



Research Paper

Evaluating the Tectonic Status of Mountainous Regions Using Geomorphic Indices and SBAS Time Series Method (Case Study: Latian Dam Basin)

Mojtaba Yamani ^a, Tahereh Farahi Boshehri* ^b 

^a Professor, Department of Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

^b Ph.D. student, Department of Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Received: 2025/02/24

Accepted: 2025/05/05

PP: 1-12

Use your device to scan and
read the article online



Keywords: *Tectonics,
Geomorphic Indicators, SBAS
Method, Latian Dam Basin .*

Abstract

Tectonic activities play a crucial role in the formation and structural changes of the Earth and can have significant impacts on the environment and human communities. In this study, the tectonic status of the Latian dam basin was evaluated using geomorphic indices and radar imagery. The main objective was to assess the level of tectonic activity and vertical displacements in the region over a specified period and to provide practical results for better management of geological hazards. Sentinel-1 radar images and the 12.5 m ALOS PALSAR digital elevation model were the primary data sources used. The main analytical tools were GMT and ArcGIS. The study examined the tectonic status using eight geomorphic indices alongside the SBAS time-series method, and the results from both approaches were compared. According to the findings, the Latian dam basin is active based on the AF, S, Br, and P indices, and relatively active according to the T and Gi indices. Furthermore, the SBAS time-series for the two years period (2020–2022) revealed significant vertical displacements ranging from -4 to 36 mm, with the northern parts of the basin experiencing the highest uplift. It should be noted that the results obtained in this study are based on radar images and the method used and represent approximate displacement values. Considering the results obtained, in order to accurately assess tectonic activities in the study basin, it is recommended to implement continuous monitoring programs using satellite observation systems and ground stations to accurately and timely identify displacement changes.

Citation: Yamani, M., & Farahi Boshehri, T. (2025). Evaluating the Tectonic Status of Mountainous Regions Using Geomorphic Indices and SBAS Time Series Method (Case Study: Latian Dam Basin). *Journal of Environmental Research in Mountainous Regions*, 1(2), 1-12.

DOI: <https://doi.org/10.22034/ermr.2026.144801.1035>



© The Author(s).

Publisher: University of Kurdistan

* **Corresponding author:** Tahereh Farahi Boshehri, **Email:** Farrahi.t758@gmail.com

Extended Abstract

Introduction

Watersheds, as fundamental units in geomorphological and tectonic studies, reflect active tectonic processes and surface dynamics of the Earth. Evaluating the tectonic status of these basins, especially in mountainous and tectonically active regions, is crucial for understanding geological hazards, managing water resources, and developmental planning. The Latian Dam basin, located northeast of Tehran and on the southern slopes of the Alborz mountain range, due to its unique tectonic setting and proximity to active faults, is considered one of the promising areas for analyzing tectonic activities. In recent years, the use of geomorphic indices as quantitative and efficient tools for assessing tectonic activity at the basin scale has expanded. On the other hand, advances in remote sensing technologies and the use of radar imagery, particularly high-resolution satellite data such as Sentinel-1 and ALOS-PALSAR, have enabled the study of micro-scale changes in topography and surface displacements. Radar images, especially in mountainous environments with dense vegetation cover, perform better than optical images and, with the aid of radar interferometry techniques (InSAR), tectonic activities can be analyzed with higher accuracy. In this study, to evaluate the tectonic status of the Latian watershed, a combination of geomorphic indices analysis and radar image interpretation was applied. This multi-faceted approach not only facilitates the identification of tectonically active zones but also proves effective in analyzing hazards such as landslides, subsidence, and seismicity. The results of this research can contribute to a better understanding of the tectonic dynamics of the region and aid in the principled planning for sustainable development in the Latian basin.

Methodology

In this study, Sentinel-1 radar images and the 12.5-meter resolution ALOS PALSAR digital elevation model were used as the primary data sources. The main tools employed were GMT, for implementing the SBAS time series method, and ArcGIS, for generating the required maps. The research was conducted in two main stages: first, the tectonic status of the Latian Dam watershed was assessed using eight geomorphic

indices, which were calculated digitally using the digital elevation model to minimize computational errors. After evaluating the tectonic conditions based on each index, the Relative Tectonic Activity Index (IAT) was applied for an overall assessment and comparison of the watershed's tectonic activity. In the second stage, vertical displacement of the Latian watershed was calculated using Sentinel-1 radar images from a one-year period (January 2021 to January 2022) through the SBAS time series method. Finally, the results from both methods were compared and analyzed together.

Results and Discussion

The results of the evaluation of the Transverse Topographic Symmetry Factor (T) indicate a value of 0.43 for the studied watershed. Based on the elevation characteristics of the basin, the Hypsometric Integral (Hi) was calculated as 0.37. The Asymmetry Factor (AF) was found to be 30, and the Stream Sinuosity Index (S) was calculated at 1.24. According to the stream order classification, the Basin Bifurcation Ratio (Br) for the study area was determined to be 3.8. The Drainage Density Index (P), calculated based on the basin area and the total length of streams, was 1.1. Additionally, the values for the Basin Shape Index (Bs) and the Gravelius Index (Gi) were 1.51 and 1.56, respectively. Furthermore, using the SBAS time series method, a vertical displacement map of the region was generated, which showed that the study area experienced vertical displacement ranging from -5 to 41 millimeters over the one-year period from 2021 to 2022.

Conclusion

The evaluation of tectonic indices for the studied watershed indicates that the area is active according to most indices (AF, S, Br, and P) and relatively active based on the T and Gi indices. Overall, the geomorphic index assessment shows that the Latian Dam watershed is tectonically active, with ongoing geological processes related to structural displacement and movement. Additionally, the SBAS time series results and interferogram maps, depicting vertical displacements over a one-year period (2021–2022), reveal significant movements ranging from -5 to 41 millimeters, with the northern parts of the basin experiencing the highest uplift. This confirms the tectonic activity of the region and the influence of

tectonic processes on vertical surface changes. Given these findings, it is recommended to implement continuous monitoring programs using satellite observation systems and ground stations to accurately and timely detect displacement changes. Moreover, conducting seismological studies and active fault investigations is essential for better hazard identification and pinpointing high-risk zones.

Financial sponsor

According to the responsible author, this article has no financial sponsor.

Contribution of the authors to the research

The first author: Development of the theoretical framework, scientific supervision of the research process

Second author: Data collection and initial writing
Conflict of Interest

Furthermore, geotechnical engineering studies are advised in areas with the greatest displacement to ensure the stability of structures and infrastructure. Finally, enhancing education and raising awareness among local communities about the consequences of tectonic activity and coping strategies plays a vital role in reducing human and financial damages.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest in writing or publishing this article.

Appreciation and thanks

The authors sincerely thank all the people who have cooperated with them in collecting field data.



