



Analysis of the Role of Morphotectonic Processes on the Potential Risk of Slope instability in the Shaharchay River Basin of Urmia

Fariba Hemmati ^{1*}, Saber Seyed Ahmadi ², Akram Alizadeh ³

¹Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran

²M.c. , Technical and Soil Mechanics Laboratory, Maku, Iran

³Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 04 June 2025

Revised: 30 July 2025

Accepted: 05 August 2025

Available Online: 06 August 2025

Keywords:

Landslide Susceptibility

Slope Instability

Geomorphological Factors

Logistic Regression Modeling

Active Fault

Landslide Hazard Zonation

ABSTRACT

This study was conducted to analyze the effects of active tectonic processes on geomorphological features and assess the potential for slope instability occurrences within the Shaharchay River Basin of Urmia. To achieve this objective, an integrated approach was employed, utilizing morphotectonic indices (such as hierarchical stream anomaly, anomaly density, and bifurcation ratio), logistic regression statistical modeling, and analysis of remote sensing data and field data. The results from the logistic regression model (with an ROC accuracy of 0.922) indicate that approximately 43.13% of recorded instabilities in areas characterized by semi-resistant to resistant lithologies are located within less than 1 km from active faults. Furthermore, 87.25% of these instabilities occurred within 3 km of rivers, and occurred within 2 km of roads 90%, typically in areas with sparse or inadequate vegetation cover. The analysis of landslide hazard zonation reveals that the highest hazard is concentrated in elevations ranging 1268 and 2000 m and on south-facing slopes. The findings highlight the significant role of active tectonics, slope gradient, and human infrastructure (such as roads) in intensifying slope instability processes. Consequently, adopting an integrated approach to risk management, restoring natural vegetation cover, and implementing land-use restrictions in high-risk areas are deemed essential.

* Corresponding author: Dr. Fariba Hemmati

E-mail address: F.Hemmati@cfu.ac.ir

How to cite this article: Hemmati, F., Seyed Ahmadi, S., & Alizadeh, A. (2025). Analysis of the Role of Morphotectonic Processes on the Potential Risk of Slope instability in the Shaharchay River Basin of Urmia. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 18-37. <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.93808.1578>



©2025 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

Landslide hazards and slope instabilities rank among the most devastating geomorphological natural hazards, inflicting significant human, economic, and environmental losses on a global scale each year. Iran, situated within the tectonically active Alpine-Himalayan belt, is especially prone to these hazards due to its rugged mountainous terrain, seasonal heavy rainfall, and complex geological framework. This study focuses on the Shahrchay River Basin in Urmia, northwestern Iran, a region characterized by intense tectonic activity and diverse geomorphological features that amplify the risk of slope failures. The historical backdrop reveals that landslides in Iran, particularly in mountainous zones such as the Zagros, Alborz, and Binalud ranges, are driven by a complex interplay of natural factors—including geological composition, topographic steepness, climatic variability, and hydrological dynamics—and human-induced activities such as land-use alterations, road construction, and vegetation clearance. Previous research, including works by Hemmati and Mokhtari (2017) and Baharvand and Sori (2015), has underscored the pivotal role of tectonic processes, notably faulting and the resultant increase in shear stress, in initiating landslides. The Shahrchay Basin, located near active fault systems like the Urmia Lake Fault, North and South Salmas Faults, Ashnoye Fault, and Kuh-e-Shahidan Fault, exemplifies this vulnerability, with notable seismic events such as the 5.7 magnitude Silvaneh earthquake in April 2015, the 7.9 magnitude earthquake in October 1965, and the aftershocks following the 1982 Ahar-Varzeqan earthquake highlighting the region's seismic susceptibility. The primary objective of this research is to explore the detailed relationship between morphotectonic indices, drainage network patterns, and slope instability risks, tackling the core question of how active tectonic processes reshape drainage structures and predispose the area to landslides. This study addresses a significant knowledge gap, as integrated analyses combining tectonic, geomorphological, and anthropogenic factors in the Shahrchay Basin remain scarce, despite the urgent need for enhanced risk management, hazard zoning, and sustainable development strategies. The research is directed toward environmental scientists, geologists, urban planners, policymakers, and disaster management professionals, employing a multidisciplinary approach that integrates geomorphological assessments with advanced statistical modeling to deliver practical insights for land-use planning and disaster mitigation. The methodological design is grounded in its ability to construct a theoretical framework for understanding tectonic influences on slope stability while providing actionable applications for hazard reduction in comparable mountainous regions. The literature review, drawing on studies by Khazri et al. (2006), Nikjoo et al. (2016), and Rofii et al. (2014), highlights ongoing debates regarding the relative impacts of tectonic versus human factors, leading to the hypothesis that tectonic activity, when compounded by human disturbances, is a primary driver of landslide occurrences in the basin. This framing sets expectations for a comprehensive analysis that bridges theoretical geomorphology with practical policy implications, addressing both the scientific community's need for deeper understanding and the public's demand for safety measures.

Material and Methods

This investigation adopts a multi-stage, integrated methodology to evaluate the contributions of geomorphological and tectonic factors to slope instabilities in the Shahrchay River Basin. The approach encompasses data collection, spatial processing using Geographic Information Systems (GIS), extraction of geomorphic indices, statistical modeling, and thorough validation of findings. Data were compiled from diverse sources: satellite imagery from Landsat-9 (2023, 30-meter resolution) and Sentinel-2 (10-meter resolution) supplied land cover and Digital Elevation Model (DEM) data, obtained from the USGS, while geological maps (1:100,000 scale) and topographic maps (1:50,000 scale) were sourced from the Geological Survey of Iran and the National Cartographic Center, respectively. Field surveys augmented these datasets with detailed records of landslide locations, types, and characteristics, ensuring a robust empirical base. In the GIS environment, topographic layers—such as slope, aspect, and elevation classes—were generated from the DEM, and landslide distribution was mapped using Band 6 of Landsat-9 imagery, correlated with nine

critical variables: elevation, slope, aspect, distance from faults, rivers, roads, lithology, vegetation cover, and land use. Each variable was assigned a sensitivity score ranging from 1 to 5, with 5 indicating the highest risk, following established geohazard assessment protocols. Key geomorphic indices, including hierarchical anomaly (Δa), anomaly density (g_a), bifurcation ratio (R_b), asymmetry factor (AF), and basin shape ratio, were calculated using standardized formulas within GIS, building on methodologies outlined by Nikjoo et al. (2016) and Burbank and Anderson (2011). The logistic regression model was applied to predict landslide probability, utilizing a nonlinear S-shaped curve to link independent variables (e.g., distance from faults) with a binary dependent variable (landslide occurrence or non-occurrence). Calibration involved assigning 1 to unstable areas and 0 to stable ones, with data processed in IDRISI software. Validation was performed by comparing zoning maps with field observations, employing Chi-Square tests (95% confidence level), Receiver Operating Characteristic (ROC) curves (target value >0.7), and Pseudo R^2 (>0.2) to assess model accuracy, fit, and predictive power. This methodology ensures replicability and complies with ethical standards by relying on secondary data and non-invasive field techniques, with no direct involvement of human or animal subjects, thus negating the need for specific consent procedures. The approach's descriptive and interpretive nature aligns with the study's objectives of elucidating tectonic impacts and informing practical interventions.

Results and Discussion

Analysis reveals a multifaceted interaction between tectonic processes and geomorphological dynamics in driving slope instabilities throughout the Shahrchay Basin. The hierarchical anomaly index (Δa) of 33.34 indicates a lower-than-expected ratio of higher-order to first-order streams, suggesting potential tectonic disruption or geomorphic adjustments, a pattern supported by regional studies from Khazri et al. (2006). The anomaly density (g_a) of 1.33 anomalies per square kilometer reflects significant tectonic activity, while the bifurcation ratio (R_b) of 1.75, below the global average of 3-5, may suggest lithological or climatic modulation rather than dominant tectonic control, consistent with insights from Burbank and Anderson (2011). The asymmetry factor (AF) of 54.39 indicates a leftward stream shift, likely attributable to lateral fault movements, and a basin shape ratio of 5.62 suggests tectonic elongation aligned with fault orientations. Spatial analysis of landslide distribution, derived from 2023 Landsat imagery, identified 42.4 square kilometers (0.61% of the basin) as unstable, with a pronounced concentration in lower elevations (1268-2000 meters) where human activities such as agriculture, road construction, and urbanization are prevalent, resulting in reduced vegetation cover and diminished soil cohesion. Slope analysis indicated peak instability at 5-20% gradients, linked to human disturbances and unstable lithologies like marls, shales, and loose alluvial deposits, while southern and southeastern aspects exhibited higher risks due to increased solar exposure and soil desiccation.

This study employed a logistic regression model ($ROC = 0.922$) to analyze the key factors influencing slope instability. The results indicated that elevation, slope, distance to faults and rivers, and vegetation cover type exerted the most significant influence, respectively. The findings revealed that 87.25% of instability events occurred within 3 km of rivers, 90% occurred within 2 km of roads in areas of sparse vegetation, and 43.13% occurred in moderate to resistant lithological units within 1 km of active faults. Spatial analyses further showed that hazard hotspots were primarily located at elevations of 1268–2000 m, on gentle to moderate slopes (5–20%), and on southern and southeastern aspects. Moreover, over 87% of instability events occurred within 3000 meters of watercourses. The results underscore the determining tripartite influence of active tectonics (faults), topography (elevation/slope), and anthropogenic activities (road construction/vegetation reduction) in exacerbating geohazards.

