed.

## Conclusion

The results of this study indicate that the CRITIC multi-criteria decision-making model is an effective tool for landslide hazard assessment in the Lenbran-Chai Watershed. The analysis confirms that slope, distance from drainage networks, and lithology are the most influential factors controlling landslide occurrence in the region. The final hazard map shows that 6.6%, 18.04%, 31.6%, 27.09%, and 16.64% of the watershed fall within the very high, high, moderate, low, and very low hazard categories, respectively.

The high predictive accuracy of the CRITIC model, demonstrated by robust AUC values, highlights its capability for objective weighting and reliable spatial modeling. The resulting hazard zonation map can support preventive policymaking, optimized land-use planning, and efficient resource allocation in disaster management.

Given these promising results, future research is recommended to integrate the CRITIC model with advanced analytical approaches such as machine learning techniques, ensemble methods, or hybrid decision-making frameworks to further increase the precision and reliability of landslide susceptibility mapping.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۵، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵ ، ص ۹۱-۶۸

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2026.97294.1638 دسترسی آزاد

# ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل CRITIC در حوضه آبریز لنبران چای شهرستان ورزقان

شهرام روستایی[1]*، سید اسدالله حجازی[1]، سید حسین فقیه خلجانی[1]

[1] گروه ژئومورفولوژی، دانشکدهٔ برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

**اطلاعات مقاله**

**تاریخچهٔ مقاله:**

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۴/۱۰/۱۰

**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۵/۰۲/۲۳

**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۵/۰۲/۲۷

**کلمات کلیدی:**

حساسیت زمین‌لغزش

مدل CRITIC

تصمیم‌گیری چندمعیاره

ارزیابی خطر زمین‌لغزش

شمال‌غرب ایران

**چکیده**

تهیهٔ نقشه خطر وقوع زمین‌لغزش از مهم‌ترین ابزارهای مدیریت بحران و برنامه‌ریزی محیطی در حوضه‌های آبریز به شمار می‌رود. حوضهٔ آبریز لنبران‌چای، واقع در ضلع شرقی رودخانه اهرچای، با مساحت ۸۲۲۶ هکتار یکی از مهم‌ترین سرشاخه‌های این رودخانه محسوب می‌شود و به دلیل ویژگی‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی خود، مستعد بروز زمین‌لغزش است. هدف پژوهش حاضر شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی نواحی مستعد در این حوضه است. برای این منظور، مجموعه‌ای از ویژگی‌های طبیعی، انسانی و مورفولوژیکی شامل فاصله از آبراهه، لیتولوژی، نوع خاک، شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، بارش، کاربری اراضی و فاصله از راه‌های ارتباطی به‌عنوان عوامل مؤثر انتخاب شد. سپس با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره CRITIC، وزن نسبی هر یک از عوامل تعیین و بر اساس آن نقشه نهایی خطر تهیه شد. نتایج نشان داد که عامل شیب بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارد و پس از آن فاصله از آبراهه و لیتولوژی در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. همچنین ارزیابی عملکرد مدل CRITIC با استفاده از داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی نشان داد که این مدل با ضرایب ۸۹/۱۳ و ۸۳/۳ به ترتیب، از دقت و کارایی مناسبی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش برخوردار است. یافته‌ها نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند به طور مؤثری در ارزیابی ریسک و برنامه‌ریزی بهینه کاربری اراضی در مناطق حساس به زمین‌لغزش مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

* نویسندهٔ مسئول: شهرام روستایی

Email: roostaei@tabrizu.ac.ir

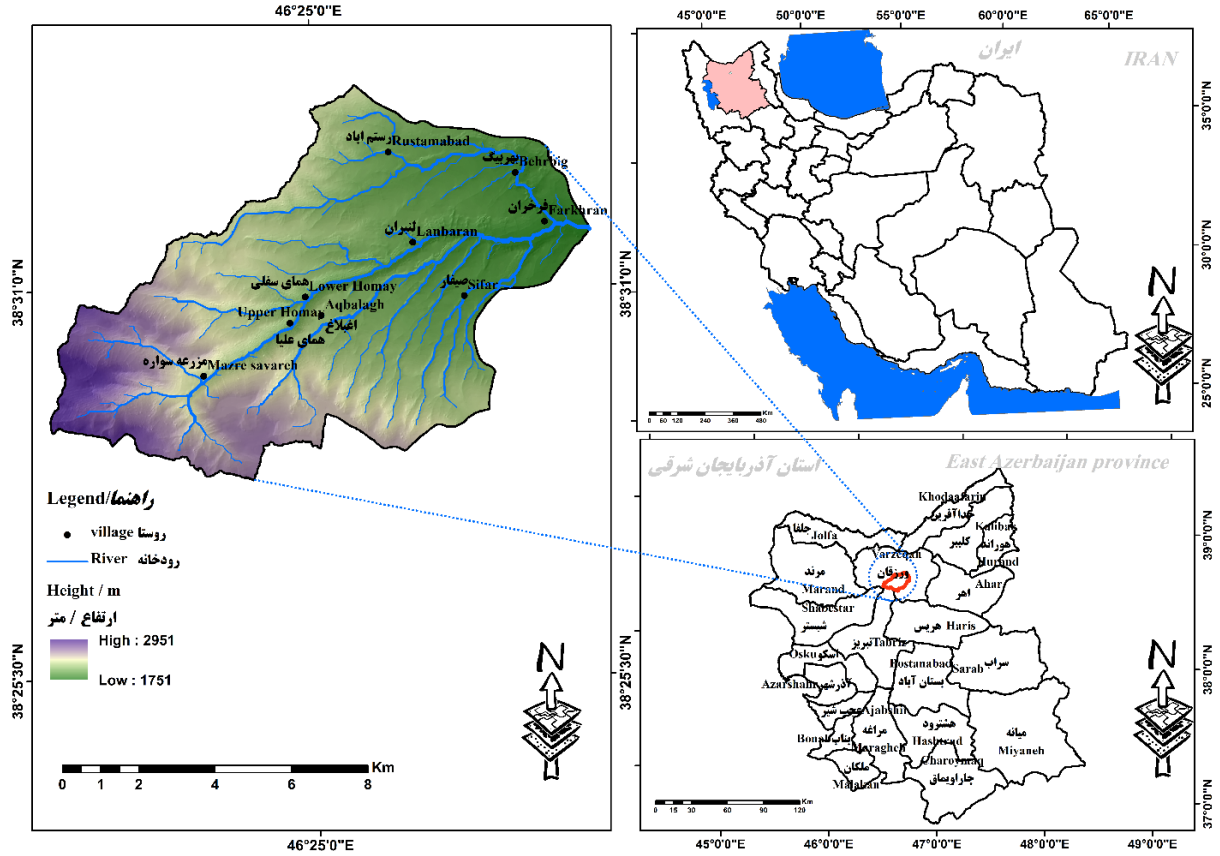
**مقدمه**

زمین‌لغزش یکی از مهم‌ترین فرایندهای ژئومورفیکی مؤثر بر تکامل چشم‌اندازهای طبیعی در سطح زمین است که در بسیاری از مناطق جهان منجر به بروز خسارات گسترده جانی، مالی و زیست‌محیطی شده است (Rostaei, Mokhtari Kashki & Ashrafi Fini, 2020). این پدیده طبیعی نقش مهمی در شکل‌گیری و فرسایش عوارض زمین ایفا می‌کند و پس از زلزله و سیل، به عنوان یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی، بیشترین آسیب را به سازه‌های انسانی و منابع طبیعی وارد می‌سازد (Nojavan & Heydari, 2013; Teymouri Yansari, Hosseinzadeh, Kavian & Pourghasemi, 2018; Zakerinejad, & Kahrani, 2023). در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت و گسترش فعالیت‌های انسانی، به ویژه تخریب جنگل‌ها و مراتع، تغییر کاربری اراضی و توسعه ساخت‌وساز در مناطق حساس، موجب تشدید فراوانی و شدت رخدادهای زمین‌لغزشی شده است (Foley et al., 2005). این مداخلات انسانی نه تنها تعادل اکوسیستم‌های طبیعی را بر هم زده، بلکه آسیب‌پذیری جوامع انسانی در برابر مخاطرات طبیعی را نیز به‌طور چشمگیری افزایش داده است (Kumar, 2008; Tien Bui, Pradhan, Lofman, Revhaug & Dick, 2012). از این رو، ضرورت تدوین راهبردهای کارآمد برای مدیریت سوانح طبیعی و کاهش ریسک زمین‌لغزش‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. مدیریت مؤثر زمین‌لغزش مستلزم شناخت دقیق عوامل مؤثر بر وقوع این پدیده و شناسایی نواحی مستعد آن است. در این راستا، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از کارآمدترین ابزارهای علمی و کاربردی مطرح شده است (Shariat Jafari, 1996; Pourghasemi, Mohammady & Pradhan, 2012; Maten, Bhandary & Yatabe, 2015). در روش پهنه‌بندی، سطح زمین به واحدهای مختلف تقسیم شده و هر واحد بر اساس احتمال یا میزان خطر وقوع زمین‌لغزش رتبه‌بندی می‌شود؛ به طوری که نتایج آن می‌تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی توسعه پایدار، مدیریت منابع طبیعی و کاهش خسارات زیست‌محیطی فراهم آورد (Pradhan & Lee, 2010; Merghadi et al., 2020). با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در زمینه روش‌ها و مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، همچنان چالش‌هایی در زمینه انتخاب روش مناسب، دقت پیش‌بینی و انطباق نتایج با شرایط محلی وجود دارد. بسیاری از مطالعات پیشین یا به یک روش خاص محدود بوده‌اند یا تأثیر هم‌زمان عوامل طبیعی و انسانی را به‌طور جامع مورد بررسی قرار نداده‌اند؛ امری که می‌تواند منجر به کاهش قابلیت اعتماد نقشه‌های پهنه‌بندی شود (Anbalagan, 1992; Pan, Nakamura, Nozaki & Huang, 2008; Bisson, Spinetti & Sulpizio, 2014; Raghuvanshi, Ibrahim & Ayalew, 2014; Girma, Raghuvanshi, Ayenew & Hailemariam, 2015; Entazari & Kordavani, 2022). ایران به دلیل برخورداری از توپوگرافی عمدتاً کوهستانی، فعالیت‌های شدید تکتونیکی و لرزه‌خیزی بالا، و تنوع گسترده شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی، از جمله کشورهای مستعد وقوع زمین‌لغزش به شمار می‌رود. این شرایط در کنار مداخلات انسانی ناآگاهانه، خسارات جانی و مالی قابل‌توجهی را در بسیاری از مناطق کشور به دنبال داشته و لزوم انجام مطالعات دقیق و منطقه‌محور در زمینه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را برجسته می‌سازد (Emadoddin, Salimzadeh & Arekhi, 2022; Zakerinejad & Kehrani, 2023; Pourghasemi, Gayen, Panahi, Rezaie & Blaschke, 2021). در سطح جهانی، پژوهش‌های گسترده‌ای برای شناسایی عوامل کنترل‌کننده و مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش انجام شده و روش‌های گوناگونی از جمله مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش‌های فازی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تحلیل‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور برای این هدف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ژائو و همکاران (Zhao,Yao, Mei, Liu & Ning, 2017) با به‌کارگیری مدل ترکیبی AHP–Fuzzy نشان دادند که این روش در برخی شرایط از دقت پیش‌بینی محدودی برخوردار است و حساسیت بالایی نسبت به قضاوت‌های کارشناسی دارد. مطالعات خان و همکاران (Khan et al., 2019) با استفاده از الگوریتم‌هایی نظیر ماشین بردار پشتیبان و روش آنتروپی در شمال پاکستان نشان دادند که مدل‌های داده‌محور در تحلیل مؤلفه‌های محیطی عملکرد بهتری دارند. همچنین، پژوهش‌های گوش و همکاران (Ghosh et al., 2023) و یکی و همکاران (Yeqi, Yonggang, Guowen & Shengjie, 2024) اثر بخشی مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را تأیید کردند، در حالی که شین و همکاران (Qin et al., 2021) با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای امکان پایش گسترده‌تر و تحلیل دقیق‌تر تغییرات مکانی را فراهم آوردند. مطالعات چن و همکاران (Chen, Chen, Peng,