مقاله پژوهشی

ارزیابی وضعیت تکتونیکی قلمروهای کوهستانی با استفاده از شاخص های ژئومورفیک و روش سری زمانی SBAS (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد لتیان)

مجتبی یمانی: استاد، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

طاہرہ فرہی بوشہری *  : دانشجوی دکتری، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
فعالیت های تکتونیکی نقش مهمی در شکل گیری و تغییرات ساختاری زمین دارند و می توانند تاثیرات قابل توجهی بر محیط زیست و جوامع انسانی داشته باشند. در این مطالعه، وضعیت تکتونیکی حوضه آبریز سد لتیان با استفاده از شاخص های ژئومورفیک و تصاویر راداری مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف اصلی پژوهش، بررسی میزان فعالیت تکتونیکی و جابجایی های عمودی منطقه در بازه زمانی مشخص و ارائه نتایج کاربردی برای مدیریت بهتر مخاطرات زمین شناسی است. در این پژوهش از تصاویر راداری سنتینل ۱ و مدل رقومی ارتفاعی ALOS PALSAR ۱۲/۵ به عنوان مهم ترین داده های تحقیق استفاده شده است. مهم ترین ابزارهای تحقیق، GMT و ArcGIS بوده است. در این تحقیق به بررسی وضعیت تکتونیکی منطقه با استفاده از ۸ شاخص ژئومورفیک و همچنین روش سری زمانی SBAS پرداخته شده است و سپس نتایج بدست آمده از هر دو روش با هم مقایسه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، حوضه آبریز سد لتیان از نظر شاخص های AF-S-Br-P دارای وضعیت فعالی و همچنین از نظر شاخص های T و Gi دارای وضعیت نسبتا فعال است. همچنین سری زمانی SBAS در بازه زمانی دو ساله (۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲) بیانگر جابجایی های قابل توجه بین ۴- تا ۳۶ میلی متر است که بخش های شمالی حوضه بیش ترین میزان بالا آمدگی را تجربه کرده اند. لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده در این پژوهش بر مبنای تصاویر راداری و روش مورد استفاده بوده و بیانگر مقادیر تقریبی جابجایی هستند. به منظور ارزیابی دقیق فعالیت های تکتونیکی در حوضه مورد مطالعه، توصیه می شود برنامه های پایش مستمر با استفاده از سامانه های رصد ماهواره ای و ایستگاه های زمینی اجرا شود تا تغییرات جابجایی به طور دقیق و به موقع شناسایی گردد	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵ شماره صفحات: ۱-۱۲ از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید  واژه های کلیدی: تکتونیک، شاخص های ژئومورفیک، روش SBAS، حوضه آبریز سد لتیان

استناد: یمانی، مجتبی و فرہی بوشہری، طاہرہ (۱۴۰۴). ارزیابی وضعیت تکتونیکی قلمروهای کوهستانی با استفاده از شاخص های ژئومورفیک و روش سری زمانی SBAS (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد لتیان). نشریه علمی پژوهش های محیطی در قلمروهای کوهستانی، ۱(۲)، ۱-۱۲.

DOI: <https://doi.org/10.22034/ermr.2026.144801.1035>

ناشر: دانشگاه کردستان



© نویسندگان

مقدمه

حوضه‌های آبریز یکی از حساس‌ترین واحدهای ژئومورفولوژیکی در برابر فرآیندهای تکتونیکی هستند (شهماری، ۱۳۹۶) و تغییرات ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی اغلب به صورت مستقیم یا غیرمستقیم در شکل، الگوی زهکشی و ساختار توپوگرافی آن‌ها انعکاس می‌یابد (چن^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). در مناطق کوهستانی فعال، مانند زون‌های فشاری یا برخوردی، حوضه‌ها معمولاً تحت تأثیر بلندشدگی‌های سریع، فعالیت گسل‌های معکوس و رانده، و تغییر شکل‌های مداوم پوسته قرار می‌گیرند. این عوامل سبب عدم تقارن حوضه، تغییر نسبت انشعابات شبکه رودخانه‌ای، افزایش شیب رودخانه‌ها و شکل‌گیری دره‌های V شکل می‌شود که همگی نشانه‌هایی از تکتونیک فعال هستند (آگاروال^۲ و همکاران، ۱۹۹۸). واکنش سریع حوضه‌ها به این تغییرات، آن‌ها را به شاخص‌های طبیعی و قابل اعتماد برای تشخیص و ارزیابی میزان فعالیت مورفوتکتونیکی تبدیل کرده است (شن^۳ و همکاران، ۲۰۲۳؛ ساهو^۴ و همکاران، ۲۰۲۴).

از سوی دیگر، وضعیت مورفوتکتونیکی حوضه‌ها در مناطقی که تحت تنش‌های فعال قرار دارند، معمولاً با فرآیندهای فرسایشی شدید، مهاجرت آبراهه‌ها، و ناپایداری شیب‌ها همراه است (الرایس^۵ و همکاران، ۲۰۲۵). چنین الگوهایی در حوضه‌هایی مشاهده می‌شود که در مجاورت گسل‌های فعال واقع شده‌اند و به دلیل تغییرات ارتفاعی ناشی از حرکات گسلی، جریان‌های رودخانه‌ای در تلاش برای رسیدن به تعادل جدید هستند. این شرایط موجب شکل‌گیری ناهنجاری در پروفیل طولی رودخانه، مقادیر بالای شاخص SL، افزایش مقدار AF و کاهش مقدار HI می‌شود که همگی نشان‌دهنده تداوم تکتونیک فعال هستند (ناتیال^۶، ۱۹۹۴). در مجموع، تحلیل مورفوتکتونیکی حوضه‌ها می‌تواند نه تنها وضعیت کنونی فعالیت‌های تکتونیکی را آشکار سازد، بلکه روندهای گذشته و آینده تغییر شکل زمین را نیز تا حد زیادی قابل پیش‌بینی کند (مختاری، ۱۳۸۴؛ عارف‌پناه و شرفی، ۲۰۲۲). بر این اساس، حوضه‌های آبریز به عنوان واحدهای پایه در مطالعات ژئومورفولوژی و تکتونیک، بازتاب‌دهنده فرآیندهای زمین‌ساختی فعال و پویایی‌های سطح زمین هستند (گارنیری و پیروتا^۷، ۲۰۰۸؛ تالامپاس و کاباهوگ^۸، ۲۰۱۸). ارزیابی وضعیت تکتونیکی این حوضه‌ها، به ویژه در مناطق کوهستانی و فعال از نظر زمین‌ساختی، اهمیت بسزایی در شناخت مخاطرات ژئولوژیکی، مدیریت منابع آب، و برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای دارد (ژو^۹ و همکاران، ۲۰۱۷؛ لانگ کومار^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۹).

موقعیت زمین‌ساختی ایران که حاصل قرارگیری آن در کمربند کوهزایی آلپ هیمالیا است، سبب شده که این سرزمین از فعال‌ترین مناطق تکتونیکی جهان به شمار رود (آرین و فرشی، ۱۳۸۹). برخورد صفحه عربی با صفحه اوراسیا و تداوم این فرایند، موجب شکل‌گیری ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی، گسل‌های فعال (درخشانی و سالاری، ۱۳۹۵)، زمین‌لرزه‌های مخرب (گنجائیان، ۱۴۰۳) و تغییر شکل‌های گسترده در پوسته ایران شده است (یمانی و همکاران، ۱۴۰۰). یکی از مناطقی که به طور ویژه تحت تأثیر این فرآیندهای تکتونیکی قرار دارد، رشته‌کوه البرز است که به عنوان یکی از فعال‌ترین واحدهای ساختاری کشور شناخته می‌شود. بخش‌های مرکزی و شرقی البرز، به دلیل وجود گسل‌های فعال متعدد و فعالیت‌های لرزه‌خیزی مداوم، از نظر ژئومورفولوژیکی بسیار پویاتر از سایر نواحی هستند (گورابی و نوحه‌گر، ۱۳۸۶). حوضه آبریز سد لتیان در چنین بستری قرار گرفته و به طور مستقیم از فعالیت‌های تکتونیکی تأثیر می‌پذیرد. این حوضه با قرارگیری در مجاورت گسل‌های مشا، شمال تهران و پارچین، در معرض خطرات بالقوه‌ای مانند لغزش دامنه‌ها، تغییر مسیر رودخانه‌ها، فرونشست محلی و تغییر شکل‌های مداوم پوسته قرار دارد. از آنجا که سد لتیان نقش مهمی در تأمین آب تهران و مدیریت سیلاب‌ها دارد، هرگونه تغییر در پایداری زمین یا الگوی زهکشی در این منطقه می‌تواند پیامدهای جدی زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی در پی داشته باشد.