Conclusion

This research illuminates the dominant role of tectonic activities, particularly active faulting, in shaping slope instability hazards within the Shahrchay Basin, with morphotectonic indices providing crucial insights into drainage network disruptions and landslide triggers. The findings reaffirm the importance of the research problem, as landslides in tectonically active regions like Iran continue to endanger human lives, infrastructure, and ecosystems, a concern echoed by Hemmati and Mokhtari (2017), Ngarash et al. (2013), and Baharvand and Sori (2015). Theoretically, the study enriches geomorphological models by integrating tectonic and anthropogenic influences, offering a foundation for future research into hazard dynamics and landscape evolution. Practically, the results provide critical guidance for land-use policies, advocating for restricted development in high-risk zones, prioritized reforestation to enhance slope stability, and improved water management to mitigate erosion. The high ROC value (0.9223) and field validation indicate that the logistic regression model accurately predicts landslide susceptibility, potentially explaining real-world phenomena such as seasonal landslide reactivation during heavy rains, as observed by Baharvand and Sori (2015), and offering a basis for modeling similar geohazards elsewhere. Applications are justified, particularly in zoning for controlled construction, implementing watershed management projects, and developing early warning systems, yet unresolved challenges persist, including accounting for long-term climatic variability, adapting to urban expansion pressures, and refining models with advanced technologies like LiDAR and real-time monitoring. The study's contribution justifies attention from both specialists and policymakers, offering a replicable framework for hazard management, which can be extended to other tectonically active basins in Iran, addressing broader environmental resilience, disaster preparedness, and sustainable development issues. Future research could focus on longitudinal studies to track tectonic and climatic interactions, enhancing predictive models and supporting adaptive management strategies in the face of evolving environmental conditions.



تحلیل نقش فرآیندهای مورفوتکتونیک بر پتانسیل خطر ناپایداری دامنه‌ای در حوضه آبریز شهرچای ارومیه

فریبا همتی^{۱*}، صابر سید احمدی^۲، اکرم علیزاده^۳

^۱ گروه آموزشی جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

^۲ کارشناسی ارشد آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، ماکو، ایران

^۳ دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ایران

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|----------------------------------|--|
| تاریخچه مقاله: | این پژوهش با هدف تحلیل اثرات فرآیندهای تکتونیک فعال بر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و ارزیابی پتانسیل وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای در حوضه آبریز شهرچای ارومیه انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، از تلفیقی از شاخص‌های مورفوتکتونیک (مانند ناهنجاری سلسله مراتبی آبراهه‌ها، تراکم ناهنجاری‌ها و نسبت انشعابات)، مدل‌سازی آماری رگرسیون لجستیک و تحلیل داده‌های سنجش از دور و داده‌های میدانی بهره گرفته شد. نتایج حاصل از مدل رگرسیون لجستیک (با دقت ROC=0.922) نشان می‌دهد که حدود ۴۳/۱۳ درصد از ناپایداری‌های ثبت‌شده در نواحی با لیتولوژی متوسط تا مقاوم، در فاصله کمتر از ۱ کیلومتر از گسل‌های فعال واقع شده‌اند. همچنین ۸۷/۲۵ درصد از این ناپایداری‌ها در فاصله‌ای کمتر از ۳ کیلومتر از رودخانه‌ها و ۹۰ درصد از آن‌ها در فاصله‌ای کمتر از ۲ کیلومتر از جاده‌ها با پوشش گیاهی کم‌تراکم یا فاقد پوشش مناسب رخ داده‌اند. تحلیل پهنه‌بندی خطر ناپایداری نیز نشان می‌دهد که بیشترین خطر در ارتفاعات بین ۱۲۶۸ تا ۲۰۰۰ متر و در دامنه‌ها، با جهت جنوبی متمرکز است. یافته‌ها بیانگر نقش مؤثر تکتونیک فعال، شیب زمین و زیرساخت‌های انسانی (مانند جاده‌ها) در تشدید فرآیندهای ناپایداری دامنه‌ای است. براین اساس، اتخاذ رویکردی یکپارچه در مدیریت خطر، احیای پوشش گیاهی طبیعی و اعمال محدودیت‌های کاربری اراضی در مناطق پرخطر ضروری به نظر می‌رسد. |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴ | |
| تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸ | |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴ | |
| کلمات کلیدی: | |
| حساسیت زمین لغزش | |
| ناپایداری دامنه‌ای | |
| عوامل ژئومورفولوژیکی | |
| مدل‌سازی رگرسیون لجستیک | |
| گسل فعال | |
| پهنه‌بندی خطر زمین لغزش | |

مقدمه

ناپایداری‌های دامنه‌ای، به‌ویژه زمین‌لغزش‌ها، از مهم‌ترین بلایای طبیعی ژئومورفولوژیکی به شمار می‌آیند که سالانه خسارات قابل توجهی را در ابعاد انسانی، اقتصادی و زیست‌محیطی به جوامع وارد می‌سازند (Hemmati & Mokhtari, 2018). این پدیده‌ها معمولاً در اثر تعامل پیچیده میان عوامل طبیعی نظیر ویژگی‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، اقلیم و هیدرولوژی با مداخلات انسانی همچون تغییر کاربری اراضی، احداث جاده و تخریب پوشش گیاهی شکل می‌گیرند (Esfandiari Darabad, 2008; Hemmati & Roostaei, Mokhtari & khodaiae, 2015; Mokhtari, 2018). از سوی دیگر، مداخلات انسانی مانند تغییر کاربری اراضی، تخریب پوشش گیاهی، احداث جاده‌ها و سازه‌ها در شیب‌های ناپایدار، و استخراج بی‌رویه منابع طبیعی، با تضعیف مقاومت مکانیکی مواد دامنه‌ای، احتمال وقوع این مخاطرات را افزایش می‌دهند (Baharvand & Soori, 2016; Negaresh, Faizi, Hodaei, Mollashahi; Roostaei & Khodaei, 2016; Shahhiseini, 2013). در میان عوامل مؤثر، فعالیت‌های زمین‌ساختی نقش بسزایی در تحریک ناپایداری‌های دامنه‌ای دارند. این فعالیت‌ها با ایجاد گسل، شکستگی، شیب‌های تند و افزایش تنش‌های برشی در دامنه‌ها، شرایط را برای گسیختگی توده‌های زمین فراهم می‌سازند (Valizadeh Kamran & Hashemzadeh, 2022). پژوهش‌های متعددی در حوضه‌های آبریز چناران (خراسان شمالی)، تسوج (آذربایجان شرقی) و زاب (آذربایجان شرقی) همپوشانی میان الگوهای زمین‌لغزش و ساختارهای تکتونیکی فعال را تأیید کرده‌اند (Khezri, Roostaei & Radjaei Asl, 2006; Moghimi, Alavi Panah & Jafari, 2008). در سطح ملی، ایران به واسطه قرارگیری در کمربند فعال آلپ - هیمالیا، توپوگرافی کوهستانی و بارندگی فصلی شدید، از مناطق پرریسک ناپایداری‌های دامنه‌ای محسوب می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده در مناطق زاگرس، البرز و بینالود، نقش هم‌افزایی فعالیت‌های تکتونیکی و الگوهای هیدروژئومورفولوژیک در تحریک ناپایداری‌ها را نشان داده‌اند (Asghari Saeskanrood, 2018; Mohammadzadeh Shishegaram & Asghari Saeskanrood, 2022; Nikjoo, Boromand, Roostaei & Amirahmadi, 2018). بر اساس مطالعات پیشین، زمین‌لغزش‌ها یکی از پرخسارت‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی در ایران به‌شمار می‌آیند که سالانه زیان‌های مالی و انسانی قابل توجهی به بار می‌آورند (Negaresh et al., 2013). این وضعیت، ضرورت ارتقاء مدیریت ریسک و بهره‌گیری از روش‌های علمی برای شناسایی و پهنه‌بندی مناطق پرخطر را برجسته می‌سازد.

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در بروز ناپایداری‌های دامنه‌ای، فعالیت‌های زمین‌ساختی است. شواهد متعددی حاکی از ارتباط مستقیم بین گسل‌های فعال و پراکندگی زمین‌لغزش‌ها در مناطق مختلف کشور است. برای نمونه، در حوضه تسوج، همپوشانی مکانی بین زمین‌لغزش‌ها و گسل‌های فعال نشان‌دهنده نقش تکتونیک در تشدید ناپایداری‌های دامنه‌ای است (Rafiei, Asadian & Ahmadi, 2015). همچنین، در مطالعات حوضه‌های زاب و بینالود، شاخص‌های مورفوتکتونیکی مانند نسبت مساحت به محیط حوضه و تراکم آبراهه‌ها، به‌عنوان شاخص‌هایی برای ارزیابی فعالیت زمین‌ساختی، همبستگی بالایی با رخداد ناپایداری‌ها داشته‌اند (Nikjoo et al., 2018; Khezri et al., 2006).

از منظر هیدرولوژیکی، بارش‌های شدید به‌عنوان یکی از عوامل تحریک‌کننده زمین‌لغزش شناخته می‌شوند. در برخی مطالعات خارجی، مانند پژوهش انجام‌شده در منطقه زاوچو چین، رابطه مستقیمی بین بارش‌های فصلی و نرخ جابجایی دامنه‌ها (تا ۴۶۱ میلی‌متر در سال) با استفاده از تداخل‌سنجی (InSAR)، گزارش شده است که حاکی از تأثیر رطوبت بر کاهش مقاومت برشی مصالح دامنه‌ای است (Shi & Hu, 2023). در ایران نیز، بارش‌های سنگین در ارتفاعات زاگرس و البرز، به‌ویژه در فصل‌های مرطوب، موجب فعال شدن مجدد لغزش‌های قدیمی و وقوع لغزش‌های جدید می‌شوند (Baharvand & Soori, 2016).