Panahi & Lee 2021) نیز با استفاده از مدل جنگل تصادفی نشان داد که روش‌های یادگیری ماشین قادر به ارائه دقت پیش‌بینی بالا در محیط‌های ناهمگن هستند. این مجموعه مطالعات، ضمن ارائه رویکردهای متنوع، به محدودیت‌هایی چون اتکا به قضاوت ذهنی، حساسیت به نوع داده‌ها و دشواری ترکیب معیارهای ناهمگون اشاره دارند. در ایران نیز پژوهش‌های متعددی در زمینه ارزیابی خطر زمین‌لغزش و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی انجام شده است که به موتردی از آنها اشاره می گردد. روستایی و کریستینه ( Roostaei & Jananeh, 2019)، با استفاده از مدل سلسله‌مراتبی فازی در محیط GIS و هشت عامل مؤثر، نقشه پتانسیل خطر زمین‌لغزش حوضه بالقلوچای را تهیه کرد و نتایج نشان داد که بیشترین مساحت حوضه در طبقه پتانسیل پایین و کمترین مساحت در طبقه پتانسیل بسیار بالا قرار دارد، به طوری که مناطق با پتانسیل بالا عمدتاً در شمال‌غرب حوضه متمرکز شده‌اند. اصغری و پیروزی (Asghari & Piroozi, 2022)، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی به ارزیابی مقایسه‌ای و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه گیوی‌چای استان اردبیل پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که فاکتورهایی چون شیب، لیتولوژی و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش این منطقه دارند. همچنین بر اساس یافته‌های مدل‌سازی و شاخص صحت‌سنجی ROC، مدل VIKOR با بیشترین دقت، کارایی بالایی در شناسایی مناطق با پتانسیل خطر بالا نشان داده است که می‌تواند راهگشای مدیریت علمی‌تر این مخاطره باشد. براتی و جعفری (Jafari & Barati, 2024)، به تحلیل فضایی نقش لیتولوژی در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه معلم‌کلایه در بخش شرقی الموت پرداختند. نتایج نشان داد که سازندهای کرج، روته، شمشک و رسوبات نئوژن و تخریبی به دلیل فرسایش‌پذیری بالا، بیشترین نقش را در وقوع حرکات دامنه‌ای در منطقه دارند. همچنین مشخص شد در نواحی پایین‌دست رودخانه‌ها به دلیل گستردگی لیتولوژی‌های سست، زمینه وقوع زمین‌لغزش بیشتر است، در حالی‌که در نزدیکی خط‌الرأس‌ها با وجود مقاومت بیشتر سنگ‌ها، به علت شیب زیاد دامنه‌ها و هوازدگی فیزیکی، احتمال وقوع حرکات دامنه‌ای افزایش می‌یابد. اسفندیاری‌درآباد و همکاران ( Esfandiari Darabad, Rostami, Mostafazadeh & Abedini, 2024)، با بهره‌گیری از تئوری کاتاستروف و قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی(GIS) ، به ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز زاگرس کرمانشاه پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که عواملی چون شیب، ارتفاع و تراکم شبکه آبراهه‌ها بیشترین نقش را در وقوع زمین‌لغزش ایفا می‌کنند و نواحی مرکزی و جنوبی حوضه از پتانسیل بالاتری برای بروز این پدیده برخوردارند. دهنوی ئیلاق و پهلوانی (Dehnavi Eylagh & Pahlavani, 2024)، با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره VIKOR و میانگین وزنی مرتب‌شده (OWA) در محیط GIS به ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در شهرستان سوادکوه پرداخته‌اند. در این پژوهش، عوامل مختلفی به‌عنوان متغیرهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که جنس خاک بیشترین تأثیر را در بروز زمین‌لغزش داشته و مقایسه مدل‌ها نیز بیانگر عملکرد بهتر روش OWA در پیش‌بینی مناطق مستعد زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه است. بررسی کلی پیشینه جهانی و داخلی نشان می‌دهد که اگرچه روش‌های متعددی برای ارزیابی خطر زمین‌لغزش توسعه یافته است، اما همچنان چالش‌هایی همچون وابستگی به قضاوت‌های ذهنی، دشواری در ترکیب هم‌زمان معیارهای کمی و کیفی و محدودیت در استخراج وزن‌های عینی برای عوامل محیطی وجود دارد. در این میان، مدل CRITIC به دلیل اتکا به ساختار آماری داده‌ها و قابلیت تعیین وزن معیارها بر اساس میزان تضاد و اطلاعات موجود در داده‌ها، می‌تواند رویکردی عینی‌تر برای وزن‌دهی عوامل مؤثر ارائه دهد. با وجود کاربردهای گسترده این روش در حوزه‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره، استفاده از آن در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در بسیاری از مناطق به‌ویژه در حوضه آبریز لنبران‌چای مورد توجه قرار نگرفته است. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز لنبران‌چای با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره CRITIC و قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی است. نتایج این پژوهش می‌تواند علاوه بر ارائه نقشه‌ای دقیق از مناطق مستعد زمین‌لغزش، اطلاعات ارزشمندی برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی، مدیریت منابع طبیعی و کاهش خسارات ناشی از این پدیده در منطقهٔ مورد مطالعه فراهم کند.

## منطقهٔ مورد مطالعه

زیر حوضه لنبران در سمت ضلع شرقی رودخانه اهرچای واقع شده است. مساحت این حوضه در محدودهٔ مورد مطالعه ۸۲۲۶ هکتار می‌باشد و سرشاخه اصلی رودخانه اهرچای محسوب می‌شود. محدودهٔ مورد مطالعه در بین مختصات جغرافیایی ″۰۷ ′۲۰ °۴۶ تا ″۳۰ ′۲۸ °۳۸ تا ″۵۲ ′۳۳ °۳۸ عرض‌های شمالی قرارگرفته است. این حوضه از نظر تقسیمات کشوری در دهستان سینا از بخش مرکزی شهرستان ورزقان از توابع استان آذربایجان شرقی واقع شده است. شهرستان ورزقان از لحاظ موقعیت جغرافیایی خاص و به دلیل اینکه از نواحی سرسبز جنگل‌های ارسباران به شمار می‌آید، به شهرستان ارسباران معروف بوده است. این حوضه از طرف شمال به اراضی روستای اویلق و ارتفاعات کوه‌های کمرقیه، دیبکلی، کهورداغی، سلمان داغی و نریمان داغی، از سمت جنوب به ارتفاعات قرقی کلگی و از جهت جنوب غربی به ارتفاعات کوه قصبه داغی، از غرب به ارتفاعات کوه آی گرون مزداغ و کوه آی گرمز، از ناحیه شمال غربی به ارتفاعات کوه‌های پیرسقاداغی و قزل آغل و از قسمت شرق به تپه داشتی‌تپه و دهانه خروجی حوضه متصل است. مرتفع‌ترین نقطهٔ حوضه در بخش غربی آن قرار دارد. این قله که به «کوه آی‌گرون مزداغ» شهرت دارد، دارای ارتفاعی معادل ۲۹۵۱ متر از سطح دریا است. پایین‌ترین نقطهٔ حوضه در بخش شرقی و در پایین‌دست روستای فرخران واقع شده و ارتفاع آن به ۱۷۵۱ متر از سطح دریا می‌رسد. همچنین متوسط بارش این حوضه ۳۹۵ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۱).




**شکل ۱**- موقعیت حوضه آبریز لنبران

**Fig. 1.** Location of the Lenbaran Watershed

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور ارزیابی و پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه آبریز لنبران، ابتدا داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز از منابع مختلف گردآوری شد. این داده‌ها شامل نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور، نقشه خاک و نقشه کاربری اراضی با مقیاس ۱:۱۲۵۰۰۰ از سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری استان آذربایجان شرقی، مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر تهیه شده از سازمان نقشه‌برداری کشور و داده‌های بارش ایستگاه‌های ورزقان، اویلق، کمانج و افشرد طی دوره آماری ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۲ بود. برای پردازش داده‌ها و انجام تحلیل‌های فضایی از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. همچنین به منظور استخراج شبکه زهکشی از الحاقیه‌های ArcHydro و ArcSWAT بهره گرفته شد و تحلیل‌های آماری و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار SPSS وExcel انجام گرفت.

### تهیه لایه‌های اطلاعاتی مؤثر در زمین‌لغزش

در این مرحله، با استفاده از داده‌های پایه و قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی، لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز برای تحلیل حساسیت زمین‌لغزش تهیه گردید. بر اساس مبانی نظری و پیشینه پژوهش نه عامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش شامل فاصله از آبراهه، لیتولوژی، نوع خاک، شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، میزان بارش، کاربری اراضی و فاصله از راه‌های ارتباطی به عنوان معیارهای اصلی انتخاب شدند.

برای تهیه لایه فاصله از آبراهه، ابتدا شبکه زهکشی حوضه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و ابزارهای هیدرولوژیکی در محیط ArcHydro و ArcSWAT استخراج شد و سپس نقشه فاصله از آبراهه تولید گردید. لایه‌های شیب، جهت شیب و طبقات ارتفاعی نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی استخراج شدند. لایه‌های لیتولوژی، خاک و کاربری اراضی از نقشه‌های پایه تهیه و در محیط GIS رقومی‌سازی و پردازش شدند. همچنین نقشه فاصله از راه‌های ارتباطی با استفاده از شبکه راه‌های موجود در منطقه و ابزار فاصله در محیط GIS تولید گردید. برای تهیه نقشه بارش نیز از داده‌های ایستگاه‌های بارانسنجی منطقه استفاده و پس از انجام درون‌یابی فضایی، نقشه توزیع بارش منطقه تهیه شد.

### وزن‌دهی معیارها با استفاده از مدل CRITIC

به منظور تعیین میزان اهمیت نسبی هر یک از معیارهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش، از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره CRITIC استفاده شد. این مدل یکی از روش‌های عینی وزن‌دهی معیارها است که بر اساس میزان پراکندگی داده‌ها و شدت همبستگی میان معیارها، وزن هر معیار را تعیین می‌کند. در این راستا، پرسشنامه‌های تخصصی برای مقایسه و ارزیابی معیارها تهیه و در اختیار کارشناسان و اساتید حوزه‌های مرتبط قرار گرفت. در مجموع ۷ پرسشنامه توسط متخصصان تکمیل شد و نتایج حاصل از آن‌ها برای محاسبه وزن نهایی معیارها مورد استفاده قرار گرفت.