با وجود اهمیت بالای منطقه، تاکنون بخش عمده مطالعات بر پایه داده‌های زمین‌شناسی سنتی و بازدیدهای میدانی صورت گرفته است که اگرچه ارزشمندند، اما قادر به ارائه تصویر جامع و کمی از پویایی تکتونیکی حوضه نیستند. از همین رو، نیاز به استفاده از روش‌های ترکیبی، شامل شاخص‌های ژئومورفولوژی و داده‌های تداخل‌سنجی راداری، بیش از پیش احساس می‌شود. شاخص‌های ژئومورفولوژیکی قادرند با تحلیل ویژگی‌های سطحی زمین، شواهد مورفوتکتونیکی را آشکار کنند، در حالی که داده‌های راداری می‌توانند تغییر شکل‌های فعال را با دقت بالا اندازه‌گیری نمایند.

1. Chen
2. Agarwal
3. Shen
4. Sahu
5. El-Rays
6. Nautiyal
7. Guarnieri & Pirrotta
8. Talampas & Cabahug
9. Guo
10. Longkumer

بنابراین، مسئله اصلی این پژوهش آن است که وضعیت مورفوتکتونیکی حوضه آبریز سد لتیان چگونه است و تا چه اندازه شاخص‌های ژئومورفیک در کنار تصاویر راداری می‌توانند میزان و الگوی فعالیت‌های تکتونیکی این حوضه را آشکار سازند؟ این تحقیق تلاش می‌کند با بهره‌گیری از این رویکرد تلفیقی، تصویری دقیق‌تر و علمی‌تر از فعالیت‌های زمین‌ساختی منطقه ارائه داده و زمینه‌ای برای مدیریت بهتر مخاطرات و برنامه‌ریزی توسعه پایدار فراهم آورد.

مرور ادبیات و سوابق پژوهش

در سال‌های اخیر، استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک^۱ به عنوان ابزارهایی کمی و کارآمد برای ارزیابی فعالیت‌های تکتونیکی در مقیاس حوضه‌ای گسترش یافته است (یمانی و عزیزاده، ۱۳۹۵). این شاخص‌ها که شامل پارامترهایی مانند گرادیان طولی رودخانه (SL)، شکل حوضه (BS) و نسبت انشعابات رودخانه‌ای (R) می‌باشند، با تفسیر کمی ویژگی‌های شکل زمین می‌توانند به صورت غیرمستقیم شدت و نحوه فعالیت تکتونیکی منطقه را بازتاب دهند (اونینس^۲ و همکاران، ۲۰۰۶). از سوی دیگر، پیشرفت فناوری‌های سنجش‌ازدور و استفاده از تصاویر راداری، به‌ویژه داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا مانند Sentinel-1 و ALOS-PALSAR، امکان بررسی تغییرات ریزمقیاس در توپوگرافی و جابه‌جایی‌های سطح زمین را فراهم کرده است (نگهبان و همکاران، ۱۳۹۹). تصاویر راداری به‌ویژه در محیط‌های کوهستانی و دارای پوشش گیاهی متراکم، نسبت به تصاویر اپتیکی عملکرد بهتری داشته و به کمک تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، می‌توان فعالیت‌های تکتونیکی را با دقت بالاتری تحلیل نمود (نیکولا^۳ و همکاران، ۲۰۱۸؛ خان^۴ و همکاران، ۲۰۲۳). با توجه به کاربرد شاخص‌های ژئومورفولوژیک و تصاویر راداری در ارزیابی وضعیت تکتونیکی مناطق (گنجائیان و همکاران، ۲۰۲۴)، در این تحقیق با استفاده از این روش‌ها، به ارزیابی وضعیت مورفوتکتونیکی حوضه آبریز سد لتیان پرداخته شده است.

در راستای موضوع مورد مطالعه، پژوهش‌های گوناگونی در زمینه ارزیابی تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی بر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و دینامیک حوضه‌های آبریز انجام شده است. کاله^۵ و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی رودخانه کوری در هندوستان، نقش تکتونیک را در کنترل الگوی شبکه زهکشی منطقه مورد تحلیل قرار دادند و نتایج آنان حاکی از تأثیر مستقیم فعالیت‌های زمین‌ساختی بر سازمان‌یافتگی شبکه رودخانه‌ای بود. نیکولا^۶ و همکاران (۲۰۱۸) تغییرات سطح زمین ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی در حوضه فوکسانی واقع در شرق رومانی را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که منطقه با جابجایی عمودی سالانه‌ای در حدود $10 \pm$ میلی‌متر مواجه است. کومار^۷ و همکاران (۲۰۲۲) نیز در حوضه دامنگانگا در غرب هند با بهره‌گیری از شاخص‌های ژئومورفیک و تحلیل شبکه زهکشی، به ارزیابی تکتونیک فعال پرداختند و فعال بودن حوضه از دیدگاه زمین‌ساختی را تأیید کردند. رازی^۸ و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از تصاویر راداری به مطالعه تغییرات تکتونیکی سطح زمین در جزیره متناوی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که مناطق شمالی این جزیره در حال فرونشست و نواحی جنوبی آن در حال بالاآمدگی هستند. در مطالعات داخلی، نایب‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) با بهره‌گیری از تصاویر راداری، وضعیت تکتونیکی حوضه دشت اشتهارد را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که کل حوضه دارای روند بالاآمدگی بوده و بیش‌ترین میزان آن در نواحی غربی و شمال‌غربی مشاهده می‌شود. گنجائیان و همکاران (۱۳۹۹) نیز با هدف بررسی هم‌پوشانی شاخص‌های ژئومورفیک با کانون‌های زمین‌لرزه در زاگرس شمال‌غربی، دریافتند که بیش‌ترین همبستگی بین شاخص تراکم زهکشی و محل وقوع زمین‌لرزه‌ها وجود دارد. همچنین علی‌پور و جهانگیری (۱۳۹۹) تأثیر تکتونیک فعال را بر اشکال ژئومورفیک در تاقدیس قلاجه تحلیل کرده و نتیجه گرفتند که یال جنوب‌غربی این ساختار دارای فعالیت زمین‌ساختی بیش‌تری نسبت به یال شمال‌شرقی آن است. گنجائیان و همکاران (۱۴۰۲) به تحلیل وضعیت تکتونیکی طاق‌دیس‌های شمال‌غربی زاگرس و ارتباط آن با کانون‌های زمین‌لرزه پرداختند. در مطالعه‌ای دیگر، اسدی و همکاران (۱۴۰۲) با بررسی زیرحوضه‌های لواسان به تطابق شاخص‌های ژئومورفیک و داده‌های راداری در تحلیل فعالیت تکتونیکی پی بردند.

