



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association
Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Evaluation of the impact of tectonic activity on the morphometry drainage system the Alamut River basin, Qazvin

Nilofar Barkhordari¹ | Shahram Bahrami² | Mohammdd Mehdi Hoseinzadeh^{3*} |
Mohsen Ehteshami Minabadi⁴

1. Phd Student Geomorphology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran. Email: nilofarbar1370@gmail.com
2. Associate Professor of Geomorphology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran. Email: sh_bahrami@sbu.ac.ir
3. Corresponding Author, Associate Professor of Geomorphology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran. Email: m_hoseinzadeh@sbu.ac.ir
4. Associate Professor of Sedimentary Basins and petroleum Department, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran. Email: ehteshami58@gmail.com

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article History: Received: 25 February 2025 Revised: 11 May 2026 Accepted: 12 May 2026 Published: 25 May 2026</p> <p>Keywords: Alamut river basin, Active tectonics, Central Alborz, Geomorphic indices, Morphotectonics.</p>	<p>The Alamut River basin, located in the Central Alborz Mountains of northern Iran, lies within an active compressional tectonic regime and is strongly influenced by regional fault systems. This study aims to evaluate the level of tectonic activity and to clarify its role in controlling the drainage network pattern using quantitative geomorphic indices. The analysis was conducted on 23 sub-basins (9 on the left bank and 14 on the right bank) based on ALOS digital elevation model (12.5 m resolution), 1:100,000 geological maps, 1:25,000 topographic maps, and satellite imagery within a GIS environment. The applied geomorphic indices include the ratio of first-order streams to total streams (N_1/N), drainage density (Dd), first-order drainage density (Dd_1), drainage frequency (Df), mean stream spacing (SMD), percentage of basin asymmetry (PAF), and drainage basin orientation (DBO). The calculated indices were normalized and classified using the quartile method into four tectonic activity classes ranging from low to very high. The results reveal a spatially heterogeneous distribution of tectonic activity across the basin. Higher tectonic activity is concentrated in the eastern, southeastern, and northeastern sub-basins (notably R13, R12, R8, L9, and L2), whereas the central and western parts exhibit relatively lower activity levels. The spatial correspondence between high-activity zones and the Alamut and Taleghan fault systems indicates strong structural control over drainage development. Elevated values of morphometric indices in active sub-basins suggest ongoing uplift, structural tilting, and geomorphic rejuvenation. The findings confirm the efficiency of integrated quantitative morphometric analysis in identifying tectonically active zones in mountainous regions and provide a useful framework for tectonic geomorphology and hazard assessment in the Central Alborz.</p>

Cite this article: Barkhordari, N.; Bahrami, Sh.; Hoseinzadeh, M. M. & Ehteshami Minabadi, M. (2026). Evaluation of the impact of tectonic activity on the morphometry drainage system the Alamut River basin, Qazvin. *Environmental Hazards Management*, 12 (4), 351-366. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2026.411980.925>



© The Author(s). **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2026.411980.925>

Introduction

Active tectonics is a fundamental driver of landscape evolution in mountainous regions and plays a crucial role in shaping drainage systems and basin morphology. In tectonically active belts such as the Alborz Mountains, crustal shortening, faulting, uplift, and folding continuously modify topography and influence geomorphic processes. The Alamut River basin, located in the central Alborz, lies within an active compressional regime resulting from the convergence between the Arabian and Eurasian plates. This study aims to clarify the relationship between structural elements and the

configuration of the drainage network, as well as to determine the spatial distribution of tectonic activity within the basin.

Methodology

In this study, drainage networks and sub-basins were extracted using a digital elevation model (DEM) with a spatial resolution of 12.5 m. Topographic maps (1:25,000 scale), geological maps (1:100,000 scale), and satellite imagery available in Google Earth were also used to enhance spatial accuracy. Hydrological analysis tools in a GIS environment were employed to delineate 23 sub-basins, comprising 9 left-bank and 14 right-bank sub-basins. Several morphometric and morphotectonic indices were calculated for each sub-basin, including the ratio of first-order streams to the total number of streams of all orders (N_1/N), drainage density (Dd), first-order drainage density (Dd_1), drainage frequency (Df), sinuosity of the main drainage (SMD), percentage of asymmetry factor (PAF), and drainage basin orientation (DBO). In addition, selected morphotectonic indices—such as hypsometric integral, mountain-front sinuosity, and basin shape index—were used to assess the tectonic influence on basin morphology. Finally, a morphotectonic activity index was calculated to determine the relative tectonic intensity of each sub-basin and to produce a tectonic activity zoning map.

Results and Discussion

The calculated morphotectonic indices indicate that the Alamut River basin exhibits overall moderate tectonic activity, although significant spatial heterogeneity is observed at the sub-basin scale. Several eastern and northeastern sub-basins show high tectonic activity, whereas some central and western sub-basins are classified as having low to moderate activity. Indices such as the hypsometric integral and mountain-front sinuosity reveal clear tectonic signatures in structurally controlled areas, while other parts of the basin display signs of geomorphic maturity and relative stability. Elevated values of the PAF and N_1/N ratios in active sub-basins suggest drainage rejuvenation and structural deformation. Spatial analysis demonstrates a strong relationship between tectonic structures and drainage orientation. Sub-basins located near major thrust faults exhibit higher morphometric index values, indicating active uplift and structural control.

Conclusion

The morphometric and morphotectonic analysis of 23 sub-basins of the Alamut River demonstrates that the study area is characterized by moderate but spatially variable tectonic activity. Eastern and northeastern sub-basins exhibit higher tectonic intensity compared to central and western sectors. The findings indicate that active fault systems exert strong control on drainage organization, basin asymmetry, and morphometric characteristics. The integration of multiple geomorphic indices enhances the accuracy of tectonic activity assessment compared to single-index approaches. Overall, this study highlights the importance of combined geomorphological and structural analysis for identifying active tectonic zones in compressional mountain belts and provides a quantitative framework applicable to similar tectonically active regions.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



ارزیابی تأثیر فعالیت تکتونیکی بر مورفومتری شبکه زهکشی در حوضه الموت رود، قزوین

نیلوفر برخورداری^۱ شهرام بهرامی^۲ محمدمهدی حسین‌زاده^{۳*} | محسن احتشامی معین‌آبادی^۴

۱. دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی. رایانامه: nilofarbar1370@gmail.com

۲. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی. رایانامه: sh_bahrami@sbu.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی. رایانامه: m_hoseinzadeh@sbu.ac.ir

۴. دانشیار گروه حوضه‌های رسوبی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی. رایانامه: ehteshami58@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

حوضه آبریز الموت رود در البرز مرکزی، به دلیل قرارگیری در پهنه‌ای فشاری و تأثیرپذیری از گسل‌های فعال منطقه، از منظر مورفوتکتونیکی دارای اهمیت ویژه‌ای است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تأثیر فعالیت تکتونیکی و تبیین نقش آن در مورفومتری شبکه زهکشی، بر پایه تحلیل کمی شاخص‌های ژئومورفیک در ۲۳ زیرحوضه (۹ زیرحوضه در سمت چپ و ۱۴ زیرحوضه در سمت راست) رودخانه الموت رود انجام گرفته است. داده‌های استفاده شده شامل مدل رقومی ارتفاع ALOS با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای بوده و تحلیل‌ها در محیط GIS صورت گرفته است. شاخص‌های به کاررفته شامل نسبت تعداد آبراهه‌های مرتبه اول به مجموع آبراهه‌ها (N_1/N)، تراکم زهکشی (Dd)، تراکم زهکشی آبراهه درجه یک (Dd_1)، فرکانس زهکشی (Df)، شاخص سینوزیته آبراهه اصلی (SMD)، درصد عدم تقارن حوضه (PAF) و تمایل حوضه زهکشی (DBO) است. به منظور تلفیق نتایج، مقادیر شاخص‌ها نرمال‌سازی شده و با روش طبقه‌بندی چارکی در چهار طبقه فعالیت (کم تا خیلی زیاد) پهنه‌بندی شد. نتایج نشان می‌دهد که فعالیت تکتونیکی در بخش‌های شرقی، جنوب شرقی و شمال شرقی حوضه (به ویژه زیرحوضه‌های $R13$ ، $R12$ ، $R8$ و $L9$) تمرکز بیشتری دارد، در حالی که زیرحوضه‌های مرکزی و غربی از ثبات نسبی برخوردارند. همبستگی مکانی پهنه‌های فعال با امتداد گسل‌های الموت و طالقان بیانگر کنترل ساختاری قوی بر شبکه زهکشی است. این الگوی ناهمگن فضایی نشان‌دهنده عملکرد متفاوت بلوک‌های گسلی و تمرکز دگرشکلی فعال در بخش‌های پیرامونی حوضه است. نتایج پژوهش حاضر کارایی شاخص‌های مورفومتریکی و رویکرد تلفیقی کمی را در شناسایی زون‌های فعال تکتونیکی در پهنه‌های کوهزایی فعال تأیید می‌کند.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵

کلیدواژه:

البرز مرکزی،

تکتونیک فعال،

حوضه الموت رود،

شاخص‌های ژئومورفیک،

مورفوتکتونیک.