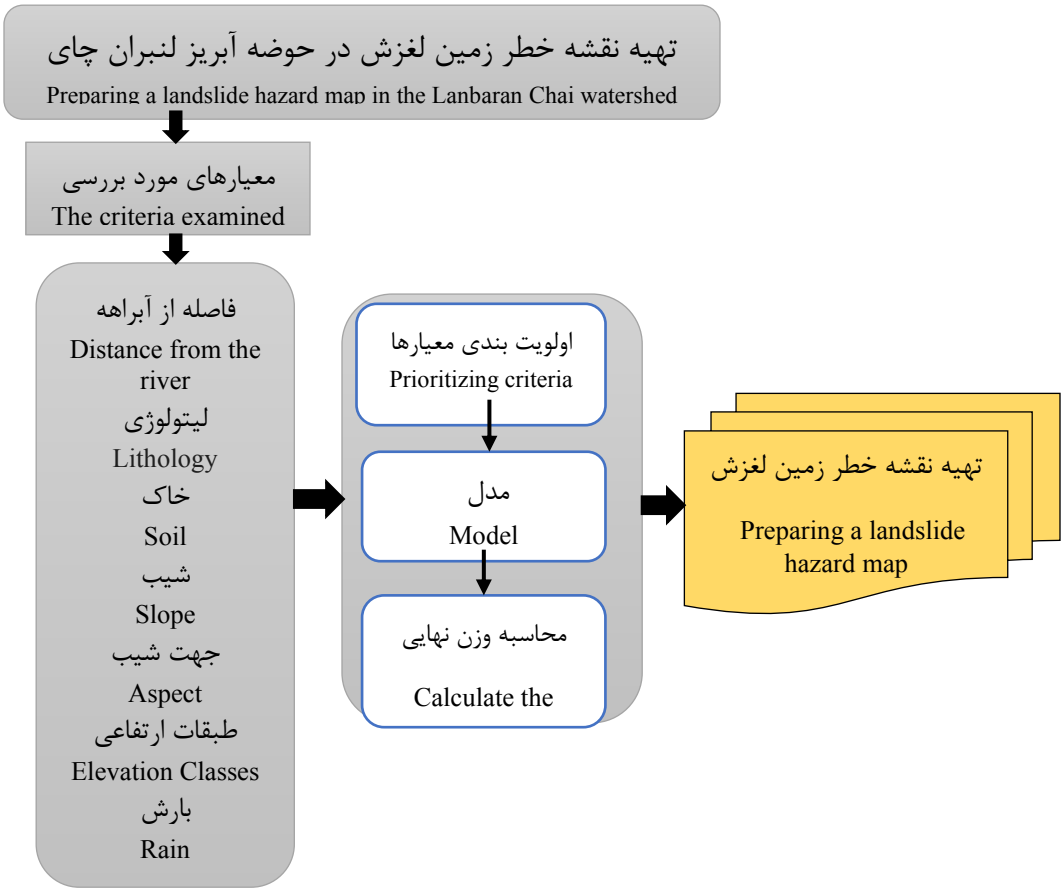
### تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش

در مرحله نهایی، لایه‌های اطلاعاتی تهیه شده پس از طبقه‌بندی و استانداردسازی، بر اساس وزن‌های به دست آمده از مدل CRITIC در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) با یکدیگر تلفیق شدند. در نهایت، نقشه حساسیت زمین‌لغزش حوضه آبریز لنبران تهیه و به چند طبقه حساسیت مختلف تقسیم‌بندی گردید. شکل ۲ فلوچارت مراحل انجام پژوهش و فرآیند تهیهٔ نقشه ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل CRITIC را نشان می‌دهد.

### مدل CRITIC

این روش توسط زلینی برای تعیین وزن معیارها ارائه شده است. در روش CRITIC، نظر کارشناسان دخالتی ندارد و همین ویژگی یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های آن محسوب می‌شود (Kazan & Ozdemir, 2014). در این روش، داده‌ها بر اساس میزان تداخل و تضاد

بین عوامل یا معیارها تجزیه و تحلیل می‌شوند. این شیوه پردازش باعث می‌شود نقش هر عامل در نتیجه نهایی محاسبات به درستی اعمال گردد. برای هر معیار در روشCRITIC ، دامنه‌ای از تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده در میان گزینه‌ها وجود دارد که در قالب یک تابع عضویت بیان می‌شوند.




**شکل۲**- فلوچارت مراحل تهیه نقشه پتانسیل خطر زمین لغزش

**Fig. 2.** Flowchart of steps for preparing a landslide hazard potential map

**مفروضات مدل CRITIC**

- میزان انحراف معیار در رابطه با هر یک از عامل‌ها نشان از میزان همگنی یا ناهمگنی می باشد. بنابراین انحراف معیار هرچقدر پایین‌تر باشد می تواند در تنزل وزن، دخیل باشد.
- هر اندازه که همبستگی مثبت بین معیارها با هم بیشتر باشد، به همان نسبت تغییرات یک معیار به عنوان معرف، بر تغییرات معیار دیگر توجیه پذیر خواهد بود.

**مراحل مدل CRITIC**

- اولین گام در این روش تشکیل ماتریس تصمیم است ماتریس تصمیم این روش همانند ماتریس تصمیم روش‌هایی چون آنتروپی شانون، تاپسیس می‌باشد. در این روش مثبت و منفی بودن معیارها در تعیین وزن دخیل نیست.
- گام دوم در این روش نرمال سازی ماتریس تصمیم است. برای نرمال سازی از رابطه (۱) استفاده می‌شود. با استفاده از این رابطه ماتریس تصمیم نرمال شده و کلیه درایه‌های آن در بازه صفر تا ۱ قرار می‌گیرند

(۱)

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}}$$

- در گام سوم وزن معیارها تعیین می‌شود در فرآیند تعیین وزن معیارها، انحراف معیار هر شاخص و همبستگی آن با معیارهای دیگر گنجانده شده است. در این رابطه (۲)، وزن j امین معیار wj نامیده می‌شود.

(۲)

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{i=0}^{m} C_i}$$

که در آن $W_j$ معرف وزن معیار j و $C_i$ معرف میزان اطلاعات مجموع معیارهای k است که از k=1 شروع شده و تا k=m ادامه دارد $C_j$ . مقدار اطلاعات استخراج شده از معیار j است که از رابطه (۳) به دست می‌آید.

(۳)

$$C_j = \delta_j \sum_{i=1}^{m} (1 - r_{ij})$$

با توجه به روابط فوق، معیارهایی که دارای $C_j$ بیشتری باشند وزن زیادی به خود اختصاص خواهند داد. همچنین در رابطه بالا $\sigma_j$ انحراف معیار j امین معیار است و $r_{ij}$ همبستگی بین دو معیار i و j می‌باشد. بر اساس تحلیل فوق، می‌توان نتیجه گرفت که ارزش بالاتری از Cj مقدار بیشتری از اطلاعات را از معیار داده شده ارائه می‌دهد بنابراین اهمیت نسبی معیار برای یک مسئله تصمیم‌گیری مورد توجه بیشتری است.

**ایجاد مجموعه داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی**

در این مرحله، برای ایجاد مجموعه داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی، از طریق بازدیدهای میدانی، و بهره‌گیری از امکانات نرم‌افزاری Google Earth و بازبینی اسناد و مدارک موجود در آرشیو اداره کل منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی مناطق درگیر با خطر لغزش (۹۶ نقطه) و مناطق بدون لغزش (۹۶ نقطه) تهیه شده و وارد پایگاه داده در محیط نرم‌افزار Arc map شد (شکل ۱۲). سپس از این مجموعه داده‌ها، ۷۰ درصد برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی نتایج استفاده شد. به منظور بررسی و ارزیابی عملکرد مدل استفاده شده در تحقیق، از سه شاخص آماریSpecificity، Sensitivity و Accuracy برای داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی استفاده شد. برای محاسبه این شاخص‌ها از رابطه‌های (۴) تا (۶) استفاده شد ( Rezaei Moghadam, Behboodi & Asl Mohammadi; 2025)

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP+FN} \quad (۴)$$

$$Specificity = \frac{TN}{FP+TN} \quad (۵)$$

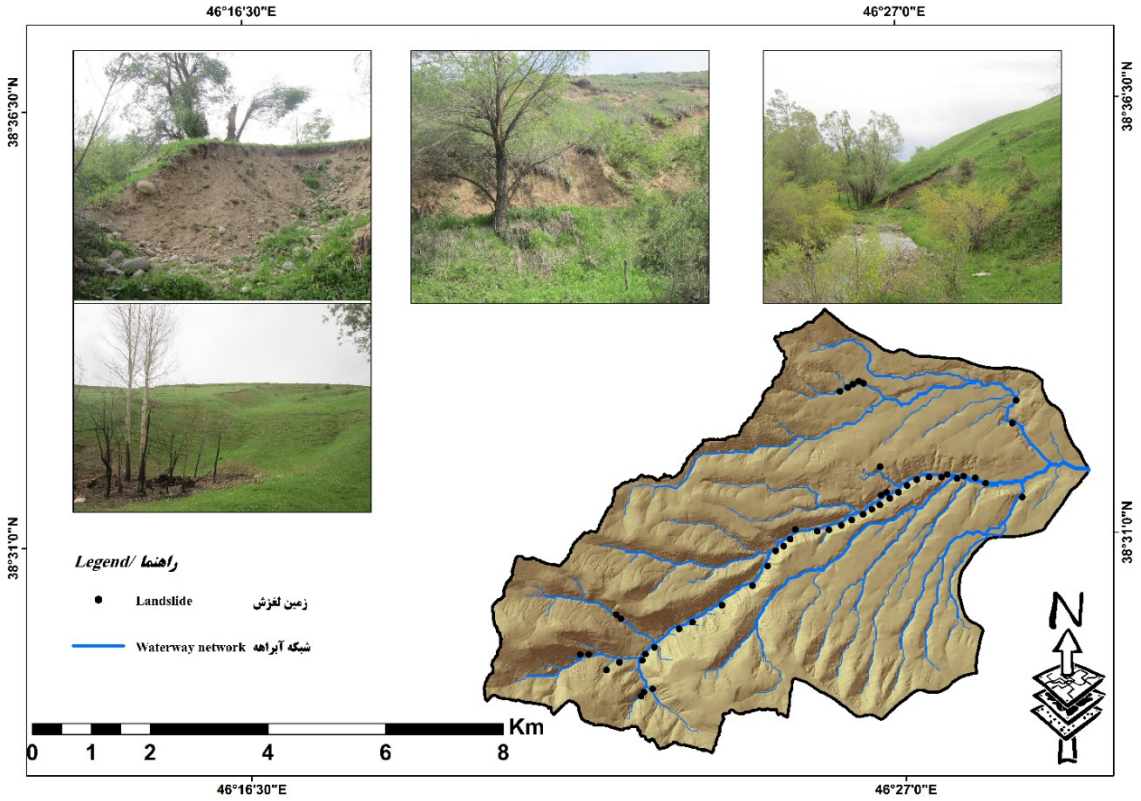
$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+FN+FP+FN} \quad (۶)$$

که در آن TN تعداد مناطق بدون سیل که درست تشخیص داده شده‌اند؛ FP تعداد نقاط سیل که اشتباه تشخیص داده شده‌اند؛ TP تعداد نقاط سیل که درست تشخیص داده شده‌اند؛ و FN تعداد نقاط بدون سیل که اشتباه تشخیص داده شده‌اند.

## نتایج و بحث

**توزیع زمین لغزش ها در سطح حوضه**

شناسایی دقیق الگوی مکانی مناطق دارای پتانسیل وقوع زمین‌لغزش، به عنوان یکی از ارکان اساسی در مطالعات مدیریت و کاهش مخاطرات به شمار می‌رود. در این فرآیند، سیاهه‌های زمین‌لغزش، داده‌های کلیدی را برای تحلیل، ارزیابی و مدیریت این پدیده فراهم می‌سازند. از این رو، به‌روزرسانی مداوم داده‌های میدانی و اتخاذ رویکردهای تحلیلی پیشرفته، تأثیر مستقیمی بر افزایش صحت نقشه‌های پهنه‌بندی و بهینه‌سازی برنامه‌های کاهش خطر خواهد داشت. بنابراین به منظور بررسی و ثبت لغزش‌های رخداده در حوضه آبریز لنبران، از یک رویکرد تلفیقی استفاده گردید. پس از شناسایی موقعیت لغزش‌ها، مختصات دقیق آن‌ها توسط گیرنده GPS برداشت و سپس داده‌ها به‌منظور پردازش و تحلیل‌های مکانی به نرم‌افزار ArcGIS انتقال یافت. خروجی این فرآیند، تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های حوضه بود (شکل ۳).