مرور پژوهش‌های انجام‌شده در داخل و خارج از کشور نشان می‌دهد که شاخص‌های ژئومورفیک ابزار مؤثری در شناسایی و ارزیابی میزان فعالیت‌های تکتونیکی در مقیاس‌های مختلف حوضه‌ای هستند. اغلب مطالعات، چه با تکیه بر شاخص‌های ریخت‌سنجی و چه با استفاده از داده‌های راداری و تداخل‌سنجی، بر تأثیر مستقیم فرایندهای زمین‌ساختی بر شکل‌گیری و تحول شبکه‌های زهکشی و توپوگرافی مناطق

1 . Geomorphic Indices

2 . Ioannis

3 . Necula

4 . Khan

5 . Kale

6 . Necula

7 . Kumar

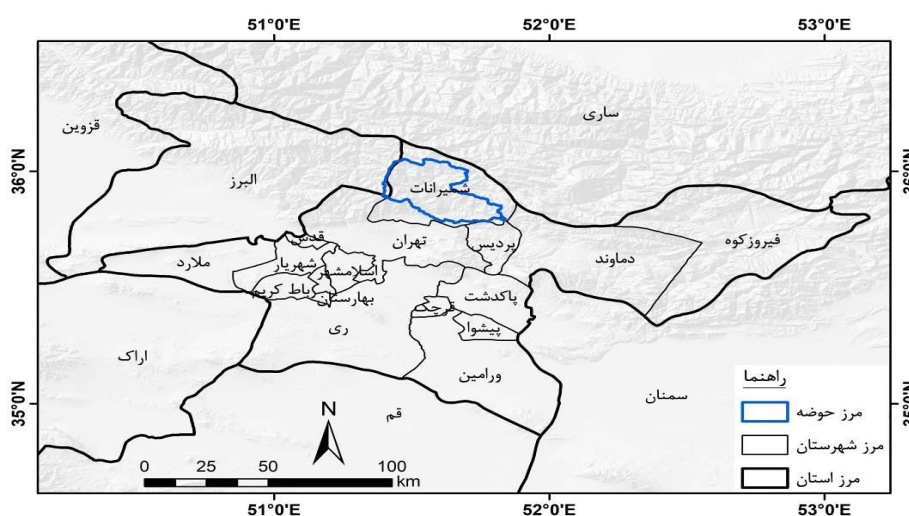
8 . Razi

تأکید دارند. همچنین یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب روش‌های سنجش‌ازدور با تحلیل شاخص‌های ژئومورفیک، دقت و توان تفسیر نتایج را به میزان چشمگیری افزایش می‌دهد. به طور کلی، مطالعات پیشین بر اهمیت استفاده‌ی هم‌زمان از رویکردهای کمی (مانند شاخص‌های مورفوتکتونیک) و ابزارهای نوین سنجش‌ازدور در تحلیل پویایی‌های زمین‌ساختی تأکید داشته‌اند. با این حال، هنوز بررسی جامعی که به‌صورت هم‌زمان از شاخص‌های مورفوتکتونیک و داده‌های راداری برای تحلیل فعالیت‌های تکتونیک در حوضه آبریز لتیان بهره‌گیرد، صورت نگرفته است. با توجه به اهمیت موضوع، در این مطالعه، با هدف ارزیابی وضعیت تکتونیک حوضه آبریز لتیان، ترکیبی از تحلیل شاخص‌های ژئومورفیک و تفسیر تصاویر راداری به کار گرفته شده است. این رویکرد چندمنظوره، نه تنها امکان شناسایی مناطق فعال از نظر تکتونیک را فراهم می‌سازد، بلکه می‌تواند در تحلیل مخاطراتی مانند زمین‌لغزش، فرونشست و زلزله‌خیزی نیز مؤثر واقع شود. نتایج این تحقیق، می‌تواند به درک بهتر پویایی‌های زمین‌ساختی منطقه و برنامه‌ریزی اصولی برای توسعه پایدار در حوضه لتیان کمک نماید.

روش‌شناسی پژوهش

محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی شامل حوضه آبریز سد لتیان است که در محدوده سیاسی استان تهران و شهرستان شمیرانات قرار دارد (شکل ۱). حوضه آبریز لتیان در میان عرض جغرافیایی $35^{\circ} 37' 37''$ تا $35^{\circ} 55' 05''$ و طول جغرافیایی $51^{\circ} 34' 11''$ تا $51^{\circ} 34' 11''$ قرار گرفته است. این منطقه نسبتاً کوهستانی است و دارای ارتفاع متوسط ۲۲۴۷ متر است. از نظر مورفوتکتونیک، این حوضه در واحد البرز مرکزی قرار دارد و به دلیل نزدیکی به گسل‌های اصلی از جمله گسل مشا و گسل شمال تهران، دارای وضعیت تکتونیک فعالی است. رودخانه جاجرود به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین آب سد لتیان، اصلی‌ترین جریان سطحی دائمی این حوضه محسوب می‌شود. علاوه بر آن، رودخانه‌های افجه، کندرود (لوارک) و برگ‌جهان نیز از دیگر جریان‌های دائمی فعال در این حوضه آبریز هستند (محمدخان و فتح‌اله‌زاده، ۱۴۰۰).



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

روش تحقیق

در این پژوهش از تصاویر راداری سنتینل ۱ و مدل رقومی ارتفاعی ALOS PALSAR ۱۲/۵ به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای تحقیق، GMT و ArcGIS بوده است که به ترتیب به‌منظور اجرای روش سری زمانی SBAS و تهیه نقشه‌های مورد نظر استفاده شده است. این تحقیق در چند مرحله انجام شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

مرحله اول (ارزیابی وضعیت تکتونیک منطقه با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک): در این پژوهش به‌منظور ارزیابی وضعیت تکتونیک حوضه آبریز سد لتیان از ۸ شاخص ژئومورفیک استفاده شده است (جدول ۱). لازم به ذکر است که در این پژوهش به‌منظور جلوگیری از خطای انسانی، از شاخص‌هایی استفاده شده است که با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و به صورت نرم‌افزاری بدست می‌آیند. پس از ارزیابی وضعیت تکتونیک حوضه مورد استفاده بر اساس هر کدام از شاخص‌ها، به‌منظور ارزیابی کلی حوضه‌ها از نظر این شاخص‌ها و همچنین مقایسه وضعیت فعالیت تکتونیک آن‌ها، از شاخص ارزیابی نسبی فعالیت‌های تکتونیک (IAT) استفاده شده است.

