Physical Geography Research Quarterly

Online ISSN: 2423-7760

Journal Homepage: jphgr.ut.ac.ir

Institute of Geography

Identification and Analysis of Surface Interrupture Landforms in the Kopet-Dagh Region in Iran, Using Machine Learning Techniques

Morteza Rezaei Arefi [1], Mansour Jafarbeglou [2] ✉, Ebrahim Moghimi [3], Seiyed Mossa Hosseini [4], Majid Fakhri [5]

1. *Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran,Tehran, Iran*
Email: morteza.rezaei.a@ut.ac.ir
2. (Corresponding Author) *Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran,Tehran, Iran*
Email: mjbeglou@ut.ac.ir
3. *Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran,Tehran, Iran*
Email: emoghimi@ut.ac.ir
4. *Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran,Tehran, Iran*
Email: smhosseini@ut.ac.ir
5. *Geographic Organization of the Armed Forces, Tehran, Iran*
Email: ma.fakhri@chmail.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:
Received:
4 June 2025
Revised:
3 September 2025
Accepted:
9 October 2025
Available online:
11 November 2025

Keywords:
Interrupture Analysis, Active tectonics, Machine Learning Water manegment, Kopet-Dagh.

ABSTRACT

This study investigates surface interrupture patterns in the tectonically active Kopet-Dagh region along the Iran–Turkmenistan border, utilizing advanced machine learning algorithms to enhance geomorphometric analysis for optimized water resource management and sustainable land-use planning. The methodology employed integrates high-resolution Digital Elevation Models (DEMs), Python-based analytical tools, and advanced statistical methods to extract key terrain attributes such as slope, aspect, and lineaments. Machine learning algorithms, including random forest and multivariate regression models, were applied to model surface interrupture patterns, achieving accuracies of 85% and 78%, respectively. The results reveal that surface interrupture predominantly occurs in areas with high lineament density (covering 49.51% of the study area), influenced by factors such as slope, fracture density, and surface-water flow patterns. The random forest model identified slope and fracture density as the most influential predictors, demonstrating the efficacy of combining modern machine learning methods with traditional geomorphometric analyses. This research provides an innovative framework for understanding surface water dynamics in tectonically active regions, offering valuable tools for water resource managers and land-use planners to optimize conservation and allocation strategies. The findings also contribute significantly to the expansion of knowledge of geomorphological and tectonic processes in semi-arid mountainous environments and support the development of sustainable water management strategies.

Cite this article: Rezaei Arefi, M., Jafarbeglou. M., Moghimi, E., Hosseini, S.M., & Fakhri, M. (2025). Identification and Analysis of Surface Interrupture Landforms in the Kopet-Dagh Region in Iran, Using Machine Learning Techniques. *Physical Geography Research Quarterly*, 57 (3), 87-100.
http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.385416.1007851

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Surface interrupture is a pivotal phenomenon in Earth sciences that significantly influences landscape evolution and surface water dynamics. This study examines surface interrupture patterns in the Kopet Dagh region of northeastern Iran, a tectonically active area, to support effective water resource management. It is motivated by the need to deepen understanding of tectonic and geomorphological controls on hydrology in semi-arid, mountainous regions. The primary objective is to identify and analyze surface interrupture patterns by integrating geomorphometric analysis with advanced machine learning techniques. Two research questions are addressed: (1) What are the main factors controlling surface interrupture patterns in the Kopet Dagh region? (2) How can machine learning improve the accuracy of modeling these patterns for water management? By proposing a novel analytical framework, this study aims to fill critical gaps in the understanding of surface water dynamics in this region.

Methodology

- Terrain attributes (slope, flow direction derived via the D8 algorithm, curvature, etc.) were derived from a 10 m Digital Elevation Model (DEM) using the open-source RichDEM Python library, which provides high-performance tools for hydrological analysis.
- Lineaments were extracted from the DEM using automated edge-detection algorithms, resulting in a lineament density covering about 49.5% of the study area.
- Fracture density was calculated by dividing mapped fracture lengths by unit area (mean ≈ 0.4355; median ≈ 0.4768). Flow accumulation was also modeled using the D8 algorithm to understand dominant drainage directions.
- Machine learning analyses included (a) multiple linear regression (yielding $R^2 \approx 0.399$), (b) Random Forest analysis (to assess predictor importance), and (c) K-means clustering (to identify distinct spatial patterns of geomorphic attributes). These analyses were combined with conventional geomorphological interpretation to form a robust framework for modeling surface water flow and storage in the region.

These methods were integrated into a comprehensive analytical framework for modeling and interpreting surface interrupture patterns and their implications for water resources.

Results and Discussion

The DEM analysis revealed that the Kopet Dagh study area (≈ 14,193 km²) has a rugged mountainous topography with elevations ranging from about 354 to 2,962 m. This terrain configuration, shaped by active tectonics, strongly influences surface water flow. Lineament analysis showed a high density of structural lineaments (average density ≈ 0.495), indicating pervasive tectonic deformation. The dominant flow direction is to the southeast, reflecting the regional gradient and channel network configuration. Fracture density (mean ≈ 0.4355) emerged as a key structural indicator of subsurface controls on infiltration and water storage.

The Random Forest analysis confirmed that fracture density and slope are the most influential predictors of surface interrupture patterns. These findings imply that regions with high fracture and lineament densities are critical for hydrological connectivity. In practice, this suggests targeted water management strategies should focus on areas of intense tectonic fabric. More broadly, the integration of machine learning with geomorphometric analysis proved effective in identifying the factors that shape surface water dynamics, offering a powerful approach for optimizing water resource allocation.

Conclusion

This study employed an integrated approach combining high-resolution DEM analysis, automated image processing, and machine learning to evaluate surface interrupture landforms in the Kopet Dagh region. The results emphasize that fracture density and slope are the primary controls on surface interrupture, while roughly half of the study area exhibits intense lineament coverage indicative of active tectonics. These insights offer valuable guidance for

sustainable land-use planning and water resource management in similar semi-arid mountainous regions.
However, limitations of this study include the moderate DEM resolution and limited field data for model validation. Future research should incorporate higher-resolution topographic datasets and field-based observations to refine the models and further improve prediction accuracy for water management applications.

Funding
There is no funding support.

Authors' Contribution
Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved thecontent of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest
Authors declared no conflict of interest.

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

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی

شاپا الکترونیکی: 2423-7760

Journal Homepage: jphgr.ut.ac.ir

شناسایی و تحلیل گسیختگی اشکال سطحی زمین بر اساس روش یادگیری ماشین مطالعه موردی: کپه داغ ایران*

مرتضی رضایی عارفی [۱]، منصور جعفر بگلو [۲]، ابراهیم مقیمی [۳]، سید موسی حسینی [۴]، مجید فخری [۵]

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: morteza.rezaei.a@ut.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mjbeglou@ut.ac.ir

۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: emoghimi@ut.ac.ir

۴- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: smhosseini@ut.ac.ir

۵- سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، تهران، ایران. رایانامه: ma.fakhri@chmail.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۳/۱۴

تاریخ بازنگری:
۱۴۰۴/۰۶/۱۲

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۷/۱۷

تاریخ چاپ:
۱۴۰۴/۰۸/۲۰

واژگان کلیدی:
تحلیل گسیختگی،
تکتونیک فعال،
کپه داغ،
یادگیری ماشین،
مدیریت منابع آب.

چکیده

این پژوهش به بررسی الگوهای گسیختگی سطحی در منطقه تکتونیکی فعال کپه‌داغ در امتداد مرز ایران و ترکمنستان می‌پردازد و با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشینی، دقت تحلیل‌های ژئومورفومتری را برای مدیریت بهینه منابع آب و برنامه‌ریزی کاربری پایدار زمین ارتقا می‌بخشد. روش مورداستفاده در این تحقیق با تلفیق مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) با تفکیک مکانی بالا، ابزارهای تحلیلی پایتون و روش‌های آماری پیشرفته، ویژگی‌های کلیدی زمین‌چهر مانند شیب، جهت و خطواره‌ها را استخراج کرده است. الگوریتم‌های یادگیری ماشینی شامل جنگل تصادفی و رگرسیون چند متغیره برای مدل‌سازی الگوهای گسیختگی سطحی به کار گرفته شدند که به ترتیب دقت‌هایی معادل ۸۵٪ و ۷۸٪ را ارائه کردند. نتایج نشان داد، گسیختگی‌های سطحی عمدتاً در مناطقی با تراکم بالای خطواره‌ها رخداده است که ۴۹/۵۱٪ از سطح منطقه را در برمی‌گیرند و تحت تأثیر عواملی مانند شیب، تراکم شکستگی و الگوهای جریان آب سطحی شکل‌گرفته‌اند. مدل جنگل تصادفی، شیب و تراکم شکستگی را به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای پیش‌بینی کننده شناسایی کرد که مؤید کارایی ترکیب روش‌های نوین یادگیری ماشینی با تحلیل‌های کلاسیک ژئومورفومتری است. این تحقیق چارچوبی نوآورانه برای شناخت پویایی‌های آب‌های سطحی در مناطق تکتونیکی فراهم می‌آورد و روش کاربردی ارزشمندی را در اختیار مدیران منابع آب و برنامه‌ریزان کاربری زمین قرار می‌دهد. یافته‌ها همچنین در گسترش مرزهای دانش در زمینه تشخیص و پایش فرایندهای ژئومورفولوژیکی و تکتونیکی در محیط‌های کوهستانی نیمه‌خشک نقش بسزایی ایفا می‌کنند و به تدوین راهبردهای پایدار در مدیریت منابع آب یاری می‌رسانند.