**شکل ۳**- توزیع مکانی زمین لغزش‌های ثبت شده در محدوده حوضه آبریز لنبران چای

**Fig. 3.** Spatial distribution of recorded landslides in the Lenbaran-Chay watershed

**لیتولوژی:** نقشه واحدهای لیتولوژی حوضه آبریز لنبران، بر مبنای نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تبریز و سیه‌رود، منتشر شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور، تدوین و رقومی‌سازی گردید (شکل ۴). بر اساس نقشه لیتولوژی، حوضهٔ مورد مطالعه عمدتاً از سه واحد سنگی اصلی تشکیل شده است. سازند غالب، Plc (کنگلومرا، سیلت و مارن) است که ۴۹/۳ درصد از مساحت منطقه را پوشش می‌دهد. پس از آن، سازند Plv (عمدتاً توف‌های اسیدی) با ۲۴/۶ درصد و سازند Qtv (سنگ‌های آذرآواری و بازالت) که بیشتر در ارتفاعات حوضه برون‌زد دارند، با ۱۹/۸ درصد قرار گرفته‌اند. تحلیل هم‌پوشانی نقشه پراکنش لغزش‌ها و لیتولوژی، یافته‌ای کلیدی را آشکار می‌سازد: علی‌رغم آنکه سازندهای جوان تنها ۵/۳ درصد از سطح حوضه را به خود اختصاص داده‌اند، بیشترین تراکم رخداد زمین‌لغزش در محدوده همین سازندها مشاهده می‌شود. این عدم تناسب میان گستره محدود و فراوانی بالای لغزش، نشان‌دهنده

حساسیت بالای این واحدها به ناپایداری است. می‌توان استنباط نمود که ویژگی‌های خاص زمین‌شناختی و ژئومکانیکی (مانند نفوذپذیری پایین، مقاومت برشی کم یا هوازدگی شدید) در این سازندها، آن‌ها را به کانون‌های اصلی مخاطرات ژئومورفولوژیکی در منطقه تبدیل کرده است.

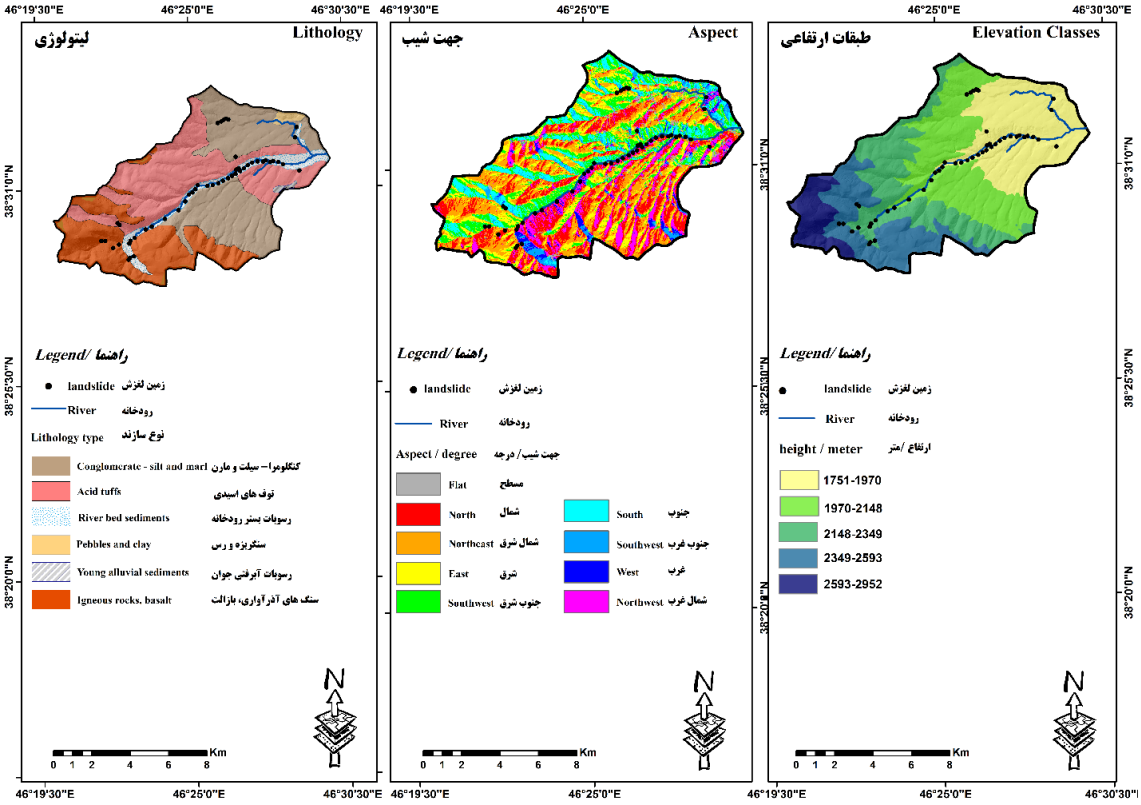
**جهت شیب:** جهت شیب به عنوان یک متغیر ژئومورفومتریک اساسی، از طریق کنترل میزان دریافت انرژی خورشیدی و توزیع بارش، بر فرآیندهای دامنه‌ای تأثیر می‌گذارد. وجود ارتباط معنادار میان جهت شیب و ناپایداری‌های دامنه‌ای در مطالعات متعدد تأیید شده است. به طور معمول، دامنه‌های شمالی به دلیل رطوبت بالاتر و تبخیر کمتر، و دامنه‌های جنوبی به دلیل خشکی نسبی، حساسیت متفاوتی به لغزش نشان می‌دهند آیالو و یاماگیشی (Ayalew & Yamagishi, 2005). تحلیل الگوی پراکنش زمین‌لغزش‌ها در ارتباط با جهت شیب در حوضه لنبران (شکل ۴) نشان می‌دهد که هر چند لغزش‌ها در تمامی جهات رخ داده‌اند، اما توزیع آن‌ها غیر یکنواخت است. بیشترین تراکم لغزش به‌طور مشخص در دامنه‌های دارای امتداد شمال‌غربی و شرقی متمرکز شده است. این امر می‌تواند به دلیل شرایط اقلیمی محلی، نظیر قرارگیری در معرض سیستم‌های بارشی غالب یا دریافت تابش کمتر و در نتیجه حفظ رطوبت بیشتر خاک در این دامنه‌ها باشد که منجر به کاهش مقاومت برشی و افزایش پتانسیل لغزش می‌گردد. در تضاد کامل، نواحی مسطح و کم‌شیب، کمترین میزان درگیری با پدیده لغزش را نشان می‌دهند.

**ارتفاع:** عامل ارتفاع به عنوان یک متغیر کنترل‌کننده اساسی، فرآیندهای هیدرومورفولوژیک، شدت فرسایش و الگوهای کاربری اراضی و مداخلات انسانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو، این متغیر به طور گسترده به عنوان یک عامل پیش‌بینی‌کننده در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش به کار گرفته شده است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که ارتباط میان ارتفاع و وقوع لغزش، معمولاً یک رابطه غیرخطی است. اغلب، بیشترین فراوانی رخداد لغزش در زون‌های ارتفاعی متوسط متمرکز می‌شود، در حالی که ارتفاعات بسیار پست به دلیل شیب کم و ارتفاعات بسیار بالا اغلب به دلیل تسلط سنگ‌های سخت و مقاوم پایداری نسبی بیشتری دارند. رایشنباخ و همکاران (Reichenbach, Rossi, Malamud, Guzzetti & Mihir, 2018). بررسی مدل رقومی ارتفاع حوضه لنبران (شکل ۴) نشان‌دهنده اختلاف ارتفاع توپوگرافیک قابل توجهی است. ارتفاع در این حوضه از ۱۷۵۱ متر در محل خروجی تا ۲۹۵۱ متر در مرتفع‌ترین بخش متغیر است. توزیع هیپسومتریک حوضه نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از مساحت ۲۷/۰۹ درصد در طبقه ارتفاعی ۱۹۷۰ تا ۲۱۴۸ متر متمرکز است. در ارتباط با پراکنش لغزش‌ها، نتایج حاکی از آن است که رخدادها محدود به یک طبقه خاص نبوده و در تمامی زون‌های ارتفاعی تعریف شده در سطح حوضه، مشاهده می‌شود.

**کاربری اراضی:** نتایج تحلیل فضایی نقشه کاربری اراضی، وابستگی شدید الگوهای کشت به ژئومورفولوژی منطقه را آشکار می‌سازد. به دلیل توپوگرافی دره‌ای و بستر عمیق رودخانه، کاربری‌های نیازمند آب دائم (کشت آبی و باغات) به تراس‌های آبرفتی و حاشیه بلافصل رودخانه محدود شده‌اند. در مقابل، کاربری غالب در سطح حوضه، اراضی دیم است که بیشترین گستره را به خود اختصاص می‌دهد. علی‌رغم گستره وسیع اراضی دیم، بیشترین فراوانی و تراکم لغزش‌ها به طور مشخص در محدوده کاربری‌های کشت آبی و باغات متمرکز شده است (شکل ۵). این همبستگی قوی نشان می‌دهد که فعالیت‌های مرتبط با این نوع کاربری‌ها، به عنوان عامل تشدید کننده عمل می‌کند. عواملی چون اشباع مداوم خاک ناشی از آبیاری، تغییر در رژیم هیدرولوژی زیرسطحی، و اصلاحات مهندسی در دامنه‌ها (مانند تراس‌بندی برای باغات) به احتمال زیاد منجر به کاهش مقاومت برشی مصالح و افزایش چشمگیر پتانسیل ناپایداری در این نواحی خاص شده است.

**خاک:** نتایج تحلیل نقشه خاک‌شناسی نشان داد که خاک‌های رسی لومی واحد خاکی غالب در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. تحلیل هم‌پوشانی این لایه با نقشه پراکنش لغزش‌ها، یک همبستگی فضایی بسیار قوی و معنادار را آشکار ساخت (شکل ۵). نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی و تراکم رخدادهای لغزش، دقیقاً در گسترهٔ همین خاک‌های رسی لومی ثبت شده است.

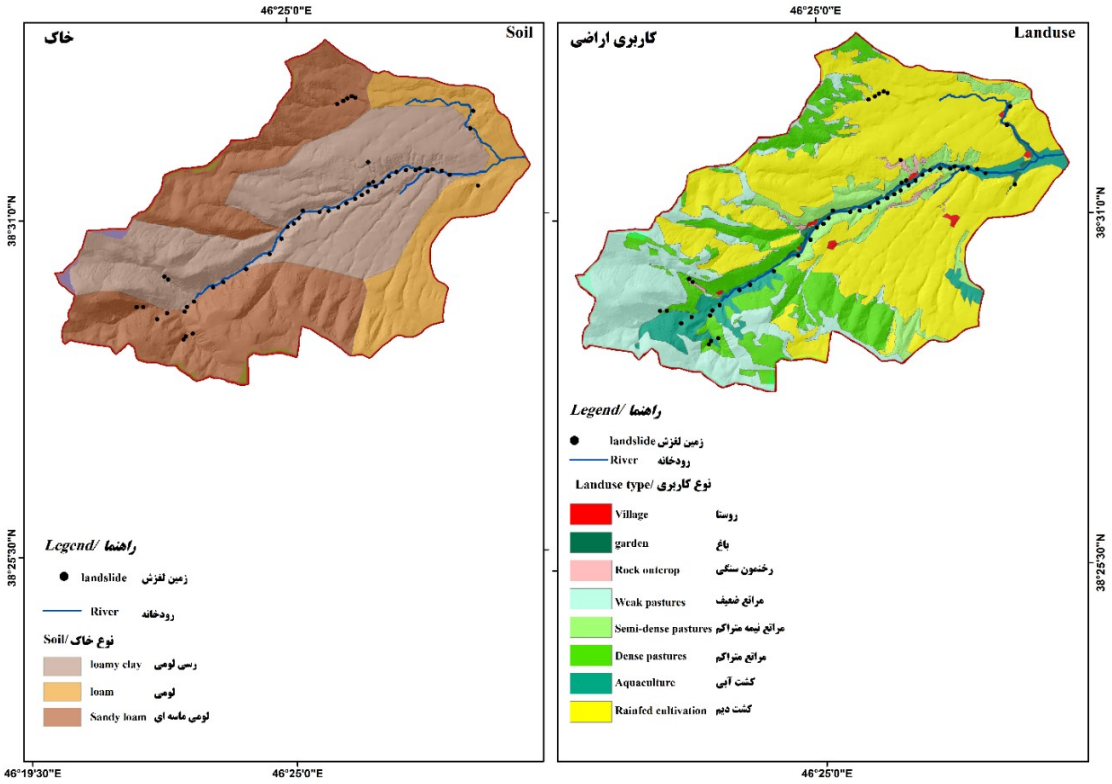
این پدیده از منظر ژئوتکنیک قابل تبیین است: خاک‌های با بافت رسی- لومی، به دلیل دارا بودن نسبت بالای رس، در هنگام اشباع شدن تمایل به کاهش نفوذپذیری و افزایش فشار آب منفذی دارند. این فرآیند مستقیماً منجر به کاهش مقاومت برشی مصالح شده و حساسیت دامنه‌ها را به ناپایداری به شدت افزایش می‌دهد. بنابراین، گستردگی این واحد خاکی، یکی از عوامل اصلی کنترل‌کننده زمین‌لغزش در حوضه به شمار می‌رود.