جدول ۱. شاخص‌های مورد استفاده در پژوهش

شاخص	نماد	معادله	توضیحات
تقارن توپوگرافی	T	$T = Da/Dd$	Da فاصله خط وسط حوضه تا رودخانه اصلی از خط میانی حوضه آبریز و Dd فاصله خط میانی حوضه تا مرز حوضه است. این شاخص بین صفر تا یک متغیر است که مقدار صفر بیانگر تقارن و مقدار یک نشان دهنده عدم تقارن حوضه است.
انتگرال هیپسومتری	Hi	$H_i = (H_{mean} - H_{min}) / (H_{max} - H_{min})$	Hmax و Hmin به ترتیب حداکثر و حداقل ارتفاع و h میانگین ارتفاع حوضه است به‌عنوان شاخص و معیاری جهت تشخیص چرخه مرحله فرسایش چشم‌انداز استفاده می‌شود، مقادیر بالای آن (نزدیک به ۰/۵) بیانگر توپوگرافی جوان و هر چه مقادیر به صفر نزدیک شود گذر از مرحله بلوغ به پیری را شاهد خواهیم بود.
درصد عدم تقارن حوضه زهکشی	AF	$AF = 100 (Ar/At)$	در این رابطه Ar مساحت حوضه در سمت راست آبراهه اصلی (رو به پایین دست) و At مساحت کل حوضه است. در صورتی که حوضه دارای تعادل باشد، این شاخص برابر ۵۰ خواهد بود. مقادیر بیش‌تر از ۵۰ بیانگر عمل بالامدگی در ساحل راست و کم‌تر از ۵۰ بیانگر بالامدگی در ساحل چپ آبراهه اصلی است.
سینوسی رودخانه	S	$S = C / V$	C طول رودخانه و V طول مستقیم دره است. هرچه مقادیر این شاخص به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، بیانگر شدت فعالیت‌های تکتونیکی است و افزایش در مقدار آن بیانگر کاهش در فعالیت تکتونیکی منطقه و حاکی از نزدیک شدن رودخانه به حالت تعادلی است.
نسبت انشعاب حوضه	Br	$Br = \left(\frac{N_1}{N_2} + \frac{N_2}{N_3} + \dots + \frac{N_{i-1}}{N_i} \right) \frac{1}{i-1}$	i شماره رده رودخانه اصلی و n1، n2، n3... به ترتیب تعداد رودخانه‌های رده ۱، ۲، ۳... حوضه می‌باشند. مناطقی که دارای نسبت انشعاب بالایی هستند، بیانگر فعالیت‌های تکتونیکی بیش‌تر و جوان بودن حوضه است.
تراکم سطحی آبراهه‌ها	P	$P = \sum Li/A$	Li طول آبراهه‌ها به کیلومتر و A مساحت حوضه به کیلومتر مربع است. بالا بودن ضریب تراکم بیانگر تکتونیک فعال و حساسیت زیاد سازندهای زمین‌شناسی حوضه است.
نسبت شکل حوضه	Bs	$Bs = BI/Bw$	BI طول حوضه (فاصله پایین‌ترین ارتفاع حوضه تا دورترین نقطه از آن) و Bw عرض حوضه (در عریض‌ترین بخش آن) است. مقادیر بالای این شاخص، بیانگر حوضه‌های کشیده بوده و در نواحی فعال زمین‌ساختی است در حالی که مقادیر کوچک آن، حوضه‌هایی دایره‌ای شکل و نواحی غیر فعال را نشان می‌دهند.
ضریب گراولوس	Gi	$Gi = 28/0 P/\sqrt{A}$	P محیط حوضه و A مساحت حوضه است.

منبع: همدونی و همکاران، ۲۰۰۸؛ ده بزرگی و همکاران، ۲۰۱۰؛ گورابی، ۱۳۹۵

مرحله دوم (ارزیابی وضعیت تکتونیکی منطقه بر اساس تصاویر راداری): در این تحقیق به‌منظور ارزیابی میزان جابجایی عمودی حوضه مورد مطالعه، از روش تداخل‌سنجی راداری استفاده شده است. در این مرحله با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ مربوط به دوره زمانی دو ساله (ژانویه ۲۰۲۰ تا ژانویه ۲۰۲۲) و با استفاده روش سری زمانی SBAS، میزان جابجایی عمودی حوضه آبریز سد لتیان محاسبه شده است. در این مرحله از ۲۲ تصاویر راداری استفاده شده است (جدول ۲). تصاویر مورد استفاده دارای حالت مداری صعودی، نوع IW، فرمت SLC و پولاریزاسیون VV هستند. پس از تهیه تصاویر، به‌منظور پردازش تصاویر از سیستم عامل لینوکس^۱ و نرم‌افزار GMT استفاده شده است که برای این منظور در ابتدا پیش‌پردازش‌های لازم بر روی تصاویر انجام شده است. پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم، بر مبنای بیس‌لاین زمانی تصاویر، نقشه‌های اینترفروگرام منطقه تهیه شده است و سپس با استفاده از روش سری زمانی SBAS، نقشه میزان جابجایی حوضه مورد مطالعه تهیه شده است.

جدول ۲. تاریخ تصاویر راداری مورد استفاده

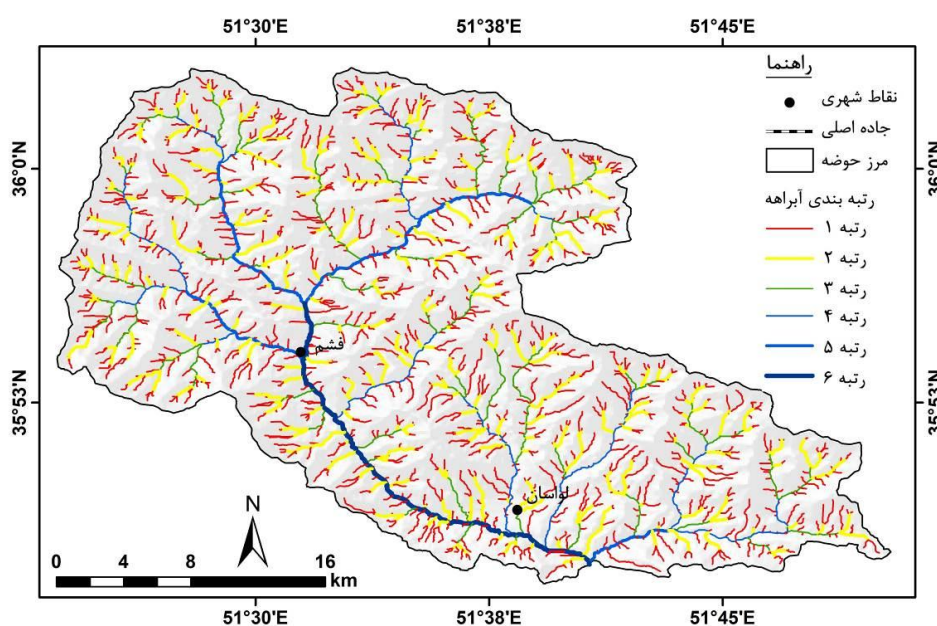
ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ
۱	۲۰۲۰/۰۱/۰۹	۹	۲۰۲۰/۱۰/۲۳	۱۷	۲۰۲۱/۰۸/۰۷
۲	۲۰۲۰/۰۲/۱۴	۱۰	۲۰۲۰/۱۱/۲۸	۱۸	۲۰۲۱/۰۹/۱۲
۳	۲۰۲۰/۰۳/۲۱	۱۱	۲۰۲۱/۰۱/۰۳	۱۹	۲۰۲۱/۱۰/۱۸
۴	۲۰۲۰/۰۴/۲۶	۱۲	۲۰۲۱/۰۲/۰۸	۲۰	۲۰۲۱/۱۱/۲۳
۵	۲۰۲۰/۰۶/۰۱	۱۳	۲۰۲۱/۰۳/۱۶	۲۱	۲۰۲۱/۱۲/۱۷
۶	۲۰۲۰/۰۷/۰۷	۱۴	۲۰۲۱/۰۴/۲۱	۲۲	۲۰۲۲/۰۱/۱۰
۷	۲۰۲۰/۰۸/۱۲	۱۵	۲۰۲۱/۰۵/۲۷	-	-
۸	۲۰۲۰/۰۹/۱۷	۱۶	۲۰۲۱/۰۷/۰۲	-	-