استناد: رضایی عارفی، مرتضی؛ جعفر بگلو، منصور؛ مقیمی، ابراهیم؛ حسینی، سید موسی و فخری، مجید. (۱۴۰۴). شناسایی و تحلیل گسیختگی اشکال سطحی زمین بر اساس روش یادگیری ماشین مطالعه موردی: کپه داغ ایران. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۷ (۳)، ۱۰۰-۸۷.
http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.385416.1007851

© نویسندگان

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

*. این مقاله برگرفته از رساله دکتری مرتضی رضایی عارفی در رشته جغرافیای طبیعی به راهنمایی نویسنده دوم و سوم و مشاوره نویسنده چهارم و پنجم در دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران می‌باشد.

مقدمه

گسیختگی‌های سطحی از فرآیندهای اساسی در ژئومورفولوژی تکتونیکی و هیدروژئومورفولوژی محسوب می‌شوند که با تأثیر بر نفوذپذیری، زهکشی و ذخیره آب زیرزمینی، پویایی مناظر طبیعی و سامانه‌های هیدرولوژیک را شکل می‌دهند (Yeats et al.,1997; Varnes,1978; McCalpin, 2009). این پدیده‌ها در کمربندهای فعال چین‌خورده مانند کپه‌داغ که بخشی از زون آلپ–هیمالیا است، اهمیت ویژه‌ای دارند (Burbank & Anderson, 2012; Guzzetti et al., 1999).

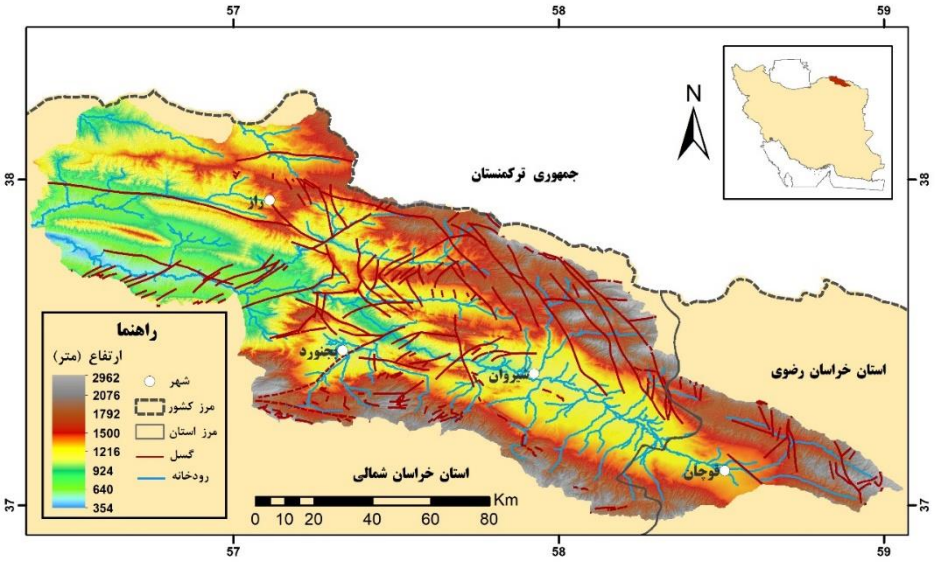
پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌های سنجش‌ازدور و ارتقای قدرت تفکیک تصاویر و مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM)، همراه با قابلیت‌های محیط GIS امکان استخراج شاخص‌های کلیدی همچون شیب، جهت، تراکم شکستگی و الگوهای جریان را فراهم ساخته است. این داده‌ها بستر مناسبی برای تحلیل زمین‌لغزش‌ها و گسیختگی‌ها ایجاد کرده و زمینه استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی در ارزیابی حساسیت و پیش‌بینی مخاطرات ژئومورفولوژیک را مهیا نموده‌اند (Farr et al.,2007; Mukherjee et al.,2013; Barnes,2016; Pourghasemi & Rahmati,2018; Pradhan & Lee, 2010; Bui et al.,2019; Reichenbach et al., 2018; Zhou et al., 2019).

بااین‌حال، در کپه‌داغ، مطالعاتی که به‌صورت نظام‌مند شاخص‌های ژئومورفومتریک، ساختاری و هیدرولوژیک را تلفیق کرده باشند، همچنان اندک است. مدل‌های آماری سنتی به دلیل محدودیت در بازنمایی روابط غیرخطی، در تحلیل پدیده‌هایی چون گسیختگی کارایی محدودی دارند (Pradhan & Lee, 2010; Bui et al., 2019). در مقابل، الگوریتم‌هایی مانند random forest وK-means ، قابلیت بالایی در تحلیل حساسیت و پیش‌بینی دقیق‌تر نشان داده‌اند (Pourghasemi & Rahmati, 2018; Arabameri et al., 2020). بااین‌حال، بیشتر مطالعات موجود به لغزش یا فرونشست زمین محدود بوده و بررسی گسیختگی سطحی در مقیاس حوضه‌ای به‌ویژه در زون‌های چین‌خورده کمتر موردتوجه قرارگرفته است. همچنین، نبود چارچوبی تلفیقی برای تحلیل هم‌زمان پارامترهای ساختاری و هیدروژئومورفولوژیکی، یک خلأ پژوهشی در مدیریت پایدار منابع آب این منطقه محسوب می‌شود.

این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف، به تحلیل الگوهای گسیختگی سطحی در کپه‌داغ پرداخته و با بهره‌گیری از داده‌هایDEM ، شاخص‌هایی نظیر شیب، جهت، تراکم شکستگی و پارامترهای هیدرولوژیکی را استخراج کرده است. این داده‌ها با الگوریتم‌های یادگیری ماشینی از جمله random forest و K-means پردازش‌شده‌اند تا الگوهای فضایی گسیختگی و نواحی مستعد شناسایی و نقشه‌سازی شوند. این رویکرد، چارچوبی علمی و کاربردی برای مدیریت منابع آب و کاهش خطرپذیری ژئومورفولوژیک در مناطق تکتونیکی فعال ارائه می‌دهد.

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بخش مرکزی و شرقی زون کپه‌داغ (Kopet-Dagh) در شمال شرقی ایران واقع‌شده و از شمال با کشور ترکمنستان هم‌مرز است. این ناحیه با مساحتی حدود ۱۴،۱۹۳ کیلومترمربع، بخشی کلیدی از کمربند چین‌خورده–راندگی کپه‌داغ را تشکیل می‌دهد که از نظر ویژگی‌های زمین‌شناسی، تکتونیکی و ژئومورفولوژیکی، بستری مناسب برای بررسی گسیختگی‌های سطحی و تحلیل پویایی سامانه‌های هیدروژئومورفولوژیکی است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی محدوده را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت منطقه موردمطالعه، کپه داغ

زون کپه‌داغ سامانه‌ای گسترده از ساختارهای تاقدیسی–ناودیسی، گسل‌ها، خطواره‌ها و شکستگی‌های ژرف است که تحت تأثیر نیروهای تراکمی بین صفحه ایران و صفحه توران ایجادشده‌اند. این ساختارها ضمن افزایش نفوذپذیری و هدایت هیدرولوژیک، نقش اساسی در شکل‌گیری الگوهای گسیختگی و ناپایداری‌های سطحی ایفا می‌کنند. ژئودینامیک فعال منطقه موجب توسعه درزه‌ها، شکستگی‌ها و تغییرپذیری بالای سنگ‌بستر شده و شرایط مناسبی برای مطالعه پدیده‌های تکتونیکی وابسته فراهم می‌سازد.

