

Assessment of Neotectonic Activity in the Zanjan-Rud Basin Using Fibonacci Golden Ratios

Gholam Hassan Jafari^{1*} 

^{1. Corresponding Author}, Associate Professor, Department of Geography, University of Yasouj, Yasouj, Iran

Email: jafarihas@yu.ac.ir

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8901-6855>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 24 September 2025 Revised: 02 December 2025 Accepted: 25 December 2025 Published: 22 December 2026 Keywords: Morphotectonics, Fibonacci ratios, Slope analysis, Sultaneih Fault, Zanjan-Rud Basin.	The Zanjan-Rud Basin, located in northwestern Iran, is a tectonically active region influenced by major faults such as the Sultaneih and Northern Zanjan faults. This study aimed to evaluate the morphotectonic status of the basin using digital elevation model (DEM) data and the application of Fibonacci golden ratios (0.236, 0.382, 0.5, 0.618, 0.764, and 1) for slope classification. The results revealed that over 84.6% of the basin lies within a slope range of 7–23%, indicating generally weak to moderate tectonic activity. However, areas with slopes exceeding 76% (Fibonacci ratio 0.764) and above 76% (ratio 1) were identified along structural lineaments, particularly near the Sultaneih and Northern Zanjan faults. These zones exhibit steep topography, deep valleys, and abrupt changes in drainage patterns, suggesting potential neotectonic influence. Lithological resistance was also found to play a significant role in shaping high-slope features, especially in areas dominated by andesitic and metamorphic rocks. Comparative analysis with previous studies indicates that while some geomorphic features may be attributed to erosional processes and base-level adjustments during the Quaternary, others reflect recent tectonic activity. The use of Fibonacci ratios proved effective in identifying critical thresholds in topographic variation, offering a novel quantitative approach for neotectonic assessments in similar geological settings.
How to Cite: Jafari, G. H. (2026). Assessment of Neotectonic Activity in the Zanjan-Rud Basin Using Fibonacci Golden Ratios. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (50), 91-110.	
	© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2025.53330.2139	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Drainage basins serve as key natural units in geomorphological, hydrological, and tectonic studies, preserving records of dynamic tectonic processes through topographic formation, drainage network patterns, lithological distribution, and erosional evolution. These units are influenced by a range of factors, including structural features, neotectonic activity, erosion, and sedimentation, with the interaction of these elements shaping distinct morphological patterns. Therefore, integrated approaches to studying such basins can provide deep insights into regional tectonic conditions.

The Zanjan-Rud Basin, located in northwestern Iran, holds a strategically significant tectonic position at the junction of the Central Iranian structural block and the Alborz-Zagros zone. Throughout various geological periods, this region has been shaped by extensive tectonic processes that have led to the formation of structures such as the Zanjan-Abhar graben, compressional faults, and uplifted blocks (horsts) in both the northern and southern highlands. The presence of major faults, particularly the Northern Zanjan Fault and the Sultaneih Fault, plays a crucial role in defining the basin's topographic and structural characteristics.

In recent years, there has been a growing interest in using morphotectonic indices to identify areas affected by recent tectonic activity. Commonly used indices include the stream length gradient index (SL), the valley floor width-to-height ratio (VF), the asymmetry factor (AF), and the topographic position index (TPI) — all of which provide quantitative tools for assessing tectonic influence. However, more recently, mathematical and geometric patterns found in nature — such as the Fibonacci golden ratios (0.236, 0.382, 0.5, 0.618, and 0.764) — have also gained attention in morphotectonic research. These ratios, derived from natural patterns observed in plant structures, animal forms, and even cosmic geometries, are increasingly being applied in geomorphological studies as powerful tools for identifying critical thresholds and abrupt changes in topography.

DATA AND METHODOLOGY

This study aims to assess the morphotectonic status of the Zanjan-Rud Basin in northwestern Iran and to identify zones potentially affected by neotectonic activity based on natural mathematical patterns — specifically, the Fibonacci golden ratios. Employing an integrative approach, the research utilizes spatial, lithological, structural, and topographic data within a morphotectonic analytical framework.

Data collection and preprocessing, including the use of Digital Elevation Models (DEM), lithological maps, land-use maps, and structural/fault maps.

1. Slope layer extraction from the DEM.
2. Classification of slope values according to the Fibonacci golden ratios.
3. Morphotectonic interpretation of high-slope zones.
4. Spatial and structural analysis of selected sub-basins to identify factors influencing neotectonic development.

All datasets were integrated and aligned within a Geographic Information System (GIS) environment. Structural and fault maps were updated based on the latest field and geophysical studies. Slope layers were extracted from the DEM and classified according to the Fibonacci ratios (0.236, 0.382, 0.5, 0.618, 0.764, and 1). Areas with slopes exceeding 0.764 and 1 were identified and further analyzed in relation to structural positioning, lithology, and morphological evidence. Sub-basins such as Arpachay, Sarmsaghlu, Armaghan-Khaneh, and Sohrin were selected as representative samples exhibiting prominent slope anomalies and unique morphotectonic conditions.

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of the slope layer revealed that over 84.6% of the basin falls within the 7–23° slope range, indicating generally weak to moderate tectonic conditions. However, areas with slopes exceeding 76°

(Fibonacci threshold of 0.764) and beyond 76° (threshold of 1) were of particular significance. These regions are predominantly located in mountainous parts of the basin and exhibit intense erosion, sinuous river systems, and abrupt topographic transitions.

These zones are largely aligned with the Sultaneih Fault and the Northern Zanzan Fault, where steep slopes, deep valleys, waterfalls, and sudden shifts in drainage networks suggest recent tectonic activity. Nevertheless, some of these features may also be attributed to Quaternary erosional processes and base-level adjustments. Such as andesites of the Karaj Formation and metamorphic-granitic rocks tend to preserve steeper gradients, thereby amplifying tectonic signatures in these areas (Tab. 1).

Table 1: Descriptive Statistical Parameters of the Main Basin, Sub-basins, and Landform Types

Parameter	Zanzanrou d	Armaghan Khaneh	Sohrin	Sarmashag lu	Arpachay	Mountaino us Areas	Alluvial Fans	Marl Areas	Grasslands
Mean	0.148	0.373	0.329	0.212	0.214	0.276	0.083	0.077	0.068
Standard Deviation	0.025	0.292	0.122	0.178	0.193	0.199	0.055	0.059	0.048
Median	0.088	0.247	0.128	0.154	0.177	0.219	0.071	0.061	0.057
Range of Variation	1.075	0.888	0.623	0.722	0.641	1.075	0.294	0.436	0.238

The application of Fibonacci golden ratios enabled the identification of critical thresholds in topographic variation. This method demonstrated higher accuracy in delineating active tectonic zones compared to traditional morphometric techniques, offering a novel perspective in neotectonic assessment.

CONCLUSION

Due to its unique tectonic setting at the intersection of the Central Iranian structural block and the Alborz-Zagros belt, the Zanzan-Rud Basin has experienced extensive tectonic transformations throughout its geological history. The presence of major faults such as the Northern Zanzan Fault and the Sultaneih Fault, combined with lithological diversity and complex topography, positions the area as a focal point for morphotectonic investigations.

Using Fibonacci golden ratios, this study analyzed the slope distribution pattern across the Zanzan-Rud Basin. Results indicate that more than 84.6% of the basin lies within the 7–23° slope range, reflecting generally weak to moderate tectonic conditions. However, areas with slopes exceeding 0.764 and 1 (>76°) were identified as potential zones of neotectonic influence.

These zones are primarily located along the Sultaneih and Northern Zanzan Faults. Their pronounced topographic anomalies — including deep valleys, waterfalls, and abrupt drainage changes — are indicative of recent tectonic uplift. Nonetheless, comparisons with prior studies reveal that some of these morphological features may also result from post-glacial erosion and base-level adjustments during the Quaternary period.

Lithology significantly influences slope development. Resistant rock types such as andesite and granitic-gneissic units tend to maintain steeper gradients, thereby enhancing the visibility of tectonic effects. This highlights the importance of incorporating lithological controls in morphotectonic analyses.

The application of Fibonacci golden ratios in this study successfully identified critical thresholds in topographic variation. As a natural mathematical tool, it offers a robust framework for detecting zones of abrupt topographic change and distinguishing between tectonically induced and erosionally driven landforms. The 0.764 ratio, interpreted as a turning point in slope behavior, proved particularly effective in identifying boundaries between tectonic and neotectonic domains.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflicts of interest related to this study.

Ethical Statement: All data were collected and analyzed in accordance with ethical guidelines and with appropriate permissions from relevant authorities.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors sincerely thank all individuals who have contributed to this paper in any capacity.