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

یافته‌ها و بحث

بررسی وضعیت هیدروژئومورفولوژی حوضه آبریز سد لتیان

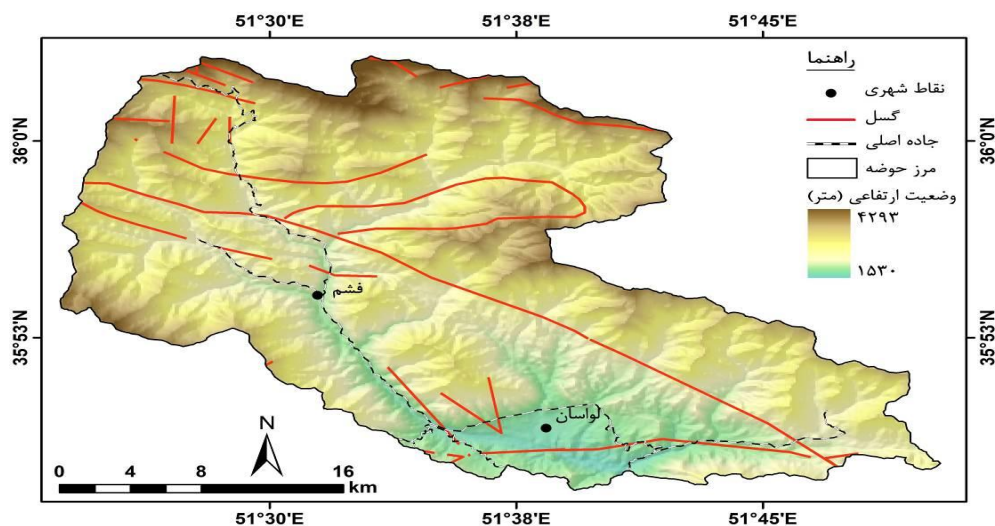
حوضه آبریز سد لتیان با وسعت ۷۰۱ کیلومترمربع، دارای ۱۴۸ کیلومتر طول محیط است. از نظر وضعیت شبکه زهکشی، پس از استخراج رودخانه‌های حوضه بر اساس مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر، نقشه رتبه‌بندی آبراهه‌ها با استفاده از روش استرالر تهیه شده است (شکل ۲) که بر اساس آن، شبکه زهکشی حوضه مورد مطالعه به ۶ رتبه تقسیم شده است. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده، مجموع طول آبراهه‌های حوضه مورد مطالعه حدود ۷۴۴ کیلومتر و طول رودخانه اصلی آن حدود ۴۲ کیلومتر است.



شکل ۲. نقشه رتبه‌بندی آبراهه‌های حوضه آبریز سد لتیان

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

حوضه آبریز سد لتیان از نظر تقسیمات مورفوتکتونیکی در واحد البرز مرکزی قرار دارد و همین مسئله سبب شده است تا از نظر تکتونیکی جزء مناطق فعال کشور باشد و همچنین دارای تراکم بالایی از خطوط گسلی باشد (شکل ۳). همچنین با توجه به موقعیت قرارگیری حوضه، بخش زیادی از وسعت آن را واحد کوهستان دربرگرفته است. حوضه آبریز سد لتیان در بین ارتفاع ۱۵۳۰ تا ۴۲۹۳ متری از سطح دریا قرار دارد و همین مسئله سبب شده است تا چشم‌انداز غالب منطقه را دامنه‌های پرشیب دربرگیرد.



شکل ۳. نقشه وضعیت ارتفاع و خطوط گسلی حوضه آبریز سد لتیان

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

ارزیابی وضعیت تکتونیکی حوضه آبریز لتیان بر اساس شاخص‌های مورفوتکتونیکی

در این پژوهش به منظور ارزیابی وضعیت تکتونیکی حوضه آبریز لتیان، ابتدا محدوده حوضه سد لتیان و شبکه زهکشی مورد نظر با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر استخراج شده است و سپس به ارزیابی وضعیت تکتونیکی این حوضه بر اساس شاخص‌های مورفوتکتونیکی پرداخته شده است. نتایج ارزیابی شاخص تقارن توپوگرافی معکوس (T) نشان داده است که ضریب این شاخص برای حوضه مورد مطالعه، ۰/۴۳ بوده است. با توجه به وضعیت ارتفاعی حوضه مورد مطالعه، ضریب شاخص انتگرال هیپسومتری (Hi) برای حوضه مورد مطالعه، ۰/۳۷ محاسبه شده است. نتایج ارزیابی شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی (AF) نشان داده است که ضریب این شاخص برای حوضه مورد مطالعه، ۳۰ بوده است. نتایج شاخص سینوسی رودخانه (S) بیانگر ضریب ۱/۲۴ برای حوضه مورد مطالعه بوده است. با توجه نتایج بدست آمده از رتبه‌بندی آبراهه‌ها، ضریب نسبت انشعاب حوضه (Br) برای محدوده مطالعاتی، ۳/۸ بوده است. شاخص تراکم سطحی آبراهه (P) که بر مبنای وسعت حوضه و مجموع طول آبراهه‌های حوضه بوده است، ۱/۱ بوده است. همچنین ضرایب مربوط به شاخص‌های شکل حوضه (Bs) و ضریب گراویلیوس (Gi) برای حوضه مورد مطالعه به ترتیب ۱/۵۱ و ۱/۵۶ بوده است (جدول ۳).

جدول ۳. نتایج محاسبه شاخص‌های مورد مطالعه

شاخص	معیارها						ضریب
T	مساحت حوضه (km)	طول حوضه (km)	عرض حوضه (km)	Dd (m)	عرض ساحل راست (km)	Da (m)	۰/۴۳
	۷۰۱	۴۵/۱	۱۵/۶	۸/۴	۵/۲	۳/۶	
Hi	Hmean (m)		Hmin (m)		Hmax (m)		۰/۳۷
	۲۵۶۳		۱۵۳۰		۴۲۹۳		
AF	Ar (km2)			At (km2)			۳۰
	۲۰۷			۶۰۱			
S	La			Ls			۱/۲۴
	۴۲/۴			۳۴/۱			
Br	تعداد رودخانه رتبه ۱	تعداد رودخانه رتبه ۲	تعداد رودخانه رتبه ۳	تعداد رودخانه رتبه ۴	تعداد رودخانه رتبه ۵	تعداد رودخانه رتبه ۶	۴
	۴۸۳	۲۱۱	۲۴	۸	۲	۱	
P	مساحت (km ²)			مجموع طول آبراهه (km)			۱/۱
	۷۰۱			۷۴۴/۴			
Bs	Bi (km)			Bw (km)			۱/۵۱
	۴۵/۱			۲۹/۹			
Gi	P (km)			A (km ²)			۱/۵۶
	۱۴۸			۷۰۱			