استناد: برخورداری، نیلوفر؛ بهرامی، شهرام؛ حسین‌زاده، محمدمهدی و احتشامی معین‌آبادی، محسن (۱۴۰۴). ارزیابی تأثیر فعالیت تکتونیکی بر مورفومتری شبکه زهکشی در حوضه الموت رود، قزوین. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۲ (۴)، ۳۶۶-۳۵۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2026.411980.925>

© نویسندگان ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2026.411980.925>



مقدمه

فعالیت‌های تکتونیکی به‌طور معمول با شکل‌گیری و تحول اشکال زمین در یک منطقه ارتباط مستقیم دارند. این فعالیت‌ها از طریق تأثیرگذاری بر الگوهای زهکشی و رفتار رودخانه‌ها، تغییراتی را ایجاد می‌کنند که قابلیت ارزیابی به‌صورت کمی و کیفی را دارند (والدیا و نارایانا، ۲۰۰۷). در نواحی فعال تکتونیکی، الگوی شبکه زهکشی نسبت به ساختارهای زمین‌ساختی نظیر چین‌خوردگی‌ها و گسل‌ها حساس است و به‌سرعت به این تغییرات واکنش نشان می‌دهد. پیامد این فرایندها، تشدید فرسایش رودخانه‌ای، نامتقارن شدن حوضه‌ها، پیچیدگی هندسی شبکه زهکشی و ایجاد انحرافات مجرای رودخانه است (کاکس، ۱۹۹۴). میزان فعالیت تکتونیکی هر منطقه را می‌توان با بهره‌گیری از شاخص‌های مورفوتکتونیک و تحلیل‌های مورفومتریک ارزیابی کرد. مورفوتکتونیک بازتابی از تأثیر متقابل فرایندهای تکتونیکی گذشته و حال بر سیمای ناهمواری‌هاست؛ به‌گونه‌ای که ویژگی‌های توپوگرافی می‌توانند به‌منزله شاخص‌هایی از حرکات تکتونیکی جاری عمل کنند. در قلمرو ایران، نیروهای ناشی از همگرایی و کوتاه‌شدگی پوسته سبب شکل‌گیری ساختارهایی مانند درزه‌ها، گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها، بالآمدگی‌ها و فرونشینی‌ها شده است. بازتاب این تحولات در سیمای ناهمواری‌ها به‌وضوح مشهود است و شواهد متعددی از عملکرد گذشته و کنونی آنها برجای مانده است. این شواهد در پژوهش‌های مختلف، مبنایی برای تحلیل مسائل تکتونیکی و مورفوتکتونیک، بررسی الگوی دینامیک گسل‌ها و ریزپلیت‌ها و نیز ارزیابی‌های نئوتکتونیک منطقه‌ای در راستای مدیریت و برنامه‌ریزی‌های محیطی بوده‌اند (گورابی و همکاران، ۱۴۰۲). شاخص‌های ژئومورفیک تکتونیک فعال ابزارهایی مؤثر در تحلیل آثار فعالیت‌های زمین‌ساختی هستند. مزیت اصلی این شاخص‌ها قابلیت محاسبه آنها در گستره‌های وسیع مکانی با بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی و فنون سنجش از دور است؛ به‌گونه‌ای که می‌توانند در شناسایی ناهنجاری‌های ژئومورفیک مرتبط با تکتونیک فعال به کار روند (زووبلی و همکاران، ۲۰۰۴).

ارزیابی تکتونیک فعال بر پایه شاخص‌های ژئومورفیک تحت تأثیر عواملی مانند مقاومت سنگ، تغییرات اقلیمی و شدت فرایندهای زمین‌ساختی قرار دارد. این نوع تحلیل از طریق به‌کارگیری شاخص‌های ژئومورفیک بر سیمای چشم‌انداز و مؤلفه‌های آن، یعنی لندفرم‌ها انجام می‌گیرد. در این چارچوب، شاخص‌های متعددی در پژوهش‌های داخلی و خارجی برای بررسی تکتونیک فعال به کار گرفته شده‌اند. این شاخص‌ها را می‌توان در سه گروه اصلی دسته‌بندی کرد: نخست، پارامترهای مورفومتریک مرتبط با حوضه‌های آبریز مانند انتگرال هیپسومتریک، شاخص نبود تقارن، کشیدگی، گردواری و هلالیت؛ دوم، شاخص‌های مربوط به شبکه‌های رودخانه‌ای از جمله تراکم زهکشی، فرکانس زهکشی، زاویه تلاقی و شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی؛ و سوم، شاخص‌های مرتبط با جبهه‌های کوهستانی مانند سینوزیته جبهه کوهستان و نسبت عرض دره به ارتفاع دره. این شاخص‌ها به‌طور گسترده در چشم‌اندازهای متأثر از فعالیت‌های تکتونیکی در مناطق مختلف جهان استفاده شده‌اند (الحمدونی و همکاران، ۲۰۰۸؛ از کایماک و سوزبیلیر، ۲۰۱۲؛ بهرامی، ۲۰۱۳؛ روژیکا و میگون، ۲۰۲۱).

پژوهش‌های متعددی در زمینه ارتباط میان شاخص‌های ژئومورفیک و فعالیت‌های تکتونیکی انجام گرفته است. برای نمونه، در جنوب غربی ایالات متحده، کاستاریکا و سواحل مدیترانه اسپانیا از شاخص‌هایی مانند SMF و VF برای ارزیابی جبهه‌های کوهستانی و تکتونیک فعال استفاده شده است (راکول و همکاران، ۱۹۸۵؛ سیلوا، ۲۰۰۳). الحمدونی و همکاران (۲۰۰۸) رویکردی منطقه‌ای را برای محاسبه شاخص‌های مورفوتکتونیک بنیان نهاد که امکان مقایسه سطوح مختلف فعالیت تکتونیکی را فراهم می‌کرد. پژوهش‌های داخلی نیز این رویکرد را دنبال کرده‌اند؛ اسماعیلی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از شاخص‌هایی همچون منحنی هیپسومتری، شاخص تقارن حوضه و شاخص گرادیان طولی رودخانه، تغییرات مورفوتکتونیک رودخانه واز را در البرز شمالی بررسی کردند و ارتباط معنی‌داری میان مقادیر زیاد شاخص‌ها و موقعیت گسل البرز شمالی گزارش دادند. نتایج مشابهی در پژوهش مجیدزاده و همکاران (۱۳۹۰) در محدوده بهشهر تا نکا به دست آمد که فعالیت نیروهای تکتونیکی را با شاخص‌های چندگانه ژئومورفیک تأیید کرد. پژوهش‌های اخیر با بهره‌گیری از سنجش از دور و مدل‌های سه‌بعدی، ارتباط میان مورفولوژی رودخانه و تکتونیک را دقیق‌تر بررسی کرده‌اند. ولدینک و همکاران (۲۰۲۲) با مطالعه ویژگی‌های مورفومتریک در حوضه‌های زهکشی، اثر گسل‌های نرمال بر الگوهای رودخانه‌ای مائدری را آشکار کردند. محققان متعددی در ایران بر نقش نئوتکتونیک در

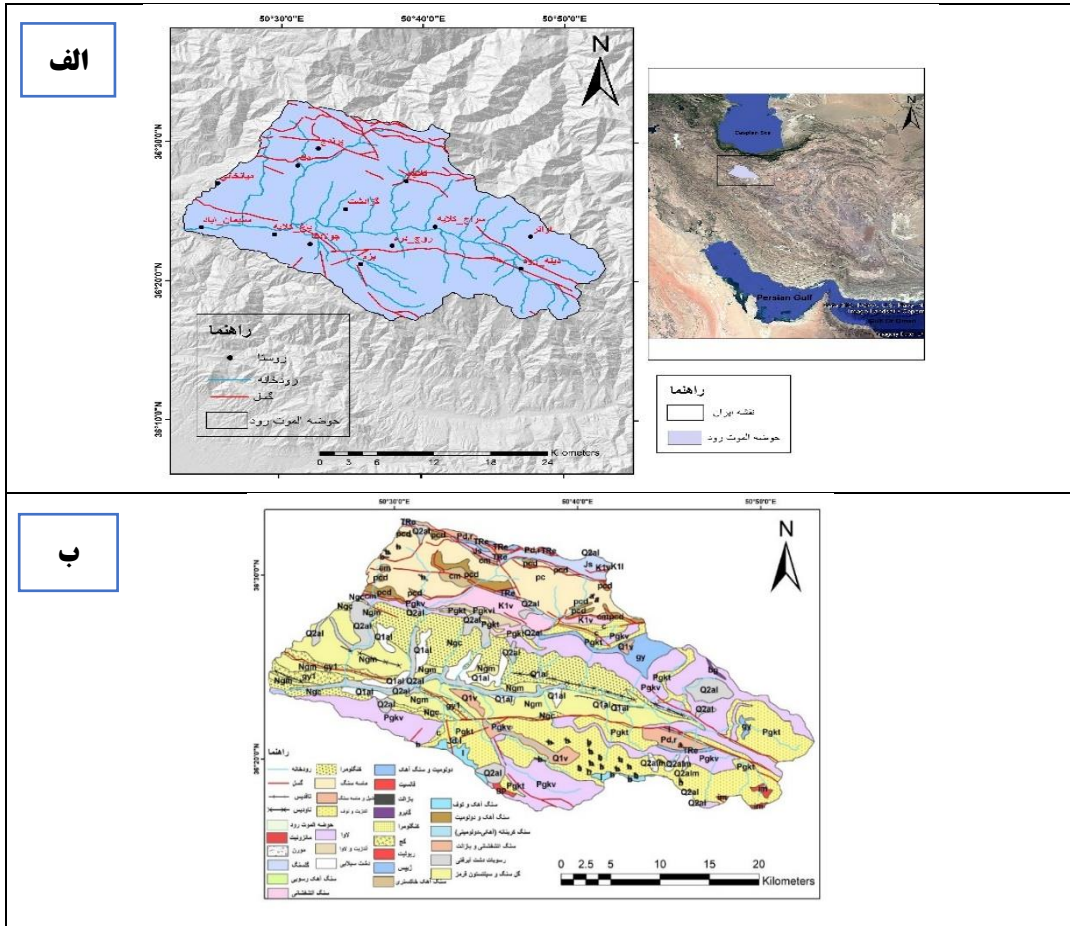
تکامل شبکه‌های زهکشی زاگرس تأکید کرده‌اند (بهرامی، ۲۰۱۳؛ فقیه و نوربخش، ۲۰۱۵؛ بهرامی و همکاران، ۲۰۲۴). مقیمی (۲۰۰۹) تغییرات سیستم حوضه زهکشی و الگوی رودخانه‌ها را در ارتباط با تأثیرات مورفوتکتونیکی در بلوک لوت بررسی کرد. به‌طور کلی، مرور پیشینه نشان می‌دهد که پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه شاخص‌های مورفوتکتونیک انجام گرفته است، اما تمرکز عمده بر زاگرس و برخی نواحی البرز بوده و بسیاری از مناطق دیگر هنوز به‌صورت جامع بررسی نشده‌اند. این خلأ پژوهشی ضرورت پژوهش حاضر را برجسته می‌کند. در محدوده پژوهش، سیمای مورفولوژیکی به‌طور محسوسی متأثر از ساختارهای زمین‌شناسی است؛ از این‌رو، ارزیابی میزان فعالیت تکتونیکی منطقه و تبیین نقش آن در شکل‌گیری و تحول ویژگی‌های مورفولوژیک موجود، ضرورتی پژوهشی محسوب می‌شود. رویکرد این مقاله مبتنی بر ارائه چارچوبی کمی است که امکان تمرکز بر حوضه‌هایی را فراهم می‌سازد که برای تعیین نرخ فعالیت تکتونیکی فعال، نیازمند بررسی‌های دقیق‌ترند. بررسی آثار تکتونیک فعال در حوضه رودخانه طالقان رود می‌تواند به روشن شدن ابهامات زمین‌ساختی، شناسایی الگوی تغییر شکل‌های سطحی و تشخیص ساختارهای فعال منطقه منجر شود. هدف اصلی این پژوهش، تحلیل نشانه‌های ژئومورفیک فعالیت‌های تکتونیکی در حوضه زهکشی رودخانه تحت بررسی است که تحت تأثیر فرایندهای بالآمدگی و کج‌شدگی قرار گرفته‌اند.