**شکل ۴**- نقشه لیتولوژی، جهت شیب و طبقات ارتفاعی حوضه آبریز لنبران

**Fig. 4.** Lithology, aspect, and elevation maps of the Lenbaran watershed

**شیب:** مورفولوژی و درجه شیب دامنه، نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری دامنه‌ها ایفا می‌کنند. به طور معمول، با افزایش شیب، نیروی محرک ثقل افزایش یافته و پتانسیل ناپایداری بیشتر می‌شود؛ اما مطالعات نشان داده‌اند که در شیب‌های بسیار تند (اغلب فراتر از ۴۰ یا ۵۰ درجه)، فراوانی زمین‌لغزش‌های خاکی کاهش می‌یابد. لی و مین (Lee & Min, 2001). در حوضه آبریز لنبران نیز در نواحی شیب‌دار، لغزش‌های متعددی مشاهده می‌شود. این لغزش‌ها بیشتر در دامنه‌های مشرف به رودخانه رخ می‌دهند و عمدتاً در طبقات شیبی بیش از ۴۰ درجه قرار دارند. این وضعیت را می‌توان به فرسایش کناره‌ای رودخانه و برداشت تدریجی مواد از پای دامنه نسبت داد که موجب تضعیف تکیه‌گاه دامنه، افزایش ناپایداری و در نهایت تشدید وقوع زمین‌لغزش در این نواحی می‌شود. نقشه شیب منطقه در پنج کلاس طبقه‌بندی شده است (شکل ۶). بیشترین مساحت حوضه در کلاس شیب ۰ تا ۱۵ درصد قرار گرفته که حدود ۳۴/۲۸ کیلومتر مربع از مساحت کل منطقه را شامل می‌شود.




**شکل ۵**- نقشه کاربری اراضی و خاک حوضه آبریز لنبران

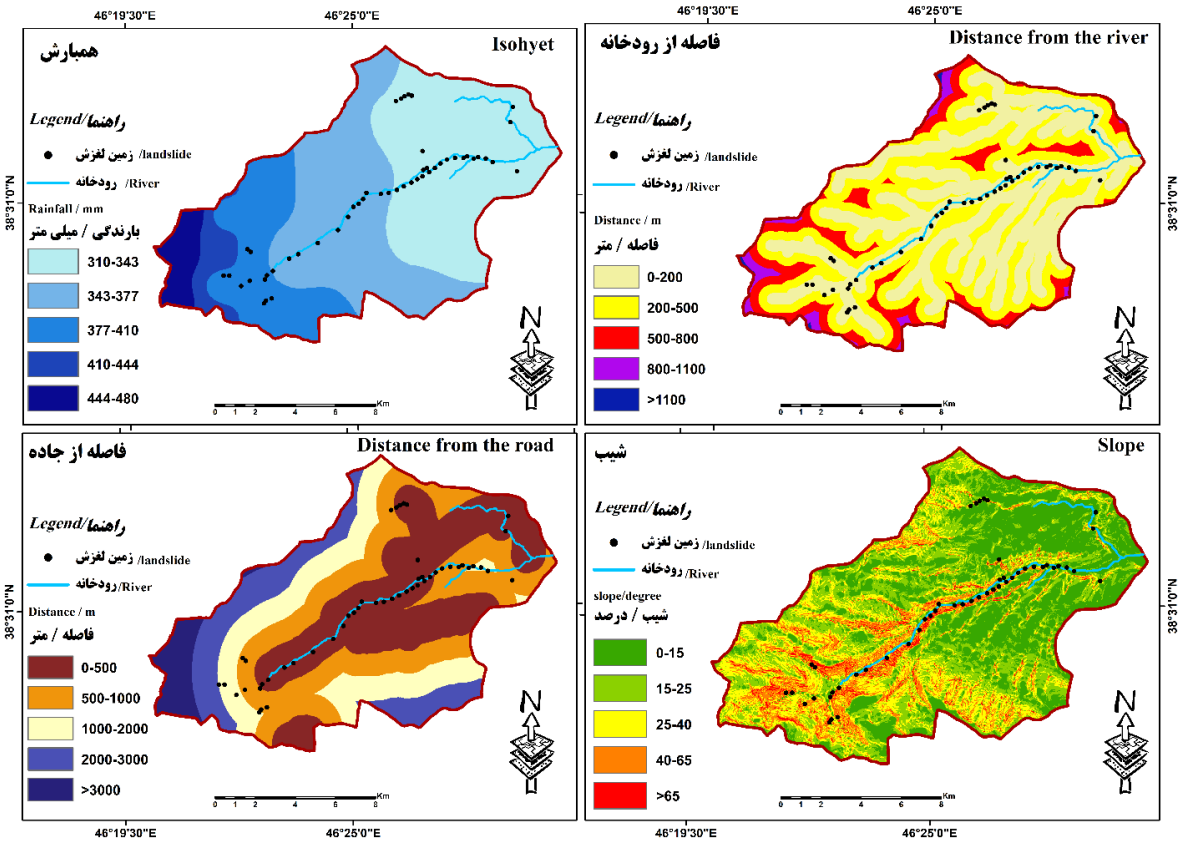
**Fig. 5.** Land use and soil maps of the Lenbaran watershed

**فاصله از آبراهه:** شبکه آبراهه‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل ژئومورفولوژیک، تأثیر دوگانه‌ای بر پایداری دامنه‌ها دارد. از یک سو با افزایش فشار آب منفذی در پای دامنه‌ها و از سوی دیگر از طریق فرآیند مکانیکی زیربری و حذف تکیه‌گاه شیب، شرایط لغزش را تسهیل می‌کند. در این پژوهش، جهت ارزیابی این پارامتر، ابتدا شبکه هیدروگرافی حوضه لنبران‌چای با استفاده از مدل رقومی ارتفاع در بستر سامانه اطلاعات جغرافیایی استخراج شد. سپس به منظور بررسی شعاع تأثیرگذاری رودخانه، لایه استاندارد فاصله از آبراهه تهیه و طبقه‌بندی گردید (شکل ۶). بررسی همبستگی مکانی میان شبکه زهکشی و پراکنش لغزش‌ها نشان‌دهنده تمرکز بالای ناپایداری‌ها در حاشیه رودخانه‌هاست. داده‌های آماری حاکی از آن است که بیشترین فراوانی رخدادها در کلاس فاصله‌ای ۲۰۰-۰ متری واقع شده‌اند. مشاهدات میدانی و (شکل ۳) تأیید می‌کند که فرسایش جانبی فعال رودخانه لنبران‌چای، عامل اصلی این ناپایداری‌هاست. جریان رودخانه با اصلاح مداوم دیواره‌ها و تغییرات مورفولوژیکی بستر، منجر به ناپایداری پنجه دامنه‌ها شده و لغزش‌های حاشیه‌ای را تشدید نموده است.

**فاصله از جاده:** احداث جاده‌ها یکی از اصلی‌ترین مداخلات انسانی در محیط‌های کوهستانی است که از طریق مکانیزم‌های چندگانه بر پایداری شیب اثر می‌گذارد. اولاً، تغییر هندسه دامنه از طریق خاکبرداری و خاکریزی، موجب تغییر در توزیع تنش‌ها و کاهش ضریب اطمینان پایداری می‌شود. ثانیاً، ایجاد سطوح نفوذناپذیر جاده‌ای، الگوهای هیدرولوژیکی طبیعی را مختل کرده و با متمرکز کردن رواناب‌ها و هدایت آن‌ها به نقاط آسیب‌پذیر، موجب اشباع خاک و افزایش فشار آب منفذی می‌گردد. در حوضه آبریز لنبران‌چای، نقش عامل فاصله از جاده در وقوع زمین‌لغزش‌ها بسیار برجسته است. توپوگرافی خشن و کوهستانی منطقه موجب شده تا احداث

جاده‌ها نیازمند ترانشه‌برداری‌های عمیق باشد که خود منجر به ایجاد شکاف‌های تنشی و ناپایداری‌های محلی شده است. تحلیل فضایی لغزش‌ها (شکل ۶) نشان‌دهنده یک همبستگی معنادار میان شبکه راه‌ها و رخداد لغزش است. داده‌ها حاکی از آن است که بیشترین فراوانی زمین‌لغزش‌ها در طبقه ۰ تا ۱۰۰۰ متری از جاده‌ها متمرکز شده است. این تمرکز بالا نشان می‌دهد که جاده‌ها نه تنها به صورت مکانیکی، بلکه به صورت هیدرولوژیکی به عنوان عامل تحریک‌کننده اصلی در این محدوده عمل کرده‌اند.

**بارندگی:** با افزایش مقدار آب نفوذ کرده در خاک بر اثر بارندگی، میزان ناپایداری دامنه بیشتر می‌شود. افزایش فشار آب در شکاف‌ها و درزهای موجود در دامنه نیز می‌تواند موجب سست شدن و در نهایت ریزش بخش‌های ناپایدار و بروز زمین‌لغزش گردد. برای بررسی الگوی بارش، نقشهٔ هم‌بارش با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های ورزقان، اویلق، کمانج و افشرد در محدوده و اطراف حوضه، و بر پایه روش درون‌یابی IDW تهیه شد (شکل ۶). بر اساس این نقشه، بیشترین میزان بارندگی با حدود ۴۸۰ میلی‌متر در بخش‌های بالادست حوضه و کمترین مقدار با حدود ۳۱۰ میلی‌متر در ناحیه خروجی حوضه ثبت شده است.