REFERENCES

References (in Persian)

- Abbasi, M. (2015). Geomorphological monitoring of alluvial deposits of Iranian rivers, case study: Ghezel Ozan Basin, Master's thesis, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Zanjan, p. 141. [In Persian]
- Alai Taleghani, M. (2009). Geomorphology of Iran. Qoms Publishing, p. 404. [In Persian]
- Bakhtiari, F. (2015). Study of geomorphological thresholds (case study: Ghezel Ozan Basin), Master's thesis, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Zanjan, p. 153. [In Persian]
- Eliasi, M., Mohajal, M., & Mesbahi, F. (2008). Paleostress analysis of horizontal Plio-Quaternary deposits in the NW of Zanjan. *Journal of the Earth and Space Physics*, 34(2), 27-42. [20.1001.1.2538371.1387.34.2.3.5](https://doi.org/10.1001.1.2538371.1387.34.2.3.5) [In Persian]
- Jafari, Gh. H. & Bakhtiyari, F. (2016). Analyze of hydro-geoneurons of the Ghezelozan basin. *Geography and Development*, 14(45), 221-242. doi: 10.22111/gdj.2016.2930 [In Persian]
- Jafari, Gh. H., & Rostamkhani, A. (2017). The scrutiny of the geomorphological effects of Armaghankhane and Taham faults. *Geography and Environmental Planning*, 149-173. [In Persian]
- Rostamkhani, A. (2013). *Monitoring the geoclimatic structure of alluvial cones of the Qezel Ozen River*. University of Zanjan. [In Persian]
- Shafeie, A., Ebaadi, N., and Naimi, A. (2008). Investigating the tectonic-sedimentary conditions of the Vir region, southeast of Soltanieh. *Applied Geology and Environment Conference*. 1-13. [In Persian]
- Thobuti, F., Hesami, Kh., Ghods, R., & Asgari, R. (2008). Seismicity and active faulting in Zanjan and adjacent areas. 13th Geophysics Conference of Iran-Tehran-<https://civilica.com/doc/71507>. [In Persian]

References (in English)

- Allen, M., Jackson, J., & Walker, R. (2004). Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23(2). <https://doi.org/10.1029/2003TC001530>
- Babatunde, S., & Abiola, O. (2024). *The Golden Ratio and Fibonacci sequence in Nature*.
- Berberian, F., & Berberian, M. J. (1981). *Tectono-plutonic episodes in Iran. Zagros Hindu Kush Himalaya Geodynamic Evolution*, 3, 5-32. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Doornkamp, J. C. (1986). Geomorphological approaches to the study of neotectonics. *Journal of the Geological Society*, 143(2), 335-342. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.143.2.0335>
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, 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.
- Ghosh, S., & Sivakumar, R. (2018). Assessment of morphometric parameters for the development of the Relative Active Tectonic Index and its significance for seismic hazard study: an integrated geoinformatic approach. *Environmental Earth Sciences*, 77(17), 600.
- Gopinath, G., Nalukudiparambil, J., Bhadrar, A., Girishbai, D., & Pillai, S. U. (2022). Geomorphological analysis of tropical river basins in southern Kerala using hypsometric indices and neotectonic proxies. *Journal of Earth System Science*, 131(4), 246.
- Gutiérrez, A. A. (2023). *Morphotectonic Processes in Seismic Zones of Moderate Intensity*, Argentina.
- Hancock, P. L., & Williams, G. D. (1986). Neotectonics. *Journal of the Geological Society*, 143(2), 325-326. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.143.2.0323>
- Kalman, D., & Mena, R. (2003). The Fibonacci numbers—exposed. *Mathematics magazine* 76(3), 167-181. <https://doi.org/10.1080/0025570X.2003.11953176>
- Kirby, E., & Whipple, K. X. (2012). Expression of active tectonics in erosional landscapes. *Journal of Structural Geology*, 44, 54-75.
- Kothyari, G. C., & Rastogi, B. K. (2013). Tectonic control on drainage network evolution in the Upper Narmada Valley: implications to neotectonics. *Geography Journal*, 2013(1), 325808.
- Mahala, A. (2020). The significance of morphometric analysis to understand the hydrological and morphological characteristics in two different morpho-climatic settings. *Applied Water Science*, 10(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1118-2>

- Miccadei, E., Carabella, C., & Paglia, G. (2021). Morphoneotectonics of the Abruzzo Periadriatic area (central Italy): Morphometric analysis and morphological evidence of tectonic features. *Geosciences*, 11(9), 397. <https://doi.org/10.3390/geosciences11090397>
- Peitgen, H. O., Jürgens, H., Saupe, D., & Feigenbaum, M. J. (2004). *Chaos and fractals: new frontiers of science* (Vol. 106, pp. 560-604). New York: Springer.
- Różycka, M., Jancewicz, K., Migoń, P., & Szymanowski, M. (2021). Tectonic versus rock-controlled mountain fronts–Geomorphometric and geostatistical approach (Sowie Mts., Central Europe). *Geomorphology*, 373, 107485.
- Sharma, V. (2009). Deterministic chaos and fractal complexity in the dynamics of cardiovascular behavior: perspectives on a new frontier. *The Open Cardiovascular Medicine Journal*, 3, 110. <https://doi.org/10.2174/1874192400903010110>
- Solaimani Azad, S., Dominguez, S., Philip, H., Hessami, K., Forutan, M. R., Zadeh, M. S., & Ritz, J. F. (2011). The Zandjan fault system: Morphological and tectonic evidence of a new active fault network in the NW of Iran. *Tectonophysics*, 506(1–4), 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.04.012>
- Turcotte, D. L. (1997). *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press.
- Zali, Z., & Yazdanfar, A. (2020). *Evaluation of Active Tectonics of the Sohrein Fault Zone Using Morphometry and Geomagnetic Survey*. *Evaluation of Active Tectonics of the Sohrein Fault Zone Using Morphometry and Geomagnetic Survey*. May 2015, 0–8.
- Zali, Z., Shabaniyan, E., Sobouti, F., & Yazdanfar, A. (2015). *Evaluation of Active Tectonics of the Sohrein Fault Zone Using Morphometry and Geomagnetic Survey*. 7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran. <https://civilica.com/doc/1132552>.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۵

ارزیابی وضعیت مورفوتکتونیک حوضه زنجانرود با استفاده از نسبت‌های طلایی فیوناچی

غلام حسن جعفری 

۱. دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: jafarihas@yu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8901-6855>

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: مورفوتکتونیک، نسبت‌های فیوناچی، شیب، گسل سلطانیه، حوضه زنجانرود.	حوضه زنجانرود در شمال باختری ایران دارای موقعیت زمین‌ساختی پویایی است که تحت تأثیر فعالیت‌های نئوتکتونیک قرار گرفته است. این مطالعه با هدف ارزیابی وضعیت مورفوتکتونیک این حوضه با استفاده از نسبت‌های طلایی فیوناچی و تحلیل کمی زیرحوضه‌ها و انواع اراضی انجام شد. ابتدا لایه شیب از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استخراج شد و سپس مقادیر شیب بر اساس نسبت‌های فیوناچی شامل ۰/۲۳۶، ۰/۳۸۲، ۰/۶۱۸، ۰/۷۶۴ و ۱ طبقه‌بندی گردید. نتایج نشان داد که بیش از ۸۴/۶٪ از سطح حوضه در محدوده شیب ۷ تا ۲۳٪ قرار دارد که بیانگر شرایط عمومی مورفوتکتونیک ضعیف تا متوسط است. باینحال، مناطقی با شیب‌های بالای ۰/۷۶۴ (۷۶٪)، بیشتر در امتداد گسل سلطانیه و گسل شمالی زنجان مشاهده شدند که می‌توانند نشانه‌هایی از فعالیت‌های نئوتکتونیک شدید باشند. تحلیل آمار توصیفی زیرحوضه‌های منتخب (آرپاچای، سارمساقلو، ارمغانخانه و سهرین) نشان داد که این مناطق از الگوهای مورفوتکتونیک مستقل یا شبه‌مستقلی نسبت به حوضه اصلی برخوردارند. زیرحوضه‌های ارمغانخانه و سهرین با داشتن میانگین بالاتر و انحراف معیارهای متفاوت، نشان‌دهنده فعالیت‌های شدیدتر و تفاوت‌های داخلی در الگوی تکتونیک خود هستند. در مقابل، زیرحوضه‌های سارمساقلو و آرپاچای با وضعیت ضعیف تا متوسط، شباهت بیشتری به حالت عمومی حوضه دارند. همچنین، تحلیل انواع اراضی نشان داد که کوهستان‌ها بیشترین واکنش را به فعالیت‌های نئوتکتونیک نشان می‌دهند، درحالی‌که لندفرم‌های مخروط-افکنه‌ای، مارنی و چمنی با مقادیر کمتر، ثبات توپوگرافیکی بیشتری دارند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از نسبت‌های طلایی فیوناچی به همراه تحلیل آماری زیرحوضه‌ها و انواع اراضی می‌تواند به عنوان یک ابزار کمی مؤثر در شناسایی مناطق تحت تأثیر نئوتکتونیک عمل کند و الگویی علمی برای مطالعات مشابه در مناطق دیگر باشد.

استناد: جعفری، غلام حسن. (۱۴۰۵). ارزیابی وضعیت مورفوتکتونیک حوضه زنجانرود با استفاده از نسبت‌های طلایی فیوناچی. مخاطرات

محیط طبیعی، ۱۵ (۵۰)، ۹۱-۱۱۰.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.53330.2139



مقدمه

حوضه‌های آبریز به‌عنوان واحدهای طبیعی کلیدی در مطالعات ژئومورفولوژی، هیدرولوژی و تکتونیک، سوابق پویایی‌های زمین‌ساختی را در قالب شکل‌گیری توپوگرافی، الگوهای شبکه زهکشی، توزیع لیتولوژی و تحولات فرسایشی حفظ کرده‌اند (کربای و ویپل^۱، ۲۰۱۲؛ ال همدونی و همکاران^۲، ۲۰۰۸). این واحدها تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله ساختارهای زمین‌ساختی، نفوختکتونیک، فرسایش و رسوبگذاری قرار دارند که برهمکنش این عوامل منجر به شکل‌گیری الگوهای مورفولوژیک خاصی می‌شود (کوتیاری و راستگوی^۳، ۲۰۱۳). بنابراین، مطالعه این حوضه‌ها از طریق رویکردهای تلفیقی می‌تواند بینش عمیقی از وضعیت تکتونیکی منطقه ارائه دهد.

در سال‌های اخیر، استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیکی به منظور تشخیص مناطق تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی اخیر، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این شاخص‌ها شامل شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL)، شاخص عرض دره به ارتفاع (VF)، شاخص عدم تقارن حوضه (AF)، شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (TPI)، شاخص گرادیان طولی رودخانه (Smf) و سایر شاخص‌های کمی مرتبط هستند (روزیکا و همکاران^۴، ۲۰۲۱؛ قوش و سیواکومار^۵، ۲۰۱۸) (جدول ۱). با این حال، این شاخص‌ها اغلب وابسته به موقعیت مکانی، شبکه زهکشی، اقلیم، نوع سنگ و توپوگرافی محلی هستند و ممکن است در مناطقی با پوشش ناهمگون یا شبکه زهکشی پیچیده، دقت کمتری داشته باشند.