منطقه پژوهش

حوضه آبریز الموت رود به طول ۴۹ کیلومتر، واقع در شمال استان قزوین و در بخش مرکزی رشته‌کوه البرز (بین 36° تا 35° عرض شمالی و 50° تا 50° طول شرقی)، از کوه‌های هفت‌خانی و حصارچال در البرز مرکزی سرچشمه می‌گیرد و دره الموت را به‌سوی غرب می‌پیماید و در روستای شیرکوه به طالقان رود می‌ریزد (یمانی و همکاران، ۲۰۱۴). این حوضه با اختلاف ارتفاع چشمگیر (از حدود ۱۲۰۰ متر در خروجی تا بیش از ۴۰۰۰ متر در ارتفاعات تخت‌سلیمان)، ساختار زمین‌شناسی پیچیده متشکل از سازندهای سنگی سخت (مانند آهک‌های ژوراسیک) و واحدهای نرم و فرسایش‌پذیر (به‌ویژه مارن‌ها و شیل‌های دوره نئوژن) و نیز گسل‌های فعال، بستری پویا برای تحول شدید اشکال زمین‌ریختی ایجاد کرده است (شکل ۱). این حوضه در یک زون تکتونیکی فعال و فشاری واقع شده است که تحت تأثیر حرکت رورانگی صفحات تکتونیکی البرز قرار دارد و گسل‌های مهم منطقه گسل فشاری الموت، راندگی زورادشت، گسل فشاری پراچان و گسل فشاری کشاچال است (شکل ۱) (توکلی و همکاران، ۱۳۹۹). اقلیم منطقه دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک کوهستانی با گرادیان شدید بارش و دما از ارتفاعات به سمت پایین‌دست است. میانگین بارش سالانه در این حوضه از حدود ۳۰۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر در دشت‌های پایینی (مانند منطقه معلم کلاویه) به بیش از ۶۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات بلند (محدوده تخت‌سلیمان و اطراف قلعه الموت) افزایش می‌یابد. میانگین دمای سالانه نیز از حدود ۵ تا ۷ درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات، به ۱۲ تا ۱۴ درجه سانتی‌گراد در خروجی حوضه (مناطق کم‌ارتفاع‌تر) می‌رسد (قهرمانی و ثروتی، ۲۰۰۸). روند عمومی رودخانه از شرق به غرب است و در طول این مسیر از بالادست زوارک تا محل دوشاخه، سه پیچان رودی بزرگ به‌ترتیب در محدوده روستای خوبان، محمودآباد- دزدک سروباغ کلاویه و پیچان رودی‌های کوچک فرعی متعدد در این مسیر مشاهده می‌شود. الگوی رودخانه در بیشتر مسیر چندشاخه‌ای و در قسمت‌هایی پیچان‌رودی یا سینوسی و تک‌کانالی می‌شود (شکل ۱).

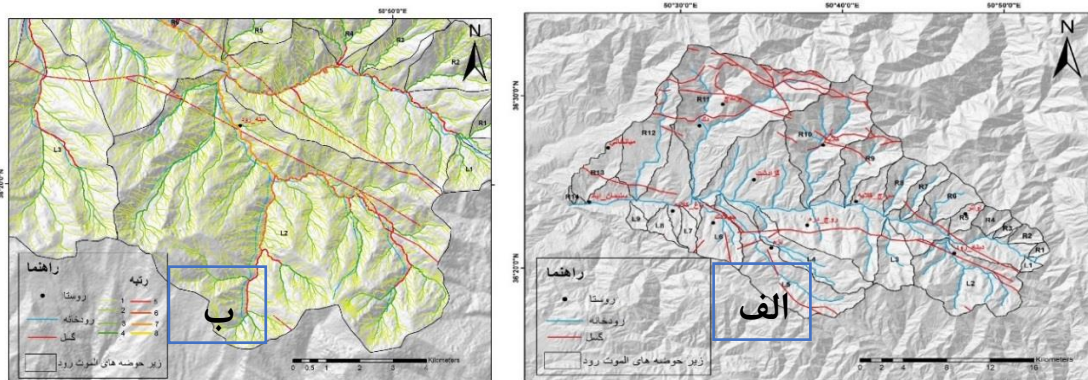
روش پژوهش

در این پژوهش از شاخص‌های مرتبط با شبکه زهکشی رودخانه، برای تعیین میزان فعالیت تکتونیکی منطقه استفاده شده است. برای این کار از مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر (مدل رقومی آلوپس برگرفته از سایت آلاسکا)، تصاویر ماهواره‌ای برگرفته از گوگل ارث، نقشه زمین‌شناسی ۱۰۰ هزار (سازمان زمین‌شناسی ایران) و نقشه‌های توپوگرافی ۲۵ هزار سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده شده است.



شکل ۱. الف) نقشه منطقه پژوهش (حوضه رودخانه الموت رود)؛ ب) نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ (سازمان زمین شناسی ایران).

برای تعیین محدوده منطقه و استخراج حوضه از مدل رقومی ارتفاع استفاده شده است سپس مرز ۲۳ زیرحوضه (۱۴ زیرحوضه سمت راست، ۹ زیرحوضه سمت چپ) که سرشاخه‌های آنها تا خط تقسیم آب اصلی امتداد یافته بود، تعیین و تفکیک شد (شکل ۲). برای استخراج شبکه زهکشی از نقشه‌های توپوگرافی ۲۵ هزار (سازمان نقشه برداری کشور) استفاده شد. برای تعیین نوع کانال و الگوی رودخانه از تصاویر گوگل ارث استفاده شد. تحلیل داده‌ها، مدل سازی و استخراج مقادیر شاخص‌ها در محیط نرم‌افزاری GIS انجام گرفت. مهم‌ترین شاخص‌های استفاده شده در این پژوهش شامل دو دسته به شرح زیر است. همچنین برای تحلیل و طبقه بندی نقشه تکتونیک نهایی منطقه از روش نرمال سازی نتایج (هر مقدار در حوضه تقسیم بر حداکثر مقدار در همان حوضه) استفاده شده است.



شکل ۲. الف) نقشه رتبه بندی آبراهه‌ها؛ ب) نقشه زیر حوضه های الموت رود.

شاخص‌های شبکه زهکشی تکتونیک فعال

شاخص نسبت تعداد آبراهه‌های مرتبه اول به مجموع آبراهه‌ها $N1/N$: یکی از شاخص‌های ساده و در عین حال مهم برای تحلیل شبکه زهکشی و سلسله‌مراتب آبراهه‌هاست که مقدار زیاد آن نشان‌دهنده جوان بودن منطقه از نظر تکتونیک است (زوجیکز، ۱۹۹۸). شاخص تراکم زهکشی (Dd): این شاخص مقدار توسعه‌یافتگی شبکه زهکشی را نشان می‌دهد. مقدار زیاد نشان‌دهنده زهکشی متراکم و فعالیت تکتونیک زیاد است (تالینگ و سوتر، ۱۹۹۹). شاخص تراکم زهکشی آبراهه درجه یک (Dd1): نشان‌دهنده میزان توسعه‌یافتگی شبکه زهکشی (آبراهه‌های درجه یک) است. مقادیر بیشتر آن نشان‌دهنده تراکم بیشتر آبراهه‌ها و به‌طور معمول مرتبط با تکتونیک فعال و شیب تند حوضه است (بهرامی و استوکز، ۲۰۲۳).