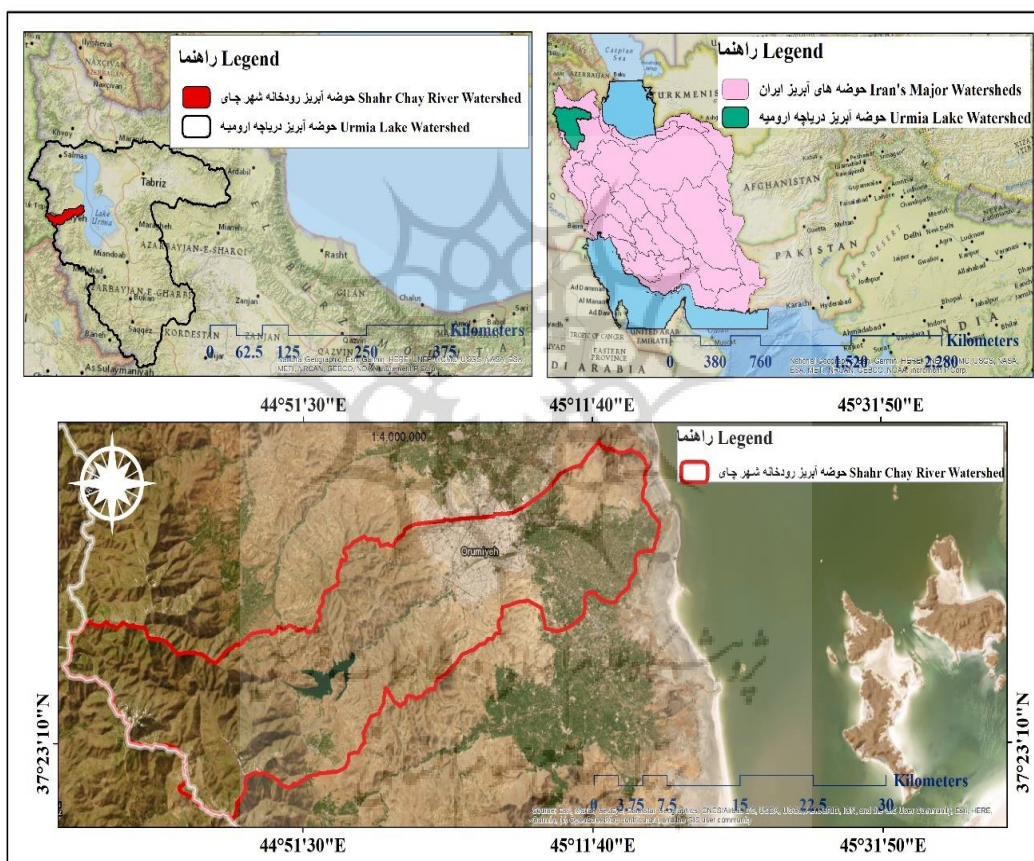
فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در مناطق کوهستانی، نقش قابل توجهی در افزایش خطر ناپایداری دارند. توسعه سکونتگاه‌ها در مناطق شیب‌دار، احداث راه‌های ارتباطی با خاک‌برداری‌های نامتناسب و تخریب پوشش گیاهی، منجر به اختلال در تعادل طبیعی دامنه‌ها می‌شود. به‌عنوان نمونه، در محور اردبیل - آستارا، احداث جاده در اراضی با لیتولوژی رسی و نزدیکی به گسل‌های فرعی باعث افزایش

وقوع زمین‌لغزش شده است (Esfandiari Darabad, 2008). همچنین، مطالعات انجام‌شده در منطقه شمالی پلوپونز یونان نشان داد که بین الگوی توسعه راه‌ها و تغییر کاربری‌اراضی با پراکندگی مکانی ریزش‌ها رابطه‌ای معنادار وجود دارد (Skilodimou, Bathrellos, 2022). در پاسخ به این مخاطرات، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در مدیریت محیطی مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، به‌کارگیری مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نظیر فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP، شبکه عصبی مصنوعی (MLP) و روش‌های نوین سنجش از دور مانند (InSAR) در مطالعات مختلف پیشنهاد شده است. برای نمونه، در مطالعات صورت‌گرفته در حوضه‌های زاب (Khezri et al., 2006) و بینالود (Nikjoo et al., 2018)، این روش‌ها جهت مدل‌سازی خطر ناپایداری دامنه‌ای با موفقیت به‌کار گرفته شده‌اند. در ایران، مطالعات متعددی رابطه میان تکتونیک فعال و زمین‌لغزش‌ها را بررسی کرده‌اند. شریفی و همکاران (Sharifi, Solgi & Pourkermani, 2013)، بابلی مؤخر (Babolimoakher, 2022) و شیرانی (Shirani, 2018) با تأکید بر اهمیت شاخص‌های مورفومتریک و مورفوتکتونیک نشان داده‌اند که این شاخص‌ها در تحلیل و پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش نقش کلیدی دارند. یافته‌های این مطالعات بر نقش تلفیقی عوامل زمین‌ساختی (مانند فاصله از گسل و شاخص‌های مورفوتکتونیک) و زمین‌شناختی (نظیر شیب، لیتولوژی و کاربری‌اراضی) در تعیین پهنه‌های پرخطر تأکید دارند. با این حال، کمبود مطالعات جامع که به بررسی هم‌زمان ساختار شبکه زهکشی، ویژگی‌های مورفوتکتونیک و تأثیر آن‌ها بر پایداری دامنه‌ها در مناطق کوهستانی ایران، به‌ویژه در حوضه‌هایی نظیر شهرچای ارومیه، بپردازند، همچنان احساس می‌شود. بر این اساس، هدف این پژوهش، تحلیل رابطه میان شاخص‌های مورفوتکتونیک، الگوهای شبکه‌زهکشی و خطر ناپایداری دامنه‌ای در حوضه شهرچای ارومیه است. سؤال اصلی این است که: تا چه میزان فرآیندهای زمین‌ساختی فعال، ساختار شبکه زهکشی را تغییر داده و زمینه‌ساز بروز ناپایداری‌های دامنه‌ای در این منطقه شده‌اند؟ نتایج این مطالعه می‌تواند به بهبود پهنه‌بندی خطر و سیاست‌گذاری در مدیریت ریسک ناپایداری‌ها در نواحی کوهستانی ایران کمک کند.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز شهرچای ارومیه در شمال غرب ایران و در محدوده استان آذربایجان غربی قرار دارد. این حوضه در فاصله ۱۲ کیلومتری جنوب غربی شهر ارومیه واقع شده و بین مختصات جغرافیایی $35^{\circ} 35'$ تا $45^{\circ} 17'$ طول شرقی و عرض‌های جغرافیایی $37^{\circ} 19'$ تا $37^{\circ} 35'$ شمالی گسترده شده است (شکل ۱). حوضه شهرچای بخشی از سامانه حوضه‌های آبریز تغذیه‌کننده دریاچه ارومیه محسوب می‌شود و تأمین‌کننده بخش قابل‌توجهی از منابع آب سطحی و زیرزمینی مورد نیاز شرب، کشاورزی و صنایع در منطقه ارومیه است. رودخانه شهرچای، که منبع اصلی تغذیه این حوضه است، از ارتفاعات مرزی ایران و ترکیه سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از اراضی کوهستانی و دره‌های عمیق، به سمت جنوب جریان می‌یابد. مورفولوژی حوضه، شامل: مناطق مرتفع، دامنه‌های شیب‌دار و پوشش گیاهی است که نقش مهمی در حفظ رواناب‌ها و کنترل فرسایش ایفا می‌کند. از منظر زمین‌ساختی، این حوضه در مرز بین زون‌های تکتونیک زاگرس و ایران مرکزی قرار گرفته و تحت تأثیر مجموعه‌ای از گسل‌های فعال شامل گسل دریاچه ارومیه، گسل‌های شمال و جنوب سلماس، گسل اشنویه، گسل کوه شهیدان و خطواره ارومیه می‌باشد. فعالیت این ساختارها، که در سوابق لرزه‌ای تاریخی و معاصر منعکس شده است، بیانگر وضعیت فعال تکتونیک در منطقه است (Malekzadeh, Sharifi & Elyasi, 2005). به‌عنوان نمونه، زمین‌لرزه‌هایی مانند زلزله سیلوانه در فروردین ۱۳۹۴ با بزرگای حدود ۵/۷ ریشتر، زلزله مرداد ۱۳۶۲ (دنباله زلزله اهر و ورزقان) و زلزله ۷/۹ ریشتری مهرماه ۱۳۶۴ در سیلوانه نشان از لرزه‌خیزی بالای منطقه دارند.

تحلیل مقایسه‌ای بین داده‌های بارش سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۸ و نوسانات سطح آب زیرزمینی حاکی از ارتباط احتمالی بین حرکات تکتونیکی و تغییرات هیدرولوژیکی در این حوضه است (Kiani & Yousefi, 2018). علاوه بر آن، شیب‌های تند، نرخ بالای فرسایش خاک، و فعالیت‌های دامنه‌ای از جمله چالش‌های ژئومورفیک این حوضه محسوب می‌شوند. همچنین شیب‌های تند، فرسایش خاک و فرآیندهای دامنه‌ای از چالش‌های عمده این حوضه به شمار می‌آیند. در سال‌های اخیر، کاهش قابل توجه بارندگی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب، منجر به تنش آبی مضاعف در سیستم رودخانه‌ای و آبخوان‌های منطقه شده است. موقعیت ویژه حوضه شهرچای در محل تلاقی گسل‌های فعال و ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده، زمینه‌ای مناسب برای تحلیل ارتباط بین فعالیت‌های تکتونیکی، تحولات ژئومورفولوژیکی و ناهنجاری‌های شبکه زهکشی فراهم کرده است.



شکل ۱- نقشه حوضه آبریز شهرچای و موقعیت آن در حوضه‌های آبریز ایران
Fig.1. Shahrchay Watershed and Its Location in Iran's Watersheds

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف ارزیابی نقش عوامل ژئومورفولوژیکی و تکتونیکی در ناپایداری‌های دامنه‌ای، در قالب یک رویکرد تلفیقی و چندمرحله‌ای طراحی شده است. مراحل اصلی شامل: گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها، تحلیل مکانی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی، استخراج شاخص‌های ژئومورفیک، مدل‌سازی رگرسیون لجستیک و اعتبارسنجی نتایج می‌باشد.

(۱) گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها: داده‌های مورد نیاز از منابع مختلف گردآوری شده‌اند:

داده‌های ماهواره‌ای: تصاویر سنجنده Landsat-9 مربوط به سال ۲۰۲۳ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و مدل رقومی ارتفاع (DEM) از پایگاه داده USGS اخذ گردید. برای شناسایی پوشش‌زمین، از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با وضوح مکانی ۱۰ متر استفاده شد و داده‌های پردازش‌شده پوشش‌زمین پایگاه Esri Landcover به‌عنوان مرجع برای تلفیق و تحلیل داده‌ها به کار گرفته شدند.

داده‌های سازمانی: نقشه‌های زمین‌شناسی (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) برای محدوده‌های ارومیه، اشنویه، سیلوانه و سرو از سازمان زمین‌شناسی و نقشه‌های توپوگرافی (مقیاس ۱:۵۰۰۰۰) از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شدند.