جدول ۱: شاخص‌های مورفوتکتونیک و کاربرد آن‌ها

شاخص	نام کامل	هدف و کاربرد
Smf	شاخص گرادیان طولی رودخانه	شناسایی ناهمواری‌های طولی رودخانه و ارزیابی بالآمدگی تکتونیکی
VF	نسبت عرض دره به ارتفاع	اندازه‌گیری شکل دره، مقادیر پایین نشانه فرسایش عمودی و فعالیت تکتونیکی
SL	گرادیان طولی رودخانه	شناسایی نقاط شکست در راستای رودخانه ناشی از بالآمدگی تکتونیکی
AF	عدم تقارن حوضه زهکشی	تشخیص کج‌شدگی جانبی حوضه ناشی از حرکات تکتونیکی نامتقارن
TPI	شاخص تقارن توپوگرافی عرضی	ارزیابی تقارن حوضه؛ عدم تقارن نشانه تغییر شکل نفوختکتونیکی

در مقابل، نسبت‌های طولی فیبوناچی که از الگوهای ریاضی موجود در ساختارهای طبیعی (مانند گیاهان، صدف‌ها و کهکشان‌ها) گرفته شده‌اند، به‌عنوان ابزاری کمی، بی‌طرفانه و قابل‌تعمیم در تحلیل‌های مورفوتکتونیکی مطرح شده‌اند (باباتوند و آبیولا^۶، ۲۰۲۴). این نسبت‌ها قادرند نقاط بحرانی در تغییرات توپوگرافی را شناسایی کنند بدون آنکه تحت تأثیر مستقیم فاکتورهای محلی مانند جهت زهکشی یا نوع سنگ قرار گیرند.

به همین دلیل، در این مطالعه از نسبت‌های فیبوناچی به‌عنوان یک چارچوب تحلیلی جهانی استفاده شده است که می‌تواند هرجا و هر زمان در حوضه‌های آبریز مختلف، بدون وابستگی به موقعیت مکانی خاص به کار گرفته شود. این رویکرد، ضمن افزایش دقت تشخیص مناطق فعال تکتونیکی، امکان مقایسه بین مناطق مختلف را فراهم می‌کند و به‌عنوان یک ابزار نوین و قابل‌تعمیم در مطالعات مورفوتکتونیک عمل می‌کند.

¹ Kirby, & Whipple

² El Hamdouni et al.,

³ Kothyari & Rastogi

⁴ Różycka et al.,

⁵ Ghosh & Sivakumar

⁶ Babatunde & Abiola

عباسی (۱۳۹۴)، بختیاری (۱۳۹۵) و رستم‌خانی (۱۳۹۳) تغییرات سطح اساس دوره کواترنری قزل اوزن را مسئول اصلی تسلط فرسایش خطی و قهقریایی در دشت‌های اطراف زنجانرود و ایجاد لندفرم‌های مورفوتکتونیک منطقه دانستند. یافته‌های سلیمانی آزاد و همکاران (۲۰۱۱) و زالی و یزدانفر (۲۰۲۰)، نقش پایین افتادن سطح اساس و فرسایش قهقریایی را در ایجاد بسیاری از عوارض مورفولوژیکی این منطقه تایید کردند. زالی و یزدانفر (۲۰۲۰)، با استفاده از شاخص‌های SL و VF به این نتیجه رسیدند که تغییرات منظمی ناشی از فعالیت‌های تکتونیک در طول گسل سهرین دیده نمی‌شود و لبه‌ها و پرتگاه‌های مشاهده‌شده، اثر فرسایش در پادگانه‌های آبرفتی هستند. در مقابل، شیب‌های تند، دره‌های عمیق، آبشارهای بلند و تغییرات ناگهانی در شبکه زهکشی در ارتفاعات شمالی زنجان، نشانه‌هایی از فعالیت‌های تکتونیک اخیر هستند. این منطقه به‌عنوان یک هورست بین گسل شمالی زنجان و گسل قزل‌اوزن قرار دارد و شواهد متعددی از فعالیت تکتونیک شدید در آن وجود دارد (جعفری و رستم‌خانی، ۱۳۹۳). میانگین شاخص فعالیت تکتونیک نسبی (IAT) برای حوضه‌های منتخب ارتفاعات شمالی زنجان، برابر با ۱/۸ محاسبه شده است که نشان‌دهنده وضعیت تکتونیک زیاد این منطقه است.

باین‌حال، استفاده از الگوهای ریاضی و هندسی طبیعی مانند نسبت‌های طلایی فیبوناچی که در مطالعات مورفوتکتونیک در سال‌های اخیر مطرح شده‌اند (گوپیناث و همکاران^۱، ۲۰۲۲)، در این منطقه و حتی در ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این مقاله به بررسی این روش نوین در حوضه زنجانرود می‌پردازد.

نسبت‌های فیبوناچی (۰/۲۳۶، ۰/۳۸۲، ۰/۶۱۸، ۰/۷۶۴) که از الگوهای طبیعی موجود در ساختارهای گیاهی، حیوانی و حتی سازه‌های کیهانی گرفته شده‌اند (باباتوند و آبیولا، ۲۰۲۴)، امروزه در زمینه‌های مختلف علمی از جمله ژئومورفولوژی و برنامه‌ریزی سرزمینی به‌عنوان ابزاری تشخیصی و تحلیلی شناخته شده‌اند. این نسبت‌ها به‌ویژه در شناسایی الگوهای طبیعی و ارزیابی تأثیرات محیطی عملکرد دارند (کالمن و منا^۲، ۲۰۰۳؛ شارما^۳، ۲۰۰۳). پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که نسبت‌های فیبوناچی می‌توانند به تحلیل پیچیدگی‌های طبیعی کمک کنند و همچنین در ارائه راه کارهای مؤثر برای مدیریت و برنامه‌ریزی سرزمینی مؤثر باشند.

مورفوکلیماتیک شاخه‌ای از ژئومورفولوژی است که به بررسی نقش اقلیم در شکل‌گیری، تحول و توزیع زمین‌فرم‌ها می‌پردازد. این مفهوم تأکید دارد که چگونه عوامل مختلف اقلیمی مانند دما، بارش و باد بر توسعه و تغییر زمین تأثیر می‌گذارند (میکادی و همکاران^۴، ۲۰۲۱). فرآیندهای مورفوکلیمایی برای درک تکامل شکل زمین جدایی‌ناپذیر هستند و به دسته‌بندی مناطق مورفوکلیمایی کمک می‌کنند (گوتیریز^۵، ۲۰۲۳؛ ماهالا^۶، ۲۰۲۰).

نئوتکتونیک به مطالعه فرآیندهای تکتونیک از دوره پلیستوسن به بعد اشاره دارد و مورفوتکتونیک به بررسی شکل‌گیری و تغییرات سطح زمین بر اساس فرآیندهای تکتونیک می‌پردازد (هانکوک و ویلیامز^۷، ۱۹۸۶؛ دورنکامپ^۸، ۱۹۸۶).

¹ Gopinath et al.,

² Kalman & Mena

³ Sharma

⁴ Miccadei et al.,

⁵ Gutiérrez

⁶ Mahala

⁷ Hancock & Williams

⁸ Doornkamp

حوضه زنجانرود با وجود موقعیت زمین‌ساختی حساس در برخورد بلوک ایران مرکزی و پهنه البرز - طالش، فاقد یک روش سیستماتیک و قابل تعمیم برای شناسایی مناطق فعال تکتونیکی است. روش‌های متداول مانند شاخص‌های SL، VF و AF اغلب وابسته به شبکه زهکشی و لیتولوژی هستند و در مناطق بدون زهکشی منظم یا با پوشش ناهمگون، دقت کمتری دارند. بنابراین، ضرورت توسعه یک چارچوب کمی، بی‌طرف و قابل تعمیم، مانند استفاده از نسبت‌های تلای فیبوناچی، برای شناسایی عوارض نئوتکتونیکی امری ضروری است. وجود گسل‌های بزرگی چون گسل شمالی زنجان و گسل سلطانیه، نقش اصلی را در تعیین الگوی توپوگرافی و ساختاری حوضه ایفا کرده‌اند. این گسل‌ها ضمن ایجاد اختلاف ارتفاع قابل توجه، منجر به شکل‌گیری دامنه‌های شدید و دره‌های عمیقی شده‌اند که اغلب نشانه‌هایی از فعالیت‌های نئوتکتونیکی را در خود حفظ کرده‌اند (شافعی و همکاران، ۱۳۸۷).

تفسیر وضعیت مورفوتکتونیکی حوضه زنجانرود در مطالعات پیشین دارای دو رویکرد متضاد بوده است: گروهی از پژوهشگران از جمله عباسی (۱۳۹۵) و رستم‌خانی (۱۳۹۳) بر اساس شاخص‌های مورفوتکتونیکی مانند Smf، VF و SL، فعالیت تکتونیکی شدید را در ارتفاعات شمالی و جنوبی زنجان تأیید کرده‌اند. در مقابل، زالی و یزدانفر (۲۰۲۰) در بررسی گسل فرضی سهرین، با استفاده از شاخص‌های SL و VF و داده‌های ژئوفیزیکی، نتیجه گرفتند که هیچ الگوی منظمی از فعالیت تکتونیکی در طول این ساختار مشاهده نمی‌شود. آن‌ها تغییرات توپوگرافیکی مانند لبه‌ها و پرتگاه‌ها را ناشی از فرسایش قهقرایی در پادگانه‌های آبرفتی و نه فعالیت گسلی دانسته و این ساختار را غیرفعال یا حداقل غیرتکتونیکی ارزیابی کردند.