شاخص فرکانس زهکشی (DF): این شاخص به‌عنوان یکی از پارامترهای کمی شبکه زهکشی، بیانگر میزان تمرکز و تعداد آبراهه‌ها در واحد سطح است و می‌تواند بازتابی از فعالیت‌های تکتونیک و رشد ساختارهای چین‌خورده باشد (دوی و همکاران، ۲۰۱۱). شاخص‌های حوضه زهکشی تکتونیک فعال: شاخص سینوزیت آبراهه اصلی (SMD): به بررسی سینوزیت آبراهه اصلی حوضه می‌پردازد. فعالیت‌های تکتونیک و شیب توپوگرافی می‌تواند در مقدار این شاخص تأثیرگذار باشد. مقدار زیاد این شاخص به معنای پیچ‌وخم زیاد و تکتونیک فعال و مقدار کم آن نشان‌دهنده مسیر مستقیم و تکتونیک ضعیف است (بهرامی و همکاران، ۲۰۱۳). شاخص درصد عدم تقارن حوضه (PAF): می‌تواند نشانه‌ای از حرکات تکتونیک و تغییرات ناگهانی در ارتفاع سطحی باشد (رابطه ۶). مقدار PAF زیاد ($> 20\%$) نشان‌دهنده تأثیر زیاد نیروهای تکتونیک و تغییرات شدید در شبکه زهکشی است. مقدار PAF پایین ($< 10\%$) نشان‌دهنده تقارن بیشتر و تأثیر کمتر فعالیت‌های زمین‌ساختی است (بهرامی، ۲۰۱۳). شاخص تمایل حوضه زهکشی DBO: برای بررسی تمایل یا جهت‌گیری حوضه زهکشی و ارتباط آن با ساختارهای زمین‌شناسی و تکتونیک استفاده می‌شود. مقدار زیاد این شاخص (به‌طور معمول بیشتر از ۱۵ درجه) بیانگر آن است که حوضه زهکشی تحت تأثیر جهت گسل و رشد جانبی تاقدیس است (بهرامی و استوکز، ۲۰۲۳).

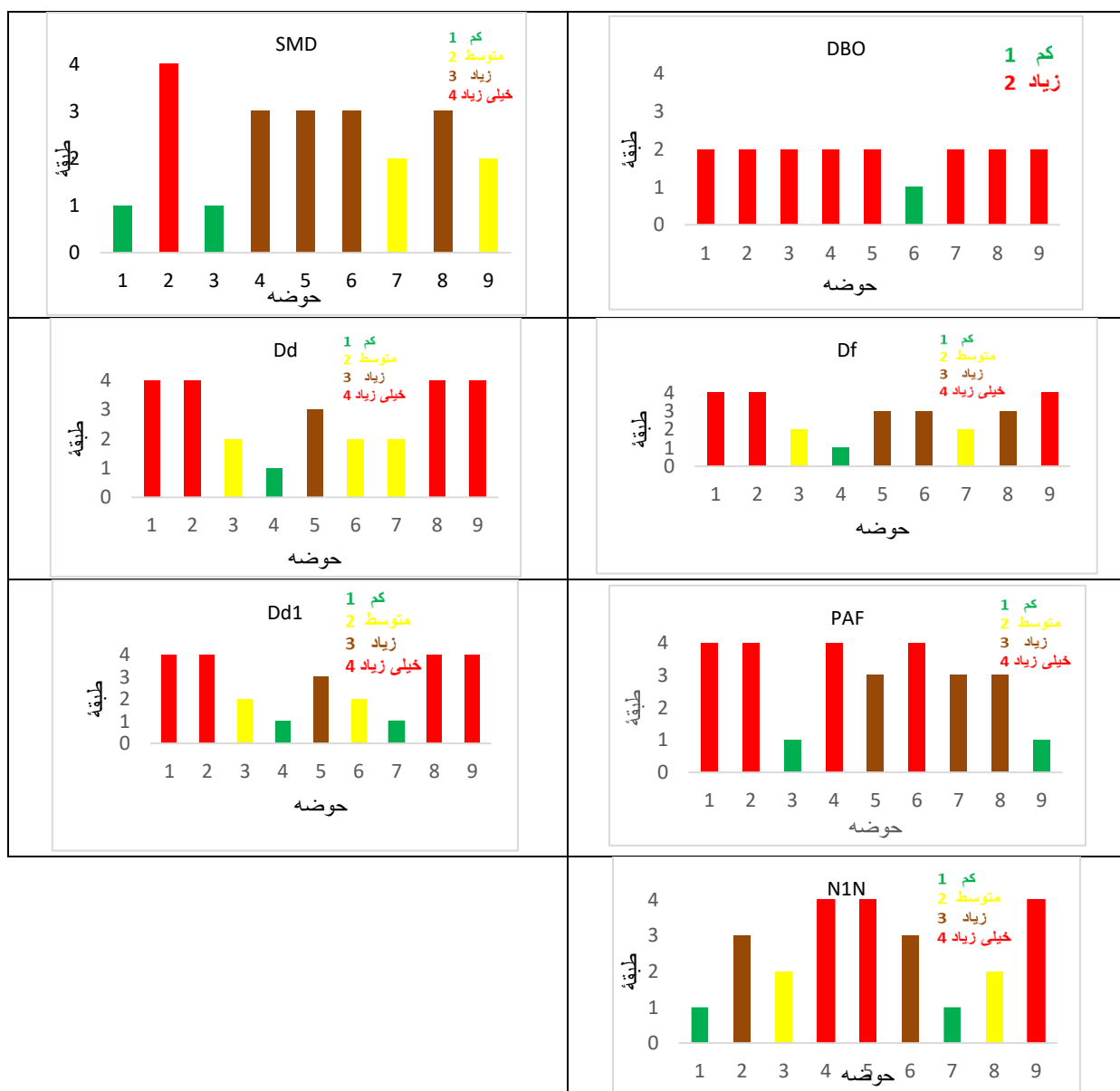
در این تحقیق مقادیر تمام شاخص‌های مورفوتکتونیک بین صفر و ۱ نرمال‌سازی شدند. برای نرمال‌سازی، مقدار شاخص در هر زیرحوضه از مقدار حداقل شاخص (در تمام زیرحوضه‌ها) کم شد و عدد به‌دست‌آمده بر عدد تفاوت بین کمترین و بیشترین مقدار، تقسیم شد. در نقشه نهایی فعالیت نسبی تکتونیک، مقادیر نرمال‌سازی‌شده تمام شاخص‌ها به هم جمع و بر تعداد شاخص‌ها تقسیم شد. مقدار ۰ تا ۰/۲۵ رده کم، مقدار ۰/۲۵ تا ۰/۵۰ رده متوسط، مقدار ۰/۵۰ تا ۰/۷۵ رده زیاد و مقدار ۰/۷۵ تا ۱ رده فعالیت نسبی تکتونیک بسیار زیاد در نظر گرفته شد.

یافته‌های پژوهش

بررسی شاخص‌های ژئومورفیک در ۲۳ زیرحوضه از حوضه الموت رود شامل ۹ زیرحوضه در سمت چپ و ۱۴ زیرحوضه در سمت راست، نشان‌دهنده الگوی ناهمگن و معنادار از توزیع فعالیت‌های تکتونیک در سطح منطقه است. آنچه از تلفیق و تحلیل این شاخص‌ها آشکار می‌شود، تفاوت چشمگیر میان دو بخش راست و چپ حوضه و همچنین تمرکز فعالیت‌ها در بخش‌های خاصی از طول آبراهه‌های اصلی است. نتایج نشان می‌دهد که در سمت چپ، زیرحوضه‌های ۱، ۲، ۸ و ۹ در اکثر شاخص‌ها در طبقه بالاتر قرار گرفته‌اند که بیانگر فعالیت تکتونیک بیشتر در این بخش‌هاست. به‌ویژه زیرحوضه‌های ۲ و ۹ در چند شاخص از جمله درصد عدم تقارن حوضه، تراکم آبراهه درجه یک، فرکانس زهکشی، تراکم زهکشی، سینوزیت آبراهه اصلی و نسبت تعداد آبراهه‌های درجه اول به مجموع آبراهه‌ها مقادیر بیشتری را نشان می‌دهند که حاکی از پویایی ژئومورفیک بیشتر و کنترل ساختاری قوی‌تر در این نواحی است. در مقابل، زیرحوضه‌های ۳، ۴ و ۷ در طبقات پایین‌تر شاخص‌ها قرار دارند که بیانگر فعالیت تکتونیک ضعیف‌تر یا شرایط به‌نسبت پایدارتر در این بخش‌هاست. به‌ویژه زیرحوضه ۴ در چند شاخص مقدار حداقلی را نشان می‌دهد. زیرحوضه‌های ۵ و ۶ بیشتر در طبقات میانی قرار گرفته‌اند و از نظر شدت فعالیت، وضعیت بینابینی را نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که نه در زمره فعال‌ترین و نه در گروه کم‌فعال‌ترین زیرحوضه‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. در مجموع الگوی فضایی شاخص‌ها بیانگر فعالیت تکتونیک بیشتر در بخش‌های مربوط به زیرحوضه‌های ۱، ۲، ۸ و ۹ و کاهش نسبی آن در زیرحوضه‌های مرکزی‌تر (به‌ویژه ۳، ۴ و ۷) است (جدول ۳ و شکل ۳).