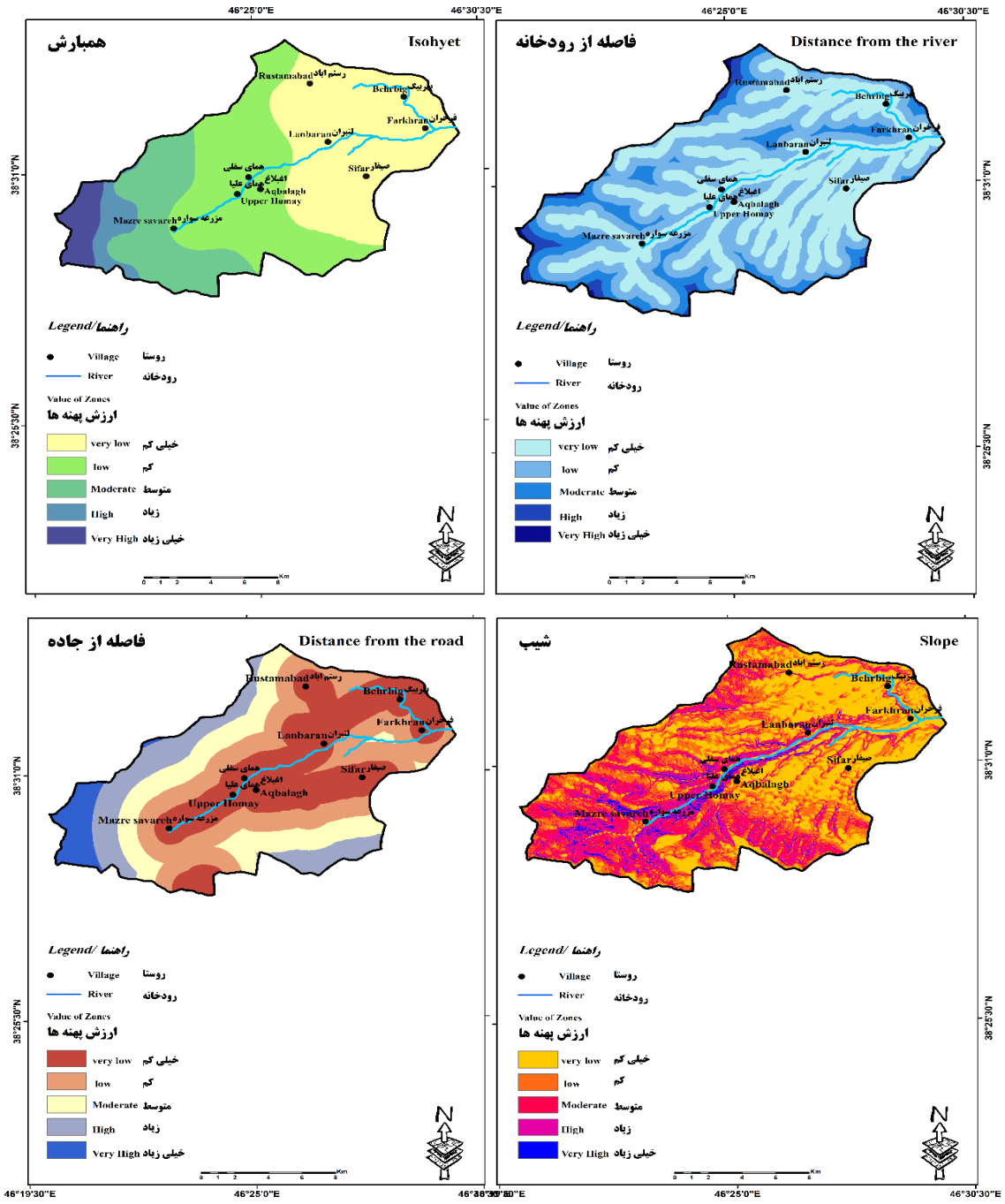

**شکل ۶** – نقشهٔ بارندگی، فاصله از رودخانه، جاده و شیب حوضه آبریز لنبران

**Fig. 6.** Map of rainfall, distance from river, road and slope of the Lenbaran watershed

### استانداردسازی نقشه‌های معیار

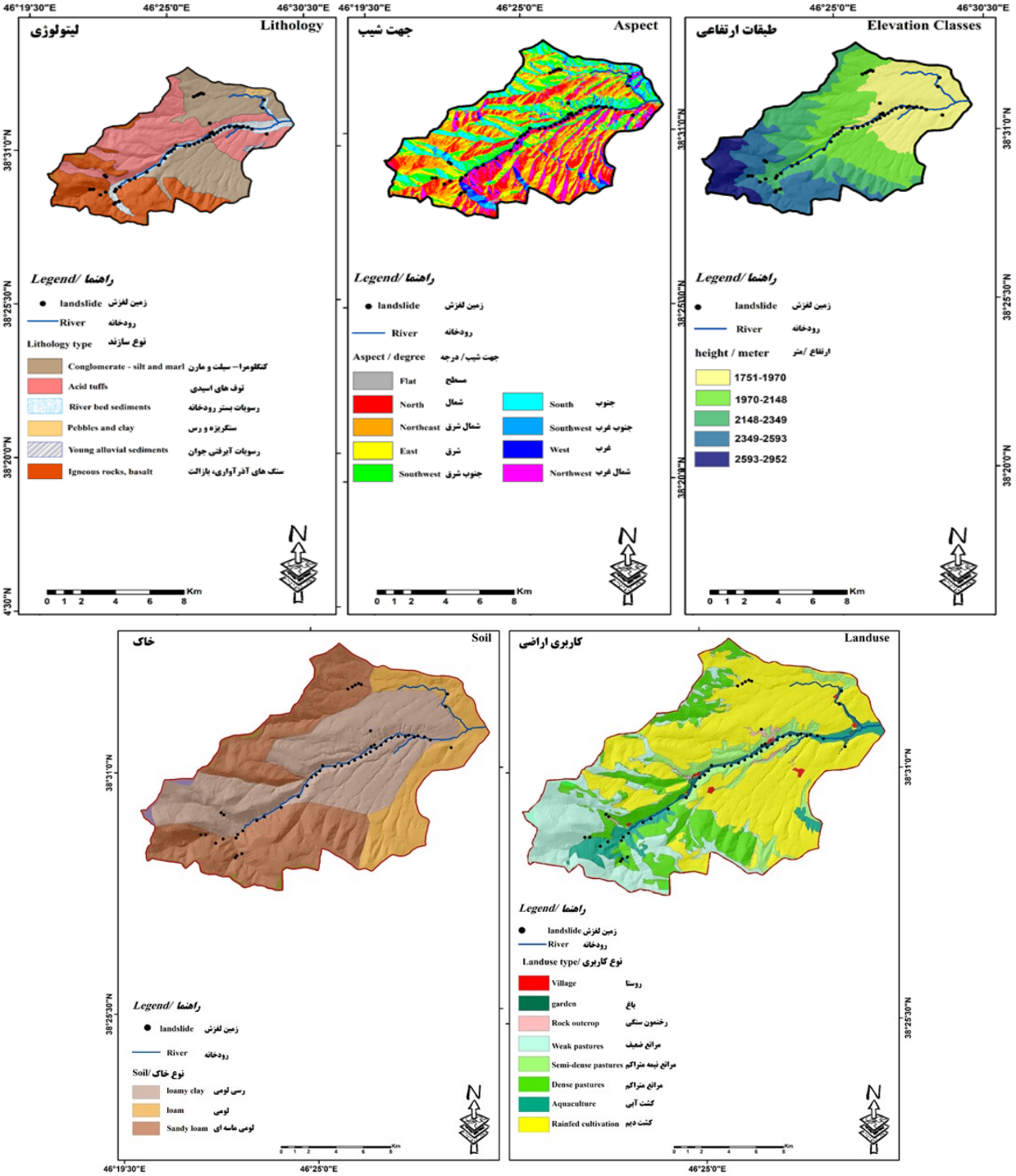
به منظور یکسان‌سازی مقیاس معیارهای مورد استفاده در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، از روش استانداردسازی گسسته مبتنی بر طبقه‌بندی رتبه‌ای استفاده شد. در این روش، مقادیر خام هر یک از معیارهای مؤثر شامل شیب، جهت شیب، لیتولوژی، بارش، ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه و کاربری اراضی، بر اساس میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر وقوع زمین‌لغزش به پنج طبقه حساسیتی تفکیک گردیدند.

به این ترتیب، دامنه تغییرات هر معیار به سطوح خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم شده و به ترتیب مقادیر ۱ تا ۵ به آن‌ها اختصاص یافت، به گونه‌ای که کلاس‌های با حساسیت بیشتر به زمین‌لغزش، امتیاز بالاتری دریافت نمودند. این فرآیند منجر به تبدیل داده‌های ناهمگن اولیه به یک مقیاس ترتیبی مشترک گردید. در نهایت، پیاده‌سازی این فرآیند با استفاده از دستور Reclassifyدر محیط نرم‌افزار Arc map انجام شد تا امکان ادغام لایه‌ها و اعمال اوزان استخراج‌شده از مدل CRITIC فراهم گردد (شکل ۷ و ۸).




**شکل ۷**– نقشهٔ استاندارد شده بارندگی، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده و شیب حوضه آبریز لنبران

**Fig. 7.** Standardized maps of rainfall, distance to rivers, distance to roads, and slope gradient for the Lenbaran watershed




**شکل ۸**– نقشه استاندارد شده لیتولوژی، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، خاک و کاربری اراضی حوضه آبریز لنبران

**Fig. 8.** Standardized map of lithology, Aspect, elevation, soil and land use of the Lenbaran watershed

برای اجرای مدل CRITIC، نخستین گام پس از تعیین معیارهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش، تشکیل ماتریس تصمیم است (جدول ۱). ساختار ماتریس تصمیم در این روش مشابه روش‌هایی نظیر آنتروپی شانون و تاپسیس می‌باشد. نکتهٔ حائز اهمیت آن است که در مدلCRITIC، مثبت یا منفی بودن معیارها در فرآیند تعیین وزن معیارها نقشی نداشته و صرفاً روابط آماری میان معیارها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مرحلهٔ دوم نرمال سازی ماتریس تصمیم صورت می‌گیرد. برای نرمال سازی از رابطه ای که در فصل مواد و روش اشاره گردید استفاده می شود. با استفاده از این رابطه ماتریس تصمیم نرمال شده و کلیه درایه‌های آن در بازه صفر تا ۱ قرار می‌گیرند (جدول ۲).

**جدول ۱**- ماتریس تصمیم برای اجرای مدل CRITIC

**Table 1-** Decision matrix for implementing the CRITIC model

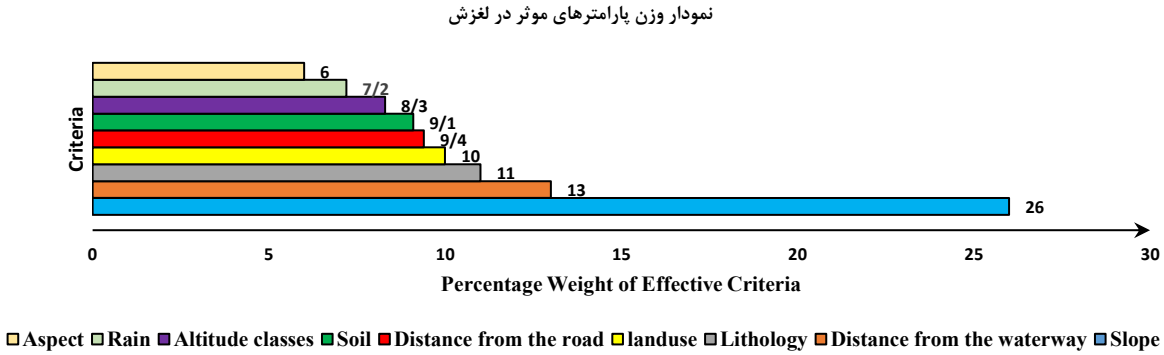
| ماتریس تصمیم Decision Matrix | شیب Slope | جهت شیب Aspect | طبقات ارتفاعی Altitude classes | لیتولوژی Lithology | فاصله از آبراهه Distance from the waterway | فاصله از جاده Distance from the Road | کاربری اراضی landuse | خاک Soil | بارش Rain |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| زیر حوضه ۱ Sub-basin 1 | 3 | 1 | 2 | 4 | 3 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| زیر حوضه ۲ Sub-basin 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| زیر حوضه ۳ Sub-basin 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 3 | 4 | 4 | 3 |
| زیر حوضه ۴ Sub-basin 4 | 5 | 2 | 3 | 5 | 5 | 3 | 4 | 4 | 3 |
| زیر حوضه ۵ Sub-basin 4 | 5 | 2 | 3 | 5 | 5 | 2 | 2 | 4 | 3 |

**جدول ۲**- ماتریس نرمال برای اجرای مدل CRITIC

**Table 2-** Normal matrix for running the CRITIC model

| ماتریس تصمیم Decision Matrix | شیب Slope | جهت شیب Aspect | طبقات ارتفاعی Altitude classes | لیتولوژی Lithology | فاصله از آبراهه Distance from the waterway | فاصله از جاده Distance from the road | کاربری اراضی landuse | خاک Soil | بارش Rain |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| زیر حوضه ۱ Sub-basin 1 | 0.33 | 0 | 0.5 | 1 | 0.33 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| زیر حوضه ۲ Sub-basin 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 |
| زیر حوضه ۳ Sub-basin 3 | 0.33 | 1 | 1 | 0.5 | 1 | 0.5 | 0 | 1 | 1 |
| زیر حوضه ۴ Sub-basin 4 | 1 | 1 | 1 | 1.5 | 1 | 0.5 | 1 | 1 | 1 |
| زیر حوضه ۵ Sub-basin 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |

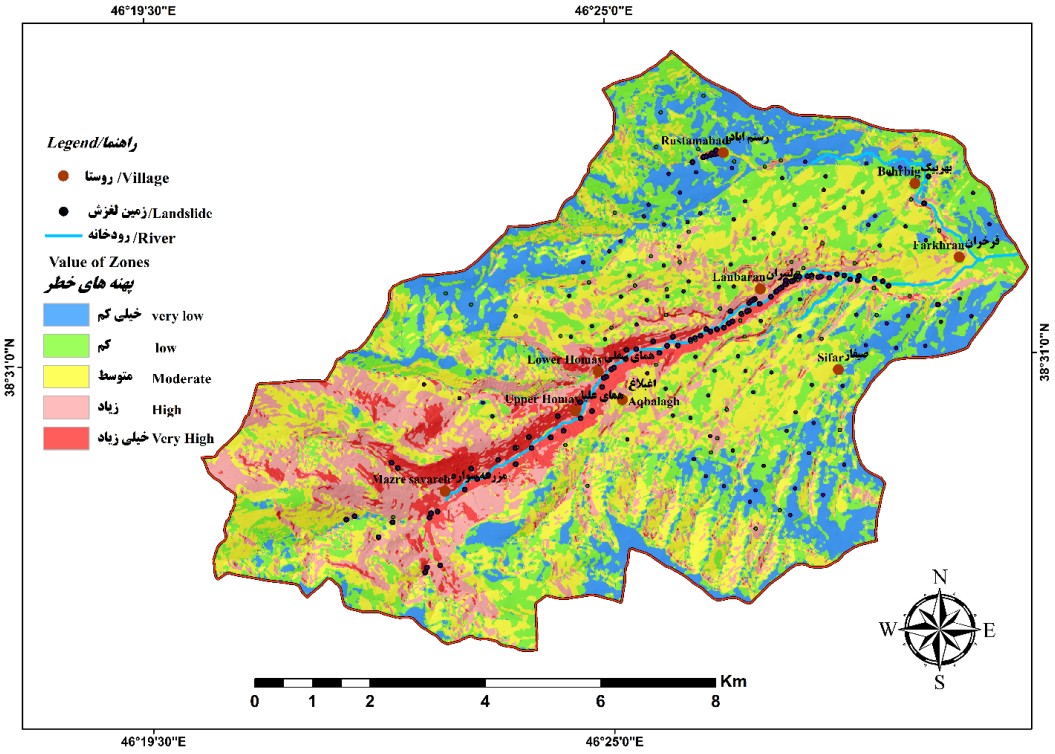
در مرحلهٔ سوم، وزن معیارها تعیین می‌گردد. در این فرآیند، انحراف معیار هر شاخص به همراه میزان همبستگی آن با سایر معیارها در یک رابطه ریاضی قرار داده می‌شود و بر اساس آن وزن نهایی هر معیار محاسبه می‌شود (شکل ۹).




**شکل ۹**- وزن نهایی معیارهای اصلی بر اساس مدل CRITIC

**Fig. 9.** Final weight of the main criteria based on the CRITIC model

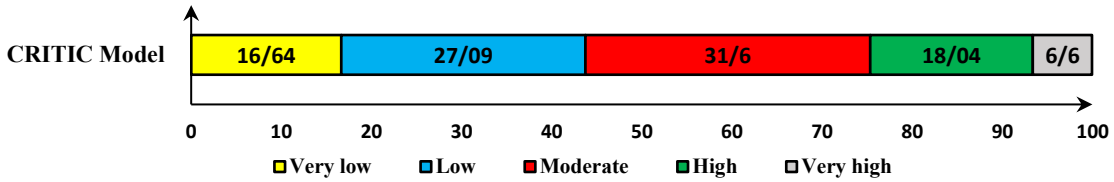
پس از مشخص نمودن وزن های معیارهای مؤثر در زمین لغزش حوضه آبریز لنبران با استفاده از مدل CRITIC این اوزان در محیط نرم افزار Arc map بر لایه‌های مورد نظر اعمال گردید و نقشه نهایی تهیه شد (شکل ۱۰).




**شکل ۱۰**- نقشهٔ پهنه بندی زمین لغزش حوضه آبریز لنبران چای با استفاده از مدل CRITIC

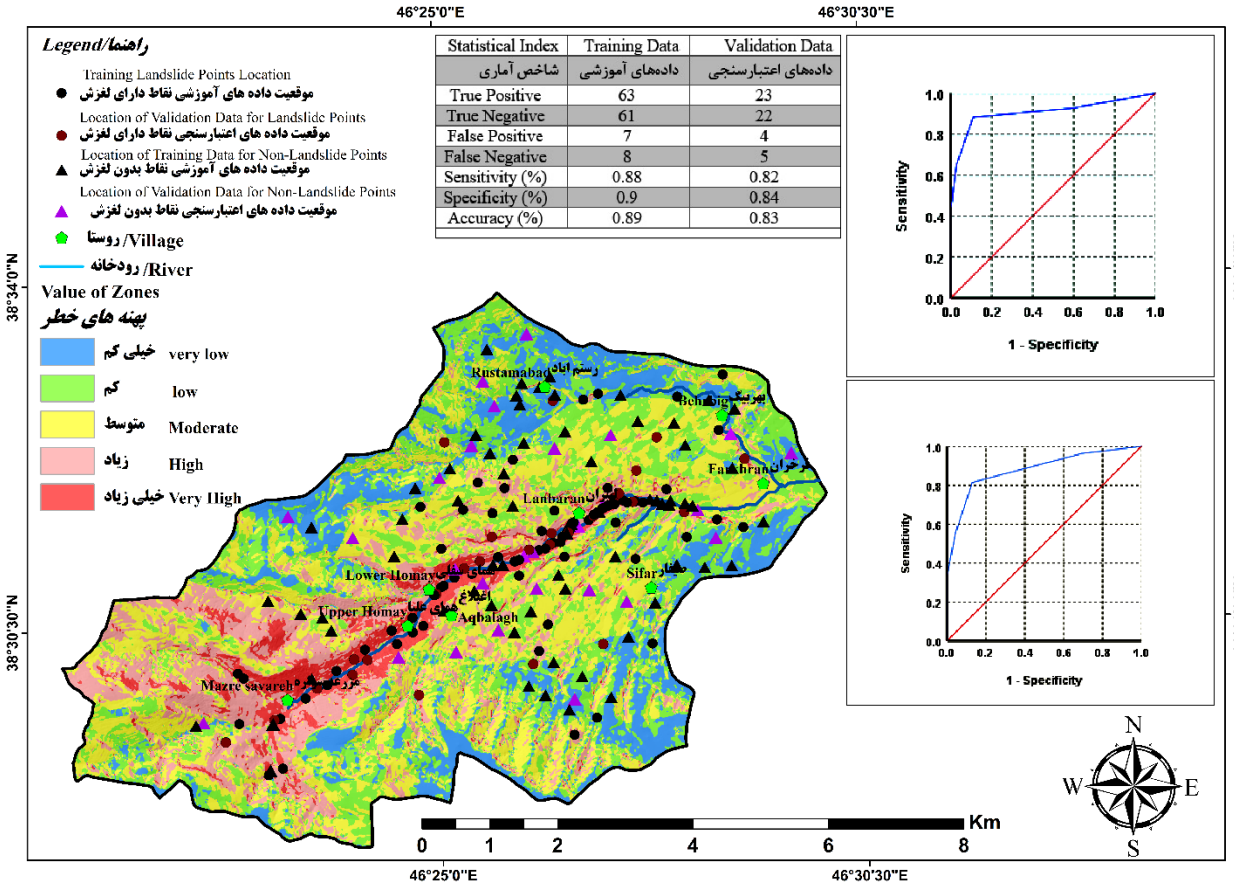
**Fig. 10.** Landslide zoning map of the Lanban Chay watershed using the CRITIC model

با بررسی نقشهٔ پهنه بندی با استفاده از مدل CRITIC مشاهده می شود که ۵/۴، ۱۴/۷، ۲۵/۸، ۲۲/۱۶ و ۱۳/۶ کیلومتر مربع از مساحت منطقهٔ مورد مطالعه به ترتیب در پهنه‌های خطر خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم قرار دارند (شکل ۱۱). بررسی توزیع فضایی این پهنه‌ها نشان می‌دهد که نواحی با خطر خیلی زیاد و زیاد عمدتاً در مجاورت آبراهه‌ی اصلی متمرکز شده‌اند، که بیانگر تأثیر چشمگیر عوامل هیدروژئومورفولوژیکی در بروز ناپایداری‌های شیب در منطقه است. همچنین، نتایج حاصل از بازدید میدانی انجام‌شده تطابق قابل‌توجهی با یافته‌های مدل‌سازی دارد و به خوبی صحت و دقت مدل CRITIC در تحلیل خطر زمین‌لغزش را تأیید می‌کند.




**شکل ۱۱**- نمودار درصد مساحت پهنه های خطر زمین لغزش در حوضه آبریز لنبران چای

**Fig. 11.** Percentage chart of landslide hazard areas in the Lanbaran Chay watershed




**شکل ۱۲**- نقشهٔ موقعیت داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی و نتایج عملکرد مدل CRITIC

**Fig. 12.** Map of the location of training, validation data, and the performance results of the CRITIC model

به منظور سنجش میزان دقت نقشه نهایی پهنه‌بندی زمین‌لغزش در حوضه آبریز لنبران‌چای، از منحنی ROC و محاسبه سطح زیر منحنی در محیط نرم‌افزار Spss استفاده شد (شکل ۱۲). سطح زیر منحنی ROC که به اختصار AUC نامیده می‌شود. بیانگر توانایی یک مدل برای پیش‌بینی پیکسل‌های لغزش و بدون لغزش می‌باشد. منحنیROC بازنمایی گرافیکی از موازنه میان نرخ مثبت صحیح و نرخ مثبت کاذب در سطوح مختلف آستانه‌های احتمالی است. سطح زیر منحنی ROC شاخصی برای سنجش توانایی مدل در تفکیک پیکسل‌های لغزشی و غیرلغزشی به شمار می‌رود. سطوح مختلف ناحیه زیر منحنی به صورت طبقه‌بندی شده به شرح زیر تعریف می‌گردند: مقدار ۰/۹۱ و بالاتر به عنوان عالی، بازۀ ۰/۸۹ تا ۰/۸ به عنوان بسیار خوب، مقادیر بین ۰/۸ تا ۰/۷در سطح خوب، دامنۀ ۰/۷ تا ۰/۶ در سطح متوسط، و مقادیر بین ۰/۶ تا ۰/۵ به عنوان ضعیف در نظر گرفته می‌شوند (Nandi & Shakur, 2010; Madadi & Pirouzi, 2023). منحنی ROC برای دو نوع داده‌های آموزشی و اعتبار سنجی ترسیم شد. نتایج نشان داد که در مورد داده‌های آموزشی، مدل CRITIC با سطح زیر منحنی برابر با ۸۹/۱ درصد از دقت خوبی برخوردار است. برای داده‌های اعتبار سنجی نیز این مقدار برابر با ۸۳/۳ درصد است که نشان‌دهندۀ عملکرد خوب این مدل در تهیه نقشه پهنه بندی زمین لغزش است.