این تناقض ظاهری، در واقع نشان‌دهنده تفاوت در مقیاس مکانی، واحد سنگی و نوع فرآیند غالب است. در واقع، فعالیت تکتونیکی در مناطق مرتفع و دارای سنگ‌های مقاوم (مانند آندزیت و گرانیت) (مانند زیرحوضه‌های ارمغانخانه و سهرین) به وضوح قابل تشخیص است و با یافته‌های عباسی و رستم‌خانی همخوانی دارد. در مقابل، در دشت‌های آبرفتی و مناطق دارای لیتولوژی نرم، فعالیت‌های فرسایشی قهقرایی، بر اثر تغییر سطح اساس قزل اوزن، توانسته است الگوهایی شبیه به عوارض تکتونیکی ایجاد کند که بدون تحلیل تلفیقی، به اشتباه به فعالیت تکتونیکی نسبت داده می‌شوند. بنابراین، تناقض بین مطالعات قبلی نه در سطح علمی، بلکه در سطح مقیاس و واحد فضایی است. در این پژوهش، با استفاده از تحلیل تفکیک‌شده زیرحوضه‌ها و انواع اراضی، نشان داده شد که فعالیت تکتونیکی در برخی بخش‌ها (به‌ویژه کوهستان) قوی و مستقل است، درحالی‌که در مناطق آبرفتی و مخروط‌افکنه، فرسایش قهقرایی نقش غالب دارد.

این رویکرد تفکیکی، از یک‌سو به تأیید یافته‌های عباسی و رستم‌خانی در مناطق فعال تکتونیکی منجر می‌شود و از سوی دیگر، توجیهی منطقی برای یافته‌های زالی و یزدانفر در مناطق آبرفتی ارائه می‌دهد. در نتیجه، هیچ تناقض اساسی وجود ندارد؛ بلکه تنوع در فرآیند غالب در واحدهای مختلف فضایی است که باید به آن توجه شود.

استفاده از نسبت‌های تلای فیبوناچی به‌عنوان یک چارچوب کمی و قابل تعمیم برای شناسایی نقاط بحرانی توپوگرافیکی، به‌ویژه در مناطق فاقد شبکه زهکشی منظم یا داده‌های ژئوفیزیکی مستقیم، نوآوری اصلی این پژوهش است. این روش، ضمن حفظ سادگی و دسترسی بالا، می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل یا جایگزین در مقایسه با شاخص‌های مورفوتکتونیکی سنتی (SL، VF و AF) به‌کار گرفته شود و به تشخیص مناطق با فعالیت نئوتکتونیکی شدید کمک کند.

در این پژوهش، برای اولین بار، این نسبت‌ها به صورت سیستماتیک و کمی به عنوان یک چارچوب تحلیلی برای طبقه‌بندی شیب و شناسایی نقاط بحرانی توپوگرافیکی تحت تأثیر نئوتکتونیک به کار گرفته شده‌اند. انتخاب این نسبت‌ها می‌تواند به عنوان یک ابزار مکمل در مقایسه با شاخص‌های سنتی (AF، VF، SL) عمل کند. اگرچه استفاده صریح و نظام‌مند از این نسبت‌ها به عنوان شاخصی در مطالعات مورفوتکتونیک تاکنون محدود بوده است؛ اما مفاهیم مرتبط با آن، از جمله فرکتال‌ها و الگوهای هندسی در شبکه زهکشی، در ژئومورفولوژی کاربرد داشته‌اند (تورکوت^۱، ۱۹۹۷؛ پیتگن و همکاران^۲، ۲۰۰۴).

داده‌ها و روش‌ها

روش پژوهش

این پژوهش با هدف ارزیابی وضعیت مورفوتکتونیک حوضه زنجانرود در شمال باختری ایران و شناسایی مناطق تحت تأثیر نئوتکتونیک بر اساس الگوهای طبیعی ریاضی (نسبت‌های تلای فیوناچی) انجام شده است. این مطالعه با رویکردی تلفیقی، داده‌های مکانی، لیتولوژیکی، ساختاری و توپوگرافیکی را در قالب یک چارچوب تحلیلی مورفوتکتونیک مورد استفاده قرار داده است.

روش کار شامل چندین مرحله کلیدی است: جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌های مکانی، استخراج لایه شیب از مدل رقومی ارتفاع (DEM)، طبقه‌بندی شیب بر اساس نسبت‌های تلای فیوناچی، تفسیر مورفوتکتونیک مناطق با شیب بالا و در نهایت تحلیل مکانی و ساختاری این مناطق در راستای شناسایی عوامل مؤثر بر تحولات نئوتکتونیک.

بر این اساس، داده‌های این پژوهش از روش‌های مختلفی جمع‌آوری گردید: الف) مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۳۰ متری از سنجنده (SRTM؛ ب) نقشه لیتولوژی زنجان با مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰ (پ) لایه تیپ اراضی از لایه DEM و نقشه لیتولوژی؛ ت) لایه گسل‌ها و ساختارهای زمین‌ساختی منطقه از منابع موجود (بربریان، ۱۹۷۶؛ سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱؛ شافی و همکاران، ۲۰۰۸؛ زالی و یزدانفر، ۲۰۲۰؛ ث) داده‌های آمار توصیفی شیب حوضه زنجانرود به عنوان حوضه اصلی و زیرحوضه‌های آریاچای، ارمغانخانه، سهرین و سارمساقلو به عنوان زیرحوضه‌های فرعی؛ ج) داده‌های توپوگرافیکی و میدانی از منطقه. تمامی داده‌ها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS تلفیق و تطبیق داده شد. نقشه‌های ساختاری و گسلی نیز با توجه به آخرین مطالعات صحرایی به‌روزرسانی شدند.

نسبت‌های تلای فیوناچی، به عنوان ابزاری برای شناسایی نقاط بحرانی در سیستم‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نسبت‌ها بر اساس دنباله فیوناچی و عدد تلای (۱/۶۱۸) شکل گرفته و نشان‌دهنده تعادل در ساختارهای طبیعی هستند.

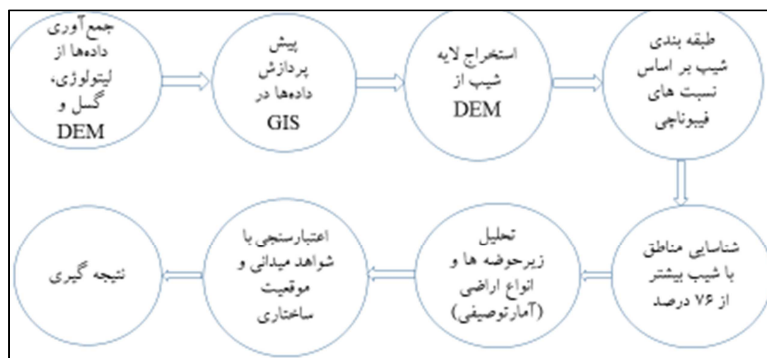
شیب به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مورفوتکتونیک، تحت تأثیر عوامل تکتونیک، لیتولوژی و فرسایش قرار دارد. بنابراین، تحلیل الگوی شیب می‌تواند به شناسایی مناطق فعال تکتونیک کمک کند. لایه شیب به عنوان پایه‌ای برای طبقه‌بندی مورفوتکتونیک منطقه با استفاده از نسبت‌های تلای فیوناچی (به عنوان معیاری برای طبقه‌بندی شیب) به کار گرفته شد. نسبت‌های مورد استفاده شامل: ۰/۲۳۶ (۲۳/۶٪)، ۰/۳۸۲ (۳۸/۲٪)، ۰/۶۱۸ (۶۱/۸٪)، ۰/۷۶۴ (۷۶/۴٪) و ۱ (۱۰۰٪) می‌باشند.

¹ Turcotte

² Peitgen et al.,

در مطالعات ژئومورفولوژی، روش‌های رایج طبقه‌بندی داده‌های شیب شامل روش فواصل مساوی، چارک‌ها و طبقه‌بندی طبیعی جینکس است. در مقابل، استفاده از نسبت‌های طلایی فیبوناچی به‌عنوان معیاری برای طبقه‌بندی شیب، بر اساس الگوهای ریاضی - طبیعی است که در سیستم‌های پیچیده زمینی، به‌صورت خودبه‌خودی ظاهر می‌شوند. این رویکرد قادر است تغییرات غیرخطی و ناگهانی در توپوگرافی را شناسایی کند. نسبت 0.764 (معادل شیب $\sim 76\%$) به‌عنوان یک مرز طبیعی در تغییر وضعیت از تکتونیک به نئوتکتونیک عمل می‌کند که با شواهد میدانی و موقعیت ساختاری همخوانی دارد. همچنین، نسبت $1 (100\%)$ ، به‌عنوان شاخص فعالیت نئوتکتونیک شدید در نظر گرفته شد.

در این راستا: الف) موقعیت چنین شیب‌هایی در ارتباط با گسل‌های شناخته‌شده (گسل سلطانیه، گسل شمالی زنجان و گسل فرضی سهرین) مورد بررسی قرار گرفت؛ ب) نوع سنگ و مقاومت لیتولوژیکی در شکل‌گیری شیب‌های تند بررسی گردید؛ ج) شواهد مورفولوژیکی (مانند دره‌های عمیق، آبشارها، تغییرات شبکه زهکشی و...) بررسی شد؛ د) زیرحوضه‌های آریاچای، سارمساقلو، ارمغانخانه و سهرین به‌عنوان نمونه‌هایی از مناطق با شیب‌های برجسته و شرایط مورفوتکتونیک خاص انتخاب شدند. این مناطق با توجه به موقعیت ساختاری، نوع سنگ و شواهد مورفولوژیکی، مورد تحلیل قرار گرفت و سرانجام داده‌های برآوردشده از تحلیل آمار توصیفی شیب (میانگین، انحراف معیار، میانه و دامنه تغییرات) در زیرحوضه‌ها و انواع مختلف سطوح اراضی تجزیه و تحلیل گردید (شکل ۱).