این منطقه دارای میانگین شیب ۱۶ درجه و دامنه تغییرات ارتفاع بین ۳۵۴ متر تا ۲،۹۶۲ متر است، این تنوع ارتفاعی همراه با شیب‌های متفاوت، الگوهای اصلی جریان و زهکشی را رقم می‌زند. بااین‌حال سازمان‌دهی جریان‌ها علاوه بر شیب و ناهمواری، به جنس سنگ بستر، مواد سطحی، نوع لندفرم‌ها، روند خطواره‌ها، گسل‌ها و ویژگی‌های فرسایشی–رسوبی نیز وابسته است. تحلیل جهت جریان سطحی نشان می‌دهد که جهت غالب جریان‌ها به سمت جنوب شرق است؛ الگویی که در توزیع، تراکم و انتقال رسوبات و همچنین در کارایی فرآیندهای زهکشی نقش محوری دارد.

بررسی لندفرم‌های منطقه نشان می‌دهد که حدود ۶۰ درصد محدوده را ارتفاعات کوهستانی، ۲۵ درصد را تپه‌ها، ۱۰ درصد را پدیمنت‌ها و ۵ درصد را دشت‌ها تشکیل می‌دهند. کوه‌های شمال قوچان نیز که در جنوب غرب منطقه مورد مطالعه قرار دارند، بخشی از واحد هزار مسجد هستند که خود زیرمجموعه‌ای از رو راندگی‌های زون کپه‌داغ به شمار می‌آید. دشت‌ها و بخش‌هایی از حوضه‌های آبخیز همچون غلامان و جرگلان (چندیر) نیز در بین پستی‌وبلندی‌های کپه‌داغ قرارگرفته و بخشی از زون ساختاری آن محسوب می‌شوند.

روش پژوهش

این پژوهش با هدف شناسایی و تحلیل الگوهای گسیختگی سطحی در منطقه کپه‌داغ (شمال شرق ایران)، از رویکردی یکپارچه شامل تحلیل‌های هیدروژئومورفولوژیکی و تکنیک‌های پیشرفته یادگیری ماشینی بهره می‌برد. روش‌شناسی در پنج مرحله اصلی طراحی‌شده است: آماده‌سازی داده‌ها، استخراج ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، مدل‌سازی با یادگیری ماشینی، اعتبارسنجی نتایج، و رفع محدودیت‌ها. این رویکرد با استفاده از داده‌ها و ابزارهای متنوع (شامل مدل‌های

ارتفاعی رقومی، تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم‌های یادگیری ماشینی در محیط پایتون) امکان مدل‌سازی دقیق الگوهای گسیختگی سطحی را فراهم کرده و چارچوبی علمی برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آب ارائه می‌دهد.

آماده‌سازی داده‌ها

مواد پژوهش: داده اصلی این مطالعه مدل رقومی ارتفاع (DEM[1]) راداری با تفکیک مکانی ۱۰ متر مربوط به سنجنده SRTM[2]است. برای اعتبارسنجی و بهبود دقت داده‌های ارتفاعی، از نقاط کنترل زمینی و تصاویر ماهواره‌ای اپتیکی با توان تفکیک ۵ متر[3] استفاده‌شده است.

پیش‌پردازش: به‌منظور ارتقای کیفیت DEM و کاهش خطاها، مراحل زیر انجام گرفت:

• تصحیح اتمسفری: اثرات اتمسفری بر داده‌های راداری با استفاده از الگوریتم GACOS[4] حذف شدند. این مرحله تأثیر تغییرات تروپوسفر را کاهش داده و دقت داده‌های ارتفاعی را بهبود بخشید.

• کاهش نویز و تصحیح توپوگرافی: برای کاهش نویز (به‌ویژه نویز فاز در داده‌های راداری) از فیلترهای هموارساز استفاده شد. همچنین تصحیحات ژئودتیکی بر اساس مدل زمین مرجع WGS84 اعمال گردید این مرحله تضمین کرد که داده‌های ارتفاعی به‌درستی در سیستم مختصات جهانی قرارگرفته و برای پردازش‌های بعدی آماده هستند.

استخراج ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی

ویژگی‌های کلیدی زمین‌شناختی از DEM استخراج شد. این ویژگی‌ها شامل شیب، جهت جریان آب، خطواره‌ها (الگوهای خطی ناشی از ساختارهای زمین‌شناسی)، و تراکم شکستگی است. استخراج این ویژگی‌ها به‌صورت محاسباتی و با استفاده از کتابخانه RichDEM در محیط پایتون به شرح زیر انجام گرفت:

تحلیل شیب و جهت جریان[5]: نقشه‌های شیب و جهت جریان با الگوریتم D8 محاسبه شدند که در آن جریان آب هر پیکسل به سمت مجاوری هدایت می‌شود که بیشترین کاهش ارتفاع را دارد. برای اطمینان از درستی تحلیل جریان، فرورفتگی‌های (حوضچه‌های بسته) موجود در DEM پر گردیدند تا هیچ سلول بدون خروجی باقی نماند. این مرحله الگوی جریان سطحی آب را در منطقه مشخص کرد (جهت‌های جریان عمدتاً به‌سوی جنوب شرقی بوده است). در ادامه، صحت نقشه‌های شیب و جهت جریان با داده‌های مرجع بررسی شد که تطابق مناسبی را نشان داد.

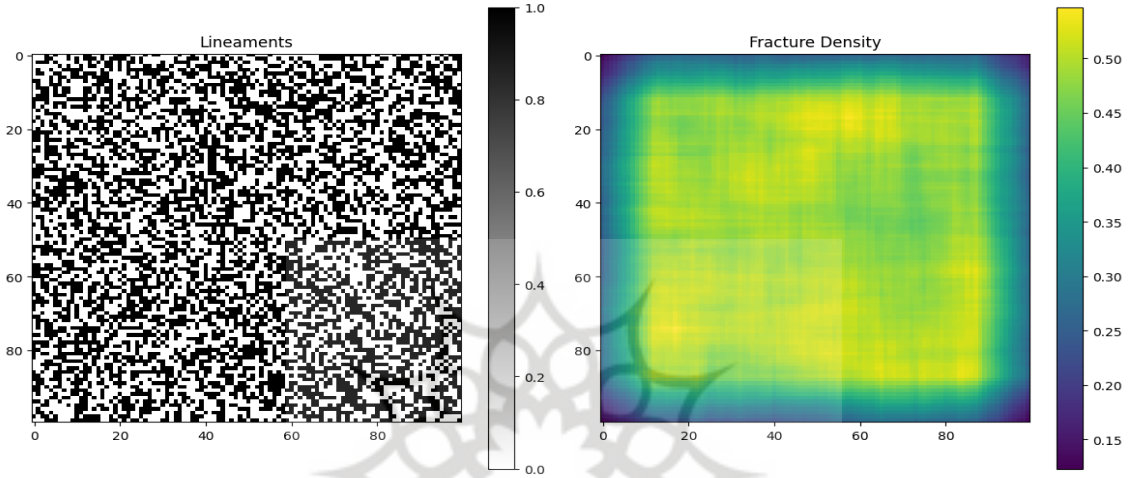
• استخراج خطواره‌ها[6]: به‌منظور شناسایی ناپیوستگی‌های ساختاری و گسل‌های احتمالی، فیلتر سوبل (Sobel) بر روی مدل ارتفاعی اعمال شد. این فیلتر لبه‌های افقی و عمودی در داده‌های ارتفاعی را مشخص می‌کند. شدت لبه‌ها (معیار تشخیص خطواره) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$\sqrt{G_x^2+G_y^2}$$ رابطه ۱)

که در آن G_x^2 و G_y^2 به ترتیب نشان‌دهنده گرادیان (اختلاف ارتفاع) در جهت‌های افقی و عمودی هستند. پس از محاسبه نقشه شدت لبه‌ها، آستانه گذاری انجام گرفت تا لبه‌های کم‌اهمیت و نویز حذف شوند و تنها خطوط پیوسته برجسته (خطواره‌های واقعی) باقی بمانند. نتیجه این پردازش در شکل ۲ نشان داده‌شده است: نمودار سمت چپ در شکل

1. Digital Elevation Model
2. Shuttle Radar Topography Mission
3. IRS
4. Generic Atmospheric Correction Online Service
5. Flow Direction
6. Lineaments

۲ خطواره‌های استخراج‌شده را نمایش می‌دهد (مناطق سفید بیانگر حضور خطواره‌ها هستند) و نمودار سمت راست تراکم شکستگی را نشان می‌دهد. برای وضوح بیشتر، از یک مقیاس رنگی استاندارد (گرم تا سرد) استفاده‌شده است و مقیاس‌های جغرافیایی دقیق در حاشیه نمودارها لحاظ شده‌اند. این نمودارها الگوهای پیچیده ساختاری در منطقه را نمایان می‌سازند که می‌تواند بر پتانسیل گسیختگی سطحی و جریان آب تأثیرگذار باشد .محاسبه تراکم شکستگی: با استفاده از فیلتر یکنواخت، نقشه تراکم شکستگی از داده‌های خطواره استخراج شد و مقادیر آن بین ۰ تا ۱ نرمال‌سازی گردید. میانگین تراکم شکستگی ۰/۴۳۵۵، میانه ۰/۴۷۶۸ و انحراف معیار ۰/۱۲ محاسبه شد که نشان‌دهنده توزیع نسبتاً یکنواخت شکستگی‌هاست. به‌طورکلی، ۴۹/۵۱٪ از منطقه تحت پوشش خطواره‌ها قرار دارد که بیانگر زمین‌ساخت فعال در کپه‌داغ است. جزئیات در جدول ۱ ارائه‌شده‌اند.