جدول ۳. شاخص‌های شبکه زهکشی زیرحوضه‌های سمت چپ حوضه الموت رود

حوضه	N1/N	PAF	Dd1	DF	Dd	DBO	SMD	مساحت (کیلومتر مربع)
۱	۰/۷۵	۷۸/۵۹	۵/۲۱	۳۰/۱۲	۸/۲۶	۶۸/۵۶	۱/۰۵	۱/۸۵
۲	۰/۷۹	۷۴/۹۸	۶/۰۷	۲۶/۹۳	۸/۶۱	۲۹/۳۴	۱/۴۴	۵۴/۷۱
۳	۰/۷۷	۵۹/۰۷	۴/۵۳	۱۸/۲۲	۶/۸۹	۲۷/۶۲	۱/۰۹	۱۸/۹۸
۴	۰/۸۱	۷۳/۳۴	۴/۱	۱۲/۹۴	۵/۸۳	۵۷/۹۵	۱/۳۷	۲۹/۲۷
۵	۰/۸	۶۶/۴۶	۵/۰۹	۱۹/۹۳	۷/۳۱	۷۳/۸۹	۱/۳۵	۵۲/۷۷
۶	۰/۷۹	۸۰/۳۴	۴/۷	۲۰/۶۱	۷/۱۵	۶/۰۸	۱/۲۱	۲۰/۸
۷	۰/۷۶	۶۶/۹۳	۴	۱۷/۹۶	۷/۰۱	۱۸/۹	۱/۱۲	۵/۸۴
۸	۰/۷۸	۷۳/۲۸	۵/۵۷	۲۳/۳۱	۸/۳۳	۲۱/۲۲	۱/۲۴	۵/۹۱
۹	۰/۸۵	۵۷/۴۲	۶/۷۷	۳۰/۶۴	۹/۳۵	۲۸/۱۵	۱/۱۱	۳/۶۲
میانگین	۰/۷۸	۷۰/۰۴	۵/۱۱	۲۲/۲۹	۷/۶۳	۳۶/۸۵	۱/۲۲	۲۱/۵۲
حداقل	۰/۷۵	۵۷/۴۲	۴	۱۲/۹۴	۵/۸۳	۶/۰۸	۱/۰۵	۱/۸۵
حداکثر	۰/۸۵	۸۰/۳۴	۶/۷۷	۳۰/۶۴	۹/۳۵	۷۳/۸۹	۱/۴۴	۵۴/۷۱



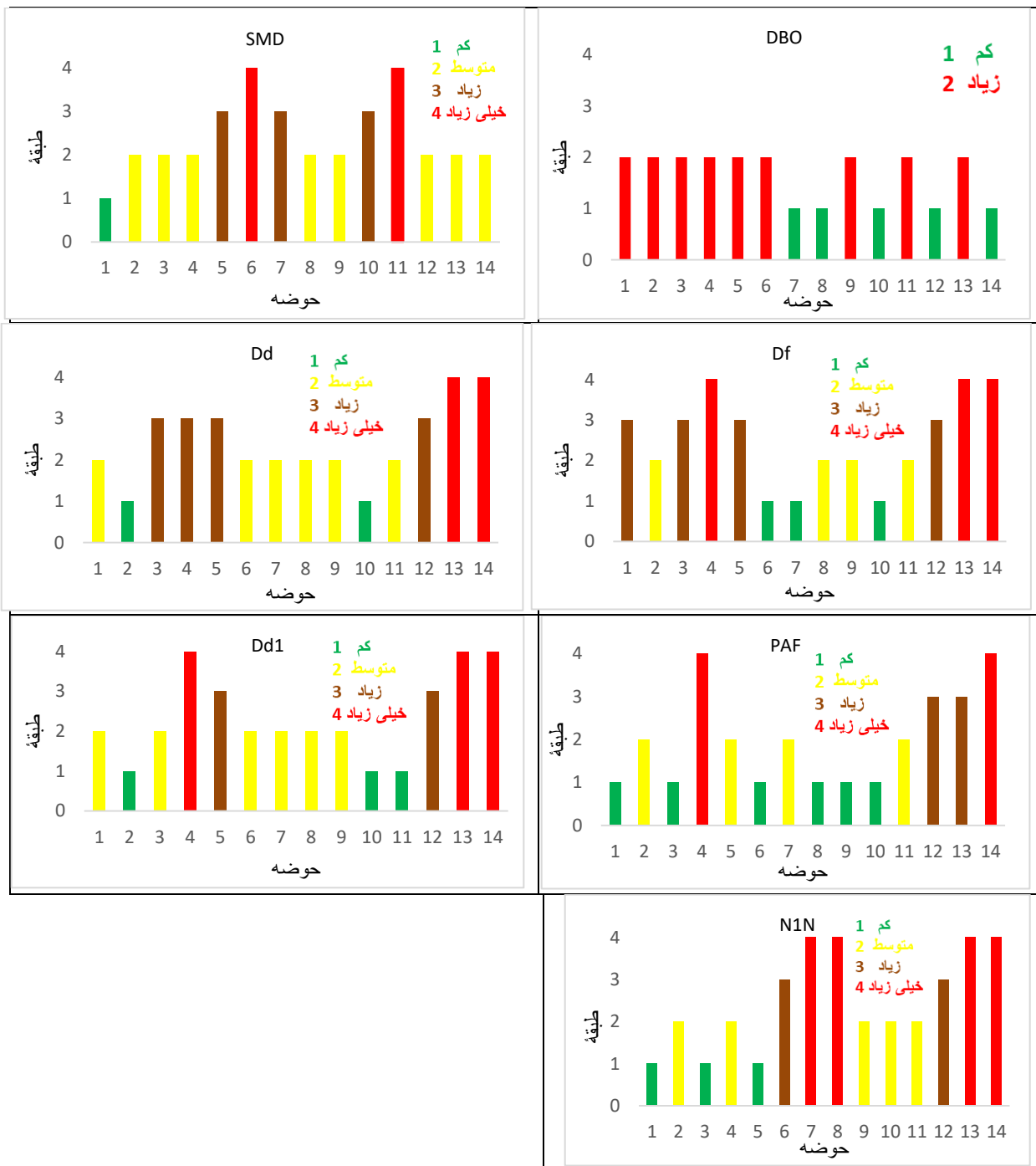
شکل ۳. نمودار نتایج شاخص‌های شبکه زهکشی سمت چپ زیرحوضه الموت رود طبقه ۱ (کم)، ۲ (متوسط)، ۳ (زیاد)، ۴ (خیلی زیاد)

نتایج در سمت راست نشان می‌دهد که زیرحوضه‌های ۴، ۱۳ و ۱۴ در بیشتر شاخص‌ها در طبقه بالاتر قرار گرفته‌اند که بیانگر فعالیت تکنونیک بیشتر در این بخش‌هاست. به‌ویژه زیرحوضه‌های ۱۳ و ۱۴ در چند شاخص از جمله درصد عدم تقارن حوضه، تراکم آبراهه درجه یک، فرکانس زهکشی، تراکم زهکشی، سینوزیته آبراهه اصلی و نسبت تعداد آبراهه‌های درجه اول به مجموع آبراهه‌ها مقادیر بیشتری را نشان می‌دهند که حاکی از پویایی ژئومورفیک بیشتر و کنترل ساختاری قوی‌تر در این نواحی است. در مقابل، زیرحوضه‌های ۱، ۲، ۶، ۸ تا ۱۰ در طبقات پایین‌تر شاخص‌ها قرار دارند. به‌ویژه زیرحوضه ۱ در چند شاخص مقدار حداقلی را نشان می‌دهد. زیرحوضه‌های ۵، ۷، ۱۱ و ۱۲ بیشتر در طبقات میانی قرار گرفته‌اند و از نظر شدت فعالیت، وضعیت بینایی را نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که نه در زمره فعال‌ترین و نه در گروه کم‌فعال‌ترین زیرحوضه‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. در مجموع الگوی فضایی شاخص‌ها بیانگر فعالیت تکنونیک بیشتر در بخش‌های مربوط به زیرحوضه‌های ۴، ۱۳ و ۱۴، کاهش نسبی آن در زیرحوضه‌های غربی‌تر (به‌ویژه ۱، ۲، ۶، ۸ تا ۱۰) است (جدول ۴ و شکل ۴).

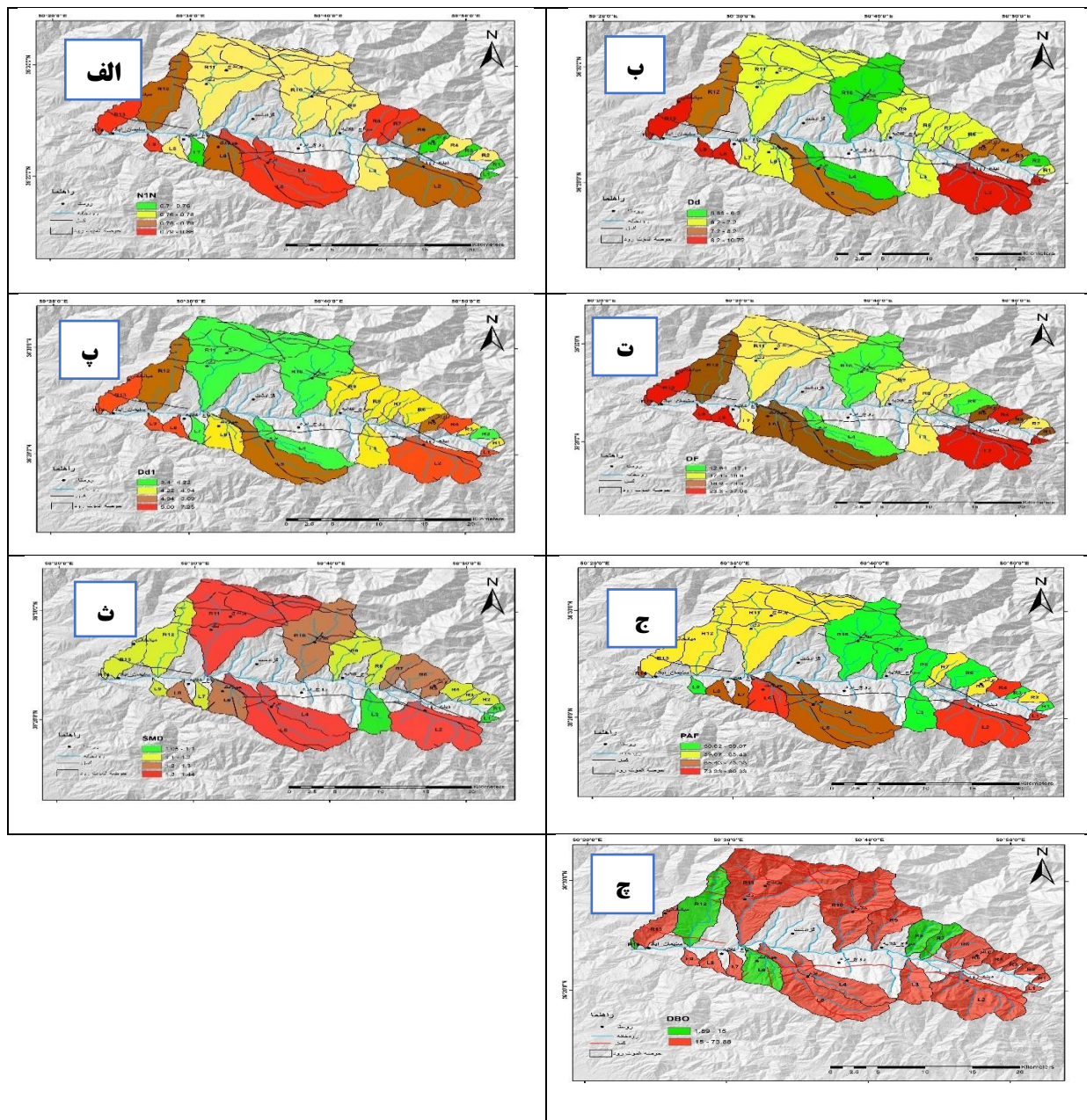
نکته شایان تأمل، قرارگیری زیرحوضه مرکزی ۸ در هر دو بخش به‌عنوان نقطه عطف فعالیت‌های تکنونیک است. این الگوی فضایی دوگانه نشان‌دهنده ناهمگونی ساختاری در منطقه است؛ به‌گونه‌ای که پهنه‌های فعال تکنونیک بیشتر در بخش‌های پیرامونی (شمالی - شرقی در چپ و شرقی - جنوبی در راست) متمرکز شده‌اند، درحالی که هسته مرکزی‌تر منطقه از ثبات نسبی بیشتری برخوردار است. این توزیع نامتقارن فعالیت‌ها را می‌توان ناشی از عملکرد متفاوت بلوک‌های گسلی یا تغییر در سبک دگرشکلی در طول منطقه دانست (شکل ۵).