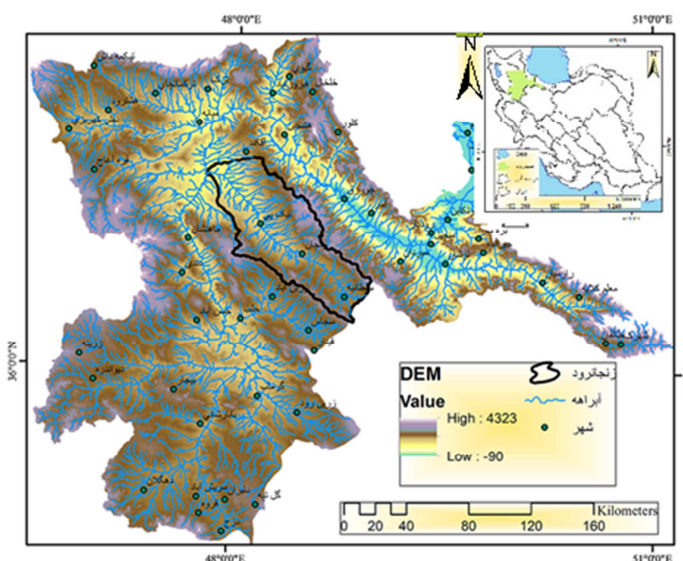
شکل ۱: فلوچارت پژوهش به‌صورت گرافیکی

منطقه مورد مطالعه

فلات ایران مجموعه‌ای از چندین قطعه خرده قاره است که در امتداد مناطق بخیه اقیانوسی به هم متصل شده‌اند (آلن و همکاران، ۲۰۰۴). در تکامل ژئومورفولوژیکی مناظر حوضه زنجانرود، به‌دلیل موقعیت خاص زمین‌شناسی (محل برخورد زون‌های مختلف تکتونیک)، تنوع بسیار زیادی وجود دارد. آب‌وهوای متنوع و اقلیم‌های دیرینه که بر روی لوح‌های تکتونیک، بسترها و نقش برجسته‌های مختلف باقیمانده‌اند، مناظر طبیعی بسیار متنوعی را ایجاد کرده‌اند. ناحیه زنجان شامل یک بلوک پوسته بزرگ است که از سنگ‌های دگرگونی، توده‌های گرانیتی و لایه‌های رسوبی پروتروزیوئیک - کامبرین پسین تا سنوزوئیک شکل گرفته است. سازندهای پیش از ترشیاری کمربند سلطانیه چین خورده و تا حدی رانده شده‌اند، سازندهای ترشیاری فرورفتگی زنجان را در امتداد گسل سلطانیه پر می‌کنند (بربریان و بربریان، ۱۹۸۱؛ سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱). فرورفتگی زنجان در شمال غربی بلوک ساختاری ایران مرکزی قرار دارد و دارای یک روند عمومی شمال باختری - جنوب شرقی است که توسط تکتونیک پس از میوسن کنترل می‌شود (زالی و همکاران، ۲۰۱۵).

حوضه زنجانرود در مختصات جغرافیایی ۳۶/۳ تا ۳۷/۲۵ درجه شمالی و ۴۷/۸ تا ۴۹ درجه شرقی واقع شده است. طول آن نزدیک به ۱۳۰ و عرض حداکثر ۶۰ کیلومتر است (شکل ۲). این حوضه در بین بخشی از ارتفاعات البرز غربی (از رشته کوه‌های تالش جنوبی) و ارتفاعات سلطانیه (از ارتفاعات ایران مرکزی) قرار دارد. حوضه زنجانرود بخشی از حوضه آبریز بزرگ قزل اوزن است (علایی طالقانی، ۱۳۸۸: ۹۶).

فرونش زنگان، حوضه باریک و ممتدی در راستای شمال غرب - جنوب شرق است که پهنه‌های کوهستانی طارم (ارتفاعات شمالی زنگان) و سلطانیه (ارتفاعات جنوبی زنگان) در شمال شرقی و جنوب غربی را از هم جدا می‌کند (الیاسی و همکاران، ۱۳۸۷: ۲۸). ارتفاع کف حوضه زنجانرود از سطح دریا به کمتر از ۱۱۰۰ متر (در دهانه‌ی ورودی به قزل اوزن) و فراز برخی قله‌های پیرامون آن، به بیش از ۲۸۹۰ متر می‌رسد.



شکل ۲: موقعیت جغرافیایی حوضه زنجانرود در ایران و حوضه سفیدرود

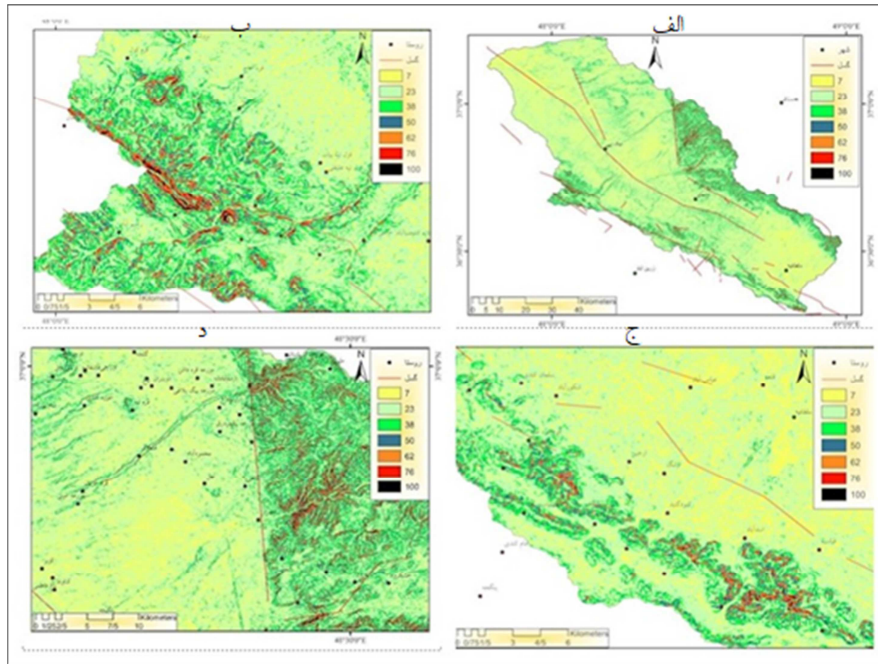
یافته‌های پژوهش

تحلیل شیب حوضه زنجانرود بر اساس لایه DEM و طبقه‌بندی آن بر اساس نسبت‌های طلایی فیبوناچی، نشان داد که ۸۴/۶٪ از سطح حوضه در محدوده شیب ۷ تا ۲۳ درصد، ۱۰/۶٪ در محدوده ۲۳ تا ۳۸ درصد، ۴/۵٪ در محدوده ۳۸ تا ۶۲ درصد، ۰/۳٪ در محدوده ۶۲ تا ۷۶ درصد و ۰/۰۵٪ در محدوده بالاتر از ۷۶ درصد قرار دارد (جدول ۲).

جدول ۲: توزیع شیب حوضه زنجانرود بر اساس نسبت‌های فیبوناچی

ردیف	شیب (٪)	مساحت Km ²	٪ از کل	وضعیت مورفوتکتونیکی
۱	۷-۰	۰/۱۶۵	۰/۰۳۵	بسیار ضعیف (فعالیت تکتونیکی بسیار کم)
۲	۲۳-۷	۳۹۳۰/۵۱۸	۸۴/۶۱	ضعیف (فعالیت تکتونیکی کم)
۳	۳۸-۲۳	۴۹۰/۹۷۵	۱۰/۵۷	متوسط (فعالیت تکتونیکی متوسط)
۴	۶۲-۳۸	۲۰۸/۱۶۴	۴/۴۸	شدید (فعالیت تکتونیکی زیاد)
۵	۷۶-۶۲	۱۳/۴۹۲	۰/۲۹	تکتونیک
۶	<۷۶	۲/۳۳۹	۰/۰۵	نئوتکتونیک
جمع		۴۶۴۵/۶۵	٪۱۰۰	-

مناطق با شیب بیشتر از ۰/۷۶۴ (معادل ۰/۷۶٪) بیشتر در امتداد گسل سلطانیه و گسل شمالی زنجان متمرکز هستند. نسبت ۰/۷۶۴ به عنوان مرز تغییر وضعیت از شرایط تکتونیکی به نئوتکتونیک در نظر گرفته شد. این مناطق با تراکم آبشارها، تنگه‌ها و تندآب‌ها همخوانی دارند (شکل ۳).



شکل ۳: وضعیت شیب با توجه به نسبت‌های فیبوناچی: الف) حوضه زنجانرود با مقیاس: ۱:۱۰۰,۰۰۰، بخشی از ارتفاعات جنوبی زنجانرود با تاکید بر زیرحوضه آریاچای، ج) امتداد گسل سلطانیه در جنوب، د) ارتفاعات و دشت‌های شمالی زنجانرود، بامقیاس: ۱:۵۰,۰۰۰. تمامی نقشه‌ها بر اساس لایه شیب استخراج شده از DEM با دقت ۱۲/۵ متری و طبقه‌بندی شده بر اساس نسبت‌های طلایی فیبوناچی تهیه شده‌اند. مناطق با شیب بالاتر از ۰/۷۶۴ (۰/۶۲-۰/۷۶٪) و (بزرگ‌تر از ۷۶ درصد) به عنوان مناطق مشکوک به فعالیت نئوتکتونیک شناسایی شده‌اند. رنگ زرد (کمتر از ۰/۷٪): فعالیت تکتونیک بسیار کم، سبز کم رنگ (۲۳-۰/۷٪): فعالیت تکتونیک کم، سبز تیره (۳۸-۰/۲۳٪): بافعالیت تکتونیک متوسط، آبی تیره (۵۰-۰/۳۸٪): فعالیت تکتونیک زیاد، نارنجی (۶۲-۰/۵۰٪): با فعالیت تکتونیک زیاد، قرمز (۷۶-۰/۶۲٪): مناطق تکتونیک و مشکوک (۱۰۰-۰/۷۶٪): فعالیت نئوتکتونیک.