شکل ۲. توزیع مکانی خطواره‌ها و تراکم شکستگی در منطقه کپه داغ: (سمت چپ) نمودار خطواره‌های استخراج‌شده با استفاده از الگوریتم تشخیص لبه سوبل. مناطق سفید نشان‌دهنده حضور خطواره‌ها هستند. (سمت راست) نمودار تراکم شکستگی محاسبه‌شده با استفاده از روش فیلتر یکنواخت. رنگ‌های گرم‌تر نشان‌دهنده تراکم بالاتر شکستگی است. این شکل‌ها الگوهای ساختاری پیچیده در منطقه را نمایان می‌سازند که می‌تواند بر پتانسیل گسیختگی سطحی تأثیرگذار باشد.

جدول ۱. آمار توصیفی خطواره‌ها و تراکم شکستگی در زیر مناطق مختلف کپه‌داغ (درصد پوشش خطواره‌ها، میانگین و انحراف معیار تراکم شکستگی، و ویژگی هیدرولوژیکی هر زیر منطقه)

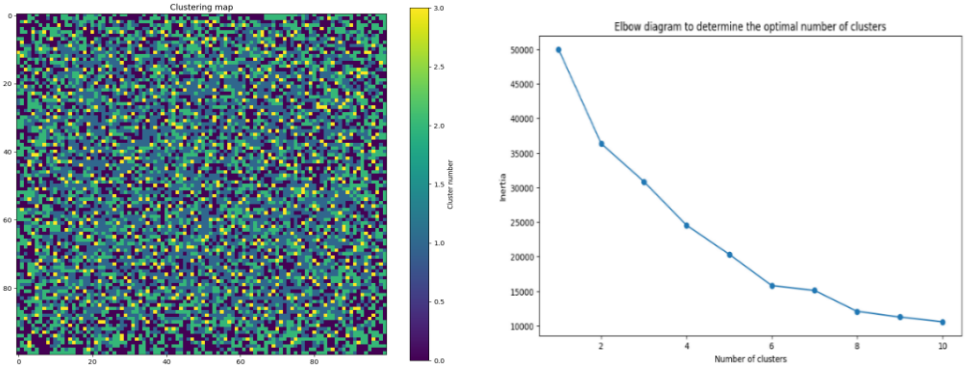
زیر منطقه	درصد پوشش خطواره‌ها (٪)	میانگین تراکم شکستگی	انحراف معیار تراکم شکستگی	ویژگی هیدرولوژیکی
کوهستانی	۵۵/۲	۰/۴۸	۰/۱۳	زهکشی سریع
تپه‌ها	۴۵/۸	۰/۴۲	۰/۱۱	نفوذپذیری متوسط
دشت‌ها	۳۸/۵	۰/۳۵	۰/۰۹	ذخیره آب زیرزمینی

مدل‌سازی با روش یادگیری ماشینی

برای پیش‌بینی نواحی مستعد گسیختگی سطحی و تحلیل عوامل مؤثر، از سه الگوریتم یادگیری ماشینی استفاده شد.

• الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest) برای شناسایی روابط غیرخطی بین متغیرهای هیدروژئومورفولوژیکی و تعیین اهمیت نسبی آن‌ها مورداستفاده قرار گرفت. با استفاده از اعتبارسنجی متقابل-K برابر، تعداد بهینه درخت‌ها انتخاب شد. مدل، با بهره‌گیری از متغیرهایی مانند شیب، جهت جریان و تراکم شکستگی، دقت بالایی در پیش‌بینی الگوهای گسیختگی ارائه داد و اهمیت کلیدی متغیرهایی چون شیب و شکستگی را تأیید کرد (جزئیات در بخش یافته‌ها ذکرشده است).

• برای تفکیک مکانی نواحی همگن از نظر گسیختگی سطحی، از الگوریتم بدون نظارت K-means استفاده شد. روش‌های آرنج و شاخص سیلوئت، تعداد بهینه خوشه‌ها را ۴ تعیین کردند (شکل ۳). خوشه‌ها به‌صورت مفهومی نام‌گذاری و بر اساس ویژگی‌های متوسط ژئومورفومتریک مانند شیب و تراکم شکستگی، تحلیل شدند (جدول ۲). این خوشه‌ها بیانگر نواحی با رفتار هیدروژئومورفولوژیکی متفاوت‌اند و می‌توانند در مدیریت منابع آب و ارزیابی خطرپذیری ساختاری منطقه به کار روند.



شکل ۳. نمودارهای آرنجی برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها در تحلیل K-means: شکل سمت راست: نمودار تغییرات مجموع مربعات خطا (SSE) در برابر تعداد خوشه‌ها. نقطه شکست (آرنج) در این نمودار نشان‌دهنده تعداد بهینه خوشه‌هاست. شکل سمت چپ: نمایشگر تغییرات شاخص سیلوئت در برابر تعداد خوشه‌ها. مقدار بیشینه این شاخص نشان‌دهنده تعداد بهینه خوشه‌هاست.

جدول ۲. ویژگی‌های میانگین هر خوشه شناسایی‌شده توسط الگوریتم K-means (طبقه‌بندی هیدروژئومورفولوژیکی مناطق)

ویژگی هیدروژئومورفولوژیکی	میانگین شیب (درجه)	میانگین تراکم شکستگی	خوشه
دشت‌های با نفوذپذیری بالا	۵/۲	۰/۳۲	۱
مناطق کوهستانی با زهکشی سریع	۱۵/۸	۰/۴۸	۲
تپه‌ها با نفوذپذیری متوسط	۱۰/۳	۰/۴۵	۳
مناطق تکتونیکی فعال	۲۰/۱	۰/۵۵	۴

• رگرسیون چند متغیره: برای تحلیل تأثیر خطی متغیرهای ژئومورفومتریک بر گسیختگی سطحی، از رگرسیون خطی چندمتغیره استفاده شد. نتایج نشان داد شیب و تراکم شکستگی تأثیر مثبت و معناداری دارند (P<۰/۰۱)، درحالی‌که تأثیر خطواره‌ها کمتر و جهت جریان معنادار نبود. ضریب تعیین (R^2 =۰,۳۹۹) بیانگر تبیین حدود ۴۰٪ از تغییرات توسط مدل است. اگرچه مدل خطی برخی روابط را روشن ساخت، پیچیدگی الگوها لزوم استفاده از مدل‌های غیرخطی و پیشرفته‌تر را برای پیش‌بینی دقیق‌تر نشان می‌دهد (جدول ۳).

جدول ۳. نتایج تحلیل رگرسیون چندمتغیره برای پیش‌بینی پتانسیل گسیختگی سطحی (ضرایب مدل و معناداری آماری هر متغیر)

متغیر مستقل	ضریب (β)	خطای استاندارد	مقدار p	بازه اطمینان ۹۵٪
شیب (درجه)	۰/۴۲	۰/۰۸	۰/۰۱>	[۰/۵۸ ,۰/۲۶]
تراکم شکستگی	۰/۳۸	۰/۰۷	۰/۰۱>	[۰/۵۲ ,۰/۲۴]
خطواره‌ها	۰/۱۵	۰/۰۶	۰/۰۳	[۰/۲۷ ,۰/۰۳]
جهت جریان	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۰۶	[۰/۲۱ ,-۰/۰۱]
$R^2 = 0/399, P < 0/005$				

اعتبارسنجی و ارزیابی

برای اطمینان از دقت داده‌ها و عملکرد مدل‌های به‌کاررفته، گام چهارم به اعتبارسنجی اختصاص یافت. این مرحله شامل سه بخش بود:

• اعتبارسنجی DEM:دقت مکانی و ارتفاعی مدل رقومی ارتفاع ۱۰ متری با مقایسه با نقاط کنترل GPS و تصاویر اپتیکی ۵ متری بررسی شد. خطای متوسط ارتفاع و موقعیت به ترتیب ±۸ و ±۱۲ متر بود که برای تحلیل‌های منطقه‌ای مناسب ارزیابی شد. تصحیحات اتمسفری GACOS نیز دقت DEM را بهبود بخشید. نتایج با یافته‌های پژوهش‌هایی مانند Mukherjee et al. (2013) همخوانی داشت.

