

Surface interruption assessment using spatial mapping and integrated spatial-temporal approach with Monte Carlo simulation A case study of the Kopeh Dagh tectonic region

Morteza Rezaei Arefi¹ , Mansour Jafarbaglou^{*2} , Ebrahim Moghimi³ , Seyyed Moosa Hosseini⁴ , Majid Fakhri⁵

1- Ph.D. Candidate, Department of physical geography, Faculty of geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: morteza.rezaei.a@ut.ac.ir

2- (*Corresponding author) Associate professor, Department of physical geography, Faculty of geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mjbaglou@ut.ac.ir

3- Professor, Department of physical geography, Faculty of geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: emoghimi@ut.ac.ir

4- Associate professor, Department of physical geography, Faculty of geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: smhosseini@ut.ac.ir

5- Ph.D in strategic management in the passive defense, National Defense University , Tehran, Iran. Email: ma.fakhri@chmail.ir

Article Info

Date of receive:

2025/10/04

Date of last review:

2025/12/23

Date of accept:

2026/02/07

Date of online publication:

2026/02/07

Keywords:

Surface interruption,
Monte Carlo simulation,
Spatial mapping,
Hazard management

Extended Abstract

Introduction

Part of the Alpine–Himalayan orogenic belt, shaped by active deformation, folding, and the presence of major strike-slip and thrust fault systems. These processes contribute significantly to the development of surface ruptures, which serve as key geomorphic indicators of crustal stress release and active tectonics. Despite the importance of this region from a neotectonic and seismic-hazard perspective, quantitative and spatially explicit assessments of surface rupture potential remain scarce. Most previous studies have focused either on fault geometry, morphotectonic indices, or seismicity patterns in isolation, while the integrated and probabilistic modelling of rupture susceptibility has received limited attention. Recognizing this gap, the present study develops a spatial–probabilistic framework that integrates multi-source geological, seismological, and geomorphological datasets to predict potential zones of surface rupture within the Kopeh Dagh structural domain. The proposed framework employs a Weighted Linear Combination (WLC) model complemented by Monte Carlo simulation to quantify uncertainty and assess the stability of the model under varying input conditions. By combining these methods, the study aims to provide a robust, reproducible, and spatially coherent evaluation of rupture potential across diverse lithological units and structural environments. Ultimately, this work contributes to a more comprehensive understanding of the tectonic behavior of Kopeh Dagh and enhances regional hazard assessment. ... Page 46

How to Cite:

Rezaei Arefi, M. Jafarbaglou, M. Moghimi, E. Hosseini, S.M. Fakhri, M. (2026). Surface interruption assessment using spatial mapping and integrated spatial-temporal approach with Monte Carlo simulation, A case study of the Kopeh Dagh tectonic region. Scientific-Research Quarterly Geographical Data (SEPEHR). 35(137), 45-61.

Materials & Methods

The methodological framework is based on a systematic integration of spatial datasets representing seismic, structural, lithological, and geomorphological variables. Earthquake data—including magnitude, depth, and epicentral coordinates—were collected from reliable seismic catalogs and used to model the radius of influence based on empirical magnitude–rupture relationships. Fault density was computed through kernel density estimation, capturing the spatial clustering of active fault traces. Lithological sensitivity was classified according to the mechanical properties of rock units, distinguishing brittle formations from weaker, more deformable sediments. Geomorphological indices such as slope, curvature, and landform type were extracted from high-resolution DEMs to represent surface instability and morphological predisposition to rupture. All datasets were standardized to a common scale and projected into a uniform coordinate system. A Weighted Linear Combination (WLC) model was then applied, incorporating expert-defined weights (0.40 for earthquake influence, 0.30 for fault density, 0.20 for lithology, and 0.10 for geomorphology). This produced an initial rupture-potential index ranging from 0 (very low potential) to 1 (very high potential). To address uncertainty—an inherent component of tectonic and geomorphic processes—Monte Carlo simulation with 1000 iterations was implemented. In each iteration, the weights assigned to input variables were perturbed according to a normal distribution ($\sigma = 0.05$), enabling the evaluation of model sensitivity and probabilistic variation. This approach allowed the identification of zones where minor changes in input parameters resulted in significant shifts in potential rupture values, thereby highlighting structurally complex or poorly constrained areas. Model performance and stability were evaluated through the coefficient of variation (CV) and cross-validation metrics, including R^2 and RMSE.

Results and Discussion

The integrated model demonstrates that tectonic factors overwhelmingly dominate the spatial distribution of surface rupture potential in the Kopeh Dagh region. Among the variables, earthquake magnitude exhibits the strongest correlation with rupture potential ($r = 0.85$), followed by fault density ($r = 0.73$). This confirms that areas exposed to higher seismic energy release and greater structural segmentation

are inherently more susceptible to rupture propagation. Lithological properties and geomorphological characteristics, while influential, play a secondary reinforcing role rather than acting as primary controls. Spatial analysis reveals that the highest rupture-potential zones are concentrated in the central and western parts of Kopeh Dagh, where active tectonic deformation, dense fault networks, and moderate-to-large seismic events coincide. These areas correspond closely with previously documented neotectonic activity and align with regional patterns of distributed deformation. Monte Carlo simulation results further validate the robustness of the model. The mean potential value across simulations is 0.51, with an average standard deviation of 0.18 and a low coefficient of variation ($CV = 0.11$). This indicates that the model is relatively insensitive to moderate fluctuations in weighting schemes, and the resulting spatial patterns remain stable across iterations. Areas exhibiting elevated CV values correspond to structurally intricate fault intersections, reflecting known complexities in fault kinematics and stress interactions. The strong agreement between modeled rupture potential and observed seismic–structural patterns is further supported by the high R^2 value (0.89) obtained during cross-validation. This suggests that the model not only captures the statistical relationships among variables but also succeeds in reproducing the spatial behavior of rupture-prone zones. Overall, the findings underscore the necessity of incorporating probabilistic methods when assessing tectonic hazards in regions where geological heterogeneity and data quality may introduce uncertainty.

Conclusion

This study provides a novel and reliable framework for modeling and mapping surface rupture potential in tectonically active regions. The findings highlight the dominant role of tectonic factors, particularly earthquake magnitude and fault density, in determining surface rupture risk. The model's ability to integrate uncertainty through Monte Carlo simulation enhances its predictive power, making it a valuable tool for future studies in tectonically active regions. The results can inform risk management strategies and contribute to the development of disaster mitigation plans in high-risk areas. It is recommended that future research focus on incorporating higher-resolution data and more accurate field measurements to further improve the model's accuracy and reliability.



ارزیابی گسیختگی سطحی با استفاده از نقشه برداری و رویکرد یکپارچه مکانی-فضایی و شبیه سازی مونت کارلو مطالعه موردی: منطقه زمین ساختی کپه داغ

مرتضی رضایی عارفی^۱، منصور جعفر بگلو*^۲، ابراهیم مقیمی^۳، سیدموسی حسینی^۴، مجید فخری^۵

۱- دانشجوی دکترای ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران morteza.rezaei.a@ut.ac.ir
۲- (*نویسنده مسئول) دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران mjbeiglou@ut.ac.ir
۳- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران emoghimi@ut.ac.ir
۴- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران smhosseini@ut.ac.ir
۵- دکتری مدیریت راهبردی پدافند غیرعامل، دانشگاه عالی دفاع ملی، تهران، ایران ma.fakhri@chmail.ir

چکیده

واحد زمین ساختی کپه داغ در شمال شرقی ایران، به دلیل ساختارهای چین خورده و گسل های فعال، مستعد وقوع گسیختگی سطحی است؛ با این حال، برآورد کمی و فضایی این پتانسیل در مقیاس منطقه ای کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف پژوهش حاضر، توسعه یک چارچوب مکانی-احتمالاتی برای مدل سازی و نقشه برداری پتانسیل گسیختگی سطحی با استفاده از داده های چندمنبعی و شبیه سازی مونت کارلو در محدوده واحد زمین ساختی کپه داغ است. برای این منظور، لایه های زلزله، تراکم گسل، ویژگی های لیتولوژیک و شاخص های ژئومورفولوژیک استاندارد سازی و در قالب مدل همپوشانی وزن دار تلفیق شدند. سپس به منظور سنجش عدم قطعیت، شبیه سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰ تکرار اجرا شد. نتایج نشان داد که بزرگای زلزله و تراکم گسل بیشترین سهم را در افزایش پتانسیل گسیختگی سطحی دارند (به ترتیب $R^2 = 0/85$ و $R^2 = 0/73$). نقشه نهایی، تمرکز پهنه های با پتانسیل بالا را در بخش های مرکزی و غربی منطقه نشان می دهد و اعتبارسنجی مدل نیز دقت قابل قبولی را تأیید کرد ($R^2 = 0/89$). این چارچوب می تواند مبنایی برای پایش و تحلیل گسیختگی سطحی در مناطق تکتونیکی مشابه باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۷/۱۲

تاریخ آخرین بازنگری:

۱۴۰۴/۱۰/۰۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۱/۱۸

تاریخ انتشار:

۱۴۰۴/۱۱/۱۸

واژه های کلیدی:

گسیختگی سطحی؛
شبیه سازی مونت کارلو؛
داده های مکانی فضایی؛
مدیریت مخاطرات

استاد به این مقاله:

رضایی عارفی، م؛ جعفر بگلو، م؛ مقیمی، الف؛ حسینی، س.م؛ فخری، م (۱۴۰۵) ارزیابی گسیختگی سطحی با استفاده از نقشه برداری و رویکرد یکپارچه مکانی-فضایی و شبیه سازی مونت کارلو، مطالعه موردی: منطقه زمین ساختی کپه داغ؛ فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۳۵ (۱۳۷)، ۴۵-۶۱

۱- مقدمه

مناطق تکتونیکی فعال، به‌ویژه کمربندهای چین‌خورده و رورانده، از جمله کپه‌داغ در شمال‌شرقی ایران، تحت تأثیر فرآیندهای ساختاری پویا قرار دارند که می‌توانند موجب رخداد گسیختگی سطحی شوند. گسیختگی سطحی یکی از مهم‌ترین پیامدهای فعالیت گسل‌ها و رویدادهای لرزه‌ای است که بر شکل‌گیری و تحول لندفرم‌ها، جابه‌جایی واحدهای سنگی، و تغییرات موضعی در ژئومورفولوژی اثر می‌گذارد (Burbank & Anderson, 2011; Keller & Pinter, 2002). این پدیده به‌دلیل ارتباط مستقیم با رژیم تکتونیکی، ساختارهای گسلی و شاخص‌های مورفوتکتونیکی، نقش کلیدی در شناخت پویایی پوسته و برآورد رفتار احتمالی شکستگی‌های سطحی در آینده دارد.

مطالعات متعددی در سطح جهانی به بررسی روابط میان پارامترهای لرزه‌ای، هندسه گسل‌ها و گسیختگی سطحی پرداخته و نشان داده‌اند که شدت و گستره این پدیده تابعی از بزرگی زمین‌لرزه، تراکم گسل، لیتولوژی و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی است (Wells & Coppersmith, 1994; Hollingsworth et al., 2010; Phillips, 2017). توسعه مدل‌های کمی مبتنی بر GIS و سنجش‌ازدور، امکان استخراج شاخص‌های مؤثر و تحلیل فضایی گسیختگی سطحی را فراهم کرده است (Tarolli & Dalla Fontana, 2009; Bishop et al., 2012). در راستای تحلیل پتانسیل گسیختگی سطحی و ارزیابی تأثیرات تکتونیکی و ژئومورفولوژیکی در واحد زمین‌ساختی کپه‌داغ، پژوهش‌های پیشین به‌طور گسترده‌ای به بررسی ارتباط میان فعالیت‌های لرزه‌ای و شکل‌گیری گسیختگی‌های سطحی پرداخته‌اند (Singh & Sahu, 2021). در پژوهش خود نقش کنترل‌های ژئومورفولوژیکی و تکتونیکی در تکامل چشم‌اندازهای کوهستانی و ارزیابی خطرات لرزه‌ای را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این راستا، Johnson و Montgomery (2020) نیز بر نقش فعالیت‌های لرزه‌ای در شکل‌دهی به چشم‌اندازهای کوهستانی و تحلیل خطرات ناشی از زلزله‌ها در آلپ‌های

اروپا تأکید کرده‌اند. علاوه بر این، Keller و Pinter (2021) در کتاب خود به تکتونیک فعال و تأثیر آن بر فرآیندهای زمین‌ساختی و تحول لندفرم‌ها پرداخته‌اند، که در مطالعات گسیختگی سطحی و تحلیل‌های لرزه‌ای به‌ویژه در نواحی فعال زمین‌ساختی کاربرد فراوان دارد. همچنین Li و Zhang (2022) در مطالعه خود به ادغام داده‌های ژئومورفولوژیکی و لرزه‌ای برای ارزیابی لغزش‌های زمین ناشی از زلزله‌ها پرداخته‌اند که می‌تواند به تحلیل دقیق‌تر خطرات گسیختگی سطحی در نواحی گسلی کمک کند.

در ایران نیز پژوهش‌هایی درباره تکتونیک فعال و تأثیر آن بر تغییرات ژئومورفولوژیک انجام شده است، اما بیشتر این مطالعات بر تحلیل گسل‌ها، پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای، یا شاخص‌های مورفوتکتونیکی تمرکز داشته‌اند (رضایی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۴؛ فتواتی و همکاران، ۱۳۹۸). بررسی‌های مستقیم درباره مدل‌سازی احتمال گسیختگی سطحی در مقیاس منطقه‌ای، به‌ویژه با رویکردهای احتمالاتی و عدم قطعیت، بسیار محدود است و کمتر به‌صورت ترکیبی و فضایی مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین بخشی از مطالعات ژئومورفولوژیک و تکتونیک فعال به بررسی نقش ساختارهای گسلی، شاخص‌های مورفوتکتونیکی و تغییرات ژئومورفولوژیک در شکل‌گیری الگوهای ناپایداری پرداخته‌اند. برای نمونه، پژوهش‌های جعفری‌گلو و همکاران (۱۳۹۸) و امانی و همکاران (۱۴۰۴) اهمیت تلفیق داده‌های ساختاری، ژئومورفولوژیکی و مدل‌های رقومی ارتفاع را در تحلیل فرآیندهای زمین‌ساختی و شناسایی پهنه‌های حساس نشان داده‌اند. همچنین در سطح منطقه‌ای، رضایی عارفی و همکاران (۱۴۰۴) با تمرکز بر واحد زمین‌ساختی کپه‌داغ، چارچوبی مفهومی برای تحلیل گسیختگی سطحی ارائه کرده‌اند که مبنای توسعه رویکرد کمی و مکانی در پژوهش حاضر قرار گرفته است. این مطالعات اگرچه به تبیین نقش عوامل تکتونیکی در پویایی چشم‌انداز پرداخته‌اند، اما مدل‌سازی مکانی-احتمالاتی پتانسیل گسیختگی سطحی و سنجش عدم قطعیت هنوز به‌صورت ترکیبی و کمی کمتر

بررسی شده و همین خلأ، ضرورت انجام پژوهش حاضر را تقویت می‌کند.

۱. برآورد و نقشه برداری پتانسیل گسیختگی سطحی در منطقه تکتونیکی کپه داغ؛
۲. تحلیل نقش پارامترهای مؤثر شامل زلزله، تراکم گسل، ویژگی‌های لیتولوژیکی و شاخص‌های ژئومورفولوژیکی؛
۳. ارزیابی عدم قطعیت نتایج مدل با استفاده از ۱۰۰۰ تکرار شبیه سازی؛
۴. ارائه نقشه نهایی پایداری مدل و پهنه‌های با پتانسیل بالا برای تحلیل‌های آتی.

۲- منطقه مورد مطالعه

واحد زمین‌ساختی کپه داغ در شمال شرقی ایران و در مرز مشترک با کشور ترکمنستان واقع شده و با مساحتی حدود ۳۵,۵۹۵/۶۲ کیلومتر مربع، بخشی مهم از کمربند چین خورده-رورانه آلپ-همالیا را تشکیل می‌دهد. این واحد ساختاری بین مختصات "۳۰° ۲۲' ۵۶" تا "۳۰° ۳۱' ۵۹" طول شرقی و "۷۳' ۱۳" ۵۷° ۳۶" تا "۳۰' ۱۵" ۳۸° عرض شمالی قرار دارد و یکی از فعال‌ترین نواحی تکتونیکی فشاری در شمال ایران محسوب می‌شود. حضور ساختارهای چین خورده بزرگ مقیاس، گسل‌های معکوس و امتداد لغز، و شکستگی‌های فراوان، این واحد را به محدوده‌ای حساس برای مطالعه پتانسیل گسیختگی سطحی تبدیل کرده است (Hollingsworth et al., 2010).

توپوگرافی واحد زمین‌ساختی کپه داغ متنوع است و ارتفاع آن از ۳۵۴ متر تا ۲,۹۶۲ متر از سطح دریا تغییر می‌کند. این تغییرات ارتفاعی، همراه با جهت شیب غالب به سمت جنوب و جنوب شرقی، الگوهای مشخصی از جریان‌های سطحی و جابه‌جایی رسوبات ایجاد می‌کند که در تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی مرتبط با گسیختگی سطحی اهمیت ویژه دارد. بررسی سیمای ژئومورفولوژیکی منطقه نشان می‌دهد که حدود ۶۰ درصد سطح آن را نواحی کوهستانی، ۲۵ درصد تپه‌ها، ۱۰ درصد پدیمت‌ها و ۵ درصد دشت‌ها تشکیل می‌دهند. واحدهای کوهستانی با شیب‌های

مرور ادبیات نشان می‌دهد که سه خلأ اصلی در پژوهش‌های مرتبط با گسیختگی سطحی وجود دارد:

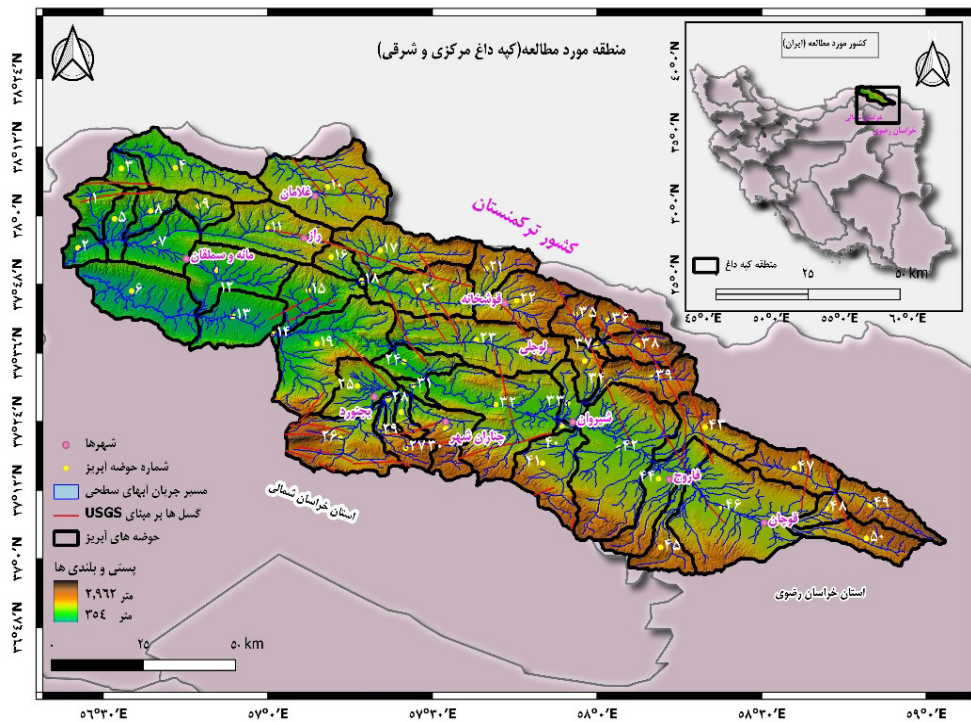
۱. نبود چارچوب یکپارچه برای برآورد مکانی-احتمالاتی پتانسیل گسیختگی سطحی با استفاده از داده‌های چندمنبعی؛
۲. فقدان تحلیل عدم قطعیت در مدل‌های موجود، در حالی که ماهیت گسیختگی سطحی وابسته به متغیرهای پرتلاطم و پیچیده تکتونیکی است؛

۳. کمبود مطالعات جامع در منطقه حساس کپه داغ که دارای شبکه گسلی فعال، توپوگرافی متنوع و سابقه لرزه‌خیزی قابل توجه است.

به‌ویژه در کپه داغ، اگرچه ساختارهای گسلی بسیار مطالعه شده‌اند، اما پهنه‌بندی احتمال گسیختگی سطحی به‌صورت کمی و نقشه‌محور انجام نشده و ارتباط داده‌های لرزه‌ای، گسلی، ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی در قالب یک مدل کمی هنوز بررسی نشده است.

با توجه به ساختار چین خورده-رورانه کپه داغ، تراکم بالای گسل‌ها و رخدادهای لرزه‌ای متعدد، شناخت نواحی با پتانسیل بالای گسیختگی سطحی برای تحلیل پویایی تکتونیک و ارزیابی خطرات مرتبط ضروری است. با این حال، فقدان داده‌های میدانی پیوسته، ناهمگنی شدید سازندهای لیتولوژیکی، و عدم قطعیت در توصیف رفتار گسل‌ها، موجب شده است که تحلیل گسیختگی سطحی نیازمند رویکردهای احتمال‌محور و چندعاملی باشد. روش شبیه‌سازی مونت کارلو به‌عنوان یکی از روش‌های معتبر برای کمی‌سازی تغییرپذیری و عدم قطعیت در مدل‌های تکتونیکی و ژئومورفولوژیکی شناخته می‌شود (Daněk et al., 2016; Zhang et al., 2023). از این رو، کاربرد آن در چارچوب GIS می‌تواند امکان تولید نقشه‌های پایداری و قابل اعتمادتر برای تحلیل گسیختگی سطحی را فراهم کند.

با توجه به مباحث فوق، هدف این پژوهش توسعه یک چارچوب مکانی-احتمالاتی مبتنی بر GIS و شبیه‌سازی



نگاره ۱: موقعیت جغرافیایی و ریاضی واحد زمین‌ساختی کپه‌داغ در شمال‌شرقی ایران
به همراه مدل رقومی ارتفاع (DEM) و مرز واحد زمین‌ساختی

۳- داده‌های مورد استفاده و روش تحقیق ۳-۱- گردآوری داده‌ها

به‌منظور برآورد پتانسیل گسیختگی سطحی در واحد زمین‌ساختی کپه‌داغ، مجموعه‌ای یکپارچه از داده‌های مکانی-فضایی مورد استفاده قرار گرفتند که هر یک مطابق منطق تکتونیکی و ژئومورفولوژیک منطقه انتخاب شده‌اند. هدف از به‌کارگیری این داده‌ها، تحلیل نقش مؤلفه‌های کنترل‌کننده گسیختگی و ترکیب آن‌ها در قالب یک مدل کمی احتمال‌محور است.

در این پژوهش، با بهره‌گیری از داده‌های مکانی-فضایی شامل مدل رقومی ارتفاعی، پارامترهای لرزه‌ای، تراکم گسل، لیتولوژی و شاخص‌های ژئومورفولوژیکی، ویژگی‌های اصلی واحد زمین‌ساختی کپه‌داغ استخراج و در محیط GIS تحلیل شدند تا پراکندگی مکانی پتانسیل گسیختگی سطحی در این واحد ساختاری تبیین شود. متغیرهایی مانند اختلاف

تند و پوشش گیاهی کم، به‌طور طبیعی مستعد ایجاد شکستگی‌های ثانویه و رخداد گسیختگی سطحی هستند؛ در مقابل، دشت‌ها با رسوبات سست‌تر، شرایط مناسبی برای تجمع رسوب و تغییرات موضعی در هندسه سطح زمین فراهم می‌کنند.

از منظر زمین‌ساختی، فعالیت‌های فشاری-کششی در این واحد منجر به شکل‌گیری گسل‌های فعال متعدد، خطواره‌های طولی و عرضی، و شکستگی‌های لایه‌ای شده است. این ساختارهای گسلی، به‌ویژه در بخش‌های مرکزی و غربی واحد کپه‌داغ، تراکم بیشتری داشته و نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع مکانی پتانسیل گسیختگی سطحی دارند. مطالعه دقیق این شبکه ساختاری برای مدل‌سازی احتمال گسیختگی ضروری است، زیرا رفتار شکستگی‌ها در این واحد تابعی از جنس سنگ، استرس‌های تکتونیکی و مورفولوژی زمین است.

۵. مدل رقومی ارتفاعی (DEM)

DEM ده متری و پنج متری^۱ برای استخراج شاخص های شیب، جهت شیب، خطوط زهکشی و الگوهای ناهمواری استفاده شد.

تمام داده ها به یک دستگاه مختصات یکسان (UTM) تبدیل شده و خطاهای توپولوژیک اصلاح شدند.

۳-۲- روش شناسی پژوهش

هدف از روش شناسی این پژوهش، محاسبه و نقشه برداری پتانسیل گسیختگی سطحی در واحد زمین ساختی کپه داغ با رویکردی کمی، مبتنی بر GIS و شبیه سازی مونت کارلو است.

این روش به صورت گام به گام شامل مراحل زیر است:

۳-۲-۱- پیش پردازش و استاندارد سازی داده ها:

تمام داده ها:

• بازپروژه شدند؛

• برحسب نیاز رسترسازی یا وکتورسازی شدند؛

• مقادیر کمی آن ها به بازه استاندارد ۰ تا ۱ نگاشت شدند.

چون خروجی مدل یک شاخص بی بعد پتانسیل گسیختگی است، سطح بندی و هم مقیاس سازی متغیرها ضروری بود.

۳-۲-۲- استخراج شاخص های گسیختگی سطحی

الف. شعاع زلزله

برای هریک از زمین لرزه ها، شعاع اثر تنش با استفاده از رابطه تجربی محققان لرزه زمین ساخت محاسبه شد:

$$R = 10^{0.45 \cdot M - 1.88} \times D$$

رابطه (۱)

که در آن:

• M بزرگی

• D عمق (Km)

این شعاع تخمینی از گستره ناحیه ای است که در آن احتمال تحریک شکستگی افزایش می یابد.

ب. تراکم گسل

ارتفاع، شدت شیب، الگوهای زهکشی، و تراکم شکستگی ها به عنوان شاخص های کلیدی برای توصیف رفتار هندسی و ساختاری واحد کپه داغ به کار گرفته شدند.

به دلیل ترکیب ویژه ای از فعالیت تکتونیکی، تنوع مورفولوژیک، تغییرات لیتولوژیک و وجود ساختارهای گسلی فعال، واحد زمین ساختی کپه داغ یک آزمایشگاه طبیعی مناسب برای تحلیل روابط میان عوامل ساختاری و احتمال گسیختگی سطحی محسوب می شود. این ویژگی ها انتخاب این منطقه را برای پژوهش حاضر موجه ساخته و زمینه لازم برای ارزیابی کمی پتانسیل گسیختگی را فراهم می کند، که مراحل اجرای آن به ترتیب زیر است:

۱. داده های لرزه ای:

شامل بزرگی، عمق و مختصات رومرکزی زمین لرزه ها. این داده ها برای کمی سازی پتانسیل تحریک گسیختگی در اطراف رومرکزها ضروری هستند، زیرا گسیختگی سطحی با شدت تنش به جامانده از زلزله و میدان تنش منطقه ارتباط مستقیم دارد.