## نتیجه‌گیری

شناسایی نواحی مستعد خطر، به ویژه در ارتباط با پدیده‌های ژئومورفولوژیکی همچون زمین‌لغزش، از ارکان بنیادین مدیریت بحران و برنامه‌ریزی محیطی به شمار می‌رود. پیش‌بینی و پیشگیری از این مخاطرات طبیعی مستلزم تحلیل دقیق و نظام‌مند شرایط محیطی و انسانی منطقه است. در همین راستا، پژوهش حاضر با هدف شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش در حوضه آبریز لنبران‌چای واقع در شهرستان ورزقان انجام پذیرفت. بدین منظور، ۹ شاخص کلیدی مؤثر در بروز زمین‌لغزش شامل شیب، جهت شیب، لیتولوژی، بارش، ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه و کاربری اراضی مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین اهمیت نسبی هر یک از این شاخص‌ها، از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره CRITIC بهره‌گیری شد. نتایج وزن دهی معیارهای اصلی نشان می‌دهد که معیار شیب، فاصله از آبراهه و لیتولوژی به ترتیب با ضریب ۲۶، ۱۳ و ۱۱ درصد بیشترین اهمیت را نسبت به سایر معیارها دارند. این نتایج با یافته‌های مددی و پیروزی (Madadi & Piroozi, 2023)، آقایاری و همکاران (Aghayari, Asghari Saraskanroud & Zeinali, 2024)، اصغری سراسکانرود و پیروزی (Asghari Sarascanrud & Piroozi, 2022) و ذاکرنژاد و عموشاهی (Zakernejad & Amooshahi, 2022) مطابقت می‌کند. زیرا محققین مذکور نیز در مطالعات خود به تأثیر بیشتر معیارهای شیب، فاصله از رودخانه و لیتولوژی اشاره کرده‌اند. بررسی نقشه پهنه بندی با استفاده از مدل CRITIC نشان می‌دهد که ۶/۶، ۱۸/۰۴، ۳۱/۶، ۲۷/۰۹ و ۱۶/۶۴ درصد از مساحت منطقۀ مورد مطالعه به ترتیب در پهنه‌های خطر خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم قرار دارند. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که مدل CRITIC با دستیابی به مقادیر سطح زیر منحنی (AUC) برابر با ۰/۸۹ برای داده‌های آموزشی و ۰/۸۳ برای داده‌های اعتبارسنجی، از دقت و توان پیش‌بینی بالایی در تهیه نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش برخوردار است. بر اساس یافته‌ها، این مدل به عنوان ابزاری کارآمد در تحلیل و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش مطرح می‌شود. دقت بالای مدل در شناسایی پهنه‌های پرخطر می‌تواند نقش مؤثری در سیاست‌گذاری‌های پیشگیرانه، مدیریت کاربری اراضی و تخصیص بهینه منابع در حوزه مدیریت بحران ایفا نماید. با توجه به نتایج به دست آمده، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی از ترکیب مدل CRITIC با سایر مدل‌ها بهره گرفته شود تا دقت نقشه‌های خطر زمین‌لغزش ارتقاء یابد.

## References

Aghayari, L., Asghari Saraskanroud, S., & Zeinali, B. (2024). Identification and zonation of landslide-prone areas in Germi County. *Hydrogeomorphology, 11*(39), 1–18. [in Persian] https://doi.org/10.22034/hyd.2024.58703.1709

Anbalagan, R. (1992). Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology, 32*(4), 269–277.

Asghari Saraskanroud, S., & Piroozi, E. (2022). Landslide hazard zoning in the upstream basin of Yamchi Dam, Ardabil Province using MARCOS and CODAS multi-criteria decision methods. *Quantitative Geomorphological Research, 12*(1), 73–94. [in Persian]

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*(1–2), 15–31. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010

Bisson, M., Spinetti, C., & Sulpizio, R. (2014). Volcaniclastic flow hazard zonation in the Sub-Apennine Vesuvian area using GIS and remote sensing. *Geosphere, 10*(6), 1419–1431. https://doi.org/10.1130/GES01037.1

Chen, W., Chen, X., Peng, J., Panahi, M., & Lee, S. (2021). Landslide susceptibility modeling based on ANFIS with teaching-learning-based optimization and Satin bowerbird optimizer. *Geoscience Frontiers, 12*(1), 93–107. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.06.001

Dehnawi Eilaq, M., & Pahlavani, P. (2024). Landslide susceptibility assessment using VIKOR and ordered weighted averaging models: A case study of Savadkooh County. *Physical Geography Research Quarterly, 56*(1), 41–59. [in Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2024.366517.1007792

Emadoddin, S., Salimzadeh, F., & Arekhi, S. (2022). Landslide hazard assessment in the Khanian-Tonakabon watershed using analytic hierarchy process and analytic network process models. *Geographical Engineering of Territory, 6*(2), 411–427.

Entezari, M., & Kordavani, M. (2022). Landslide hazard zonation using GIS-based and radar data methods: A case study of Feridunshahr. *Natural Environmental Hazards, 11*(33), 177–196. [in Persian] https://doi.org/10.22111/jneh.2022.38660.1810

Esfandiyari, F., Rostami, Q., Mostafazadeh, R., & Abedini, M. (2024). Spatial evaluation and landslide hazard zonation of Zamkan watershed using support vector machine and logistic regression. *Hydrogeomorphology, 11*(40), 123–142. [in Persian] https://doi: 10.22034/hyd.2024.61467.1737

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., ... & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science, 309(*5734*),* 570–574. https://doi.org/10.1126/science.1111772

Ghosh, S., Bhowmik, C., Sinha, S., Raut, R. D., Mandal, M. C., & Ray, A. (2023). An integrated multi-criteria decision-making and multivariate analysis towards sustainable procurement with application in automotive industry. *Supply Chain Analytics, 3,* 100033. https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100033

Girma, F., Raghuvanshi, T. K., Ayenew, T., & Hailemariam, T. (2015). Landslide hazard zonation in Ada Berga District, Central Ethiopia: A GIS-based statistical approach. *Journal of Geomatics, 9*(1), 25–38.

Jafari, G. H., & Barati, Z. (2024). Spatial analysis of lithology in the occurrence of landslides in the East Almut watershed: A case study of Moallem-Kalaieh watershed. *Hydrogeomorphology, 11*(40), 124–142. [in Persian] https://doi.org/10.22034/hyd.2024.61470.1738

Kazan, H., & Ozdemir, O. (2014). Financial performance assessment of large-scale conglomerates via TOPSIS and CRITIC methods. *International Journal of Management and Sustainability***,** ***3***(4), 203–224.

Khan, H., Shafique, M., Khan, M. A., Bacha, M. A., Shah, S. U., & Calligaris, C. (2019). Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio: A case study of northern Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 22*(1), 11–24. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.03.006

Kumar Dahal, R. (2008). Predictive modeling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology, 102*(3–4), 496–510. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.008

Lee, S., & Min, K. (2001). Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology, 40*(9), 1095–1113. https://doi.org/10.1007/s002540100310

Madadi, A., & Piroozi, E. (2023). Landslide hazard zoning in the upstream basin of Yamchi Dam, Ardabil Province using MARCOS and CODAS multi-criteria decision methods. *Quantitative Geomorphological Research, 12*(1), 73–94. [in Persian] https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.370812.1390

Maten, M., Bhandary, N. P., & Yatabe, R. (2015). Effect of landslide factor combinations on the prediction accuracy of landslide susceptibility maps in the Blue Nile Gorge of Central Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters, 2*. https://doi.org/10.1186/s40677-015-0016-2

Merghadi, A., Yunus, A. P., Dou, J., Whiteley, J., ThaiPham, B., Bui, D. T., … & Abderrahmane, B. (2020). Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance. *Earth-Science Reviews, 207*, 103225. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103225

Nandi, A., & Shakoor, A. (2010). A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology, 110*(1–2), 11–20. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.10.001

Nojavan, M. R., & Heydari, G. R. (2013). Landslide hazard zonation of Siahkhor watershed, Eslamabad-e Gharb using analytic hierarchy process (AHP). *Territory Geography, 10*(38), 81–92. [in Persian]

Pan, X., Nakamura, H., Nozaki, T., & Huang, X. (2008). A GIS-based landslide hazard assessment by multivariate analysis. *Landslides, 5*(3), 187–195. https://doi.org/10.1007/s10346-008-0122-5

Pourghasemi, H. R., Gayen, A., Panahi, M., Rezaie, F., & Blaschke, T. (2021). Multi-hazard probability assessment and mapping in Iran incorporating anthropogenic factors using GIS-based spatial multicriteria evaluation. *Environmental Science and Pollution Research, 28*(45), 63245–63261. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14789-2

Pourghasemi, H. R., Mohammady, M., & Pradhan, B. (2012). Landslide susceptibility mapping using an index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. Catena, *97*, 71–84. https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.05.005

Pradhan, B., & Lee, S. (2010). Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: Backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling & Software, 25*(6), 747–759. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.10.016

Qin, S., Guo, X., Sun, J., Qiao, S., Zhang, L., Yao, J., ... & Zhang, Y. (2021). Landslide detection from open satellite imagery using distant domain transfer learning. *Remote Sensing, 13*(17), 3383. https://doi.org/10.3390/rs13173383

Raghuvanshi, T. K., Ibrahim, J., & Ayalew, D. (2014). Slope stability susceptibility evaluation parameter (SSEP) rating scheme—An approach for landslide hazard zonation. *Journal of African Earth Sciences*, *99*, 595–612. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.05.004

Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Guzzetti, F., & Mihir, M. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews, 180*, 60–91. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001

Rezaei Moghadam, M. H., Behboodi, A., & Asl Mohammadi, L. (2025). Flood hazard assessment and zonation using the MFFPI model in the Sarand-Chay Watershed, East Azerbaijan. *Environmental Erosion Research Journal*, *15*(60), 44–65. [in Persian]

Rostaei, S., & Jananeh, K. (2019). Landslide hazard zonation of Balaghlu-Chay watershed, Ardabil using fuzzy analytic hierarchy process. *Geography and Planning, 23*(70), 169–188. [in Persian] https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_10309.html

Rostaei, S., Mokhtari Kashki, D., & Ashrafi Fini, Z. (2020). Landslide hazard zonation in Taleghan watershed using Shannon entropy index. *Geography and Planning, 24*(71), 125–150. [in Persian] https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/m/article_10631.html

Shariat Jafari, H. (1996). *Landslide: Principles of natural slope stability*. Sazeh Publications.

Teymouri Yansari, Z., Hosseinzadeh, S. R., Kavian, A., & Pourghasemi, H. R. (2018). Modeling and estimation of landslide volume based on area in Chahardangeh watershed (Mazandaran Province). *Geographical Space Planning, 8*(30), 79–94. [in Persian] https://doi.org/10.30488/gps.2019.85833

Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., & Dick, O. B. (2012). Landslide susceptibility mapping at Hoa Binh province (Vietnam) using an adaptive neuro-fuzzy inference system and GIS. *Computers & Geosciences, 45*, 199– 211. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.03.023

Yeqi, Z., Yonggang, G., Guowen, W., & Shengjie, W. (2024). Evaluation of landslides susceptibility in Southeastern Tibet considering seismic sensitivity. *Heliyon, 10*(18), e37429. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37429

Zakerinejad, R., & Amooshahi, N. (2022). Landslide hazard assessment using remote sensing data and Maximum Entropy model: Case study Komeh watershed, south Isfahan. *Quantitative Geomorphological Research, 11*(2), 128–149. [in Persian] https://doi.org/10.22111/jneh.2023.42304.1904

Zakerinejad, R., & Kahrani, A. (2023). Evaluation and comparison of CART and TreeNet models for preparing landslide susceptibility maps using SPM software and geographic information system (GIS): A case study of Komeh watershed, south of Isfahan Province. *Natural Environmental Hazards, 12(37),* 17–38. https://doi.org/10.22111/jneh.2023.42304.1904

Zhao, H., Yao, L., Mei, G., Liu, T., & Ning, Y. (2017). A fuzzy comprehensive evaluation method based on AHP and entropy for a landslide susceptibility map. *Entropy, 19*(8), Article 396. https://doi.org/10.3390/e19080396