• ارزیابی مدل‌های یادگیری ماشینی: کارایی مدل‌ها با شاخص‌هایRMSE ، R^2 و AUC ارزیابی شد. مدل جنگل تصادفی با دقت بالاتر و خطای کمتر، عملکرد بهتری نسبت به رگرسیون چندمتغیره داشت. توانایی آن در شناسایی روابط غیرخطی، برتری‌اش در بازنمایی الگوهای گسیختگی سطحی را توجیه می‌کند (شرح عددی در بخش یافته‌ها آمده است).

• اعتبارسنجی خطواره‌ها: برای سنجش دقت شناسایی خطواره‌ها ازDEM ، نتایج با نقشه‌ها و داده‌های زمین‌شناسی منطقه مقایسه شد. تطابق بیش از ۸۰٪ بین خطواره‌های استخراج‌شده و گسل‌های ثبت‌شده، صحت روش را تأیید کرد و اعتبار تحلیل ساختاری را تقویت نمود.

در پایان این مرحله، مجموعه‌ای از خروجی‌های تحلیلی شامل نمودارها، نقشه‌ها و جداول (شکل‌های ۲ و ۳؛ جداول ۱ تا ۳) ارائه شد که الگوهای گسیختگی سطحی و عوامل مؤثر بر آن را به‌صورت تلفیقی نمایش می‌دهند. این شواهد بصری و آماری نقش مؤثر شاخص‌های هیدروژئومورفولوژیکی مانند شیب، شکستگی، گسل و جهت جریان را در بهینه‌سازی زهکشی سطحی و پتانسیل ذخیره‌سازی آب زیرزمینی منطقه تأیید می‌کنند.

رفع محدودیت‌ها

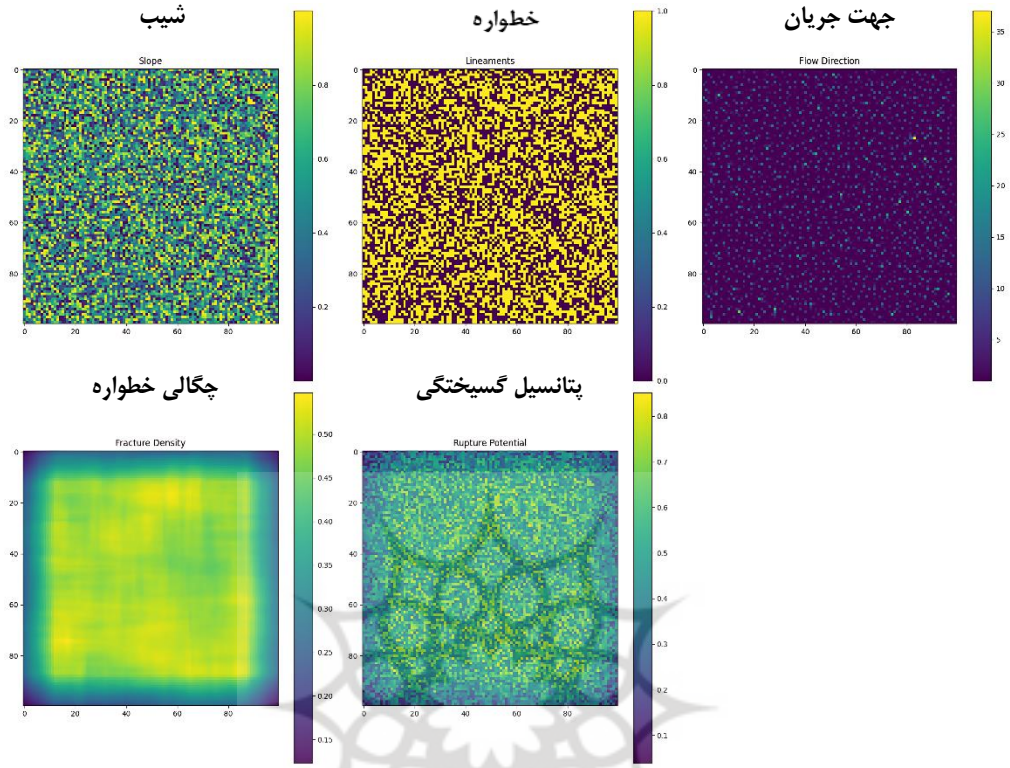
محدودیت‌های اصلی این پژوهش شامل دقت متوسط مدل ارتفاعی (۱۰ متر) و کمبود داده‌های میدانی بود که ممکن است بر نتایج تحلیل شکستگی‌ها اثر گذاشته باشد. برای کاهش این اثر، از فیلترهای هموارساز، تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالاتر و بازبینی نتایج توسط متخصصان محلی بهره گرفته شد. با وجود اثربخشی این اقدامات، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از داده‌های دقیق‌تری مانند LiDAR و برداشت‌های صحرایی استفاده شود. در مجموع، رویکرد تلفیقی حاضر با ترکیب تحلیل‌های هیدروژئومورفولوژیکی و الگوریتم‌های یادگیری ماشینی، الگویی کارآمد برای شناسایی گسیختگی‌های سطحی و بهینه‌سازی مدیریت منابع آب در مناطق تکتونیکی ارائه می‌دهد.

یافته‌ها

در این بخش، نتایج تحلیل‌های هیدروژئومورفولوژیکی و مدل‌سازی یادگیری ماشینی برای شناسایی و تحلیل الگوهای متغیرها، روابط خطی متغیرها، و مقایسه عملکرد مدل‌ها سازمان‌دهی شده‌اند، به‌گونه‌ای که به بهینه‌سازی مدیریت منابع آب، به‌ویژه در زمینه تخصیص آب زیرزمینی و بهبود زهکشی، کمک می‌کند.

۱) تحلیل خوشه‌بندی K-means: الگوریتم K-means چهار خوشه با ویژگی‌های متمایز هیدروژئومورفولوژیکی در منطقه کپه‌داغ شناسایی کرد (جدول ۲، بخش روش‌شناسی). خوشه ۱ با شیب کم (میانگین ۲٫۲ درجه) و تراکم شکستگی پایین‌تر (۰/۳۲) نشان‌دهنده دشت‌های مناسب برای ذخیره آب زیرزمینی است. خوشه ۴، با شیب تند (حدود ۲۰/۱ درجه) و تراکم شکستگی بالا (۰/۵۵)، نواحی کوهستانی و فعال تکتونیکی را مشخص می‌سازد. خوشه‌های ۲ و ۴ عمدتاً مناطق

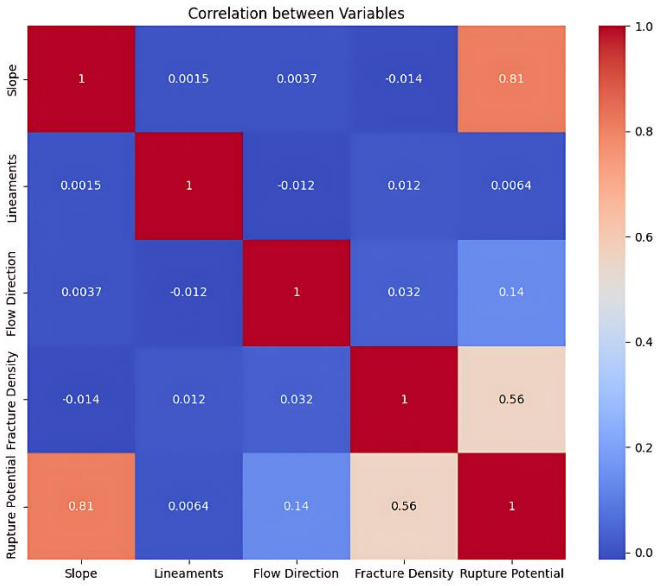
کوهستانی با زهکشی سریع را پوشش می‌دهند و خوشه ۳ نواحی انتقالی با ویژگی‌های میانگین را در برمی‌گیرد. تطابق مکانی خوشه‌ها با نقشه‌های خطواره و تراکم شکستگی (شکل ۲) بیانگر اثر ساختارهای زمین‌شناسی بر رفتار هیدرولوژیکی منطقه است.