جدول ۴. شاخص‌های شبکه زهکشی زیرحوضه‌های سمت راست حوضه الموت رود

حوضه	NI/N	PAF	Dd1	DF	Dd	DBO	SMD	مساحت (کیلومتر مربع)
۱	۰/۷	۵۰/۸۷	۴/۲۴	۲۲/۰۶	۶/۵۸	۲۰/۹۶	۱/۰۹	۱/۹۹
۲	۰/۷۷	۵۹/۷۲	۳/۴	۱۷/۳۲	۵/۸۸	۳۶/۰۳	۱/۱۲	۴/۷۹
۳	۰/۷۶	۵۳/۶۸	۴/۸۱	۲۱	۷/۳۳	۴۰/۱۴	۱/۱۷	۲/۶۶
۴	۰/۷۸	۷۵/۴۱	۵/۶۶	۲۳/۸	۸/۱۲	۳۲/۰۹	۱/۱۳	۶/۸۹
۵	۰/۷۵	۶۲/۰۲	۴/۹۵	۱۹/۳۱	۷/۴۵	۴۱/۰۹	۱/۲۳	۵/۹۳
۶	۰/۷۹	۵۰/۰۲	۴/۳۳	۱۴/۷	۶/۴۱	۱۶/۷۴	۱/۳	۱۵/۳
۷	۰/۸۴	۵۹/۵۶	۴/۹۴	۱۷/۱	۶/۷	۳/۰۸	۱/۲۱	۱۰/۷۵
۸	۰/۸۱	۵۵/۸۷	۴/۹۱	۱۸/۶۹	۶/۹۱	۱/۸۹	۱/۱۵	۱۴/۱۲
۹	۰/۷۷	۵۰/۵۴	۴/۵	۱۷/۲۱	۶/۶۶	۳۰/۰۴	۱/۱۶	۲۴/۸۶
۱۰	۰/۷۸	۵۵/۲۵	۴/۱۲	۱۴/۸۸	۶/۰۴	۱۵/۹۵	۱/۲۴	۶۴/۲۸
۱۱	۰/۷۷	۶۵/۴۳	۴/۲۲	۱۷/۱۴	۶/۴۲	۶۸/۰۸	۱/۳۶	۱۱۴/۲۲
۱۲	۰/۷۹	۴۶/۶۶	۵/۰۶	۱۸/۹۸	۷/۵۳	۱۲/۸۱	۱/۱۹	۳۸/۴۴
۱۳	۰/۸۱	۶۰/۴۲	۶/۷۲	۲۹/۰۹	۹/۴	۲۷/۸۱	۱/۱۸	۱۶/۲۸
۱۴	۰/۸۶	۷۱/۴۴	۷/۲۵	۳۷/۰۸	۱۰/۷۲	۹/۷۴	۱/۱۸	۰/۸
میانگین	۰/۷۸	۵۹/۶۳	۴/۹۳	۲۰/۵۹	۷/۲۹	۲۵/۴۲	۱/۱۹	۲۲/۹۵
حداقل	۰/۷	۵۰/۰۲	۳/۴	۱۴/۷	۵/۸۸	۱/۸۹	۱/۰۹	۰/۸
حداکثر	۰/۸۶	۷۵/۴۱	۷/۲۵	۳۷/۰۸	۱۰/۷۲	۶۸/۰۸	۱/۳۶	۱۱۴/۲۲

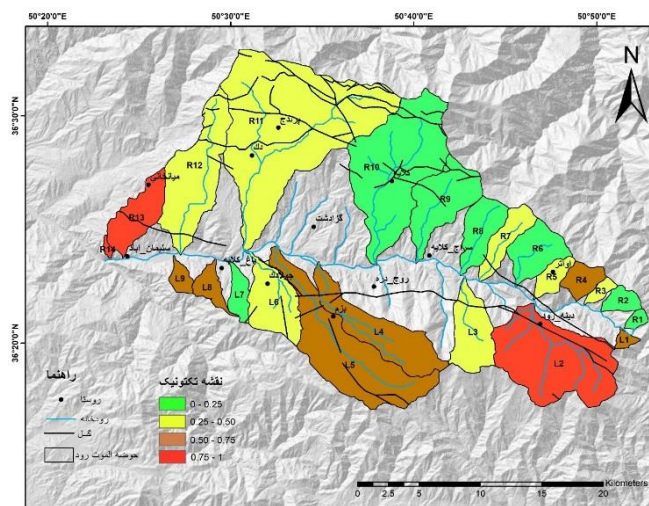


شکل ۴. نمودار نتایج شاخص‌های شبکه زهکشی سمت راست زیرحوضه‌های الموت رود طبقه ۱ (کم)، ۲ (متوسط)، ۳ (زیاد)، ۴ (خیلی زیاد)



شکل ۵. نقشه شاخص های شبکه زهکشی زیرحوضه الموت رود؛ (الف) شاخص نسبت تعداد آبراهه های درجه اول به مجموع آبراهه ها N_1/N ؛ (ب) شاخص تراکم زهکشی Dd ؛ (پ) شاخص تراکم زهکشی آبراهه درجه یک $Dd1$ ؛ (ت) شاخص فرکانس زهکشی DF ؛ (ث) شاخص سینوزیته آبراهه اصلی SMD ؛ (ج) شاخص درصد عدم تقارن حوضه PAF ؛ (چ) شاخص تمایل حوضه زهکشی DBO

نقشه نهایی فعالیت نسبی تکنونیک در دامنه ۰ تا ۱ محاسبه و سپس با استفاده از طبقه بندی چارکی (Quantile) به چهار طبقه شامل طبقه ۱ (کم)، ۲ (متوسط)، ۳ (زیاد) و ۴ (خیلی زیاد) تقسیم شد. نتایج این پهنه بندی نشان می دهد که زیرحوضه های واقع در بخش های شرقی و جنوب شرقی منطقه (به ویژه $R13, R14$) و نیز زیرحوضه های شمالی و شمال شرقی در بخش چپ (مانند $L2$) در بالاترین رده فعالیت تکنونیک قرار گرفته اند. در مقابل، زیرحوضه های غربی و مرکزی غربی شامل ($R6, R2, R1$) و نیز ($R8$ تا $R10$) اغلب در طبقات پایین (فعالیت کم) جای گرفته اند. حوضه های $L4, L5, L8, L9, R3, R5, R7, R11$ و $R12$ نیز وضعیت میانی و بینابینی را نشان می دهند. این الگوی کمی شده که حاصل نرمال سازی و طبقه بندی یکسان شاخص هاست، تأییدی بر ناهمگونی ساختاری منطقه و تمرکز فعالیت های تکنونیک در بخش های پیرامونی به ویژه در شمال شرق و جنوب شرق است (شکل ۶).



شکل ۶. نقشه نهایی فعالیت نسبی زمین ساختی (نرمال سازی شاخص‌ها) زیر حوضه‌های رودخانه الموت رود