داده‌های میدانی: اطلاعات مربوط به موقعیت و ویژگی‌های ناپایداری‌های دامنه‌ای با استفاده از بازدید میدانی و مطالعات پیشین جمع‌آوری گردید.

(۲) تحلیل مکانی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی: در محیط نرم‌افزاری GIS، لایه‌های مختلف محیطی و ساختاری تولید و تحلیل شدند:

لایه‌های توپوگرافی: با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، نقشه‌های شیب، جهت‌شیب و طبقات ارتفاعی تولید شدند. توزیع مکانی ناپایداری‌ها: با تحلیل داده‌های میدانی و Band 6 تصاویر Landsat-9، نقاط ناپایداری شناسایی و با ۹ عامل کلیدی (ارتفاع، شیب، جهت‌شیب، فاصله از گسل، رودخانه، جاده، لیتولوژی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی) مورد تحلیل قرار گرفتند. کدگذاری عوامل: به هر طبقه از متغیرهای مؤثر، امتیازی بین ۱ تا ۵ بر اساس شدت حساسیت نسبت داده شد (امتیاز ۵ نشان‌دهنده بالاترین حساسیت).

(۳) شاخص‌های ژئومورفیک: با هدف ارزیابی تأثیر تکتونیک فعال، شاخص‌های ژئومورفیک کلیدی شامل ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa)، تراکم ناهنجاری (ga)، نسبت انشعاب (Rb) و درصد عدم تقارن حوضه (AF) با استفاده از فرمول‌های استاندارد و در محیط GIS استخراج شدند. خلاصه روابط و منابع به شرح جدول ۱ است (Keller & Pinter, 2002):

جدول ۱- شاخص‌های ژئومورفیک و روابط محاسباتی

Table 1- Geomorphologic Indices and Computational Relationships

| شاخص Index | رابطه / رفرنس Relationship / Reference |
|--|--|
| شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی (Δa) | $\Delta a = \frac{Ha_t}{N1}$ |
| Hierarchical anomaly index (Δa) | $\Delta a =$ Hierarchical Anomaly Index, $Ha_t =$ Total count of hierarchical anomalies, $N1 =$ Actual number of 1st-order streams (Guarnieri & Pirrotta, 2008). |

| | |
|--|--|
| $ga = \frac{Ha_t}{A}$ <p>شاخص تراکم ناهنجاری سلسله‌مراتبی (ga) Density of Hierarchical Anomaly (ga)</p> <p>ga = شاخص تراکم ناهنجاری سلسله‌مراتبی، Ha_t = تعداد ناهنجاری سلسله‌مراتبی آبراهه برای کل حوضه، A = مساحت حوضه (Ciccacci et al, 1987).</p> <p>ga = Hierarchical Anomaly Density Index, Ha_t = Total count of hierarchical anomalies for the entire basin, A = Basin Area (Ciccacci et al, 1987).</p> | |
| $Rb(u - u + 1) = \frac{Nu}{Nu + 1}$ <p>Rb = شاخص نسبت انشعاب، Nu = تعداد آبراهه‌های رتبه ویژه، Nu + 1 = تعداد آبراهه‌های رتبه بالاتر (Guarnieri & Pirrotta, 2008).</p> <p>Rb = Bifurcation Ratio Index, Nu = Number of streams of a given order, Nu + 1 = Number of streams of the next higher order (Guarnieri & Pirrotta, 200).</p> | نسبت انشعاب (Rb) Bifurcation Ratio (Rb) |
| $Rbd(u - u + 1) = \frac{Ndu}{Nu + 1}$ <p>Rbd = شاخص نسبت مستقیم انشعاب، Ndu = تعداد آبراهه‌های رتبه ویژه که به رتبه بالاتر جریان می‌یابد، Nu + 1 = تعداد آبراهه‌های رتبه بالاتر (Baroni et al, 2005).</p> <p>Rbd = Direct Bifurcation Ratio Index, Ndu = Number of streams of a given order draining directly into the next higher order, Nu + 1 = Number of streams of the next higher order (Baroni et al, 2005).</p> | نسبت مستقیم انشعاب (Rbd) Direct Bifurcation Ratio (Rbd) |
| $R = Rb - Rbd$ <p>R = شاخص انشعابات، Rb = نسبت انشعابات حوضه، Rbd = نسبت مستقیم انشعابات (Guarnieri & Pirrotta, 2008).</p> <p>R = Anastomosis Index, Rb = Bifurcation Ratio of the basin, Rbd = Direct Bifurcation Ratio (Guarnieri & Pirrotta, 2008).</p> | شاخص انشعابات (R) Anastomosis Index (R) |
| $AF = \frac{AR}{AT} * 100$ <p>AF = شاخص درصد عدم تقارن حوضه، AR = مساحت سمت بزرگتر رودخانه اصلی، AT = مساحت کل حوضه به کیلومتر مربع (Clement & Brook, 2008).</p> <p>AF = Percent Basin Asymmetry Index, AR = Area of the larger side of the main river, AT = Total basin area (km²) (Clement & Brook, 2008).</p> | شاخص درصد عدم تقارن حوضه (AF) Percent of Basin Asymmetry |
| $BS = \frac{BL}{Bw}$ <p>BS = شاخص کل حوضه، BL = اندازه طول حوضه از انتهای ترین مقسم آب تا خروجی حوضه، Bw = پهنای حوضه در پهن ترین قسمت (Burbank & Anderson, 2001).</p> <p>BS = Basin Shape Ratio Index, BL = Basin length (from the farthest divide to the outlet), Bw = Basin width at its widest point (Burbank & Anderson, 2001).</p> | شاخص نسبت شکل حوضه (BS) Basin Shape Ratio (BS) |
| $LN1 = \frac{\sum L1}{N}$ <p>LN1 = شاخص میانگین طول آبراهه درجه ۱، $\sum L1$ = مجموع طول آبراهه درجه ۱، N = تعداد آبراهه درجه ۱ (Zuchiewicz, 1998).</p> <p>LN1 = Mean Length of 1st-Order Streams Index, $L1\sum$ = Total length of all 1st-order streams, N = Number of 1st-order streams (Zuchiewicz, 1998).</p> | شاخص میانگین طول آبراهه درجه ۱ (LN1) Mean Length of First Order Streams (LN1) |

مدل‌سازی رگرسیون لجستیک: برای پیش‌بینی احتمال وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای، از مدل رگرسیون لجستیک استفاده شد. این مدل رابطه غیرخطی بین متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر) و متغیر وابسته دوحالته (وقوع/عدم وقوع) را به صورت یک منحنی S شکل توصیف می‌کند (Dai & Lee, 2002; Rahimi, 2011). معادله (۱) شکل عمومی مدل رگرسیون لجستیک را نشان می‌دهد:

- 1-Basin Shape Ratio
- 2-Mean length of first order streams

$$P = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (۱)$$

که در آن P احتمال رویداد حادثه (در این پژوهش فرآیندهای دامنه‌ای) و Z پارامتر یا فاکتور خطی است و از رابطه (۲) بدست می‌آید، e نیز عدد ثابت ۲/۷۱۸ می‌باشد.

$$Z = \logit(p) = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = C_0 + C_1X_1 + \dots + C_nX_n \quad (۲)$$

C0 عرض از مبدأ یا ضریب ثابت مدل، و X1, X2, ..., Xn ضرایب مربوط به متغیرهای مستقل، C1, C2, ..., Cn هستند. با تغییر در مقدار Z از $-\infty$ تا $+\infty$ احتمال وقوع فرآیندهای دامنه‌ای (P) به صورت S از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند. هر چه عدد به یک نزدیک‌تر باشد، احتمال وقوع فرآیندهای دامنه‌ای بیشتر و هر چه عدد به صفر نزدیک‌تر باشد، احتمال وقوع آن کمتر خواهد بود (Chau et al., 2004). مناطق با ناپایداری عدد ۱ و مناطق پایدار عدد ۰ دریافت کردند. داده‌ها به نرم‌افزار IDRISI وارد و تحلیل شدند.

۴) اعتبارسنجی نتایج: اعتبارسنجی نتایج با استفاده از روش‌های مختلفی ارزیابی شد. اولین روش، تطابق نقشه‌های پهنه‌بندی با مشاهدات میدانی بود. علاوه بر این، آزمون‌های آماری مختلفی نیز به کار گرفته شدند. در این راستا، آزمون کی دو (Chi-Square) برای رد فرضیه صفر در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده گردید (Motavali Sadraddin & Esmaili, 2013). همچنین، شاخص ROC به منظور اندازه‌گیری میزان تطابق پیش‌بینی مدل با واقعیت، با مقدار مطلوب بالای ۰/۷ به کار رفت (Ayalew & Yamagishi, 2005). در نهایت، شبه R^2 (PR²) با ارزش بالای ۰/۲ به عنوان معیاری برای ارزیابی برازش مناسب مدل در نظر گرفته شد (Menard, 2002).

نتایج و بحث

درک روابط پیچیده، میان فرآیندهای زمین‌ساختی و عوامل ژئومورفولوژیکی، پیش‌نیاز تحلیل ناپایداری دامنه‌ها در محیط‌های تکتونیکی فعال است. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های سنجش از دور، تحلیل‌های میدانی و مدل‌سازی آماری، نقش شاخص‌های مورفوتکتونیک و زمین‌شناختی در پهنه‌بندی خطر ناپایداری دامنه‌ای در حوضه شهرچای ارومیه بررسی شد. تحلیل لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS، مدل‌سازی رگرسیون لجستیک و اعتبارسنجی آماری، چارچوبی منسجم برای تبیین رابطه میان پویایی‌های زمین‌ساختی و رفتار شبکه‌زهکشی ارائه می‌دهد. یافته‌های به‌دست‌آمده می‌توانند مبنایی برای برنامه‌ریزی کاهش خطر در مناطق مشابه باشند.

تحلیل تأثیرات تکتونیکی بر ناهنجاری‌های شبکه‌های زهکشی
شاخص‌های ژئومورفیک، ابزارهای کلیدی برای بررسی تأثیرات تکتونیکی بر هندسه دره‌ها و مسیر رودخانه‌ها محسوب می‌شوند. این شاخص‌ها با تمرکز بر آشکارسازی تغییرات ناگهانی در الگوهای زهکشی، جابجایی‌های آبراهه‌ای و ناهنجاری‌های ناشی از گسلش امکان تمایز میان اثرات تکتونیکی و فرآیندهای فرسایشی معمول را فراهم می‌سازند.

شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی (Δa): این شاخص یکی از معیارهای مهم در بررسی ساختار و نظم شبکه‌های زهکشی است که با هدف شناسایی اختلالات زمین‌ساختی و تکتونیکی در حوضه‌های آبریز به کار می‌رود. در این مطالعه، تعداد آبراهه‌ها بر اساس روش استرالر تعیین و نسبت تعداد کل آبراهه‌ها به تعداد آبراهه‌های درجه اول (Δa) محاسبه شد. در این مطالعه، مقدار Δa برابر با ۱/۳۴ محاسبه شد؛ به این معنا که نسبت کل آبراهه‌ها به آبراهه‌های مرتبه اول پایین‌تر از ساختار متوازن نظری است. این مسئله ممکن است نشان‌دهنده کمبود آبراهه‌های مرتبه اول در اثر تکتونیک فعال یا عوامل ژئومورفیک باشد. با توجه به عدم وجود مقادیر مرجع جهانی برای شاخص Δa، تفسیر نتایج باید در قالب ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی منطقه انجام شود.

بنابراین، مقایسه این شاخص با داده‌های مشابه در مناطق دارای شرایط مشابه زمین‌شناسی و اقلیمی، ابزاری کاربردی برای تحلیل تحولات زمین‌ساختی و تأثیرات ژئودینامیکی محسوب می‌شود.

شاخص تراکم ناهنجاری سلسه مراتبی: این شاخص بیانگر تعداد ناهنجاری‌ها به ازای واحد سطح حوضه است. مقدار محاسبه شده در منطقه برابر با ۱/۳۳ است، که به معنی وجود بیش از یک ناهنجاری ساختاری به طور میانگین در هر کیلومتر مربع از حوضه می‌باشد. میزان بالای این شاخص معمولاً با شدت فعالیت‌های تکتونیکی مرتبط است.

شاخص نسبت انشعابات: شاخص نسبت انشعابات (Rb) از تقسیم تعداد آبراهه‌های یک مرتبه بر مرتبه بالاتر به دست می‌آید و معیاری برای ارزیابی نظم شبکه‌زهکشی است. مقدار میانگین Rb در منطقه ۱/۷۵ محاسبه شد که پایین‌تر از میانگین جهانی (۳ تا ۵) است. این مقدار می‌تواند نشان‌دهنده توسعه یافتگی شبکه یا تأثیر محدود تکتونیک باشد. همچنین، تغییرات لیتولوژیکی و اقلیم ممکن است در کاهش شاخص مؤثر باشند. مقایسه این شاخص با مناطق مشابه، ابزار مناسبی برای تحلیل نقش نیروهای زمین‌ساختی فراهم می‌کند.

شاخص نسبت انشعابات مستقیم: شاخص نسبت انشعابات مستقیم (Rbd) برای تحلیل دقیق‌تر پویایی شبکه‌زهکشی محاسبه شده و مقدار آن در منطقه ۰/۳۳ به دست آمده است. این شاخص نشان می‌دهد چه بخشی از آبراهه‌ها مستقیماً به مرتبه بالاتر متصل می‌شوند. شاخص کلی انشعابات (R) نیز با ترکیب Rb و Rbd برابر با ۱/۴۱ محاسبه شد. مقادیر پایین این شاخص‌ها حاکی از نظم نسبی شبکه و تأثیر محدود تکتونیک فعال است. با این حال، برخی ناهنجاری‌ها ممکن است بیانگر تأثیر زمین‌ساخت‌های موضعی باشند.

شاخص عدم تقارن حوضه‌زهکشی^۱ (فاکتور عدم تقارن): شاخص AF با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و محاسبه مساحت‌های جانبی رودخانه تعیین شد. مقدار به دست آمده برابر با ۵۴/۳۹ است که بیانگر تمایل جریان رودخانه به سمت چپ حوضه است. این نوع عدم تقارن می‌تواند ناشی از تأثیر حرکات جانبی گسل‌ها یا تغییرات ساختاری منطقه باشد.

نسبت شکل حوضه‌زهکشی: این شاخص که از نسبت طول به عرض حوضه محاسبه می‌شود، در منطقه مورد مطالعه برابر با ۵/۶۲ است. مقدار بالا نشان‌دهنده کشیدگی قابل توجه حوضه است که احتمالاً تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی، ساختار گسل‌ها یا عوامل مورفولوژیکی قرار دارد. چنین کشیدگی‌هایی معمولاً با جهت حرکت گسل‌ها هم‌راستا بوده و می‌توانند معیارهای غیرمستقیمی برای ارزیابی تنش‌های زمین‌ساختی باشند.

شاخص میانگین طول آبراهه درجه ۱: براساس داده‌های موجود، طول کل آبراهه‌های درجه اول برابر با ۵۲۹/۵۳۵ کیلومتر و تعداد آن‌ها حدود ۱۰۱۳ مورد است. بنابراین، میانگین طول هر آبراهه درجه اول ۰/۵۱۷ کیلومتر محاسبه شد. تغییر در این شاخص، در کنار سایر معیارهای ژئومورفیک، می‌تواند نشان‌دهنده تحولات ساختار هیدرولوژیکی منطقه باشد. در حوضه‌هایی با فعالیت تکتونیکی بالا، این شاخص معمولاً تحت تأثیر جابجایی‌های زمینی و شکستگی‌های بستر قرار می‌گیرد.

بررسی ارتباط عوامل تأثیرگذار بر وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای: نقشه پراکنش ناپایداری‌های دامنه‌ای اطلاعات ارزشمندی در خصوص موقعیت، نوع و شدت این پدیده‌ها در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد. این نقشه‌ها، که از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ استخراج شده‌اند، مبنای تحلیل‌های بعدی جهت شناسایی عوامل مؤثر بر ناپایداری و مدیریت خطر محسوب می‌شوند (Van Westen, 2008). در این پژوهش، با استفاده از تصاویر لندست سال ۲۰۲۳، مناطق مستعد ناپایداری شناسایی شدند. نقشه نهایی، پس از تحلیل‌های پردازشی در نرم‌افزار Idrisi، نشان داد که حدود ۴۲/۴ کیلومتر مربع از سطح منطقه (معادل ۰/۶۱٪) دچار ناپایداری‌های دامنه‌ای شده‌اند.

تأثیر ارتفاع: برای تحلیل تأثیر ارتفاع بر ناپایداری‌های دامنه‌ای، از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استفاده شد و محدوده ارتفاعی منطقه مطالعه بین ۱۲۶۸ تا ۳۵۹۶ متر به پنج طبقه ارتفاعی تقسیم گردید. نتایج نشان داد که بیشترین ناپایداری‌های دامنه‌ای در طبقات ارتفاعی پایین‌تر (۱۲۶۸ تا ۲۰۰۰ متر) متمرکز هستند. کاهش فراوانی ناپایداری‌ها در ارتفاعات بالاتر را می‌توان به چند عامل نسبت داد. در ارتفاعات پایین‌تر، فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، جاده‌سازی و ساخت‌وساز بیشتر است که به واسطه تغییرات کاربری زمین و تخریب پوشش گیاهی، ریسک ناپایداری دامنه‌ها افزایش می‌یابد. در ارتفاعات بالاتر، این فعالیت‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و پوشش گیاهی غالباً متراکم‌تر و سالم‌تر است که نقش تثبیت‌کننده در پایداری خاک ایفا می‌کند. علاوه بر این، شیب دامنه‌ها در ارتفاعات بالاتر گرچه ممکن است تند باشد، اما به دلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی و ساختاری منطقه، پایداری نسبی بیشتری مشاهده می‌شود. شرایط اقلیمی، نوع خاک و عوامل محیطی دیگر نیز در توزیع ناپایداری‌های دامنه‌ای تأثیرگذار هستند.

تأثیر شیب دامنه: در این مطالعه، به‌منظور بررسی رابطه شیب با ناپایداری دامنه‌ای، نقشه شیب به پنج طبقه تقسیم‌بندی شد. نتایج حاصل از تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که بیشترین تراکم ناپایداری دامنه‌ای در محدوده شیب‌های ۵ تا ۲۰ درصد مشاهده شده است. این محدوده‌ها معمولاً در نواحی با فعالیت‌های انسانی گسترده مانند کشاورزی شیب‌دار، ساخت‌وساز و تخریب پوشش گیاهی قرار دارند. چنین فعالیت‌هایی با کاهش مقاومت برشی مواد سطحی، پتانسیل ناپایداری دامنه را افزایش می‌دهند. در عین حال، در شیب‌های بالاتر نیز ناپایداری دامنه‌ای مشاهده شده است، به‌ویژه در مناطقی که دارای سازندهای زمین‌شناسی ناپایدار نظیر مارن‌ها، شیل‌ها و نهشته‌های سست آبرفتی هستند. این مسئله نشان می‌دهد که علاوه بر شیب، نوع سنگ بستر و ویژگی‌های ژئومورفولوژیک نقش مهمی در تحریک ناپایداری ایفا می‌کنند.

تأثیر جهت‌شیب: تحلیل جهت شیب دامنه‌ها با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) نشان داده است که دامنه‌هایی با جهت‌های جنوبی و جنوب‌شرقی بیشترین میزان ناپایداری را تجربه می‌کنند. این پدیده به‌ویژه در مناطقی با پوشش گیاهی کم و خاک‌های با بافت سبک‌تر برجسته‌تر است. دامنه‌های جنوبی به دلیل دریافت بیشتر تابش خورشیدی، معمولاً دارای نرخ بالاتری از تبخیر و خشکی سطحی خاک هستند که می‌تواند منجر به کاهش پیوستگی ذرات خاک و تسریع فرآیندهای ناپایداری شود. در مقابل، دامنه‌های شمالی که تابش مستقیم کمتری دریافت می‌کنند، گرچه رطوبت بیشتری دارند، اما تحت تأثیر چرخه‌های انجماد و ذوب مکرر قرار دارند که می‌توانند ساختار خاک را تضعیف کرده و ترک‌های ریز ایجاد کنند. تحلیل نقشه جهت‌شیب که بر اساس هشت طبقه اصلی جهت (شمال، شمال‌شرق، شرق، جنوب‌شرق، جنوب، جنوب‌غرب، غرب و شمال‌غرب) انجام شده است، ارتباط معناداری بین جهت شیب و توزیع مکانی ناپایداری‌های دامنه‌ای نشان داده است. این نتایج بیانگر نقش تعیین‌کننده جهت شیب، به‌ویژه در تعامل با پارامترهای دیگر مانند شیب دامنه، نوع خاک، شرایط اقلیمی و کاربری زمین در پایداری دامنه‌ها است.