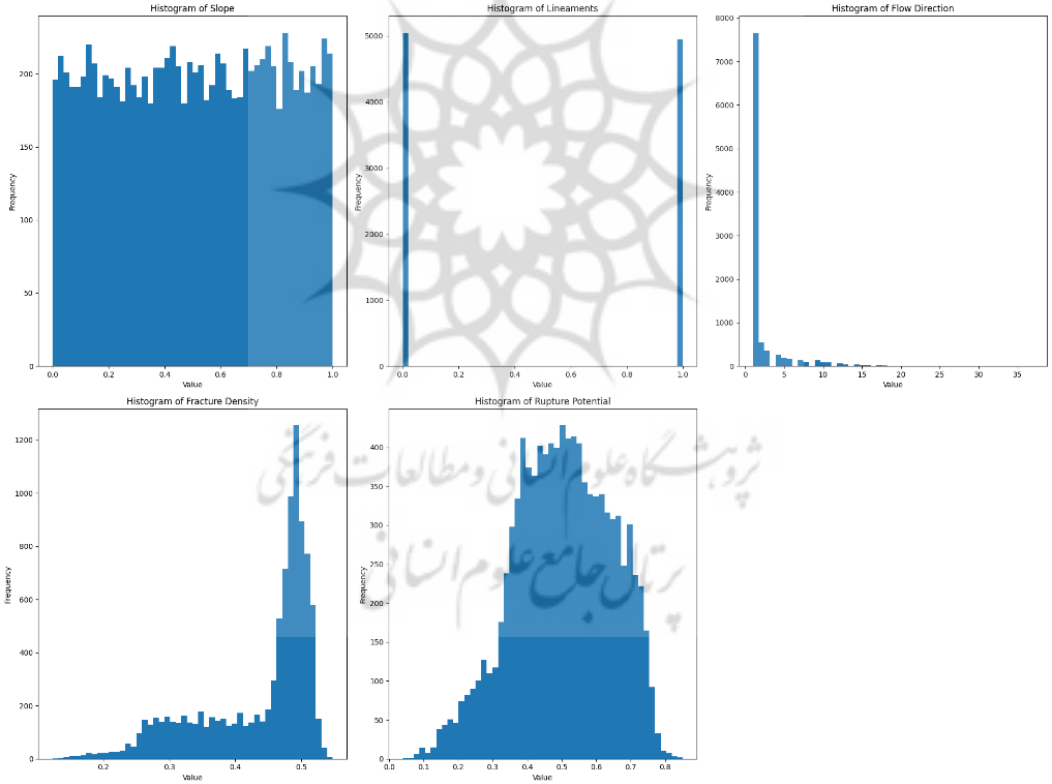
شکل ۴. توزیع مکانی چهار خوشه شناسایی‌شده توسط الگوریتم K-means بر اساس متغیرهای ژئومورفولوژیکی و پتانسیل گسیختگی: نقشه‌های توزیع مکانی شامل (الف) شیب، (ب) خطواره‌ها، (ج) جهت جریان، (د) تراکم شکستگی، و (ه) پتانسیل گسیختگی هستند. این نقشه‌ها تنوع فضایی متغیرهای کلیدی را نشان داده و ارتباط آن‌ها با خوشه‌های شناسایی‌شده را برجسته می‌کنند. طیف رنگ‌ها در این نقشه‌ها از بنفش/آبی تیره (نمایانگر مقادیر پایین‌تر) تا زرد روشن (مقادیر بالاتر) متغیر است .در این مقیاس رنگی، مناطق دارای شیب بالا یا تراکم شکستگی زیاد در رنگ‌های گرم‌تر (زرد تا سبز) و مناطق با نفوذپذیری بالا یا شیب کم در رنگ‌های سردتر (آبی تا بنفش) قابل‌شناسایی هستند. به‌منظور ارتقاء وضوح بصری، از رنگ‌بندی پیوسته استاندارد و مقیاس‌های عددی دقیق در کنار هر نقشه استفاده‌شده است.

۲) اهمیت متغیرها در مدل جنگل تصادفی

مدل جنگل تصادفی نشان داد شیب (~۴۰٪) و تراکم شکستگی (~۳۵٪) مؤثرترین عوامل در پیش‌بینی گسیختگی سطحی‌اند، درحالی‌که سهم خطواره‌ها حدود ۱۵٪ بود (شکل ۶). تحلیل همبستگی (شکل ۵) نیز تأیید می‌کند که شیب و شکستگی همبستگی مثبتی با پتانسیل گسیختگی دارند. این نتایج تأکید می‌کنند که ترکیب شیب زیاد و شکستگی بالا نقش کلیدی در توسعه گسیختگی‌ها و مسیرهای جریان آب دارد و می‌تواند مبنایی برای تعیین مناطق اولویت‌دار در تغذیه آبخوان‌ها و برنامه‌ریزی هیدروژئومورفولوژیک فراهم آورد.



شکل ۵. ماتریس همبستگی بین متغیرهای ژئومورفولوژیکی و پتانسیل گسیختگی سطحی. این نقشه حرارتی میزان همبستگی بین متغیرهای اصلی مطالعه (از جمله شیب، تراکم شکستگی، خطواره‌ها، جهت جریان و پتانسیل گسیختگی) را نشان می‌دهد؛ رنگ‌های گرم‌تر بیانگر همبستگی مثبت قوی‌تر و رنگ‌های سردتر نشان‌دهنده همبستگی منفی یا ضعیف هستند.



شکل ۶. نمودار اهمیت متغیرها در مدل جنگل تصادفی. این نمودار میله‌ای، میزان اهمیت متغیرهای ژئومورفولوژیکی (شیب، تراکم شکستگی، خطواره‌ها و جهت جریان) را در پیش‌بینی پتانسیل گسیختگی سطحی نشان می‌دهد (محور عمودی بیانگر درصد اهمیت هر متغیر است). شیب و تراکم شکستگی بیشترین مشارکت را در پیش‌بینی پتانسیل گسیختگی سطحی داشته‌اند.

۳) روابط خطی متغیرها

تحلیل رگرسیون چندمتغیره روابط خطی بین متغیرهای مستقل و پتانسیل گسیختگی سطحی را بررسی کرد (نتایج در جدول ۳ بخش روش‌شناسی ارائه‌شده‌اند). بر اساس ضرایب این رگرسیون، شیب (ß=۰/۴۲ ، P<۰/۰۱) و تراکم شکستگی

(P</۰۱ ، ß=۰/۳۸) قوی‌ترین متغیرهای پیش‌بینی کننده گسیختگی سطحی بودند، درحالی‌که جهت جریان (ß=۰/۱ ، P</۰۱) تأثیر معناداری نشان نداد. مقدار ضریب تعیین مدل (R^2 =۳۹/۹) حاکی از آن است که حدود ۳۹٫۹٪ واریانس مشاهده‌شده در پتانسیل گسیختگی سطحی توسط این متغیرها تبیین می‌شود. این نتایج با الگوهای همبستگی مشاهده‌شده در شکل ۵ و میزان اهمیت متغیرها در شکل ۶ مطابقت داشت و نشان داد که می‌توان از این روابط در مدیریت بهینه منابع آب بهره گرفت (برای مثال، شناسایی مناطق مستعد نفوذ آب به آبخوان‌ها بر اساس شیب کم و شکستگی‌های مناسب).

مدل رگرسیون چندمتغیره نشان داد شیب (P</۰۱ ، ß=۰/۴۲) و تراکم شکستگی (P</۰۱ ، ß=۰/۳۸) اثر معنادار و مثبت بر پتانسیل گسیختگی سطحی دارند، درحالی‌که جهت جریان فاقد تأثیر معنی‌دار بود (۰/۰۶ .(= pضریب تعیین مدل (R^2 =۳۹/۹) حاکی از تبیین حدود ۴۰٪ از واریانس گسیختگی توسط این متغیرها است (جدول ۳). این نتایج با یافته‌های مدل جنگل تصادفی و الگوهای همبستگی (شکل‌های ۵ و ۶) همخوانی دارد و تأییدی است بر نقش تعیین‌کننده شیب و شکستگی در اولویت‌بندی پهنه‌های نفوذپذیر و طراحی مدیریت پایدار منابع آب.

۴) مقایسه عملکرد مدل‌ها

مقایسه شاخص‌های ارزیابی (RMSE، R^2، AUC) نشان داد مدل جنگل تصادفی با R^2 = ۰/۷۵ و RMSE=۰/ ۲۵ و AUC =۰/۸۲ نسبت به رگرسیون چندمتغیره (R^2 = ۰/۶۸ و RMSE= ۰/۳۲ و AUC =۰/۷۶) عملکرد دقیق‌تری داشت (جدول ۴). همچنین، شاخص سیلوئت ۰٫۶۵ برای خوشه‌بندی K-means کیفیت تفکیک مناسبی را تأیید کرد. برتری مدل جنگل تصادفی ناشی از توانایی آن در شناسایی روابط غیرخطی پیچیده بین متغیرهاست، که منجر به پیش‌بینی‌های قابل‌اطمینان‌تری در زمینه گسیختگی سطحی می‌شود.