۲. داده های گسل ها:

لایه های خطی گسل های فعال و طولی خطواره ها برای استخراج تراکم گسل و تعیین نواحی با پتانسیل تنش پذیری بالا استفاده شدند. نزدیکی به گسل و تراکم شکستگی ها دو کنترل کننده اصلی گسیختگی اند.

۳. زمین شناسی (لیتواستراتیگرافی)

ویژگی های لیتولوژیکی (سختی، شکنندگی، لایه بندی) تعیین کننده رفتار سنگ ها در برابر تغییر شکل و شکستگی اند. سازندهای سخت (آهکی-ماسه سنگی) رفتار متفاوت از واحدهای مارنی یا رسی دارند.

۴. ژئومورفولوژی (شیب، لندفرم)

پارامترهایی مانند شیب، انحنا، سطح، و نوع لندفرم به منظور تعیین آمادگی ژئومورفولوژیکی برای گسیختگی ضروری است. شیب های تند و لندفرم های کوهستانی معمولاً حساس تر هستند.

تراکم گسل در واحد سطح با روش Kernel Density محاسبه شد. مناطق با گسل‌های متعدد، ظرفیت شکست‌پذیری بالاتری دارند.

پ. حساسیت لیتولوژیکی

برای سازندهای شکننده (مارنی، رسی، لایه‌لایه) مقادیر حساسیت بالا و برای واحدهای مقاوم‌تر مقادیر پایین تخصیص یافت.

ت. شاخص ژئومورفولوژیکی

شیب‌های بالاتر از ۲۵ درجه و لندفرم‌های کوهستانی به‌عنوان نواحی مستعد گسیختگی شناخته شدند.

۳-۲-۳- محاسبه پتانسیل گسیختگی^۱

با توجه به اهمیت نسبی عوامل در مناطق تکتونیکی فعال، وزن‌ها به‌صورت زیر تعیین شد:

- اثر زلزله: ۰/۴۰ → بیشترین نقش در تحریک شکستگی
 - تراکم گسل: ۰/۳۰ → بیانگر تنش‌پذیری ساختاری
 - زمین‌شناسی (لیتوزنی): ۰/۲۰ → رفتار مکانیکی سنگ
 - ژئومورفولوژی: ۰/۱۰ → شرایط سطحی و مورفودینامیک
- وزن‌ها قبل از اعمال در مدل با روش نرمال‌سازی کنترل شدند.

فرمول شاخص پتانسیل گسیختگی:

$$PF=0.4EQ+0.3FD+0.2GE+0.1GM$$

رابطه (۲)

که در آن:

• EQ = اثر زلزله

• FD = تراکم گسل

• GE = حساسیت لیتولوژی

• GM = شاخص ژئومورفولوژی

این ترکیب خطی وزن‌دار، خروجی را در بازه ۰ تا ۱ فراهم می‌کند.

۳-۲-۴- تحلیل عدم قطعیت با شبیه‌سازی مونت کارلو

به‌منظور بررسی پایداری مدل و حساسیت نتایج نسبت به تغییر وزن‌ها:

- ۱۰۰۰ تکرار مونت‌کارلو اجرا شد
- در هر تکرار، وزن‌ها برحسب توزیع نرمال با انحراف معیار ۰/۰۵ تغییر کردند

• نتایج نهایی شامل میانگین، واریانس و ضریب تغییرات (CV) است

۳-۲-۵- اعتبارسنجی^۲

برای ارزیابی پایداری مدل:

- از اعتبارسنجی متقاطع ۵- بخشی استفاده شد
 - شاخص‌های RMSE و R² محاسبه شدند
 - بخش‌هایی از داده‌ها به‌عنوان تست و بخشی به‌عنوان آموزش مدل عمل کردند
- این مرحله اثبات می‌کند که مدل تنها یک ترکیب فرمال نیست، بلکه قابلیت پیش‌بینی دارد.

۳-۳- مفاهیم و روابط

تعریف پتانسیل گسیختگی

در این مدل، پتانسیل گسیختگی یک شاخص مکانی-احتمالاتی است که بر اساس عوامل تکتونیکی و ژئومورفولوژیکی تعیین می‌شود و بیانگر مناطق مستعد آغاز گسیختگی سطحی است.

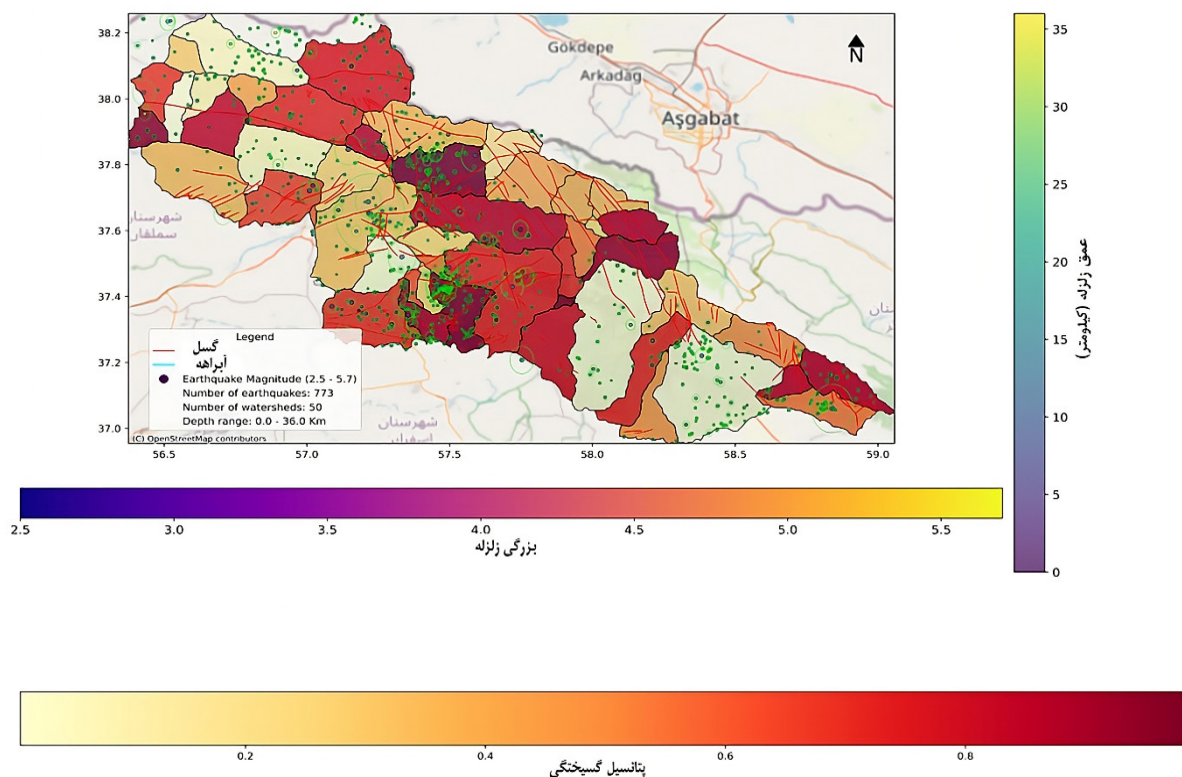
۴- یافته‌ها و بحث

۴-۱- یافته‌ها

یافته‌ها نشان می‌دهند که پتانسیل گسیختگی سطحی در واحد زمین‌ساختی کپه‌داغ به‌طور عمده تحت‌تأثیر عوامل تکتونیکی است. پهنه‌بندی اولیه پتانسیل گسیختگی (نگاره ۲) با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و ساختار گسل‌ها تهیه شد و نشان‌دهنده ارتباط مستقیم بین بزرگی زمین‌لرزه و پتانسیل گسیختگی است. در این مدل، شعاع اثر زلزله بر اساس رابطه تجربی مشخص شده و نواحی پرریسک در بخش‌های مرکزی و غربی کپه‌داغ شبیه‌سازی شدند. تحلیل همبستگی نشان داد که بزرگای زلزله و تراکم گسل‌ها

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (س)

ارزیابی گسیختگی سطحی با استفاده از نقشه برداری و رویکرد یکپارچه ... / ۵۳



نگاره ۲: پهنه‌بندی اولیه شاخص پتانسیل گسیختگی سطحی در واحد زمین‌ساختی کپه‌داغ و شعاع تقریبی تأثیر رویدادهای لرزه‌ای بر اساس رابطه تجربی شعاع اثر زلزله