نسبت یک (۰/۱۰۰٪) به عنوان شاخص فعالیت نئوتکتونیک شدید در نظر گرفته شد. مناطق با شیب بیشتر از ۰/۷۶٪ در زیرحوضه آریاچای در ارتفاعات جنوبی، در امتداد گسل سلطانیه مشاهده شدند. گسل سلطانیه، گسلی فشاری با راستای شمال باختر - جنوب خاوری است و طول آن بیش از ۱۴۰ کیلومتر است. این گسل در لبه شمالی کوهستان سلطانیه قرار دارد و در بخش‌های شمالی ارتفاعات سلطانیه سطوح ارضی با شیب‌های تند ایجاد کرده است. نوع گسل: وارونه با مؤلفه امتدادلغز جانبی معکوس (سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱). دیواره‌های گسلی در بیشتر طول گسل سلطانیه و در مرز کوه و دشت به وضوح قابل تشخیص است. در محل گسل سلطانیه، یک پهنه خردشدگی با پهنای ۳۹ تا ۴۹ متر وجود دارد که شامل توده گرانیتی دوران و توده‌های کربناتی ضخیم (دولومیت) است. زیرحوضه‌های ارمغانخانه، سهرین و سارمساقلو در امتداد گسل شمالی زنجان قرار دارند. در این منطقه شیب‌های تند بیشتر از ۰/۷۶٪، دره‌های عمیق و آبشارهای متعدد مشاهده شد. مقادیر ارائه شده جدول (۳) به صورت نسبت بدون بعد هستند و واحد فیزیکی ندارند. این شاخص‌ها از طبقه‌بندی لایه شیب به دست آمده‌اند.

جدول ۳: پارامترهای آمار توصیفی شیب در زیرحوضه‌های منتخب زنجانرود و نوع سطوح ارضی در کل زنجانرود

پارامتر	زنجانرود	ارمغانخانه	سهرین	سارمساقلو	آرپاجای	کوهستان	مخروط افکنه	مارن	چمن
میانگین	۰/۱۴۸	۰/۳۷۳	۰/۳۲۹	۰/۲۱۲	۰/۲۱۴	۰/۲۷۶	۰/۰۸۳	۰/۰۷۷	۰/۰۶۸
انحراف معیار	۰/۰۲۵	۰/۲۹۲	۰/۱۲۲	۰/۱۷۸	۰/۱۹۳	۰/۱۹۹	۰/۰۵۵	۰/۰۵۹	۰/۰۴۸
میانه	۰/۰۸۸	۰/۲۴۷	۰/۱۲۸	۰/۱۵۴	۰/۱۷۷	۰/۲۱۹	۰/۰۷۱	۰/۰۶۱	۰/۰۵۷
دامنه تغییرات	۱/۰۷۵	۰/۸۸۸	۰/۶۲۳	۰/۷۲۲	۰/۶۴۱	۱/۰۷۵	۰/۲۹۴	۰/۴۳۶	۰/۲۳۸

بر اساس تحلیل آمار توصیفی شیب (جدول ۳): میانگین شیب در زیرحوضه ارمغانخانه ۰/۳۷۳ (بالاترین مقدار را در بین زیرحوضه‌ها را دارد)، میانگین شیب در زیرحوضه سارمساقلو ۰/۲۱۲ و آرپاجای ۰/۲۱۴ (نزدیک به میانگین کل حوضه است)، بیشترین انحراف معیار شیب در زیرحوضه ارمغانخانه ۰/۲۹۲ مشاهده شد و کمترین انحراف معیار شیب در زیرحوضه سهرین ۰/۱۲۲ ثبت شد. دامنه تغییرات شیب در ارمغانخانه ۰/۸۸۸ و کل حوضه زنجانرود ۱/۰۷۵) بالاست. دامنه تغییرات شیب در سهرین ۰/۶۲۳) پایین‌تر از سایر زیرحوضه‌ها است. میانه شیب در ارمغانخانه ۰/۲۴۷) بالاتر از سایر زیرحوضه‌ها است. میانگین شیب در کوهستان ۰/۲۷۶) بیشتر از سایر تیپ اراضی است. میانگین شیب در مخروط افکنه ۰/۰۸۳)، مارن ۰/۰۷۷) و چمن ۰/۰۶۸) پایین است. انحراف معیار شیب در کوهستان ۰/۱۹۹) و مارن ۰/۰۵۹) به ترتیب بیشتر و کمتر از سایر تیپ‌هاست.

شواهد میدانی نشان می‌دهد که:

- * در زیرحوضه آرپاجای، تنگ و آبشار آرپاجای در امتداد گسل سلطانیه قرار دارد (شکل ۴الف).
- * در زیرحوضه سارمساقلو، خروجی سد تهم دارای دیواره‌های تند و منظم است (شکل ۴ب).
- * ترکیبی از تکتونیک و همجواری رسوبات مقاوم و سست، اشکال بارز نفوتکتونیک را شکل داده است (شکل ۴پ)
- * در زیرحوضه سهرین، ناتعادلی فرمیک در بخش عقب عکس مشاهده می‌شود (شکل ۴ت).
- * آبشار البین در امتداد گسل فرعی شمالی زنجان قرار دارد (شکل ۴ث).
- * جابه‌جایی و کج‌شدگی رسوبات کواترنری در امتداد گسل شمالی زنجان مشاهده شد (شکل ۴ج).
- * مناطقی با شیب بین ۴۰ تا ۶۰ درصد در امتداد گسل شمالی زنجان وجود دارند (شکل ۴چ، ح).



شکل ۴: شواهد میدانی از فعالیت نئوتکتونیک در حوضه زنجارود

(الف) تنگ و آبشار آرپاچای در زیرحوضه آرپاچای، این ساختار خطی با شیب تند و آبشار دائمی نشانه‌ای از بالآمدگی نئوتکتونیک است که منجر به تشکیل پله ارتفاعی و اختلال در رژیم زهکشی شده است. موقعیت این ساختار در امتداد گسل سلطانیه، حاکی از نقش فعالیت تکتونیک در شکل‌گیری آن است.

(ب) خروجی سد تهم در زیرحوضه سارمساقلو، این دره با دیواره‌هایی با شیب تند، نشان‌دهنده تأثیر بالآمدگی تکتونیک است. شکل هندسی منظم و خطی این تنگ، همخوانی بالایی با جهت‌گیری گسل شمالی زنجان دارد و نشانه‌ای از کنترل ساختاری بر توپوگرافی است.

(پ) تنگ و آبشار اندآباد، این لندفرم شامل یک پله ارتفاعی واضح و آبشار است که ناشی از اختلال در پایه فرسایش ناشی از جنبش گسلی است. وجود سنگ‌های مقاوم (آهکی) در این بخش، از تخریب سریع این ساختار جلوگیری کرده و آن را به شاهدی پایدار از فعالیت نئوتکتونیک تبدیل کرده است.

(ت) ناتعادلی فرمیک در زیرحوضه سهرین، عدم تقارن در توپوگرافی، به‌ویژه در بخش عقب عکس، نشان‌دهنده ناتعادلی جانبی ناشی از فرسایش قهقراپی زنجارود بر اثر تغییر سطح اساس فزل‌اوزن است. این الگو، یکی از شاخص‌های کلاسیک فعالیت مورفوکلیماتیک در حوضه‌های آبریز است. (ث) آبشار البین، این آبشار با ارتفاع قابل توجه، بر روی یک سطح شکست نئوتکتونیک تشکیل شده است. موقعیت آن در امتداد گسل فرعی شمالی زنجان و همپوشانی آن با مناطقی با شیب بیشتر از ۷۶ درصد، تأییدی بر منشأ تکتونیک این لندفرم است.

(ج) تأثیر گسل شمالی زنجان بر رسوبات سطحی، این تصویر شواهدی از جابه‌جایی و کج‌شدگی رسوبات کواترنری را نشان می‌دهد که ناشی از حرکت افقی و عمودی گسل شمالی زنجان است. این ساختار، یکی از مهم‌ترین شواهد مستقیم از فعالیت اخیر گسلی در منطقه محسوب می‌شود.

(چ، ح) مناطقی با شیب بین بیش از ۶۰ درصد در امتداد گسل شمالی زنجان، این شیب تند در واحدهای مقاوم (سنگ‌های سازند کرج)، نشان‌دهنده فعالیت تکتونیک شدید و بالآمدگی است. این منطقه با شیب نزدیک به آستانه ۰/۷۶۴، در محدوده انتقالی از تکتونیک قدیمی به نئوتکتونیک قرار دارد و نشانه‌ای از تحولات اخیر زمین‌ساختی است.

برای تمایز بین لندفرم‌های ناشی از فعالیت‌های نئوتکتونیک و آن‌هایی که بیشتر حاصل فرسایش قهقراپی یا تکتونیک قدیمی هستند، از چارچوبی چندمعیاره استفاده شد. این معیارها بر اساس شواهد توپوگرافیکی، زمین‌ساختی و مورفولوژیکی تعیین گردیدند (جدول ۴).

جدول ۴: معیارهای تشخیص منشأ لندفرم‌ها: تکتونیک در مقابل فرسایشی

معیار	لندفرم تکتونیک	لندفرم فرسایشی
موقعیت ساختاری	در امتداد گسل‌های فعال (مثل گسل سلطانیه و شمالی زنجان)	دور از گسل‌های شناخته شده فعال
شکل هندسی	خطی، متقارن، با لبه‌های تیز و ناهمواری ناگهانی	منحنی، نامتقارن، با ادامه طبیعی دره
شبکه زهکشی	اختلال در الگو (مثل انحراف رودخانه، آبشار، کنج‌دی شدن)	شبکه منظم و بدون اختلال واضح
تفاوت ارتفاع و شیب	شیب‌های تند ($> ۶۲\%$) با تغییر ناگهانی ارتفاع	شیب‌های تدریجی و تغییرات آرام
سن سنگ‌ها	در امتداد واحدهای مقاوم (آندزیت، گرانیت)	در مناطق با سنگ‌های نرم (مارن، رسوبات کواترنری)
همپوشانی با شاخص‌های نئوتکتونیک	منطبق با مناطق با شیب $> ۷۶\%$ و بالای IAT	فاقد همپوشانی با شاخص‌های تکتونیک

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که توزیع شیب در حوضه زنجانرود الگویی ناهمگون و وابسته به موقعیت ساختاری و لیتولوژیکی دارد. اگرچه بیش از $۸۴/۶\%$ از سطح حوضه در محدوده شیب ۷ تا ۲۳% درصد قرار دارد که نشان‌دهنده شرایط عمومی مورفوتکتونیک ضعیف تا متوسط است؛ اما وجود مناطق بسیار محدود ($۰/۰۵\%$) با شیب بیش از ۷۶% درصد، به‌ویژه در امتداد گسل‌های سلطانیه و شمالی زنجان، نشانه‌ای از فعالیت نئوتکتونیک شدید محلی است.