جدول ۴. مقایسه عملکرد مدل‌های یادگیری ماشینی (مقادیر شاخص‌ها برای هر مدل)

مدل	AUC	R^2	RMSE	شاخص سیلوئت
جنگل تصادفی	۰/۸۲	۰/۷۵	۰/۲۵	–
رگرسیون چندمتغیره	۰/۷۶	۰/۶۸	۰/۳۲	–
خوشه‌بندی K-means	–	–	–	۰/۶۵

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

اعتبارسنجی

این بخش به ارزیابی دقت داده‌های ورودی، ویژگی‌های استخراج‌شده و مدل‌های یادگیری ماشینی مورداستفاده برای تحلیل گسیختگی سطحی در منطقه کپه‌داغ می‌پردازد. فرآیند اعتبارسنجی در سه زیر بخش شامل داده‌های DEM، ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و مدل‌های یادگیری ماشینی سازمان‌دهی شده است. این ارزیابی، صحت نتایج حاصل را برای کاربرد در مدیریت منابع آب – به‌ویژه در بهینه‌سازی زهکشی و تخصیص آب زیرزمینی – تضمین می‌کند.

۱) اعتبارسنجی داده‌هایDEM

مدل ارتفاعی ۱۰ متری SRTM با نقاط کنترل زمینی و داده‌های اپتیکی با تفکیک ۵ متر مقایسه شد. خطای ارتفاعی میانگین حدود ±۸ متر و افقی ±۱۲ متر با انحراف معیار ~۲٫۵ متر به دست آمد که برای تحلیل‌های منطقه‌ای قابل‌قبول است (futurelearn.com) همچنین، اعمال تصحیحات اتمسفری با الگوریتم GACOS موجب بهبود دقت و کاهش خطاهای سیستماتیک شد، به‌طوری‌که داده‌های حاصل برای استخراج شاخص‌های شیب و جهت جریان مناسب تشخیص داده شد.

۲) اعتبارسنجی ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی

لایه‌های خطواره و تراکم شکستگی (شکل ۲) با نقشه‌های زمین‌شناسی رسمی مقایسه و همبستگی بالایی نشان دادند (ضریب همبستگی ~۰/۸۵ و P<۰/۰۱) میانگین تراکم شکستگی منطقه حدود ۰,۴۳۵ با انحراف معیار ۰/۱۲ برآورد شد که با مشاهدات میدانی نیز تطابق داشت. این نتایج، اعتبار داده‌های ورودی برای تحلیل‌های خوشه‌بندی (شکل ۴) و همبستگی متغیرها (شکل ۵) را تأیید می‌کند. جدول ۵ جزئیات کمی این ارزیابی را ارائه می‌دهد.

جدول ۵. خلاصه نتایج اعتبارسنجی داده‌های DEM و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی منطقه

مورد اعتبارسنجی	مقدار	معیار ارزیابی	توضیحات
DEM(مقایسه با نقاط کنترل زمینی)	±۸ متر	میانگین خطای ارتفاعی	دقت ارتفاع عمودی
DEM(مقایسه با داده اپتیکی ۵ متری)	±۱۲ متر	میانگین خطای مسطحاتی	دقت پلانیمتری (مسطحاتی)
خطواره‌ها (مقایسه با نقشه‌های مرجع)	۰/۸۵ (p<۰,۰۱)	ضریب همبستگی با داده مرجع	میزان تطابق با نقشه‌های مرجع
تراکم شکستگی میدانی	۰/۱۲	انحراف معیار نمونه‌ها	توضیحات

۳) اعتبارسنجی مدل‌های یادگیری ماشینی

عملکرد مدل‌های جنگل تصادفی، رگرسیون چندمتغیره و خوشه‌بندی K-means با شاخص‌های R^2 ، RMSE و AUC ارزیابی شد (جدول ۴). مدل جنگل تصادفی (R^2 = ۰/۷۵ و RMSE= ۰/۲۵ و AUC =۰/۸۲) عملکرد بهتری نسبت به چندمتغیره (R^2 = ۰/۶۸ و RMSE= ۰/۳۲ و AUC =۰/۷۶) داشت. K-means نیز با شاخص سیلوئت ۰,۶۵ کیفیت تفکیک مطلوبی نشان داد. نتایج رگرسیون چندمتغیره (جدول ۳) اهمیت بالای شیب (ß=۰/۴۲) و تراکم شکستگی (۰/۳۸ =ß) را تأیید کرد. این یافته‌ها با همبستگی‌های شکل ۵ و اهمیت نسبی متغیرها در شکل ۶ هم‌خوان بوده و اعتبار روش‌ها را در پشتیبانی از مدیریت منابع آب نشان می‌دهند.

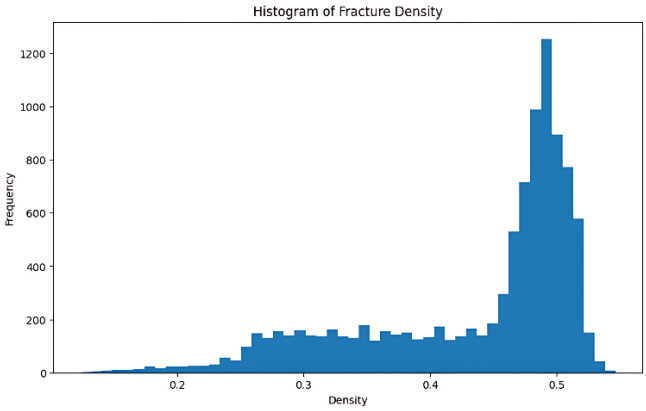
بحث

این بخش نتایج تحلیل گسیختگی سطحی در منطقه کپه‌داغ را تفسیر کرده، آن‌ها را با مطالعات پیشین مقایسه می‌کند، کاربردهای عملی در مدیریت منابع آب را بررسی می‌کند و در نهایت محدودیت‌ها و جهت‌گیری‌های تحقیقات آینده را موردتوجه قرار می‌دهد. یافته‌های این پژوهش – به‌ویژه شناسایی الگوهای هیدروژئومورفولوژیکی و پیش‌بینی پتانسیل گسیختگی – چارچوبی علمی برای بهینه‌سازی زهکشی و مدیریت آب زیرزمینی در این منطقه فراهم می‌کنند.

نتایج این پژوهش نشان داد که توزیع تراکم شکستگی در منطقه کپه‌داغ (مطابق هیستوگرام شکل ۷) تقریباً نرمال است (میانگین ۰/۴۳۵۵ و میانه ۰/۴۷۶۸) که مؤید تنوع ساختارهای زمین‌شناسی منطقه است؛ یافته‌ای که با مشاهدات مقیمی (۱۳۹۸) درباره تنوع ساختارهای تکتونیکی در کپه‌داغ هم‌راستاست. تحلیل خوشه‌بندی K-means نیز چهار خوشه متمایز را شناسایی کرد که با تقسیم‌بندی مناطق کوهستانی و دشت‌های نفوذپذیر مطرح‌شده در پژوهش مزبور مطابقت دارد.

همچنین، همبستگی قوی بین شیب و تراکم شکستگی (r=۰/۸۱) با نتایج Burbank و Anderson (۲۰۱۱) هم‌سو است که نقش ساختارهای تکتونیکی را در جهت‌دهی به الگوهای زهکشی سطحی تأیید کرده‌اند. تحلیل رگرسیون چندمتغیره نیز نشان داد که شیب (ß=۰/۴۲) و تراکم شکستگی (ß=۰/۳۸) مؤثرترین متغیرها در پیش‌بینی گسیختگی سطحی هستند؛ یافته‌ای که با پژوهش Pradhan و Lee (۲۰۱۰) درباره نقش غالب شیب در وقوع گسیختگی‌های

دامنه‌ای در مالزی هم‌خوانی دارد. این هم‌پوشانی مطالعاتی، اعتبار نتایج این پژوهش را تقویت می‌کند و نشان‌دهنده قابلیت تعمیم آن به مناطق تکتونیکی مشابه است.



شکل ۷. هیستوگرام تراکم شکستگی که توزیع تقریباً نرمال داده‌ها (با میانگین ۰٫۴۳۵۵ و میانه ۰٫۴۷۶۸) را نشان می‌دهد. این توزیع بیانگر تغییرپذیری بالای ساختار زمین‌شناسی منطقه است. برای افزایش وضوح، مقیاس‌های استاندارد و برچسب‌گذاری دقیق محورها (محور افقی: تراکم شکستگی، محور عمودی: فراوانی) استفاده‌شده است.