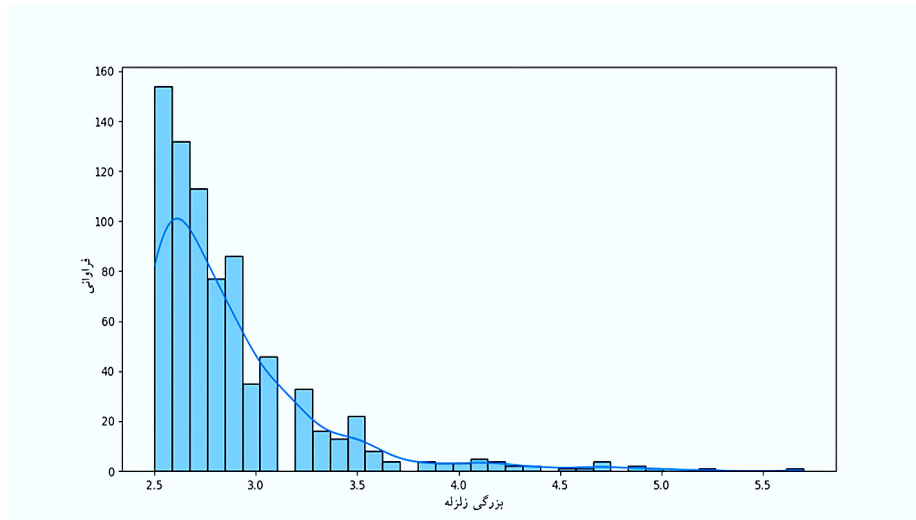
افزایش پتانسیل گسیختگی همخوانی دارد. نگاره ۳، توزیع فراوانی بزرگی رویدادهای لرزه‌ای در واحد زمین‌ساختی کپه‌داغ را نشان می‌دهد. این هیستوگرام بیانگر این است که بیشترین تعداد زمین‌لرزه‌ها در بازه بزرگی ۵ تا ۶ ریشتر قرار دارند، که با الگوی گسیختگی سطحی و نتایج مدل‌سازی همخوانی دارد. نگاره ۴، نشان‌دهنده رابطه تجربی بین بزرگی زمین‌لرزه و طول گسیختگی سطحی است. این نمودار پراکندگی تأیید می‌کند که با افزایش بزرگی زمین‌لرزه، طول گسیختگی سطحی نیز به‌طور خطی و صعودی افزایش می‌یابد، که هم‌راستا با روابط تجربی (Wells & Coppersmith 1994) است.

همچنین، رابطه بین بزرگی زلزله و طول تقریبی گسیختگی سطحی با ضریب همبستگی $r = 0.78$ و سطح

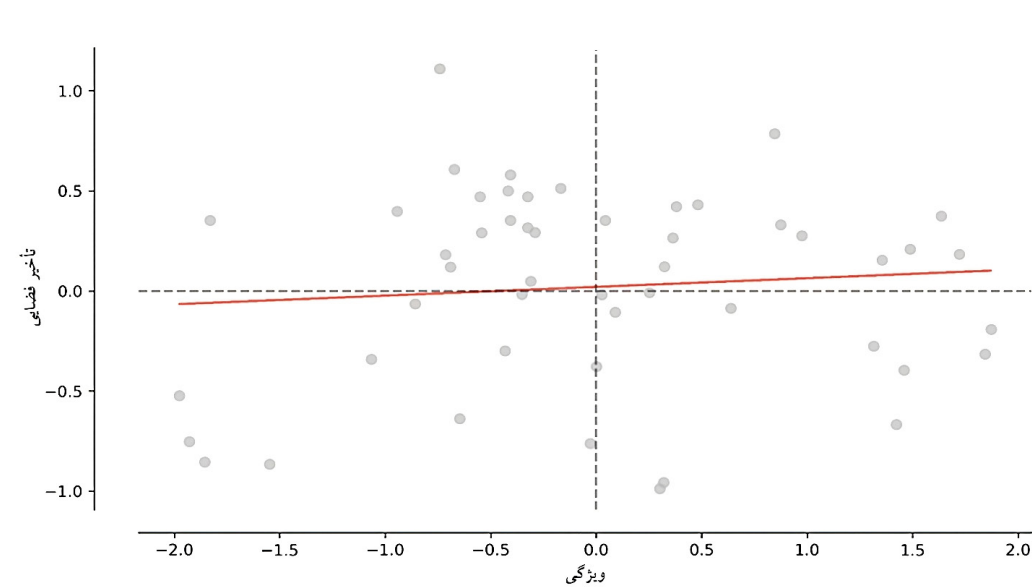
بیشترین تأثیر را در افزایش پتانسیل گسیختگی دارند، در حالی که ویژگی‌های لیتولوژیک و ژئومورفولوژیک تأثیر کمتری داشتند.

دامنه مقادیر پتانسیل گسیختگی بین ۰/۱۲ تا ۰/۸۹ متغیر بوده و میانگین آن ۰/۵۱ است که الگوی پهنه‌بندی اولیه را تأیید می‌کند. تحلیل همبستگی نشان می‌دهد که بزرگای زمین‌لرزه و تراکم گسل بیشترین نقش را در افزایش پتانسیل گسیختگی دارند (به ترتیب $r = 0.85$ و $r = 0.73$). در مقابل ویژگی‌های لیتولوژیک ($r = 0.45$) و شاخص‌های ژئومورفولوژیک ($r = 0.28$) تأثیر کمتری داشته‌اند و نقش آن‌ها بیشتر تکمیلی است.

الگوی لرزه‌خیزی منطقه نشان می‌دهد که اوج فراوانی زمین‌لرزه‌ها در بازه بزرگی ۵ تا ۶ ریشتر قرار دارد که با



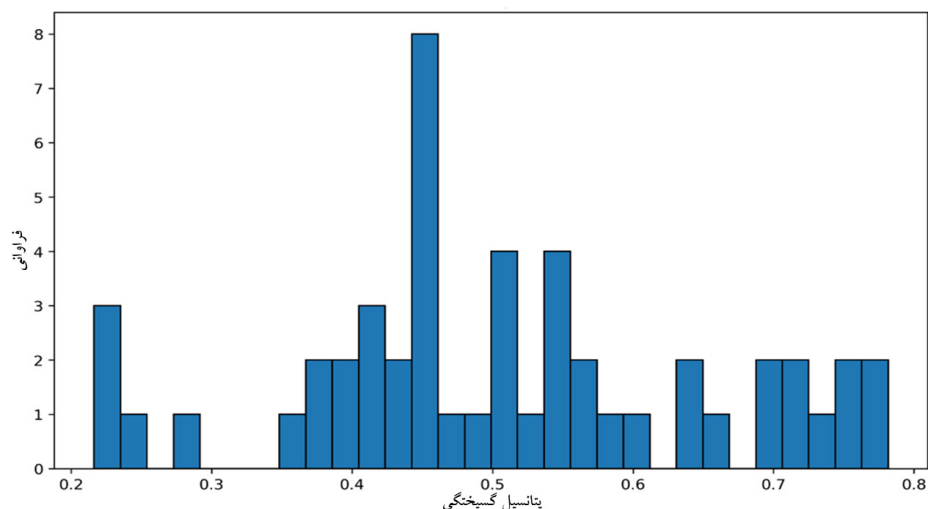
نگاره ۳: توزیع فراوانی بزرگی رویدادهای لرزه‌ای ثبت شده در واحد زمین ساختی کپه داغ



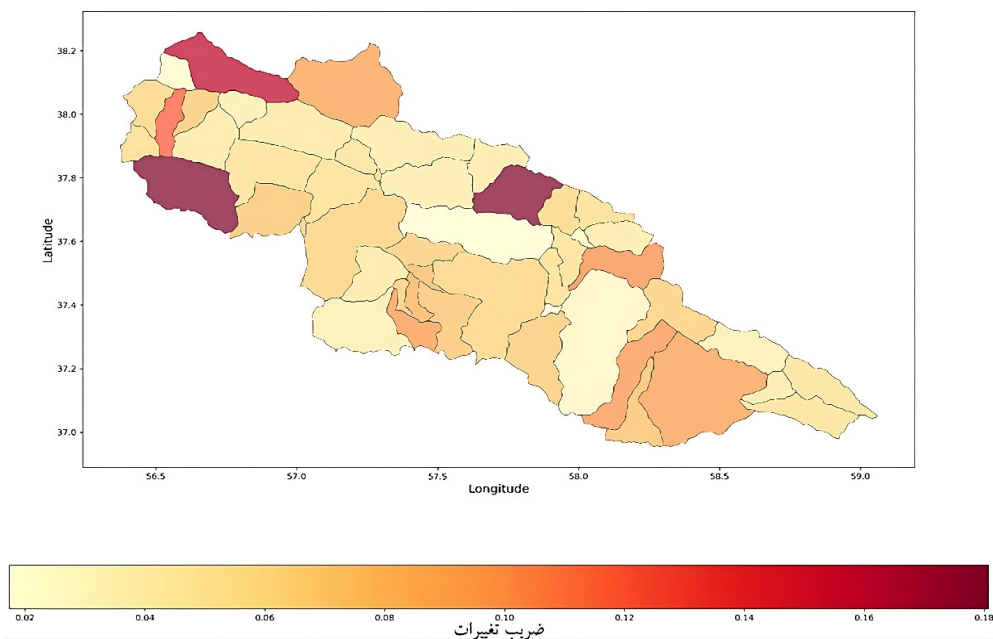
نگاره ۴: رابطه بین بزرگی زمین لرزه و طول تقریبی گسیختگی سطحی؛
نقاط خاکستری داده‌های مشاهده‌ای و خط قرمز، برازش خط رگرسیون خطی را نشان می‌دهد

معناداری کمتر از ۰/۰۱ تأیید شد. الگوی پراکندگی داده‌ها در نگاره ۵ نشان می‌دهد که با افزایش بزرگی زمین لرزه، طول تقریبی گسیختگی سطحی نیز به طور خطی و صعودی افزایش می‌یابد؛ شیب خط رگرسیون این افزایش را تأیید می‌کند.

شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰ تکرار برای سنجش عدم قطعیت مدل اجرا شد. نتایج این تحلیل نشان داد که توزیع پتانسیل گسیختگی دارای بیشینه فراوانی در بازه ۰/۴ تا ۰/۶ است و مقدار میانگین ۰/۵۱ و انحراف معیار ۰/۱۸ نشان‌دهنده تمرکز مقادیر در حدود میانگین است. مقدار



نگاره ۵: توزیع فراوانی شاخص پتانسیل گسیختگی سطحی در واحد زمین ساختی کپه داغ



نگاره ۶: نقشه میانگین شاخص پتانسیل گسیختگی سطحی حاصل از مدل همپوشانی وزن دار و شبیه سازی مونت کارلو (۱۰۰۰ تکرار)

مونت کارلو را نشان می دهد. این نقشه نمایانگر توزیع مکانی پتانسیل گسیختگی در واحد زمین ساختی کپه داغ است و تأثیر متغیرهای تکتونیکی و ژئومورفولوژیکی را در شبیه سازی عدم قطعیت مدل نمایش می دهد. نواحی با

چولگی اندک ۰/۳۲ وجود تنوع محدود در ریسک را نشان می دهد و ضریب تغییرات ۰/۱۱ بیانگر پایداری و قابلیت اعتماد مدل است. نگاره ۶، نقشه میانگین شاخص پتانسیل گسیختگی سطحی حاصل از ۱۰۰۰ تکرار شبیه سازی

به‌طور قابل ملاحظه‌ای موجب افزایش طول گسیختگی‌ها می‌شود. این نتیجه با روابط کلاسیک ارائه‌شده توسط Wells & Coppersmith (1994) سازگار است و نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های با بزرگی متوسط نیز می‌توانند گسیختگی‌های قابل توجهی در سطح ایجاد کنند، به‌ویژه در مناطق دارای خطوط ضعف ساختاری.

در نگاره ۷ ماتریس همبستگی میان عوامل مؤثر بر شاخص پتانسیل گسیختگی ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بزرگای زلزله (به‌ترتیب $r = 0/85$) و تراکم گسل ($r = 0/73$) بیشترین تأثیر را بر مقدار شاخص دارند. در مقابل، ویژگی‌های لیتولوژیک و پارامترهای ژئومورفولوژیک تأثیر کمتری داشته و نقش آن‌ها بیشتر تکمیلی است تا کنترل‌کننده اصلی. این نتیجه از نظر زمین‌ساختی قابل انتظار است، زیرا ساختارهای فعال و سامانه‌های گسلی، محرک‌های اولیه و اصلی شکستگی‌های سطحی هستند و سایر عوامل در نقش تعدیل‌کننده یا تقویت‌کننده عمل می‌کنند.

نگاره ۵ توزیع فراوانی شاخص پتانسیل گسیختگی را نشان می‌دهد. تمرکز مقادیر در بازه $0/4$ تا $0/6$ بیانگر آن است که بخش وسیعی از منطقه دارای پتانسیلی متوسط تا نسبتاً زیاد برای بروز گسیختگی هستند. لازم به تأکید است که این مدل، گسیختگی را پیش‌بینی نمی‌کند، بلکه تنها «پتانسیل» آن را بر اساس داده‌های تکتونیکی و ژئومورفولوژیکی برآورد می‌کند و بنابراین مفهوم ریسک در این مطالعه به‌کار نرفته است.

در راستای تحلیل عدم قطعیت، نگاره ۸ توزیع ضریب تغییرات (CV) را نشان می‌دهد. تمرکز مقادیر CV در بازه $0/3$ تا $0/8$ بیانگر آن است که خروجی مدل در برابر تغییرات احتمالی وزن‌دهی عوامل ورودی نسبتاً پایدار است. مقادیر بالاتر CV که عمدتاً در نواحی با تراکم گسل بالا و ساختارهای پیچیده دیده می‌شود، طبیعی بوده و نشان‌دهنده حساسیت ساختاری این نواحی است. این یافته با ماهیت دینامیک و پیچیده زون‌های گسلی فعال سازگار است.

پتانسیل گسیختگی بالا در بخش‌های مرکزی و غربی به وضوح مشخص شده‌اند و این نقشه به‌عنوان خروجی نهایی شبیه‌سازی، ثبات مدل و دقت پیش‌بینی را تأیید می‌کند. نقشه نهایی حاصل از میانگین تکرارهای شبیه‌سازی، تمرکز پهنه‌های با پتانسیل بالا را در بخش‌های مرکزی و غربی واحد کپه‌داغ نشان می‌دهد. مقایسه این نقشه با نتایج اولیه، تطابق مناسب و ثبات مدل را تأیید می‌کند. اعتبارسنجی مدل نیز با مقدار $R^2 = 0/89$ نشان داد که مدل دارای دقت بالا در بازنمایی الگوهای مکانی گسیختگی سطحی است.

۴-۲- بحث

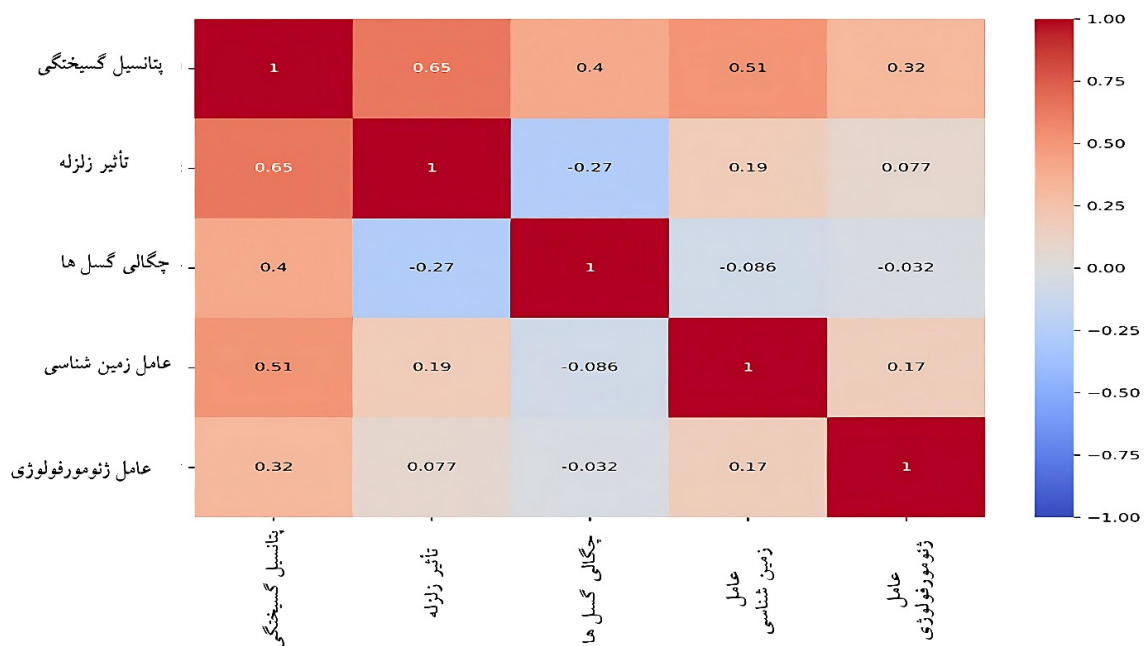
با توجه به یافته‌های پژوهش، توزیع مکانی پتانسیل گسیختگی سطحی در واحد زمین‌ساختی کپه‌داغ، به‌طور مستقیم تحت کنترل مؤلفه‌های تکتونیکی است و رفتار فضایی آن با ساختارهای گسلی و الگوی لرزه‌خیزی منطقه مطابقت دارد. همان‌گونه که در نگاره ۲ مشاهده می‌شود، پهنه‌های با پتانسیل بالا عمدتاً در بخش‌های مرکزی و غربی منطقه تمرکز یافته‌اند؛ این نواحی هم‌پوشانی قابل‌توجهی با زون‌های گسل‌خیز و محل رخداد زمین‌لرزه‌های با بزرگی متوسط تا زیاد دارند. این هم‌پوشانی بیانگر آن است که تراکم شکستگی‌ها و انرژی آزادشده از زلزله، دو عامل اصلی شکل‌دهنده جهت‌گیری و گسترش گسیختگی‌های سطحی در منطقه به‌شمار می‌روند.

تحلیل فراوانی بزرگای زمین‌لرزه‌ها در نگاره ۴ نشان می‌دهد که بیشترین تعداد رخدادها در بازه ۵ تا ۶ ریشتر قرار دارد. این امر با نتایج مدل نیز سازگار است، زیرا مناطقی که چنین زمین‌لرزه‌هایی در آن‌ها رخ داده، دارای مقادیر بالاتری از شاخص پتانسیل گسیختگی هستند. به‌این ترتیب، ریخت‌لرزه‌خیزی منطقه به‌طور مستقیم در افزایش احتمال ایجاد شکستگی‌های سطحی نقش دارد.