انتخاب نسبت $۰/۷۶۴$ ($۰/۷۶$) به‌عنوان آستانه تغییر وضعیت از تکتونیک قدیمی به نئوتکتونیک، بر اساس همخوانی بالای این مرز با:

* تراکم آبشارها و تنگه‌ها

* موقعیت ساختاری در امتداد گسل‌های فعال

* مقاومت سنگ‌های تشکیل‌دهنده (آندزیت، گرانیت) توجیه می‌شود. این مرز، نه تنها یک تقسیم‌بندی عددی است، بلکه مرز انتقالی در توپوگرافی ناشی از تغییر نرخ بالآآمدگی تکتونیک محسوب می‌شود.

در زیرحوضه آراپاجای، شیب‌های بالاتر از $۰/۷۶۴$ در امتداد گسل سلطانیه مشاهده شدند. این گسل به‌عنوان یک گسل وارونه با مؤلفه امتدادلغز جانبی معکوس، با طول بیش از ۱۴۰ کیلومتر، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری دیواره‌های گسلی و دره‌های عمیق داشته است. پهنه خردشدگی با پهنای ۳۹ تا ۴۹ متر در محل این گسل، همراه با دگرسانی عمیق، شواهدی از فعالیت‌های زمین‌ساختی چندمرحله‌ای را ارائه می‌دهد که از دوران مزوزوئیک تا کواترنری ادامه داشته است.

در مقابل، در زیرحوضه‌های ارمغانخانه، سهرین و سارمساقلو که در امتداد گسل شمالی زنجان قرار دارند، شیب‌های تند (بیشتر از $۰/۷۶$)، دره‌های عمیق و آبشارهای متعدد، نشانه‌هایی از حرکات عمودی اخیر هستند. این منطقه به‌عنوان یک هورست بین گسل شمالی زنجان و گسل قزل‌اوزن، تحت تأثیر بالآآمدگی نسبی قرار دارد که با شاخص‌های مورفوتکتونیک قبلی (مانند Smf و IAT) نیز تأیید شده است.

تحلیل آمار توصیفی شیب زیرحوضه‌ها نشان می‌دهد که:

* زیرحوضه ارمغانخانه با میانگین شیب $0/373$ و انحراف معیار $0/292$ بالاترین مقدار را در بین زیرحوضه‌ها دارد. این نشان‌دهنده فعالیت نئوتکتونیک شدید و ناهمگون داخلی است.

* زیرحوضه سهرین با میانگین $0/329$ و انحراف معیار $0/122$ ، الگوی یکنواخت‌تر و پایداری دارد که نشان‌دهنده فعالیت تکتونیک مستمر و همگن است.

* زیرحوضه‌های سارمساقلو ($0/212$) و آراچای ($0/214$)، با میانگین نزدیک به کل حوضه ($0/148$)، شباهت بیشتری به وضعیت عمومی حوضه دارند.

این تفاوت‌ها حاکی از آن است که زیرحوضه‌ها نه تنها تحت تأثیر حوضه اصلی هستند، بلکه واکنش مستقلى به فرآیندهای تکتونیک نشان می‌دهند. این استقلال، ناشی از ترکیبی از عوامل ساختاری، لیتولوژی و موقعیت نسبی درون حوضه است.

تحلیل تیپ اراضی نیز نشان می‌دهد که:

* کوهستان‌ها با میانگین شیب $0/276$ ، بیشترین واکنش را به فعالیت نئوتکتونیک نشان می‌دهند.

* مخروط‌افکنه ($0/083$)، مارن ($0/077$) و چمن ($0/068$)، با مقادیر پایین، ثبات توپوگرافیکی بیشتری دارند.

اما باید توجه داشت که مقاومت لیتولوژیکی نقش مهمی در این تفاوت‌ها دارد. سنگ‌های مقاوم (مانند آندزیت و گرانیت) در کوهستان‌ها، از فرسایش سریع جلوگیری کرده و اثرات تکتونیک را به وضوح حفظ می‌کنند. در مقابل، در مخروط‌افکنه و رسوبات نرم، فرسایش قهقرایی می‌تواند الگوهای شبیه به عوارض تکتونیک ایجاد کند که بدون تحلیل تلفیقی، به اشتباه تفسیر می‌شوند.

برای تمایز بین لندفرم‌های ناشی از نئوتکتونیک و فرسایش قهقرایی، از چارچوب چندمعیاره استفاده شد:

* لندفرم‌هایی با شکل خطی، تقارن، اختلال در شبکه زهکشی و موقعیت ساختاری روی گسل‌های فعال، به‌عنوان نشانه‌های تکتونیک تفسیر شدند.

* لندفرم‌هایی با شیب تند اما بدون ارتباط ساختاری واضح، به‌ویژه در مخروط‌افکنه، بیشتر به فرسایش قهقرایی ناشی از تغییر سطح اساس قزل اوزن نسبت داده شدند.

این تحلیل، تناقض ظاهری میان مطالعات قبلی (تأیید فعالیت تکتونیک توسط عباسی و رستم‌خانی در مقابل رد آن توسط زالی و یزدانفر) را حل می‌کند: تفاوت در نتیجه‌گیری، نه در علم، بلکه در واحد فضایی و نوع سنگ است.

استفاده از نسبت‌های طلایی فیبوناچی به‌عنوان یک چارچوب کمی و قابل تعمیم، مزایایی دارد:

* عدم وابستگی به شبکه زهکشی

* قابلیت تعمیم به مناطق مختلف

* شناسایی نقاط بحرانی غیرخطی در توپوگرافی

* سادگی محاسبه و دسترسی بالا

این روش، ضمن حفظ سادگی، می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل یا جایگزین در مقایسه با شاخص‌های سنتی (VF، SL، AF) عمل کند.

رابطه مثبت بین میانگین شیب و انحراف معیار شیب در زیرحوضه‌ها (به‌ویژه در ارمغانخانه) نشان می‌دهد که مناطق با فعالیت تکتونیکی شدید، دارای ناهمگونی داخلی بالاتری هستند. در مقابل، زیرحوضه‌هایی با میانگین متوسط (مثل سهرین)، انحراف معیار کمتری دارند و نشان‌دهنده الگوی یکنواخت‌تری هستند.

در این پژوهش، ضمن بررسی مستقل پارامترهای آمار توصیفی، تحلیل روابط میان متغیرها نیز انجام شد. مشخص گردید که بین میانگین شیب و انحراف معیار شیب رابطه مثبت و معناداری وجود دارد. به‌طور خاص، زیرحوضه‌هایی با میانگین بالاتر شیب، مانند ارمغانخانه (۰/۳۷۳) دارای انحراف معیار بزرگ‌تری (۰/۲۹۲) نیز هستند که نشان‌دهنده ناهمگونی داخلی بالا و تغییرات شدید در توپوگرافی در این مناطق است. در مقابل، زیرحوضه‌هایی با میانگین متوسط شیب، مانند سهرین (۰/۳۲۹)، انحراف معیار کمتری (۰/۱۲۲) دارد و نشان‌دهنده الگوی یکنواخت‌تر و پایدارتری از فعالیت مورفوتکتونیکی هستند. همچنین، تحلیل مقایسه‌ای نشان داد که زیرحوضه‌های با شیب بالاتر (ارمغانخانه و سهرین) بیشتر در واحدهای کوهستانی با سنگ‌های مقاوم (آندزیت، گرانیت) قرار دارند، درحالی‌که قسمت‌های عمده‌ای از زیرحوضه‌های با شیب پایین‌تر (سارمساقلو و آراپاجای) بیشتر در مناطق مخروط‌افکنه و رسوبات نرم واقع شده‌اند.

این همبستگی مکانی نشان می‌دهد که تفاوت در وضعیت مورفوتکتونیکی زیرحوضه‌ها تنها ناشی از عوامل تکتونیکی نیست، بلکه تحت تأثیر ترکیبی از ساختار زمین‌ساختی و مقاومت لیتولوژیکی است. بنابراین، واحدهای کوهستانی نه تنها دارای شیب بالاتری هستند، بلکه به‌دلیل مقاومت بیشتر سنگ‌ها، اثرات فعالیت‌های نئوتکتونیکی را به وضوح حفظ کرده‌اند. ارمغانخانه با بیشترین میانگین و انحراف معیار، نشان‌دهنده تفاوت‌های شدید داخلی و شرایط ناهمگون است، درحالی‌که سهرین با همگونی بیشتر و تغییرات کمتر، دارای الگوی پایدارتری از فعالیت تکتونیکی است. این تفاوت‌ها حاکی از آن است که زیرحوضه‌ها نه تنها تحت تأثیر حوضه اصلی قرار دارند، بلکه مستقل از آن نیز واکنش‌های متفاوتی به عوامل تکتونیکی نشان می‌دهند.

در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که تحلیل تلفیقی داده‌های مکانی، لیتولوژی، ساختار و شیب می‌تواند به درک بهتر از تحولات نئوتکتونیکی منطقه کمک کند. البته، برای تأیید قطعی نقش تکتونیک در شکل‌گیری عوارض، نیاز به مطالعات صحرایی دقیق، تجزیه‌های ژئوفیزیکی و داده‌های سنگ‌شناسی عمیق‌تر است.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که حوضه زنجانرود از نظر مورفوتکتونیکی دارای الگویی ناهمگون است که تحت تأثیر ترکیبی از عوامل ساختاری، لیتولوژیکی و فرسایشی شکل گرفته است. بیش از ۸۴/۶٪ از سطح حوضه در محدوده شیب ۷ تا ۲۳ درصد قرار دارد که نشان‌دهنده وضعیت عمومی مورفوتکتونیک ضعیف تا متوسط است. با این حال، مناطق بسیار محدودی با شیب بیش از ۷۶ درصد (بیشتر از ۰/۷۶۴) در امتداد گسل‌های سلطانیه و شمالی زنجان شناسایی شدند که نشانه‌هایی از فعالیت نئوتکتونیکی شدید محلی هستند.