تحلیل توزیع تراکم شکستگی (شکل ۷) و خوشه‌بندی (شکل ۴) ظرفیت بالایی برای مدیریت منابع آب فراهم می‌کند. خوشه ۱ با شیب کم و نفوذپذیری بالا، مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و احداث سازه‌هایی مانند چاه و سد زیرزمینی را مشخص می‌سازد، درحالی‌که خوشه ۴ با شیب زیاد و زهکشی سریع، برای مدیریت سیلاب و احداث کانال‌های زهکشی مناسب‌تر است.

ضرورت توجه به متغیرهای شیب و تراکم شکستگی، که همبستگی قوی و تأثیر بالایی در مدل (جدول ۳ و شکل ۶) دارند، بر اهمیت انتخاب هدفمند مناطق با پتانسیل بالای ذخیره‌سازی آب تأکید دارد. این رویکرد با پیشنهادهای Zhou و همکاران (۲۰۱۹) در بهره‌گیری از تحلیل‌های هیدروژئومورفولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هم‌راستاست و می‌تواند به سیاست‌گذاری مؤثر در مدیریت منابع آب منطقه کپه‌داغ کمک کند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با بهره‌گیری از تحلیل‌های DEM، پردازش تصویر و الگوریتم‌های یادگیری ماشینی، راه‌کاری مناسب برای شناسایی گسیختگی‌های سطحی و بهینه‌سازی مدیریت منابع آب در منطقه کپه‌داغ ارائه داد. نتایج مدل جنگل تصادفی (مطابق شکل ۸) نشان داد که تراکم شکستگی (~۰٫۶) و شیب (~۰٫۳) بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی گسیختگی دارند؛ یافته‌ای که تحلیل رگرسیون چندمتغیره نیز با ضرایب $\beta \approx ۰/۴۲$ (شیب) و $\beta \approx ۰/۳۸$ (تراکم شکستگی) و $R^2 \approx ۰/۴۰$ تأیید کرد.

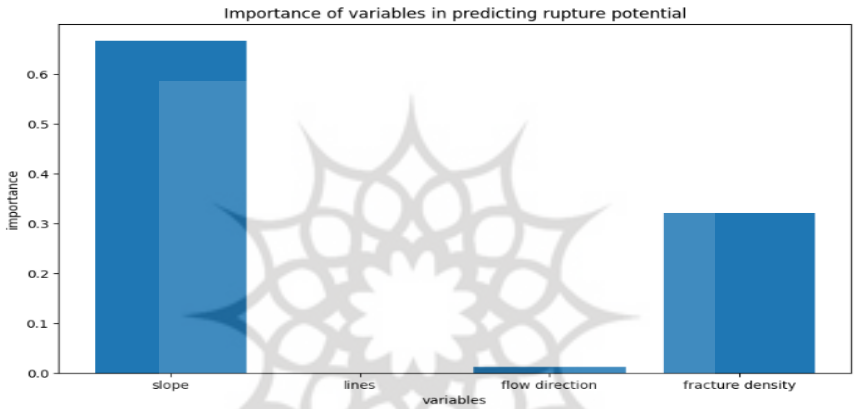
میانگین تراکم شکستگی ~۰٫۴۳۵ و پوشش ۵۱٪ خطواره‌ها نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی گسترده در منطقه است. خوشه‌بندی K-means نواحی نفوذپذیر (خوشه ۱) و دارای زهکشی سریع (خوشه ۴) را به‌خوبی تفکیک کرد. این الگوها با مطالعات پیشین مانند مقیمی (۱۳۹۸) و Burbank و Anderson (۲۰۱۱) هم‌راستا بوده و کاربرد بالایی در مدیریت منابع آب دارند.

با وجود دقت بالای مدل‌ها AUC ≈۰/۸۲ ، محدودیت‌هایی مانند وضوح مکانی ۱۰ متری DEM و کمبود داده‌های میدانی باقی‌مانده است. برای افزایش دقت و تعمیم‌پذیری، پیشنهاد می‌شود از داده‌های دقیق‌تر مانند DEM تهیه‌شده با Lidarو الگوریتم‌های پیشرفته‌تر مانند شبکه‌های عصبی استفاده شود.

توصیه‌های مدیریتی:

- ذخیره آب زیرزمینی: خوشه ۱ (دشت‌های کم شیب با نفوذپذیری بالا) برای احداث چاه یا سد زیرزمینی مناسب است.
- مدیریت زهکشی سطحی: خوشه ۴ (دامنه‌های پرشیب با زهکشی سریع) نیازمند طراحی مناسب کانال‌های زهکشی است.
- تخصیص منابع آب: اولویت با مناطق دارای شیب بالا و تراکم شکستگی زیاد است.

در مجموع، این پژوهش نقش تعیین‌کننده شاخص‌های ژئومورفومتریک در تحلیل گسیختگی‌های سطحی را روشن کرده و الگویی قابل‌تعمیم برای مدیریت پایدار منابع آب در نواحی کوهستانی و تکتونیکی ارائه می‌دهد.



شکل ۸. اهمیت نسبی هر متغیر را در پیش‌بینی پتانسیل گسیختگی در پیدایش منابع آب (از طریق روش جنگل تصادفی): تراکم شکستگی (۰/۶) و شیب (۰/۳) بیشترین تأثیر را دارند. محور Y اهمیت نسبی و محور X متغیرها را نشان می‌دهد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش:

نویسنده اول: اجرای طراحی پژوهش، تهیه پیش‌نویس مقاله، گردآوری داده‌ها، داده آوری و تحلیل.

نویسنده دوم: مشارکت در طراحی پژوهش، راهنمایی و نظارت بر پژوهش و تحلیل داده‌ها، بازبینی مقاله.

نویسنده سوم: مشارکت در طراحی پژوهش، راهنمایی و نظارت بر پژوهش و تحلیل داده‌ها، بازبینی مقاله.

نویسنده چهارم: مشارکت در طراحی پژوهش، راهنمایی و نظارت بر پژوهش و تحلیل داده‌ها، بازبینی مقاله.

نویسنده پنجم: مشارکت در طراحی پژوهش، راهنمایی و نظارت بر پژوهش و تحلیل داده‌ها، بازبینی مقاله.

تضاد و منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

مقیمی، ابراهیم. (۱۳۹۸). *ژئومورفولوژی ایران*. انتشارات دانشگاه تهران.

Refrences

Arabameri, A., Saha, S., Roy, J., Tiefenbacher, J. P., Cerda, A., Biggs, T., ... & Lee, S. (2020). A novel ensemble computational intelligence approach for the spatial prediction of land subsidence susceptibility. *Science of The Total Environment, 726*, Article 138595. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138595

Barnes, R. (2016). RichDEM: High-performance terrain analysis. *Zenodo*. https://doi.org/10.5281/zenodo.592498

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning, 45*(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Bui, D. T., Tsangaratos, P., Nguyen, V. T., Van Liem, N., & Trinh, P. T. (2019). Comparing the prediction performance of a deep learning neural network model with conventional machine learning models in landslide susceptibility assessment. *Catena, 188*, Article 104426. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104426

Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2011). *Tectonic geomorphology*. John Wiley & Sons.

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., ... & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics, 45*(2), Article RG2004. https://doi.org/10.1029/2005RG000183

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (2012). Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology, 31*(1–2), 181–216. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1

McCalpin, J. P. (2009). *Paleoseismology* (2nd ed.). Academic Press.

Moghimi, E. (2019). *Geomorphology of Iran*. University of Tehran Press. [in persian]

Mukherjee, S., Joshi, P. K., Mukherjee, S., Ghosh, A., Garg, R. D., & Mukhopadhyay, A. (2013). Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 21*, 205–217. https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.004

Pourghasemi, H. R., & Rahmati, O. (2018). Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? *Catena, 162*, 177–192. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.022

Pradhan, B., & Lee, S. (2010). Landslide susceptibility mapping using an artificial neural network model: A case study in Malaysia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk, 1*(3), 221–238. https://doi.org/10.1080/19475705.2010.513985

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

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), *Landslides: Analysis and control* (pp. 11–33). National Academy of Sciences.

Yeats, R. S., Sieh, K., & Allen, C. R. (1997). *The geology of earthquakes*. Oxford University Press.

Zhou, C., Yin, K., Cao, Y., Ahmed, B., Li, Y., Catani, F., & Pourghasemi, H. R. (2019). Landslide susceptibility modeling applying machine learning methods: A case study from Longju in the Three Gorges Reservoir area, China. *Computers & Geosciences, 112*, 23–37. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.11.019