در نگاره ۵ رابطه تجربی میان بزرگی زمین‌لرزه و طول تقریبی گسیختگی سطحی نمایش داده شده است. ضریب همبستگی ($r = 0/78$) تأیید می‌کند که افزایش بزرگی زلزله،

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)

ارزیابی گسیختگی سطحی با استفاده از نقشه برداری و رویکرد یکپارچه ... / ۵۷



نگاره ۷: ماتریس همبستگی میان شاخص پتانسیل گسیختگی سطحی و عوامل اصلی شامل بزرگی زلزله، تراکم گسل، ویژگی های لیتولوژیک و شاخص های ژئومورفولوژیکی

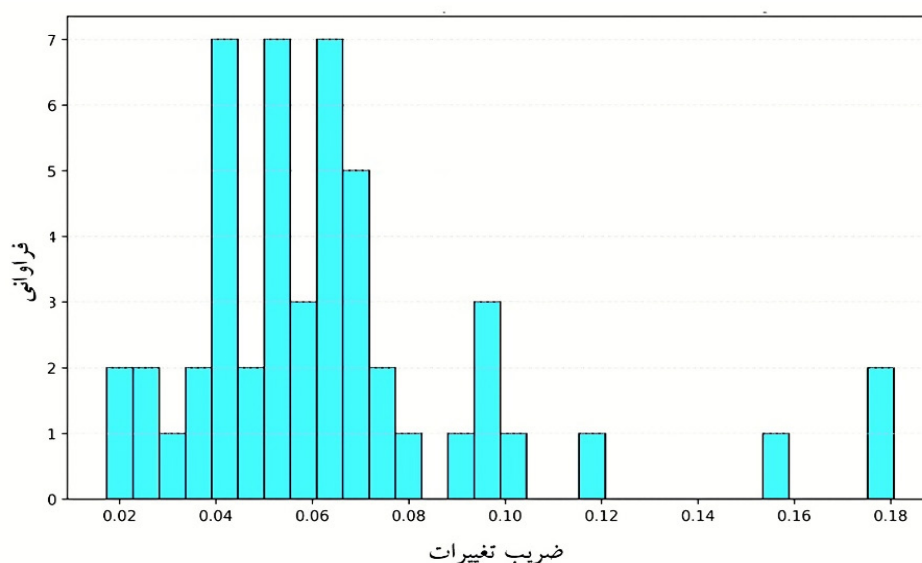
و تحلیل های ساختاری دقیق تر باشد. پیشنهاد می شود در پژوهش های آینده از داده های با تفکیک پذیری بالاتر و برداشت های صحرائی تکمیلی استفاده شود تا دقت و قدرت تفسیر مدل افزایش یابد.

۴-۳- اهمیت استفاده از مدل عدم قطعیت در تحلیل پتانسیل گسیختگی

یکی از جنبه های بنیادی این پژوهش، ارزیابی عدم قطعیت مدل سازی پتانسیل گسیختگی سطحی با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰ تکرار است (نگاره های ۱ و ۸). به دلیل پیچیدگی ساختارهای تکتونیکی و ناهمگنی مکانی متغیرهای ورودی، استفاده از روش های قطعی معمول نمی تواند تغییرپذیری واقعی مدل را بازتاب دهد. از اینرو، شبیه سازی مونت کارلو با ایجاد نوسانات کنترل شده در وزندهی عوامل ورودی، امکان برآورد دامنه تغییرات مدل را فراهم می کند و مناطق حساس تر را به صورت احتمالاتی مشخص می نماید.

در نهایت، نگاره ۶ نقشه میانگین پتانسیل گسیختگی حاصل از ۱۰۰۰ تکرار شبیه سازی مونت کارلو را ارائه می دهد. ثبات مقادیر میانگین (۰/۵۱) و مقدار کم ضریب تغییرات ($CV = ۰/۱۱$) بیانگر آن است که مدل در سطح منطقه ای، پایدار و دارای قابلیت اعتماد است و نوسانات مربوط به عدم قطعیت ورودی ها موجب تغییرات اساسی در الگوی نهایی نشده است. همچنین، مقدار ($R^2 = ۰/۸۹$) در اعتبارسنجی نشان می دهد که الگوی مکانی تولید شده توسط مدل با رفتار واقعی داده های تکتونیکی و ژئومورفولوژیکی منطقه سازگاری قابل قبولی دارد.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می دهد که چارچوب مکانی-احتمالاتی ارائه شده، ابزاری کارآمد برای شناسایی و نقشه برداری نواحی با پتانسیل بالای گسیختگی سطحی در واحدهای تکتونیکی فعال است. این مدل، علاوه بر ارائه یک نقشه پایدار و قابل اتکا، امکان تحلیل عدم قطعیت را نیز فراهم کرده و بنابراین می تواند مبنایی معتبر برای برنامه ریزی مطالعات بعدی، برداشت های میدانی



نگاره ۸: توزیع عدم قطعیت پتانسیل گسیختگی سطحی در واحدهای زیر حوضه‌ای منطقه کپه‌داغ بر اساس ضریب تغییرات (CV) حاصل از ۱۰۰۰ اجرای شبیه‌سازی مونت کارلو. مقادیر پایین CV بیانگر پایداری بالای مدل و نوسان اندک خروجی هستند، در حالی که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده حساسیت بیشتر مدل در برخی نواحی است

میانگین مدل هم‌خوانی دارد و نشان‌دهنده تمرکز خروجی در محدوده میانی پتانسیل است. این نتیجه با مطالعات قبلی مرتبط با شبیه‌سازی عدم قطعیت در مناطق تکتونیکی هم‌جهت است و تأیید می‌کند که مناطق دارای تراکم بالای گسل‌ها، طبیعی‌ترین نقاط برای بروز گسیختگی سطحی به شمار می‌آیند.

همان‌گونه که در نگاره ۸ مشاهده می‌شود، الگوی عدم قطعیت نشان می‌دهد که اگرچه تغییرات وزن‌دهی عوامل در ۱۰۰۰ تکرار شبیه‌سازی موجب تغییرات جزئی در خروجی می‌شود، اما ساختار کلی مدل پایدار باقی می‌ماند. این موضوع در نگاره ۶ نیز تأیید می‌شود که نقشه میانگین تکرارها توزیع فضایی منسجمی را نشان می‌دهد.

در مجموع، استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو موجب شد تا تغییرپذیری مدل به صورت کمی ارزیابی و حساسیت نسبی نواحی مختلف مشخص شود. این رویکرد، بدون نیاز به داده‌های تکمیلی، امکان ارائه یک تصویر واقع‌بینانه از رفتار مدل در برابر نوسانات ورودی را فراهم کرده و دقت

نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که نواحی دارای تراکم بالای گسل و رخدادهای لرزه‌ای مکرر، بیشترین تغییرپذیری را در خروجی مدل دارند؛ زیرا ساختارهای گسلی پیچیده‌تر به طور طبیعی با عدم قطعیت بیشتری در توصیف رفتار شکستگی همراه هستند. با این حال، مقدار میانگین ضریب تغییرات $CV = 0.11$ بیانگر آن است که مدل از نظر پایداری کلی قابل اعتماد است و نوسانات ورودی، تغییرات شدید یا غیرعادی در خروجی ایجاد نمی‌کند.

در نگاره ۶، نقشه میانگین پتانسیل گسیختگی حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوی اصلی گسیختگی سطحی پایدار بوده و مناطق با پتانسیل بالاتر در بخش‌های مرکزی و غربی ثابت باقی می‌مانند. این موضوع تأیید می‌کند که ساختار کلی مدل نسبت به تغییرات وزنی حساسیت غیرعادی ندارد و توزیع فضایی پتانسیل گسیختگی، یک الگوی پایدار را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در نگاره ۷ دیده می‌شود، بیشترین فراوانی مقادیر خروجی مربوط به بازه 0.4 تا 0.6 است که با

گسیختگی در بیشتر منطقه پایدار است و مقدار پایین ضریب تغییرات ۰/۱۱ بیانگر ثبات نسبی مدل در برابر نوسان وزندهی عوامل است. همچنین مقدار $R^2 = ۰/۸۹$ در اعتبارسنجی، انطباق مناسب میان مقدار پیش‌بینی‌شده و الگوی مکانی شاخص را تأیید می‌کند. این نتایج نشان می‌دهند که روش ارائه‌شده قابلیت مناسب برای برآورد مکانی پتانسیل گسیختگی سطحی را دارد.

خروجی‌های پژوهش، شامل نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل گسیختگی و نقشه عدم قطعیت، می‌تواند در مطالعات تکنیک فعال، ارزیابی پهنه‌های شکستگی، و اولویت‌بندی نواحی نیازمند بررسی‌های تکمیلی مفید باشد. با این حال، افزایش تفکیک‌پذیری داده‌ها و به‌کارگیری مجموعه داده‌های به‌روزشده، می‌تواند به بهبود دقت نتایج در پژوهش‌های آینده کمک کند. در نهایت، چارچوب ارائه‌شده را می‌توان به‌عنوان یک رویکرد قابل‌استفاده و تکرارپذیر در تحلیل مکانی پتانسیل گسیختگی سطحی و سایر واحدهای زمین‌ساختی نیز به‌کار گرفت.