تحلیل آمار توصیفی زیرحوضه‌ها نشان داد که زیرحوضه‌های ارمغانخانه و سهرین با میانگین شیب بالاتر و انحراف معیار متفاوت، از الگوهای مورفوتکتونیکی شدید و ناهمگونی داخلی بالایی برخوردارند، درحالی‌که زیرحوضه‌های سارمساقلو و آراپاجای با وضعیت تاحدودی پایدارتر، شباهت بیشتری به حالت عمومی حوضه دارند. این تفاوت‌ها

حاکمی از آن است که زیرحوضه‌ها نه تنها تحت تأثیر حوضه اصلی هستند، بلکه واکنش مستقلی به فرآیندهای تکتونیکی نشان می‌دهند.

تحلیل تیپ اراضی نیز نشان داد که کوهستان‌ها با میانگین شیب ۰/۲۷۶ بیشترین واکنش را به فعالیت نئوتکتونیکی داشته‌اند، درحالی‌که مخروط‌افکنه، مارن و چمن با مقادیر پایین شیب (کمتر از ۰/۱)، ثبات توپوگرافیکی بیشتری دارند. این تفاوت‌ها بیشتر ناشی از مقاومت لیتولوژیکی سنگ‌هاست: سنگ‌های مقاوم (آندزیت، گرانیت) اثرات تکتونیکی را به وضوح حفظ می‌کنند، درحالی‌که در رسوبات نرم، فرسایش قهقرایی می‌تواند عوارضی شبیه به تکتونیکی ایجاد کند.

این مطالعه با مقایسه یافته‌ها با مطالعات قبلی، تناقض ظاهری میان آن‌ها را حل می‌کند:

* عباسی (۱۳۹۵) و رستم‌خانی (۱۳۹۳) که فعالیت تکتونیکی را تأیید می‌کنند، در مناطق کوهستانی مقاوم تمرکز داشتند.

* زالی و یزدانفر (۲۰۲۰) که فعالیت تکتونیکی را رد می‌کنند، در مناطق آبرفتی و مخروط‌افکنه تحلیل کردند. بنابراین، تفاوت در نتیجه‌گیری، نه در علم، بلکه در واحد فضایی و فرآیند غالب است.

استفاده از نسبت‌های طلایی فیبوناچی به‌عنوان یک چارچوب کمی و قابل‌تعمیم، اثربخشی این روش را در شناسایی نقاط بحرانی توپوگرافیکی نشان داد. این روش، ضمن سادگی و عدم وابستگی به شبکه زهکشی، می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل در مطالعات مورفوتکتونیکی مورد استفاده قرار گیرد.

در نهایت، این پژوهش تأکید می‌کند که برای درک صحیح از تحولات نئوتکتونیکی، تحلیل تلفیقی داده‌های مکانی، لیتولوژی، ساختار و شیب ضروری است. همچنین، برای تأیید قطعی نقش تکتونیک در شکل‌گیری عوارض، نیاز به مطالعات صحرایی دقیق، تجزیه‌های ژئوفیزیکی و داده‌های سنگ‌شناسی عمیق‌تر است.

منابع

- بختیاری، فاطمه. (۱۳۹۴). بررسی آستانه‌های ژئومورفولوژیکی (مطالعه موردی: حوضه آبریز قزل‌اوزن)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه جغرافیای دانشکده علوم ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه زنجان، ص ۱۵۳.
- ثبوتی، فرهاد؛ حسامی، خالد؛ قدس، رضا؛ طبسی، هادی؛ عسگری، روح اله. (۱۳۸۷). لرزه‌خیزی و گسلش فعال در زنجان و مناطق مجاور، سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، صص: ۱۸۷-۱۸۹.
- جعفری، غلامحسین؛ رستم‌خانی اصغر. (۱۳۹۵). شواهد ژئومورفولوژیکی گسل‌های ارمغانخانه و تهم تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۱۶ (۴۳)، صص: ۱۴۹-۱۷۲ <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2716-fa.html>
- جعفری، غلامحسین؛ بختیاری، فاطمه. (۱۳۹۵). بررسی هیدرو-ژئوتونیک حوضه آبی قزل‌اوزن. مجله جغرافیا و توسعه، ۱۴ (۴۵)، صص: ۲۲۱-۲۴۲. doi: 10.22111/gdij.2016.2930
- رستم‌خانی، اصغر. (۱۳۹۳). پایش ساختار ژئوکلیماتیک مخروط‌افکنه‌های بستر قزل‌اوزن، پایان‌نامه گروه جغرافیای دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه زنجان، ص: ۱۲۶.
- شافعی، علیرضا؛ عبادتی، ناصر؛ نعیمی، امیر. (۱۳۸۷). بررسی شرایط زمین‌ساختی، رسوبی منطقه ویر، جنوب شرق سلطانیه، چهارمین همایش زمین‌شناسی و محیط زیست، اسلامشهر، صص: ۱-۱۳. <https://civilica.com/doc/58542>
- عباسی، مهدی. (۱۳۹۴). پایش ژئومورفولوژیکی پادگانه‌های آبرفتی رودخانه‌های ایران مطالعه موردی: رودخانه قزل‌اوزن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه جغرافیای دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه زنجان، ص: ۱۴۱.

- علایی طالقانی، محمود. (۱۳۸۸). ژئومورفولوژی ایران. نشر قومس ص: ۴۰۴.
- الیاسی، محسن؛ محجل، محمد؛ مصباحی، فاطمه. (۱۳۸۷). تحلیل تنش دیرین در رسوب‌های پلیوسن - کواترنری شمال باختر زنجان، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۴، شماره ۲، صص: ۲۷-۴۲. [20.1001.1.2538371.1387.34.2.3.5](https://doi.org/10.1001.1.2538371.1387.34.2.3.5)
- Allen, M., Jackson, J., & Walker, R. (2004). Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23(2). <https://doi.org/10.1029/2003TC001530>
- Babatunde, S., & Abiola, O. (2024). *The Golden Ratio and Fibonacci sequence in Nature*.
- Berberian, F., & Berberian, M. J. (1981). *Tectono-plutonic episodes in Iran. Zagros Hindu Kush Himalaya Geodynamic Evolution*, 3, 5-32. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Doornkamp, J. C. (1986). Geomorphological approaches to the study of neotectonics. *Journal of the Geological Society*, 143(2), 335-342. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.143.2.0335>
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, 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.
- Ghosh, S., & Sivakumar, R. (2018). Assessment of morphometric parameters for the development of the Relative Active Tectonic Index and its significance for seismic hazard study: an integrated geoinformatic approach. *Environmental Earth Sciences*, 77(17), 600.
- Gopinath, G., Nalukudiparambil, J., Bhadrar, A., Girishbai, D., & Pillai, S. U. (2022). Geomorphological analysis of tropical river basins in southern Kerala using hypsometric indices and neotectonic proxies. *Journal of Earth System Science*, 131(4), 246.
- Gutiérrez, A. A. (2023). *Morphotectonic Processes in Seismic Zones of Moderate Intensity*, Argentina.
- Hancock, P. L., & Williams, G. D. (1986). Neotectonics. *Journal of the Geological Society*, 143(2), 325-326. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.143.2.0323>
- Kalman, D., & Mena, R. (2003). The Fibonacci numbers—exposed. *Mathematics magazine* 76(3), 167-181. <https://doi.org/10.1080/0025570X.2003.11953176>
- Kirby, E., & Whipple, K. X. (2012). Expression of active tectonics in erosional landscapes. *Journal of Structural Geology*, 44, 54-75.
- Kothyari, G. C., & Rastogi, B. K. (2013). Tectonic control on drainage network evolution in the Upper Narmada Valley: implications to neotectonics. *Geography Journal*, 2013(1), 325808.
- Mahala, A. (2020). The significance of morphometric analysis to understand the hydrological and morphological characteristics in two different morpho-climatic settings. *Applied Water Science*, 10(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1118-2>
- Miccadei, E., Carabella, C., & Paglia, G. (2021). Morphoneotectonics of the Abruzzo Periadriatic area (central Italy): Morphometric analysis and morphological evidence of tectonic features. *Geosciences*, 11(9), 397. <https://doi.org/10.3390/geosciences11090397>
- Peitgen, H. O., Jürgens, H., Saupe, D., & Feigenbaum, M. J. (2004). *Chaos and fractals: new frontiers of science* (Vol. 106, pp. 560-604). New York: Springer.
- Różycka, M., Janciewicz, K., Migoń, P., & Szymanowski, M. (2021). Tectonic versus rock-controlled mountain fronts—Geomorphometric and geostatistical approach (Sowie Mts., Central Europe). *Geomorphology*, 373, 107485.
- Sharma, V. (2009). Deterministic chaos and fractal complexity in the dynamics of cardiovascular behavior: perspectives on a new frontier. *The Open Cardiovascular Medicine Journal*, 3, 110. <https://doi.org/10.2174/1874192400903010110>
- Solaimani Azad, S., Dominguez, S., Philip, H., Hessami, K., Forutan, M. R., Zadeh, M. S., & Ritz, J. F. (2011). The Zandjan fault system: Morphological and tectonic evidence of a new active fault network in the NW of Iran. *Tectonophysics*, 506(1-4), 73-85. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.04.012>
- Turcotte, D. L. (1997). *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press.
- Zali, Z., & Yazdanfar, A. (2020). *Evaluation of Active Tectonics of the Sohrein Fault Zone Using Morphometry and Geomagnetic Survey Evaluation of Active Tectonics of the Sohrein Fault Zone Using Morphometry and Geomagnetic Survey*. May 2015, 0-8.
- Zali, Z., Shabanian, E., Sobouti, F., & Yazdanfar, A. (2015). *Evaluation of Active Tectonics of the Sohrein Fault Zone Using Morphometry and Geomagnetic Survey*. 7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran. <https://civilica.com/doc/1132552>.