بحث

نتایج حاصل از تحلیل شاخص‌های ژئومورفیک در ۲۳ زیرحوضه در الموت رود، الگویی ناهمگن و معنادار از توزیع فعالیت‌های تکتونیکی را آشکار می‌کند. تمرکز فعالیت‌های تکتونیکی زیاد در بخش‌های پیرامونی شمال شرق و جنوب شرق حوضه در مقابل فعالیت به نسبت کمتر در بخش‌های مرکزی و غربی، بیانگر ناهمگونی ساختاری بارز در این منطقه است. این الگو با یافته‌های بهرامی (۲۰۱۳) در زاگرس همخوانی دارد که نشان داد ناهنجاری سلسله‌مراتبی سیستم زهکشی و آبراه‌ها به شدت تحت تأثیر تغییرات محوری چین‌ها و موقعیت زیرحوضه‌ها نسبت به ساختارهای فعال قرار می‌گیرد. اگرچه در زاگرس عامل اصلی این ناهمگونی، تفاوت در نرخ بال‌آمدگی طاق‌دیس‌ها و مهاجرت دگرشکلی از شمال شرق به جنوب غرب است (بهرامی، ۲۰۱۳). در منطقه پژوهش این الگو بیش از همه به عملکرد متمایز بلوک‌های گسلی و تغییر سبک دگرشکلی در امتداد گسل‌های اصلی و فرعی نسبت داده می‌شود. ارقام زیاد شاخص‌هایی چون درصد عدم تقارن حوضه (PAF)، تراکم زهکشی (Dd)، فرکانس زهکشی (Df) و نسبت تعداد آبراهه‌های درجه اول به مجموع آبراهه‌ها (N_1/N) در زیرحوضه‌های پرفعالیت به‌ویژه L2، R13 و R14 نشان‌دهنده کنترل ساختاری قوی بر شبکه زهکشی است. بهرامی (۲۰۱۳) در مطالعه زاگرس نشان داد که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین چگالی ناهنجاری زهکشی (Da) و نسبت N_1/N وجود دارد که این رابطه به افزایش زاویه هم‌ریختگی و در نتیجه تشدید ناهنجاری سلسله‌مراتبی منجر می‌شود. در حوضه الموت رود، مقادیر زیاد N_1/N در زیرحوضه‌های فعال به‌ویژه L2، L13 و R14 همراه با تراکم زهکشی زیاد، گویای آن است که آبراهه‌های درجه یک به دلیل فعالیت گسل‌های فرعی و شکستگی‌های متعدد، با زوایای تند به آبراهه‌های اصلی می‌پیوندند. این یافته با مشاهدات ریتز و همکاران (۲۰۰۶) در البرز مرکزی نیز همسوست؛ آنان نشان دادند که گسل‌های مشا و رودبار با سازوکار چپ‌گرد همراه با مؤلفه نرمال، الگوی زهکشی را به شدت دگرگون کرده و موجب افزایش زاویه تلاقی آبراهه‌ها شده‌اند. از سوی دیگر، مقادیر کم این شاخص‌ها در زیرحوضه‌های R6، R2، R1، L7 و R8 تا R10 نشان‌دهنده پایداری نسبی و تأثیر محدودتر ساختارهای گسلی در این نواحی است. این الگو مشابه آن چیزی است که بهرامی (۲۰۱۳) در حوضه‌های به نسبت دایره‌ای مشاهده کرد؛ جایی که الگوی زهکشی شاخه‌شاخه شکل گرفته و ناهنجاری سلسله‌مراتبی کاهش یافته است.

در حوضه الموت رود، حضور سازندهای آتشفشانی آواری کرج که اغلب شامل توف‌ها و گدازه‌های آندزیتی بازالتی با درجه نفوذپذیری متوسط تا کم است (یمانی و همکاران، ۲۰۱۴)، می‌تواند زمینه‌ساز تراکم زهکشی به نسبت زیاد در بیشتر زیرحوضه‌ها باشد. با این حال، تفاوت‌های چشمگیر در مقادیر Dd و Df میان زیرحوضه‌های هم‌جوار با لیتولوژی مشابه مانند تفاوت آشکار میان زیرحوضه R13 (فعال) و R1 (کم‌فعالیت) نشان می‌دهد که تکتونیک، عامل اولیه و کنترل‌کننده اصلی این ناهمگونی است و لیتولوژی بیشتر تعدیل‌کننده ثانویه است.

یکی از یافته‌های شایان تأمل این پژوهش، جایگاه ویژه زیرحوضه‌های ۲، ۴، ۵، ۸ و ۹ در سمت چپ و ۱۳ و ۱۴ در سمت راست به‌عنوان نقطه عطف فعالیت‌های تکنونیک است. این زیرحوضه که در محل تغییر روند گسل الموت و نزدیک به تقاطع آن با گسل طالقان قرار دارد، مقادیر زیادی از شاخص‌های مورفومتریک را نشان می‌دهد. این الگو با مشاهدات ریتز و همکاران (۲۰۰۶) در البرز مرکزی تطبیق پذیر است؛ آنها نشان دادند که بیشترین دگرشکلی در محل‌های تغییر روند گسل‌ها و تقاطع ساختارها متمرکز می‌شود. هالینگزورث و همکاران (۲۰۱۰) نیز در بررسی گسل آستانه در البرز شرقی، تمرکز جابه‌جایی‌های رودخانه‌ای را در بخش‌هایی از گسل که دچار تغییر هندسه می‌شوند، اثبات کردند. بنابراین موقعیت ممتاز این زیرحوضه‌ها در محل تغییر هندسه گسل الموت و مجاورت با گسل طالقان، توجیه‌کننده تمرکز زیاد فعالیت تکنونیک در این ناحیه است.

اگرچه پژوهش حاضر به‌طور مستقیم به اندازه‌گیری جابه‌جایی کانال‌ها نپرداخته، مقادیر زیاد شاخص‌های ناهنجاری زهکشی و عدم تقارن حوضه در بخش‌های فعال منطقه (به‌ویژه L2، L9، R13 و R14) را می‌توان شاهدی غیرمستقیم بر انحراف زهکشی ناشی از فعالیت گسل‌ها تلقی کرد. پژوهش‌های متعدد در البرز، جابه‌جایی سیستماتیک آبراهه‌ها را در امتداد گسل‌های امتدادلغز نشان داده‌اند. هالینگزورث و همکاران (۲۰۱۰) جابه‌جایی‌های ۱۵ تا ۲۰ متری رودخانه‌ها را در امتداد گسل آستانه اندازه‌گیری کردند که حاصل دو تا پنج زمین‌لرزه بزرگ در هولوسن است. فاطمی عقدا و همکاران (۲۰۱۹) در البرز غربی، جابه‌جایی‌های امتدادلغز چپ‌گرد تا ۵۰۰ متر را در امتداد گسل‌های رودبار، منجیل و کلیشم شناسایی کردند. با توجه به موقعیت حوضه الموت رود در امتداد گسل‌های طالقان و الموت که هر دو دارای مؤلفه امتدادلغز هستند (ریتز و همکاران، ۲۰۰۶)، به نظر می‌رسد که بخش عمده‌ای از ناهنجاری‌های زهکشی مشاهده‌شده در حوضه‌های فعال، نتیجه جابه‌جایی تدریجی کانال‌ها در اثر لغزش‌های مکرر کواترنری این گسل‌ها باشد.

پهنه‌بندی نهایی فعالیت تکنونیک بر اساس نرمال‌سازی و طبقه‌بندی چارکی شاخص‌ها، تصویر کمی روشنی از توزیع فضایی دگرشکلی فعال در حوضه الموت رود به‌دست می‌دهد. تمرکز بیشترین رده‌های فعالیت در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی زیرحوضه‌های R13 و R14 و شمال و شمال شرقی (L2، L8 و L9) با الگوی تمرکز لرزه‌خیزی در البرز مرکزی همخوانی قابل قبولی دارد. زنجی و همکاران (۲۰۰۶) و ریتز و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که بیشترین فعالیت لرزه‌ای در البرز مرکزی متمرکز بر گسل‌های مشا، رودبار و طالقان است. از آنجا که گسل طالقان در حاشیه جنوبی حوضه الموت رود و گسل الموت (از شاخه‌های فرعی گسل مشا) در درون حوضه قرار دارند، فعالیت زیاد زیرحوضه‌های مجاور این گسل‌ها در نقشه پهنه‌بندی کاملاً توجیه‌پذیر است. نکته حائز اهمیت دیگر، تطابق این یافته‌ها با نتایج حاصل از شاخص‌های گرادیان طولی رودخانه (SL) در البرز است. اسماعیلی و همکاران (۱۳۹۶) نشان دادند که شکستگی‌های ایجادشده در نیمرخ طولی رودخانه‌های البرز شمالی اغلب ناشی از فعالیت گسل‌های عرضی است. در پژوهش‌های البرز غربی و مرکزی (توکلی و همکاران، ۱۳۹۹)، حوضه‌های تحت تأثیر گسل‌های طالقان، الموت رود و شاهرود مقادیر زیادی از شاخص‌های ناهنجاری زهکشی و تراکم آبراهه‌ها را نشان داده‌اند که با نتایج حوضه‌های L2، L9، R13 و R14 در پژوهش حاضر همسوست.

نتیجه‌گیری

تحلیل جامع شاخص‌های ژئومورفیک در ۲۳ زیرحوضه الموت رود نشان داد که توزیع فعالیت‌های تکنونیک در این بخش از البرز مرکزی به‌شدت ناهمگن و وابسته به موقعیت ساختاری است. تمرکز بیشترین رده‌های فعالیت در زیرحوضه‌های شرقی، جنوب شرقی و شمال شرقی، در مقابل پایداری نسبی بخش‌های مرکزی و غربی، بیانگر عملکرد متمایز بلوک‌های گسلی و تغییر سبک دگرشکلی در امتداد گسل‌های اصلی منطقه است. تطابق مکانی زیرحوضه‌های پرفعالیت با امتداد گسل‌های الموت و طالقان، تأثیر مهم ساختارهای امتدادلغز و فشاری را در کنترل توسعه شبکه زهکشی تأیید می‌کند. مقادیر زیاد شاخص‌هایی مانند PAF، Df و Dd ، N_1/N در زیرحوضه‌های فعال، نشان‌دهنده جوان‌شدگی نسبی شبکه زهکشی، افزایش شکستگی‌ها و تأثیر مستقیم حرکات بالآمدگی و لغزش‌های کواترنری بر تکامل سیستم رودخانه‌ای است. از سوی دیگر، مقادیر کمتر این شاخص‌ها در بخش‌های غربی، حاکی از شرایط پایدارتر ژئومورفولوژیکی و کاهش نرخ دگرشکلی فعال است. کاربرد روش نرمال‌سازی و طبقه‌بندی کمی شاخص‌ها امکان تفکیک دقیق زون‌های همگن از نظر شدت فعالیت تکنونیک را فراهم کرد و نشان داد که

تلفیق چند شاخص مورفومتریک نسبت به اتکا بر یک شاخص منفرد، تصویر واقع‌بینانه‌تری از وضعیت زمین‌ساختی منطقه ارائه می‌دهد. این رویکرد را می‌توان چارچوبی تعمیم‌پذیر برای بقیه حوضه‌های واقع در پهنه‌های کوهزایی فعال دانست. از منظر کاربردی، شناسایی زیرحوضه‌های پرفعالیت می‌تواند در مدیریت کاربری اراضی، کاهش مخاطرات ژئومورفولوژیکی، برنامه‌ریزی زیرساختی و ارزیابی ریسک لرزه‌ای منطقه استفاده شود. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، تحلیل شاخص‌های مورفوتکتونیک با داده‌های لرزه‌نگاری، سن‌سنجی رسوبات کواترنری و تحلیل نیمرخ طولی رودخانه تلفیق شود تا برآورد دقیق‌تری از نرخ بالآمدگی و میزان لغزش گسل‌ها حاصل شود.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در اجرا و انتشار این پژوهش علمی رعایت کرده‌اند و این موضوع مورد تأیید ایشان است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در تمامی مراحل نگارش، تجزیه و تحلیل و پژوهش‌های مدل‌سازی و میدانی مشارکت داشته‌اند.