تأثیر فاصله از گسل‌ها: در بررسی تأثیر فاصله از گسل‌ها بر ناپایداری‌های دامنه‌ای، مشخص شد که بیشترین ناپایداری‌های دامنه‌ای در فاصله کمتر از ۱۰۰۰ متر از گسل‌های فعال رخ می‌دهند. این امر به دلیل شکستگی‌ها، کاهش مقاومت مکانیکی و افزایش نفوذپذیری سنگ‌ها در اطراف گسل‌هاست. گسل‌ها با ایجاد تغییر در ساختار زمین، شرایطی فراهم می‌کنند که پایداری دامنه‌ها کاهش یابد. با دور شدن از گسل‌ها، اثرات لرزه‌ای و تکتونیکی کاهش یافته و احتمال ناپایداری نیز کم‌تر می‌شود.

تأثیر فاصله از رودخانه‌ها: با تحلیل پراکندگی ناپایداری‌های دامنه‌ای نسبت به فاصله از رودخانه‌ها، مشخص شد حدود ۸۷ درصد از این ناپایداری‌ها در فاصله کمتر از ۳۰۰۰ متر از رودخانه‌ها رخ داده‌اند. این پدیده عمدتاً به دلیل فرسایش کناری رودخانه‌هاست که باعث کاهش مقاومت خاک، تضعیف پایه دامنه و افزایش تنش‌های برشی می‌شود. جریان آب موجب تخریب لایه‌های سطحی خاک و کاهش انسجام آنها شده و شرایط مناسب برای لغزش و سایر ناپایداری‌ها را فراهم می‌کند. همچنین، نزدیکی به رودخانه معمولاً با شیب‌های تندتر و تغییرات مورفولوژیکی همراه است که نقش مهمی در افزایش ناپایداری‌ها دارد.

تأثیر فاصله از جاده‌ها: برای بررسی رابطه بین فاصله از جاده‌ها و وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای، داده‌ها در پنج دسته فاصله‌ای طبقه‌بندی شدند که نتایج نشان داد بیش از ۹۰٪ از ناپایداری‌ها در فاصله کمتر از ۲۰۰۰ متر از جاده‌ها رخ می‌دهند. این موضوع بیانگر تأثیر قابل توجه فعالیت‌های مرتبط با جاده‌سازی بر افزایش خطر ناپایداری است که عمدتاً ناشی از تخریب پوشش گیاهی، تغییر ساختار خاک شامل تراکم و کاهش نفوذپذیری، و تغییر در جریان‌های سطحی و زیرسطحی آب به دلیل تغییرات توپوگرافی و ایجاد کانال‌ها می‌باشد. در مقابل، در فواصل دورتر از جاده‌ها به دلیل حفظ پوشش گیاهی و ساختار طبیعی خاک، احتمال وقوع ناپایداری‌ها به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

تأثیر لیتولوژی: تلفیق نقشه لیتولوژی با نقشه ناپایداری‌های دامنه‌ای نشان می‌دهد که بیشترین ناپایداری‌ها (حدود ۰/۴۳٪) در سنگ‌های با مقاومت متوسط تا بالا رخ داده است. برای تهیه نقشه لیتولوژی از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شده و واحدهای لیتولوژیکی مختلف بر اساس آن تعریف گردید. مطابق مطالعات پیروان و شریعت جعفری (Peyrowan & Shariat, 2013)، حساسیت و مقاومت هر واحد سنگی در برابر فرسایش بررسی و سنگ‌ها بر اساس فرسایش‌پذیری به هشت گروه لیتولوژیکی طبقه‌بندی شدند. در منطقه مورد مطالعه، سازند قم شامل مزودپوریت، گرانودیوریت، تناوب کنگلومرا، توف و ماسه‌سنگ است که با مساحتی حدود ۳۱/۶۳ کیلومتر مربع (معادل ۱۰/۱۹٪ از کل منطقه) دارای لیتولوژی مقاوم بوده و ناپایداری کمتری نشان می‌دهد. سازند روته، متشکل از شیست، سنگ‌های آتشفشانی، همتافت سیلوانا و ماسه‌سنگ آهکی، با مساحتی حدود ۲۷۱/۸۰ کیلومتر مربع (۴۳/۱۳٪ از منطقه) دارای لیتولوژی متوسط تا مقاوم است. سازند دولومیت سلطانیه با ۵۴/۳۹ کیلومتر مربع (۱۹/۲۱٪ از منطقه) شامل توف آندزیت، سنگ‌های آتشفشانی دگرگون‌شده متوسط و شیست است که لیتولوژی متوسطی دارد. همچنین، سازند ماسه‌سنگ دانه‌درشت با مساحتی برابر ۱۳۹/۱۱ کیلومتر مربع (۲۰/۳۹٪ از منطقه) دارای لیتولوژی متوسط تا ضعیف است. علاوه بر این سازندهای سنگی، نهشته‌های مخروط‌افکنه‌ای (جوان و قدیمی)، پادگانه‌های آبرفتی جوان، خاک‌های باقیمانده و اراضی کشاورزی به مساحت تقریبی ۲۱۷/۷۶ کیلومتر مربع (۷/۰۵٪ از کل منطقه) در دسته لیتولوژی‌های متوسط تا ضعیف قرار گرفته‌اند که می‌توانند عامل افزایش ناپایداری‌های دامنه‌ای باشند.

تأثیر پوشش گیاهی: در این مطالعه، به‌منظور بررسی پوشش گیاهی از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ با سنجنده OLI استفاده شد. ابتدا مقادیر دیجیتالی هر پیکسل به رادیانس تبدیل شده و سپس با به‌کارگیری الگوریتم تصحیح اتمسفری FLAASH، بازتاب سطح زمین اصلاح گردید. این بازتاب‌ها در قالب داده‌های عددی بین صفر و یک نرمال‌سازی شدند تا امکان محاسبه شاخص پوشش گیاهی فراهم شود. شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) به عنوان معیاری برای سنجش تراکم پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر بالای این شاخص بیانگر مناطق با پوشش گیاهی متراکم و مقادیر پایین یا منفی نشان‌دهنده نواحی فاقد پوشش گیاهی هستند. نتایج این بررسی نشان داد که مناطق فاقد پوشش گیاهی بیشترین ناپایداری‌های دامنه‌ای را تجربه کرده‌اند. بررسی تلفیقی نقشه پوشش گیاهی و نقشه ناپایداری‌های دامنه‌ای مشخص کرد که تمام ناپایداری‌های ثبت شده در مناطق بدون پوشش گیاهی اتفاق افتاده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده ارتباط مستقیم کاهش پوشش گیاهی با افزایش آسیب‌پذیری زمین در برابر فرسایش و ناپایداری‌های دامنه‌ای است. کاهش پوشش گیاهی منجر به کاهش انسجام خاک، افزایش فرسایش سطحی و تسهیل وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای می‌شود.

تأثیر پوشش زمین: بر اساس تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و طبقه‌بندی پوشش زمین، مشخص شد که نواحی با پوشش گیاهی کم تراکم یا فاقد پوشش مناسب، بیشترین حساسیت را در برابر ناپایداری‌های دامنه‌ای دارند. این مناطق، به دلیل کاهش تثبیت خاک ناشی از پوشش گیاهی ناکافی، در معرض افزایش فرسایش سطحی و ناپایداری‌های زمین‌شناختی مانند ناپایداری‌های دامنه‌ای قرار دارند. کاهش پوشش گیاهی موجب تسهیل فرسایش و کاهش پایداری خاک شده و در نتیجه احتمال وقوع فرآیندهای ناپایدار دامنه‌ای در این نواحی افزایش می‌یابد.

نتایج مدل رگرسیون لجستیک پهنه‌بندی حساسیت به ناپایداری‌های دامنه‌ای

در این پژوهش، به منظور تحلیل عوامل مؤثر بر ناپایداری‌های دامنه‌ای در حوضه آبریز شهرچای، داده‌های مربوط به ۹ متغیر مستقل شامل فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، لیتولوژی، پوشش گیاهی، شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی و پوشش زمین جمع‌آوری و پس از پردازش به نرم‌افزار Idrisi وارد شد. مدل رگرسیون لجستیک برای پیش‌بینی احتمال وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای به کار گرفته شد (جدول ۲). مدل رگرسیون لجستیک به‌عنوان روشی مناسب برای مدل‌سازی احتمال وقوع رویدادهای باینری (وقوع یا عدم وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای) به کار گرفته شد. این مدل رابطه آماری بین متغیرهای مستقل و احتمال رخداد ناپایداری‌های دامنه‌ای را تعیین می‌کند. معادله نهایی مدل (۳) به شکل زیر است:

جدول ۲- ضرائب حاصل از مدل رگرسیون لجستیک

Table 2- Coefficients Derived from the Logistic Regression Model

| ضرائب | متغیرهای مستقل | ضرائب |
|--------------|---------------------------------------|----------------|
| Coefficients | Independent Variables | |
| -9/5400 | عدد ثابت Constant Number | X ₀ |
| 0/23819 | فاصله از گسل Distance to fault | X ₁ |
| 0/524297 | فاصله از جاده Distance to road | X ₂ |
| -0/188468 | فاصله از رودخانه Distance to river | X ₃ |
| -0/161814 | لیتولوژی Lithology | X ₄ |
| 0/141 | پوشش گیاهی Vegetation | X ₅ |
| -0/398539 | شیب Slope | X ₆ |
| 0/505626 | جهت شیب Slope Direction | X ₇ |
| -0/008911 | طبقات ارتفاعی Elevation classes | X ₈ |
| -0/036615 | پوشش زمین land cover | X ₉ |

(۳)

$$\text{logit(Land slide)} = -9.5400 + (0.237819 * X_1) + (0.524297 * X_2) + (-0.188468 * X_3) + (-0.161814 * X_4) + (0.141 * X_5) + (-0.398539 * X_6) + (0.505626 * X_7) + (-0.008911 * X_8) + (-0.036615 * X_9)$$

ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های آماری استاندارد شامل آزمون کای‌دو (Chi-Square)، شبه‌ضریب تعیین (Pseudo R²) و سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) انجام شد (جدول ۳).