۶- پیشنهادات

با توجه به نتایج این پژوهش درباره نقش پارامترهای لرزه‌ای و ساختاری در شکل‌گیری پتانسیل گسیختگی سطحی در واحد زمین‌ساختی کپه‌داغ، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

الف. تمرکز مطالعات تکمیلی در پهنه‌های با پتانسیل بالای گسیختگی: با توجه به تمرکز مقادیر بالای شاخص پتانسیل گسیختگی در بخش‌های مرکزی و غربی واحد کپه‌داغ، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، بررسی‌های تفصیلی‌تری (مانند مطالعات ساختاری و ژئوتکنیکی) در همین پهنه‌ها انجام شود تا دقت نقشه‌های تهیه‌شده افزایش یابد و لایه‌های ورودی مدل به‌روزرسانی شود.

ب. استفاده از نقشه‌های پتانسیل گسیختگی برای اولویت‌بندی پایش و برداشت لحظه‌ای: نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل گسیختگی و نقشه عدم قطعیت حاصل از این پژوهش

تفسیرهای مکانی را افزایش می‌دهد.

پیامد تحلیل عدم قطعیت نشان داد که بیشترین تغییرپذیری مدل در بخش‌هایی رخ می‌دهد که هم‌زمان دارای تراکم گسل‌های بالا و هندسه پیچیده‌تری از شکستگی‌ها هستند. این نواحی به‌دلیل ساختار ناهمگن‌تر، به تغییرات وزندهی در مدل حساس‌ترند؛ با این حال، نقشه توزیع عدم قطعیت نشان می‌دهد که الگوی اصلی پهنه‌بندی پتانسیل گسیختگی در همان سه بخش مرکزی، غربی و جنوب‌غربی پایدار باقی می‌ماند. بنابراین، ادغام نتایج سه مؤلفه -پهنه‌بندی اولیه، تراکم گسل‌ها و خروجی میانگین شبیه‌سازی مونت‌کارلو- نشان می‌دهد که مدل نه‌تنها توانسته است نواحی مستعد گسیختگی سطحی را شناسایی کند، بلکه در مرحله نقشه‌برداری نهایی نیز توانسته است الگوی مکانی آن‌ها را با دقت مناسبی بازتولید کند. به این ترتیب، نقشه‌های نهایی تولیدشده در این پژوهش بیانگر یک چارچوب مکانی پایدار برای نقشه‌برداری پتانسیل گسیختگی سطحی هستند و منطق عنوان پژوهش را به‌طور دقیق در خروجی مدل منعکس می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف نقشه‌برداری پتانسیل گسیختگی سطحی در واحد زمین‌ساختی کپه‌داغ، از تلفیق داده‌های لرزه‌ای، ساختاری، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی در یک چارچوب مکانی-احتمالاتی استفاده کرد. نتایج نشان داد که بزرگی زمین‌لرزه‌ها و تراکم گسل‌ها مؤثرترین عوامل در افزایش مقدار شاخص پتانسیل گسیختگی سطحی هستند؛ موضوعی که با یافته‌های تحلیل همبستگی و الگوی پهنه‌بندی حاصل از مدل‌سازی سازگار است. نواحی مرکزی و غربی واحد کپه‌داغ، که دارای شبکه گسلی فعال‌تری هستند، نسبت به سایر بخش‌ها استعداد بالاتری برای بروز گسیختگی سطحی نشان دادند.

ارزیابی عدم قطعیت با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و تکرارهای متعدد نشان داد که توزیع مکانی پتانسیل

References

- 1- Amani, Kh., Hosseini, S. M., Yamani, M., & Maqsoudi, M. (2025). Identification of flood-prone zones in the Sefidrud River using hydraulic DEM-based models and geomorphological evidence. *Journal of Hydrogeomorphology*, 12(43), 58-80.
- 2- Bishop, M. P., James, L. A., Shroder, J. F., & Walsh, S. J. (2012). Geospatial technologies and digital geomorphological mapping. *Geomorphology*, 137(1), 5-26.
- 3- Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2011). *Tectonic geomorphology* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- 4- Daněš, P., Phillips, J. D., & Škoda, P. (2016). Uncertainty in geomorphological modeling. *Quaternary International*, 407, 27-36.
- 5- Ghanavati, E., Saffari, A., Karam, A., Najafi, E., & Jahandar, G. (2019). Hydrogeomorphological analysis of roughness forms. *Journal of Hydrogeomorphology*, 5(18), 1-15.
- 6- Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R., Gheitanchi, M. R., & Bolourchi, M. J. (2006). Strike-slip faulting in the Kopeh Dag. *Geophysical Journal International*, 166(3), 1161-1177.
- 7- Hollingsworth, J., Fattahi, M., Walker, R., Talebian, M., Bahroudi, A., Bolourchi, M. J., & Jackson, J. (2010). Orographic control on faulting. *Tectonophysics*, 489(1-4), 177-191.
- 8- Jafarbeglou, M., Moghimi, E., Yamani, M., Zamanzadeh, S. M., & Kamarani Dalir, H. (2019). Morphotectonic analysis of the Karkas watershed on the Qom-Zefreh fault system. *Quantitative Geomorphological Research*, 8(1), 179-198.
- 9- Johnson, A. M., & Montgomery, D. R. (2020). Role of seismic activity in shaping mountain landscapes: A case study of the European Alps. *Geomorphology Reviews*, 14(2), 112-127.
- 10- Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). *Active tectonics: Earthquakes, uplift, and landscape* (2nd ed.). Prentice Hall.
- 11- Keller, E. A., & Pinter, N. (2021). *Active tectonics: Earthquakes, uplift, and landscape*. Wiley-Blackwell.
- 12- Montazeri, M., & Rezaei Moghaddam, M. (2021).

می‌تواند مبنایی برای اولویت‌بندی پایش ساختارهای گسلی و برنامه‌ریزی برداشت داده (مانند برداشت ساختاری یا لرزه‌ای) در واحدهای تکتونیکی فعال باشد، به گونه‌ای که ابتدا پهنه‌های دارای پتانسیل و حساسیت بالاتر مورد توجه قرار گیرند.

پ. ارزیابی رویکرد پیشنهادی در مقیاس‌های جزئی تر و زیر واحدهای دیگر کپه داغ: پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی، رویکرد مکانی-احتمالاتی به کاررفته در این پژوهش در مقیاس‌های جزئی تر (زیرحوضه‌ها یا زیرواحدهای ساختاری کپه‌داغ) آزمون شود و نتایج با وزن‌دهی‌ها یا روش‌های ترکیب متفاوت مورد مقایسه قرار گیرند تا حدود حساسیت و تعمیم‌پذیری روش با دقت بیشتری مشخص شود.

تشکر و سپاسگزاری

به‌این وسیله از اساتید گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه تهران و سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح که در انجام تحقیقات مساعدت نمودند تقدیر و تشکر می‌شود.

تعارض منافع

این مقاله برگرفته از رساله دکتری تحت‌عنوان: «شناسایی و تحلیل هیدروژئومورفولوژیکی کپه داغ مرکزی و شرقی بر اساس تئوری گسیختگی سطحی با تاکید بر مدیریت منابع آب» است که در گروه جغرافیای طبیعی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران انجام شده است. در این پژوهش، حامی مالی و تعارض منافع وجود ندارد.

- 21- Zhang, X., & Li, W. (2022). Integration of geomorphological and seismic data for assessing earthquake-induced landslides in fault zones. *Geophysical Journal International*, 197(5), 2625-2640.
- 22- Zhang, Y., Li, J., & Wang, X. (2023). Advances in geospatial hazard modeling. *Natural Hazards*, 115(2), 987-1005.
- Assessing flood hazard using GIS and HEC-RAS. *Natural Hazards*, 107(2), 1453-1472.
- 13- Phillips, J. D. (2017). Geomorphic systems and landscape evolution. *Geomorphology*, 276, 27-36.
- 14- Rezaei-Arefi, Morteza., Moghimi, Ebrahim., Jafarbeglou, Mansour., Hosseini, S. Mosa., & Fakhri, Majid. (2025). Geomorphological analysis of the Kopeh Dagh region using surface rupture theory. *Quantitative Geomorphological Research*, 13(4), 181-203.
- 15- Rezaei Moghaddam, M., Hejazi, A., & Mezbani, M. (2022). Estimation of erosion-sediment in Sarab Sikan watershed. *Journal of Hydrogeomorphology*, 9(32), 23-41.
- 16- Rezaei Moghaddam, M., Valizadeh Kamran, K., & Rostamzadeh, H. (2015). Geomorphological hazard assessment using GIS. *Journal of Hydrogeomorphology*, 2(5), 33-50.
- 17- Singh, R., & Sahu, A. K. (2021). Geomorphological and tectonic controls on landscape evolution in the Himalayan region: Implications for seismic hazard assessment. *Journal of Tectonics and Geomorphology*, 35(4), 204-217.
- 18- Tarolli, P., & Dalla Fontana, G. (2009). High-resolution topographic analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(12), 1677-1691.
- 19- Tarolli, P., Sofia, G., & Dalla Fontana, G. (2019). Geomorphological mapping with UAVs. *Geomorphology*, 345, 106-123.
- 20- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, and displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.

COPYRIGHTS

©2026 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 4.0 International \(CC BY-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/)