حمایت مالی

این پژوهش حامی مالی ندارد.

تضاد منافع

بنا بر اظهار نویسندگان، این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی ندارد.

همانندجویی

نتیجه همانندجویی مقاله از ایرانداک ۱۲ درصد است.

منابع

- [۱] اسماعیلی، رضا؛ متولی، صدرالدین؛ و حسین زاده، محمدمهدی (۱۳۹۶). بررسی اثرات مورفوتکتونیک در نیمرخ طولی رودخانه واز؛ البرز شمالی، استان مازندران. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱(۳)، ۱۰۱-۱۱۴.
- [۲] توکلی، ابراهیم؛ مقیمی، ابراهیم؛ یمانی، مجتبی؛ و رضایی مقدم، محمدحسین (۱۳۹۹). بررسی زمین‌ساخت فعال با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی در البرز غربی و مرکزی. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۹(۱)، ۱۴۹-۱۷۱.
- [۳] قهرمانی، شهاب؛ و ثروتی، محمدرضا (۲۰۰۸). مطالعه ژئومورفولوژی و فرسایش در حوضه آبریز الموت رود. *فصلنامه جغرافیایی سرزمین*، ۱۷(۵)، ۴۵-۶۲.
- [۴] گورابی، ابوالقاسم؛ یمانی، مجتبی؛ محمدخان، شیرین؛ و حسینی، سیدجواد (۱۴۰۲). ارزیابی اثرات زمین‌ساخت گسلی بر ژئومورفولوژی حوضه زنجان رود با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی و ژئومورفومتری. *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۵۵(۲)، ۱-۲۵.
- [۵] مجیدزاده، رضا؛ حسین‌زاده، محمدمهدی؛ و اسماعیلی، رضا (۱۳۹۰). ارزیابی کمی مورفوتکتونیک فعال در حوضه‌های البرز شمالی حفاصل شهرهای بهشهر تا نکا، سی‌امین گردهمایی علوم زمین، تهران.
- [۶] یمانی، مجتبی؛ اهدائی، افسانه؛ و ریاهی، سمانه (۲۰۱۴). ارزیابی پتانسیل‌های ژئومورفوتوریسمی دره الموت. *ژئومورفولوژی کاربردی ایران*، ۲(۳)، ۱-۱۳.
- [7] Bahrami, S., (2013). Analyzing the drainage system anomaly of Zagros basins: implications for active tectonics. *Tectonophysics*, 608, 914–928.
- [8] Bahrami, S., & Stokes, M. (2023). Analyzing drainage basin orientation and its relationship to active fold growth (Handun anticline, Zagros, Iran). *Geomorphology*, 426, 108605.
- [9] Bahrami, S., Ehteshami-Moinabadi, M., & Soury Tuyserkani, M. (2024). Quantitative evaluation of morphometric parameters of drainage system in the forelimb and backlimb of the Asmari Anticline, Zagros, Iran. *Journal of Structural Geology*, 184, 105151.
- [10] Cox, R. T. (1994). Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi Embayment. *Geological society of america bulletin*, 106(5), 571-581.
- [11] Devi, R.K.M., Bhakuni, S.S., Bora, P.K., 2011. Tectonic implication of drainage set-up in the Sub-Himalaya: a case study of Papumpare district, Arunachal Himalaya, India. *Geomorphology*, 127, 14–31.
- [12] El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernández, T., Chacón, J., & Keller, E. A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1-2), 150-173.
- [13] Esmaili, R., Motavalli, S., & Hosseinzadeh, M.M. (2018). Investigation of morphotectonic effects on the longitudinal profile of Vaz River, Northern Alborz, Mazandaran Province [Barresi-ye asar-e morphotectonic dar nimrox-e tooli-ye rudkhaneh-ye Vaz; Alborz-e Shomali, Ostan-e Mazandaran]. *Quantitative Geomorphological Research*, 1(3), 101-114. (in Persian)
- [14] Fatemi Aghda, S. M., Kianimehr, H., & Teshnehdel, S. (2019). Active tectonics and fault rupture analysis in western Alborz, Iran: Evidence for left-lateral strike-slip displacements along the Rudbar, Manjil, and Kelishom faults. *Journal of Asian Earth Sciences*, 181, 103891.
- [15] Faghih, A., & Nourbakhsh, A. (2015). Appraisal of relative tectonic activity along the Kazerun Fault Zone, Zagros Mountains, Iran: insight from spatial analysis of geomorphic indices. *Geological Journal*, 50(6), 783-798.
- [16] Ghahremani, S., & Servati, M.R. (2008). Geomorphological and erosion study in the Alamut River drainage basin [Motale'e-ye zh'oomorfolozhi va frsaysh dar howzeh-ye abriz-e Alamut Rud]. *Geographical Territory*, 17(5), 45-62. (in Persian)
- [17] Gorabi, A., Yamani, M., Mohammadkhan, S., & Hosseini, S.J. (2023). Assessing the effects of fault tectonics on the geomorphology of the Zanjanrud Basin using remote sensing and geomorphometric techniques [Arzyabi-ye asar-e zamin-sakht-e gosali bar zh'oomorfolozhi-ye howzeh-ye Zanjanrud ba estefadeh az teknik-haye dursanji va zh'oomorfometri]. *Physical Geography Research*, 55(2), 1-25. (in Persian)
- [18] Hollingsworth, J., Nazari, H., Ritz, J. F., Salamati, R., Talebian, M., Bahroudi, A., ... & Jackson, J. (2010). Active tectonics of the east Alborz mountains, NE Iran: Rupture of the left-lateral Astaneh fault system during the great 856 AD Qumis earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B12).
- [19] Moghimi, Ebrahim. (2009). Comparative Study of changing Drainage Basins System with Tectonic Forms, Case Study: Lut Block, Iran, *American Journal of Applied Science*, 6(6), 1270-1276.
- [20] Majidzadeh, R., Hosseinzadeh, M.M., & Esmaili, R. (2011). Quantitative assessment of active morphotectonics in the basins of Northern Alborz between Behshahr and Neka cities [Arzyabi-ye kami-ye

- morphotectonic-e fa'al dar howzeh-haye Alborz-e Shomali hadd-e fasele shahr-haye Behshahr ta Neka]. *Proceedings of the 30th Geology Congress*, Tehran, Iran. (in Persian)
- [21] Özkaymak, Ç., & Sözbilir, H. (2012). Tectonic geomorphology of the Spildağı high ranges, western Anatolia. *Geomorphology*, 173, 128-140.
- [22] Ritz, J. F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S., & Vernant, P. (2006). Active transtension inside central Alborz: A new insight into northern Iran–southern Caspian geodynamics. *Geology*, 34 (6), 477–480.
- [23] Rockwell, T. K., Keller, E. A., & Johnson, D. L. (1985, September). Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain fronts near Ventura, California. In *Tectonic Geomorphology. Proceedings of the 15th Annual Geomorphology Symposium*. Allen and Unwin Publishers, Boston, MA (183-207).
- [24] Rozycka, M., & Migon, P. (2021). *Morphometric properties of river basins as indicators of relative tectonic activity-problems of data handling and interpretation*.
- [25] Silva, P. G., Goy, J. L., Zazo, C., & Bardaji, T. (2003). Fault-generated mountain fronts in southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity. *Geomorphology*, 50(1-3), 203-225.
- [26] Talling, P.J., Sowter, M.J., 1999. Drainage density on progressively tilted surfaces with different gradients, Wheeler Ridge, California. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 809–824.
- [27] Tavakoli, A., Moghimi, E., Yamani, M., & Rezaei Moghaddam, M.H. (2020). Active tectonic assessment using geomorphological indices in the Western and Central Alborz [Barresi-ye zamin-sakht-e fa'al ba estefadeh az shakhes-haye zh'oormorfolozhi dar Alborz-e gharbi va markazi]. *Quantitative Geomorphological Research*, 9(1), 149-171. (in Persian)
- [28] Valdiya, K. S., & Narayana, A. C. (2007). River response to neotectonic activity: Example from Kerala, India. *Journal of the Geological Society of India*, 70(3), 427-443.
- [29] Woolderink, H. A., Weisscher, S. A., Kleinans, M. G., Kasse, C., & van Balen, R. T. (2022). Modelling the effects of normal faulting on alluvial river meandering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(5), 1252-1270.
- [30] Yamani, M., Ahdaei, A., & Riahi, S. (2014). Assessment of geomorphotourism potentials of Alamut Valley [Arzyabi-ye potansial-haye zh'oormorfotourismi-ye darreh-ye Alamut]. *Applied Geomorphology of Iran*, 2(3), 1-13. (in Persian)
- [31] Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi, M. R., & Sabouri, J. (2006). Inversion tectonics in central Alborz, Iran. *Journal of Structural Geology*, 28(11), 2023–2037.
- [32] Zovoili, E., Konstantinidi, E., & Koukouvelas, I. K. (2004). Tectonic geomorphology of escarpments: The cases of kompotades and vea anchialos faults. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36(4), 1716-1725.
- [33] Zuchiewicz, W., 1998. Quaternary tectonics of the Outer West Carpathians, Poland. *Tectonophysics*, 297, 121–132.