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

با توجه به اینکه در این تحقیق از ۸ شاخص استفاده شده است، پس از ارزیابی وضعیت تکتونیکی حوضه مورد مطالعه از نظر تمامی شاخص‌ها، به‌منظور ارزیابی کلی حوضه از نظر این شاخص‌ها و همچنین ارزیابی وضعیت فعالیت تکتونیکی آن، از شاخص ارزیابی نسبی فعالیت‌های تکتونیکی (IAT) استفاده شده است. در این شاخص، زیرحوضه‌ها از نظر فعالیت تکتونیکی به ۳ کلاس تقسیم می‌شوند که نحوه ی طبقه بندی آن‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج بررسی وضعیت تکتونیکی حوضه مورد مطالعه از نظر شاخص‌های مورد نظر نشان داده است که از نظر شاخص T، حوضه دارای وضعیت تکتونیکی نسبتاً فعال است. از نظر شاخص Hi، دارای وضعیت غیر فعال است. از نظر شاخص AF، دارای وضعیت فعال است. از نظر شاخص S، دارای وضعیت فعال است. از نظر شاخص Br، دارای وضعیت نسبتاً فعال است. از نظر شاخص p، دارای وضعیت فعال است. از نظر شاخص Bs، دارای وضعیت غیر فعال است. از نظر شاخص Gi، دارای وضعیت نسبتاً فعال است. مجموع نتایج بدست آمده از این بخش نشان داده است که حوضه مورد مطالعه از نظر اکثر شاخص‌ها دارای وضعیت تکتونیکی فعال و یا نسبتاً فعال است که این مسئله بیانگر فعال بودن منطقه از نظر تکتونیکی است.

جدول ۴. نحوه کلاسه‌بندی زیرحوضه‌ها از نظر فعالیت تکتونیکی (همدونی و همکاران، ۲۰۰۸)

ردیف	شاخص	طبقه ۱ (تکتونیک فعال)	طبقه ۲ (تکتونیک نسبتاً فعال)	طبقه ۳ (تکتونیک غیرفعال)	وضعیت حوضه	وضعیت فعالیت
۱	T	۰-۱/۶۶	۰/۳۳-۰/۶۶	۰-۰/۳۳	۰/۴۳	نسبتاً فعال
۲	Hi	بیش از ۰/۵	۰/۴-۰/۵	کم‌تر از ۰/۴	۰/۳۷	غیر فعال
۳	AF	$AF-50 > 15$	$AF-50 : 7-15$	$AF-50 < 7$	۳۰	فعال
۴	S	۱-۱/۵	۱/۵-۲	بیش از ۲	۱/۲۴	فعال
۵	Br	بیش از ۴	۳-۴	کم‌تر از ۳	۳/۸	فعال
۶	P	بیش از ۰/۶	۰/۵-۰/۶	کم‌تر از ۰/۵	۱/۱	فعال
۷	Bs	بیش از ۴	۳-۴	کم‌تر از ۳	۱/۵۱	غیرفعال
۸	Gi	بیش از ۲	۱/۵-۲	کم‌تر از ۱/۵	۱/۵۶	نسبتاً فعال

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

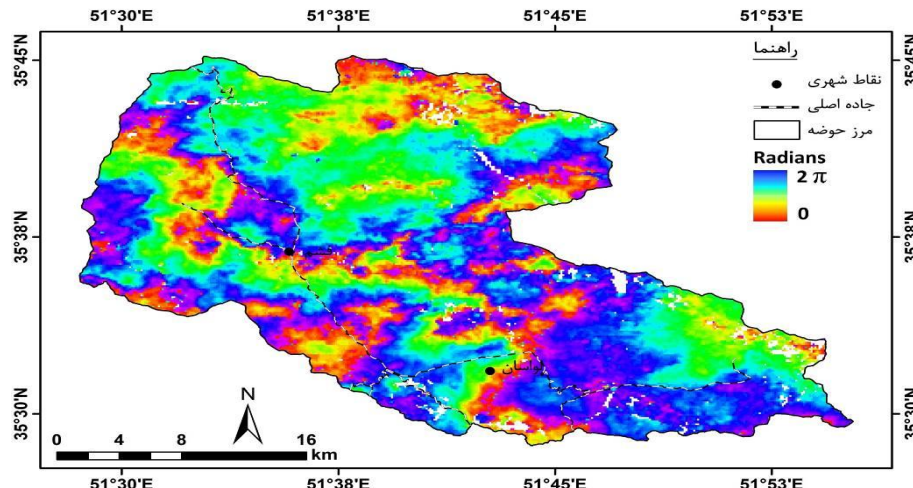
ارزیابی وضعیت جابجایی عمودی منطقه

در این پژوهش به‌منظور ارزیابی میزان فرونشست منطقه از تاریخ ۲۰۲۰/۰۱/۰۹ تا ۲۰۲۲/۰۱/۱۰، از ۲۲ تصویر راداری استفاده شده است و بر اساس بیس‌لاین زمانی، ۲۱ زوج تصویر به‌منظور تهیه نقشه‌های اینترفروگرام انتخاب شده است (جدول ۵). پس از انتخاب زوج تصاویر، اینترفروگرام‌های مورد نظر در این بازه زمانی تهیه شده است (شکل ۴).

جدول ۵. زوج تصاویر انتخاب شده جهت تهیه نقشه‌های اینترفروگرام

ردیف	زوج تصاویر	ردیف	زوج تصاویر	ردیف	زوج تصاویر
۱	۲۰۲۰/۰۲/۱۴ - ۲۰۲۰/۰۱/۰۹	۸	۲۰۲۰/۱۰/۲۳ - ۲۰۲۰/۰۹/۱۷	۱۵	۲۰۲۱/۰۷/۰۲ - ۲۰۲۱/۰۵/۲۷
۲	۲۰۲۰/۰۳/۲۱ - ۲۰۲۰/۰۲/۱۴	۹	۲۰۲۰/۱۱/۲۸ - ۲۰۲۰/۱۰/۲۳	۱۶	۲۰۲۱/۰۸/۰۷ - ۲۰۲۱/۰۷/۰۲
۳	۲۰۲۰/۰۴/۲۶ - ۲۰۲۰/۰۳/۲۱	۱۰	۲۰۲۱/۰۱/۰۳ - ۲۰۲۰/۱۱/۲۸	۱۷	۲۰۲۱/۰۹/۱۲ - ۲۰۲۱/۰۸/۰۷
۴	۲۰۲۰/۰۶/۰۱ - ۲۰۲۰/۰۴/۲۶	۱۱	۲۰۲۱/۰۲/۰۸ - ۲۰۲۱/۰۱/۰۳	۱۸	۲۰۲۱/۰۹/۱۲ - ۲۰۲۱/۱۰/۱۸
۵	۲۰۲۰/۰۷/۰۷ - ۲۰۲۰/۰۶/۰۱	۱۲	۲۰۲۱/۰۳/۱۶ - ۲۰۲۱/۰۲/۰۸	۱۹	۲۰۲۱/۱۱/۲۳ - ۲۰۲۱/۱۰/۱۸
۶	۲۰۲۰/۰۸/۱۲ - ۲۰۲۰/۰۷/۰۷	۱۳	۲۰۲۱/۰۴/۲۱ - ۲۰۲۱/۰۳/۱۶	۲۰	۲۰۲۱/۱۲/۱۷ - ۲۰۲۱/۱۱/۲۳
۷	۲۰۲۰/۰۹/۱۷ - ۲۰۲۰/۰۸/۱۲	۱۴	۲۰۲۱/۰۵/۲۷ - ۲۰۲۱/۰۴/۲۱	۲۱	۲۰۲۲/۰۱/۱۰ - ۲۰۲۱/۱۲/۱۷