مقدار آماره آزمون کای‌دو برابر با ۴۸ / ۱۰۹۳۰ به دست آمد که به‌طور معناداری بیشتر از مقدار بحرانی در سطح اطمینان ۹۹ درصد است (P < 0.001). این نتیجه بیانگر آن است که: مدل به‌صورت کلی معنی‌دار بوده و فرض صفر مبنی بر عدم وجود رابطه

میان متغیرهای مستقل و وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای رد می‌شود. به عبارت دیگر، حداقل یکی از متغیرهای مستقل تأثیر معناداری بر متغیر وابسته دارد.

شبه‌ضریب تعیین ($Pseudo R^2$) از نوع برابر با ۰/۳۱۳۳ محاسبه شد که نشان‌دهندهٔ برازش نسبتاً مناسب مدل است. با توجه به ماهیت مدل‌های لجستیک، مقادیر $Pseudo R^2$ معمولاً کمتر از ضریب تعیین در رگرسیون‌های خطی هستند؛ با این حال، مقدار به‌دست‌آمده حاکی از قابلیت قابل قبول مدل در توضیح داده‌هاست.

همچنین مقدار سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) برابر با ۰/۹۲۲۳ محاسبه گردید. این مقدار که به عدد ۱ بسیار نزدیک است، نشان‌دهندهٔ توانایی بالای مدل در تمایز میان مناطق دارای ناپایداری‌های دامنه‌ای و مناطق فاقد آن است. در نتیجه، مدل ارائه شده از کارایی بالایی در پیش‌بینی ناپایداری‌های دامنه‌ای در منطقه‌ی مورد مطالعه برخوردار است.

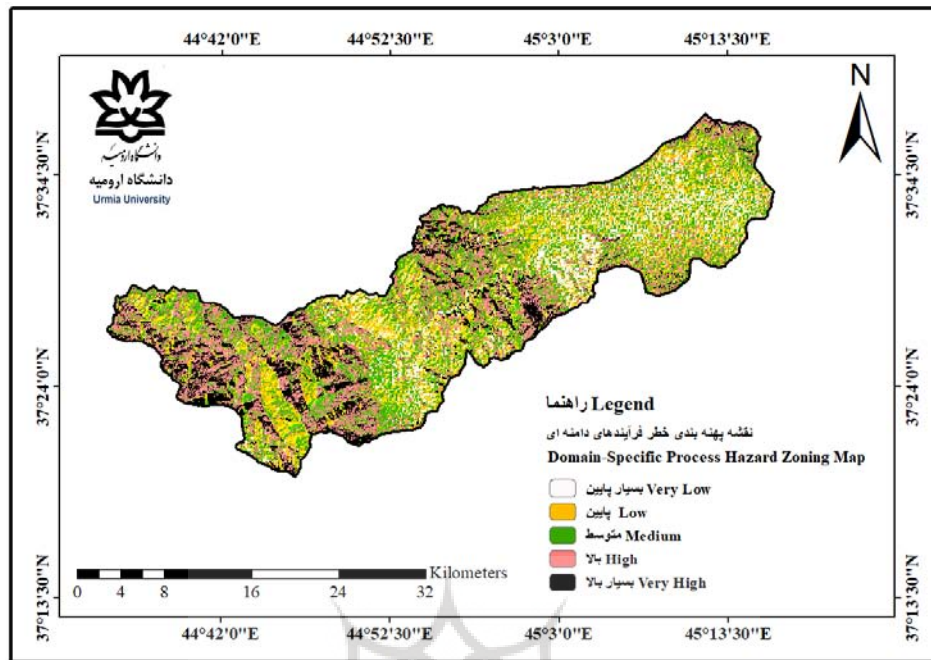
با استفاده از ضرایب محاسبه شده و مدل ارائه شده، نقشه حساسیت ناپایداری دامنه‌ها در حوضه شهرچای تهیه گردید (شکل ۲). این نقشه، مناطق مورد مطالعه را به پنج دسته حساسیت شامل «بسیار بالا»، «بالا»، «متوسط»، «کم» و «بسیار کم» تقسیم‌بندی می‌کند. تحلیل فضایی نتایج نشان می‌دهد که مناطق با حساسیت بسیار بالا از نظر مساحت محدود هستند (شکل ۳)، اما این نواحی با ویژگی‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی مانند شیب‌های تند، مجاورت با مسیرهای ارتباطی و پوشش گیاهی کم تراکم هم‌خوانی دارند. این توزیع فضایی نامتقارن، تمرکز مخاطره ناپایداری دامنه‌ای را در مناطق مشخصی تأیید می‌کند.

برای صحت‌سنجی مکانی مدل، تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالای و داده‌های میدانی مورد استفاده قرار گرفت. تطابق مکانی میان مناطق پرخطر شناسایی شده و ناپایداری دامنه‌ای واقعی، مؤید دقت بالای مدل و قابلیت اعتماد نقشه حساسیت تولید شده است.

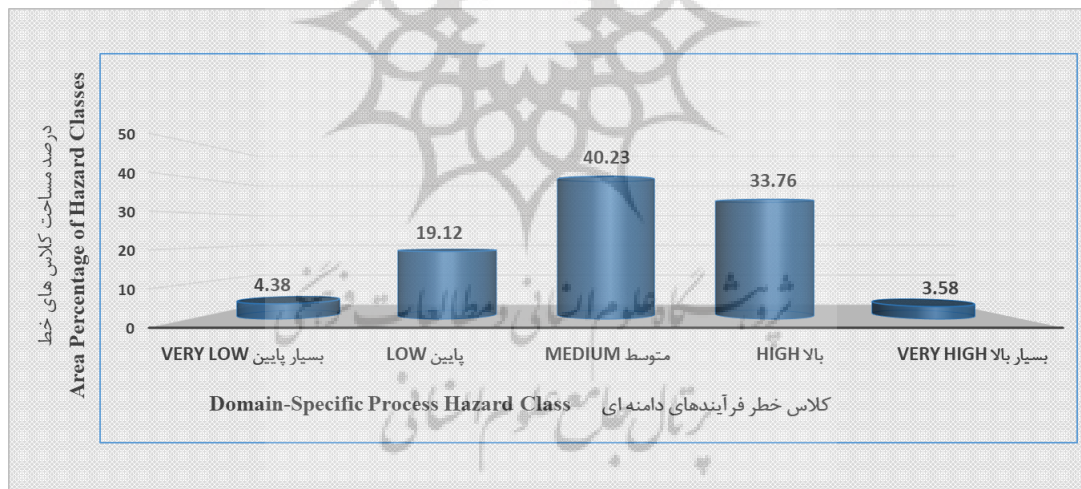
جدول ۳- شاخص‌های اعتبار سنجی مدل آماری رگرسیون لجستیک

Table 3 – Validation Indicators of the Logistic Regression Statistical Model

| مقدار به دست آمده Observed Value | مقدار استاندارد Standard Value | شاخص Indicator |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 10930/4795 | >14/1 | Chi Square |
| 0/3133 | >0/2 | Pseudo R Square |
| 0/9223 | 1>0/5 | ROC |



شکل ۲- نقشه پهنه‌بندی ناپایداری دامنه‌ای به روش رگرسیون لجستیک
Fig.2. Landslide Susceptibility Zoning Map Using the Logistic Regression Method



شکل ۳- نمودار مساحت تحت اشغال کلاس‌های خطر در روش رگرسیون لجستیک
Fig.3. Area Occupied by Hazard Classes Based on the Logistic Regression Method

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی رابطه بین فرآیندهای تکتونیکی و ژئومورفولوژیکی و ناپایداری‌های دامنه‌ای در حوضه آبریز شهرچای ارومیه انجام شد. نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها نشان داد که فعالیت‌های زمین‌ساختی، به‌ویژه حضور و فعالیت گسل‌های فعال (گسل‌های فعال شامل گسل دریاچه ارومیه، گسل‌های شمال و جنوب سلماس، گسل اشنویه، گسل کوه شهیدان) در منطقه، نقش اساسی و تعیین‌کننده‌ای در افزایش ریسک وقوع ناپایداری‌دامنه‌ای دارند. شاخص‌های مورفوتکتونیکی مانند ناهنجاری

سلسله‌مراتبی آبراهه‌ها (Δa)، تراکم ناهنجاری‌ها (ga) و نسبت انشعابات (Rb) همبستگی معنی‌داری با پراکندگی ناپایداری دامنه‌ای نشان دادند که بیانگر تأثیر مستقیم تحرکات زمین‌ساختی بر شکل‌گیری و توسعه ناپایداری‌های سطحی است.

از سوی دیگر، بررسی عوامل انسان‌ساخت مؤید تأثیر منفی فعالیت‌های توسعه‌ای در کاهش پایداری دامنه‌ها بود. ساخت و توسعه راه‌های ارتباطی، تغییرات گسترده در کاربری‌اراضی و تخریب پوشش گیاهی به طور محسوس پتانسیل وقوع ناپایداری دامنه‌ای را افزایش داده‌اند؛ به طوری که تقریباً ۹۰ درصد از رویدادهای ناپایداری دامنه‌ای در مجاورت جاده‌ها و مناطق فاقد پوشش گیاهی مناسب رخ داده است. این نکته، اهمیت نقش دخالت‌های انسانی در تشدید ناپایداری‌های دامنه‌ای را برجسته می‌سازد.

در این مطالعه، مدل رگرسیون لجستیک به عنوان ابزار اصلی تحلیل مورد استفاده قرار گرفت که با دقت بالایی (ضریب $ROC = 0.922$) توانست عوامل کلیدی مؤثر بر وقوع ناپایداری دامنه‌ای را شناسایی نماید. متغیرهایی همچون ارتفاع، شیب، فاصله از گسل‌ها و رودخانه‌ها و نوع پوشش گیاهی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر وقوع ناپایداری داشتند. تحلیل پهنه‌بندی خطر نشان داد که بیش از ۸۷ درصد ناپایداری دامنه‌ای در فاصله کمتر از ۳۰۰۰ متر از شبکه‌های آبراهه‌ای اتفاق افتاده‌اند و عمدتاً در ارتفاعات بین ۱۲۶۸ تا ۲۰۰۰ متر با شیب‌های ملایم تا متوسط (۵ تا ۲۰ درصد) تمرکز یافته‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که توزیع فضایی و ویژگی‌های توپوگرافیکی و زمین‌شناسی در تعیین ریسک ناپایداری دامنه‌ای نقش مهمی دارند.

یافته‌های این پژوهش بر ضرورت اتخاذ رویکردی جامع و بین‌رشته‌ای در مدیریت ریسک ناپایداری‌های دامنه‌ای تأکید دارند. با توجه به تأثیرات همزمان عوامل زمین‌ساختی و انسان‌ساخت، توصیه می‌شود اقدامات حفاظتی شامل احیای پوشش گیاهی بومی و طبیعی، اعمال محدودیت‌های ساخت‌وساز در شیب‌های بحرانی، کنترل فعالیت‌های عمرانی در مناطق حساس و توسعه پروژه‌های آبخیزداری به عنوان سیاست‌های اولویت‌دار در برنامه‌های مدیریت منابع طبیعی و محیط‌زیست در نظر گرفته شوند.

در نهایت، نتایج به دست آمده قابلیت تعمیم به سایر حوضه‌های کوهستانی با ویژگی‌های زمین‌ساختی و ژئومورفولوژیکی مشابه در ایران را دارند. این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنایی علمی و کاربردی برای طراحی و اجرای برنامه‌های کاهش مخاطرات ناپایداری‌های دامنه‌ای و بهبود راهبردهای مدیریت بحران و محیط‌زیست در مناطق کوهستانی کشور مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر با بهره‌گیری از داده‌های لیدار، سنجش‌ازدور، و پایش بلندمدت تغییرات مورفولوژیکی، می‌تواند مسیر تحقیقات آتی را شکل دهد.

References

- Asghari Saeskanrood, S., Mohammadzadeh Shishegaram, M., & Asghari Saeskanrood, S. (2022). Zoning and estimation of range movements in Hashtroud city using radar interferometry and MABAC model. *Environmental Management Hazards*, 9(2), 133-150. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jhsci.2022.346994.736>
- 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>
- Babolimoakher, H. (2022). Investigation the relationship between frequency of landslide with active tectonic, based on morphotectonic indices in Fahlian River Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 14(2), 243-259. [In Persian] https://jwem.areeo.ac.ir/article_125162.html
- Baharvand, S., & Soori, S. (2016). Landslide hazard zonation using artificial neural network (Case study: Sepiddasht-Lorestan, Iran). *Journal of RS and GIS for Natural Resources (Journal of Applied RS and GIS Techniques in Natural Resource Science)*, 6(4), 15-31. [In Persian]

- Baroni, C., Noti, V., Ciccacci, S., Righini, G., & Salvatore, M. C. (2005). Fluvial origin of the valley system in northern Victoria Land (Antarctica) from quantitative geomorphic analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 117(1-2), 212-228. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.08.013>
- Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2011). *Tectonic Geomorphology*. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.19.2.198>
- Chau, K. T., Sze, Y. L., Fung, M. K., Wong, W. Y., Fong, E. L., & Chan, L. C. P. (2004). Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS. *Computers & Geosciences*, 30(4), 429-443. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.08.013>
- Ciccacci, S., Fredi, P., Lupia Palmieri, E., & Pugliese, F. (1987). Indirect evaluation of erosion entity in drainage basins through geomorphic, climatic and hydrological parameters. *International Geomorphology*, 2, 233-219. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.3909.1843>
- Clement, A. J., & Brook, M. S. (2008). Tilting of active folds and drainage asymmetry on the Manawatu anticlines, New Zealand: a preliminary investigation. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 33(11), 1787-1795. <https://doi.org/10.1002/esp.1632>
- Dai, F. C., & Lee, C. F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3-4), 213-228. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00087-3)
- Esfandiari Darabad, F. (2008). Landslide hazard zoning of Ardabil-Astara communication road using GIS. *Quarterly Geographical Journal of Territory*, 5(18), 113-124. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/Journal/sarzamin/Article/823981>
- Guarnieri, P., & Pirrotta, C. (2008). The response of drainage basins to the late Quaternary tectonics in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily). *Geomorphology*, 95(3-4), 260-273. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Hemmati, F. & Mokhtari, D. (2018). Risk assessment model using artificial neural networks Benaravan fault domain instabilities (MLP). *Quantitative Geomorphological Research*, 7(1), 74-89. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1397.7.1.6.0>
- Hemmati, F., & Mokhtari, D. (2018). Zonation of the susceptibility of Banarvan Fault area to slope instability using Fuzzy AHP model. *Journal of Physical Geography*, 11 (42), 15-34. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085656.1397.11.42.2.0>
- Keller, A. E., & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. New Jersey: Prentice Hall.
- Khezri, S., Roostaei, S., & Radjaei Asl, A. (2006). Evaluation and slope instability risk zonation in central section of Zab basin (Sardast township) by Anbalagan method. *The Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 10(1), 49-80. [In Persian] <http://hsmmp.modares.ac.ir/article-21-695-fa.html>
- Kiani, T., & Yousefi, Z. (2018). Effect of active faults in the groundwater level of Shaharchay Basin in Urmia. *Journal of Geographical Sciences*, 17(47), 61-75. [In Persian] <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2682-en.pdf>
- Malekzadeh, T., Sharifi, J., & Elyasi, E. (2005). Earthquake hazard assessment in western Azerbaijan regions (Urmia County). Paper presented at the Proceedings of the First Conference on Earthquake in Dorud - Past, Present, Future, Dorud, Iran. [In Persian] <https://civilica.com/doc/4291>
- Menard, S. (2001). *Applied Logistic Regression Analysis*. SAGE publications.
- Moghimi, E., Alavi Panah, S. K., & Jafari, T. (2008). Evaluation and Zonation of Effective Factors on Landslide Occurrence of Aladagh Northern Slopes. *Physical Geography Research*, 0(63), 53-75. [In Persian] https://jphgr.ut.ac.ir/article_26906.html?
- Motavali Sadraddin, M., & Esmaeili, R. (2013). Landslide hazard zoning using gamma fuzzy operator (A case study: Taleghan watershed). *Environmental Erosion Research*, 2(4), 1-20. [In Persian] <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-178-fa.html>

- Negaresh, H., Faizi, V., Hodaei, A. A., Mollashahi, M., & Shahhiseini, M. (2013). Zoning of Mass Movement Occurrence Hazard in West Azarbaijan Province. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 2(3), 29-43. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2013.2460>
- Nikjoo, M., Boromand, R., Roostaei, S., & Amirahmadi, A. (2018). Network Analysis of Factors Affecting Binalod Range Range Instability with Environmental Management Approach (Case study: North and South slopes). *Quantitative Geomorphological Research*, 6(2), 45-63. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1396.6.2.4.3>
- Peyrowan, H. R., & Shariat Jafari, M. (2013). Presentation of a comprehensive method for determining erodibility rate of rock units with a review on Iranian geology. *Watershed Engineering and Management*, 5(3), 199-213. [In Persian] https://jwem.areeo.ac.ir/article_101843.html
- Rafiei, M., Asadian, F., & Ahmadi, J. Y. (2015). Investigation role of tectonics and lithology on slope instability in the highlands north of Orumieh Lake using GIS (A case study of the north basin of water spreading schemes Tasuj). *Territory*, 46, 23-40. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/fa/Article/823730>
- Rahimi, H. (2011). Spatio-temporal modeling of land cover changes using integration of Markov chain analysis, artificial neural networks, and cellular automata. (Master's thesis), University of Tabriz. [In Persian]
- Roostaei, S., & Khodaei, F. (2016). The zoning of slope instabilities on the mountain roads by artificial neural network (MLP) (Case study: Dare Diz Strait). *Physical Geography Quarterly*, 33, 19-35. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085656.1395.9.33.2.8>
- Roostaei, S., Mokhtari, D., & khodaiaie, F. (2015). The application of Logistic Regression in the zoning of slope instabilities on the mountain roads (case study: dare diz strait). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 4(6), 89-103. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2016.2525>
- Sharifi, R., Solgi, A., & Pourkermani, M. (2013). A study of the relationship between landslide and active tectonic zones: a case study in Karaj Watershed management. *Open Journal of Geology*, 3(3), 233-239. <http://dx.doi.org/10.4236/ojg.2013.33027>
- Shi, X., & Hu, X. (2023). Characterization of landslide displacements in an active fault zone in Northwest China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48(10), 1926-1939. <https://doi.org/10.1002/esp.5594>
- Shirani, K. (2018). On the Efficiency of Geomorphometric Parameters in Increasing the Accuracy of the Landslide Zoning Maps (Case Study: Dezolia Basin, Isfahan Province). *Geography and Environmental Planning*, 29(3), 111-130. [In Persian] <https://doi.org/10.22108/gep.2017.104440.1047>
- Skilodimou, H. D., Bathrellos, G., Antoniou, V., Koukouvelas, I., & Nikolakopoulos, K. (2022). A GIS-based study of factors related to landslides events in a tectonic active area. Paper presented at the 10th International Conference on Geomorphology, Coimbra, Portugal, ICG2022-555. <https://doi.org/10.5194/icg2022-555>, 2022
- Valizadeh Kamran, K., & Hashemzadeh, N. (2022). Zoning the risk of slope instability in Garmi city by fuzzy ANP method. *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 2(2), 20-1. [In Persian] https://rsgi.tabrizu.ac.ir/article_14792.html?
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering geology*, 102(3-4), 112-131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Zuchiewicz, W. (1998). Quaternary tectonics of the outer West Carpathians, Poland. *Tectonophysics*, 297(1-4), 121-132. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00226-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00226-1)