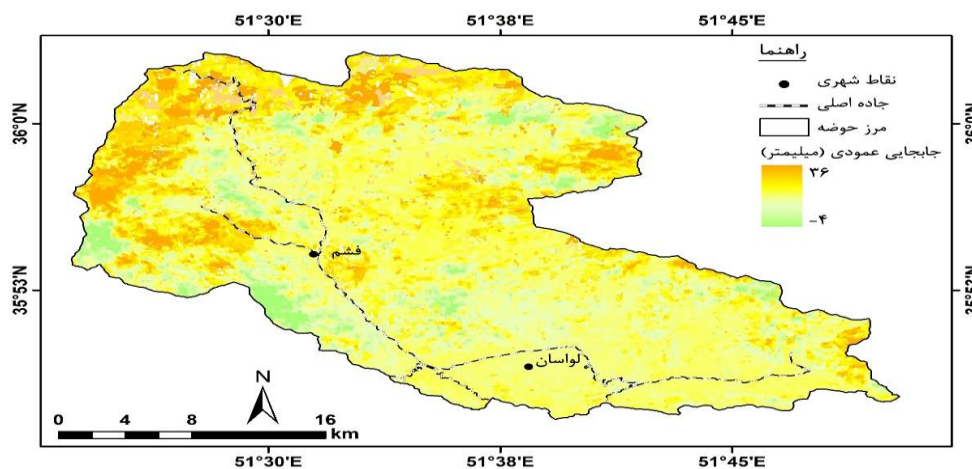
منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴



شکل ۴. نمونه‌ای از اینترفروگرام‌های تهیه شده (۲۰۲۱/۰۱/۰۳ تا ۲۰۲۱/۰۲/۰۸)

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

پس از تهیه نقشه‌های اینترفروگرام منطقه، با استفاده از روش سری زمانی SBAS، نقشه میزان جابجایی عمودی منطقه در طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ تهیه شده است (شکل ۵). بر اساس نتایج بدست آمده، حوضه مورد مطالعه در طی دوره زمانی دو ساله بین ۴- تا ۳۶ میلی‌متر جابجایی داشته است. در واقع، این حوضه با ۴ میلی‌متر پایین‌رفتگی و ۳۶ میلی‌متر بالاآمدگی مواجه شده است. آنالیز مکانی جابجایی صورت گرفته نشان داده است که در یک روند کلی، مناطق شمالی حوضه دارای بالاآمدگی بیش‌تری بوده است.



شکل ۵. نقشه میزان جابجایی عمودی از تاریخ ۲۰۲۱/۰۱/۰۳ تا ۲۰۲۲/۰۱/۱۰

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

تلفیق یافته‌ها

بر اساس نتایج حاصل از شاخص‌های مورفوتکتونیکی (جدول ۳)، حوضه آبریز سد لتیان از نظر پارامترهای مختلف ژئومورفومتری دارای ویژگی‌هایی است که بیانگر فعالیت تکتونیکی متوسط تا بالا در منطقه می‌باشد. شاخص تقارن توپوگرافی معکوس ($T=0.43$) و شاخص گراویلیوس ($Gi=1.56$) حاکی از وضعیت نسبتاً فعال بوده، در حالی که شاخص‌های $AF=30$ و $S=1.24$ و $P=1.1$ نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی بالا هستند. شاخص‌های $Hi=0.37$ و $Bs=1.51$ بیانگر نواحی با فعالیت غیرفعال یا کم‌تحرك بوده‌اند. با توجه به مجموع نتایج و طبقه‌بندی شاخص ارزیابی نسبی فعالیت‌های تکتونیکی (IAT)، منطقه به‌طور کلی در کلاس تکتونیک فعال تا نسبتاً فعال قرار می‌گیرد و به احتمال زیاد، نیروهای درونی زمین و تغییرات ساختاری نقش مهمی در شکل‌گیری مورفولوژی حوضه داشته‌اند.

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل جابجایی عمودی منطقه (شکل ۵) نیز این موضوع را تأیید می‌کند. بر اساس پردازش تصاویر راداری در بازه زمانی ژانویه ۲۰۲۰ تا ژانویه ۲۰۲۲، میزان جابجایی عمودی در محدوده حوضه بین ۴- تا ۳۶ میلی‌متر متغیر بوده است که این میزان تقریباً با نتایج بدست آمده از اسدی و همکاران (۱۴۰۳) که میزان بالاآمدگی زیرحوضه‌های لواسان را طی دوره‌های زمانی ۳ ساله (۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹) ۷۹

میلی‌متر برآورد کرده‌اند، مطابقت دارد. همچنین همانند زیرحوضه‌های لواسان، بیش‌ترین بالآمدگی در بخش‌های شمالی حوضه مشاهده شده و روند کلی حرکات عمودی، نشان‌دهنده‌ی بالآمدگی تکتونیکی در منطقه است. این تغییرات ارتفاعی با الگوی توپوگرافی و جهت‌گیری گسل‌های اصلی همخوانی دارد. در تلفیق دو دسته داده، می‌توان نتیجه گرفت که:

۱. شاخص‌های مورفوتکتونیکی به‌ویژه AF، S و P که به حساسیت نسبت به تغییرات ساختاری و شیب وابسته‌اند، با نتایج حاصل از جابجایی عمودی هم‌راستا هستند و به احتمال زیاد هر دو بیانگر فعالیت تکتونیکی در منطقه می‌باشند.
۲. همزمانی مقادیر نسبتاً بالا در شاخص‌های مربوط به زهکشی Br و P و مقادیر مثبت جابجایی عمودی در شمال حوضه، احتمال بالآمدگی تکتونیکی در امتداد گسل‌های فعال شمال تهران و لتیان را تقویت می‌کند.

نتیجه‌گیری

بررسی شاخص‌های تکتونیکی حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد که این منطقه از نظر اکثر شاخص‌های بررسی شده (AF-S-Br-P) دارای وضعیت فعالی است و همچنین از نظر شاخص‌های T و Gi دارای وضعیت نسبتاً فعال است. مجموع نتایج بدست آمده از ارزیابی وضعیت تکتونیکی حوضه آبریز سد لتیان بر اساس شاخص‌های ژئومورفیک نشان داده است که حوضه مورد مطالعه همانند حوضه آبریز کرج (یمانی و عزیزاده، ۱۳۹۵) و زیرحوضه‌های لواسان (اسدی و همکاران، ۱۴۰۳) از نظر تکتونیکی به‌صورت کلی فعال است و فرایندهای زمین‌شناسی مرتبط با جابجایی و تحرکات ساختاری در آن جریان دارد. همچنین، نتایج سری زمانی SBAS و نقشه‌های اینترفروگرام که جابجایی‌های عمودی منطقه را در بازه زمانی دو ساله (۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲) نشان می‌دهد، حاکی از وجود جابجایی‌های قابل توجه بین ۴- تا ۳۶ میلی‌متر است که بخش‌های شمالی حوضه بیش‌ترین میزان بالآمدگی را تجربه کرده‌اند. البته بالآمدگی منطقه می‌تواند نشان‌دهنده اثر ترکیبی فرایندهای تکتونیکی و غیرتکتونیکی باشد و تفسیر دقیق آن نیازمند پایش بلندمدت است. لازم به ذکر است که نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش بر مبنای تصاویر راداری و روش مورد استفاده بوده و بیانگر مقادیر تقریبی جابجایی هستند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، به‌منظور ارزیابی دقیق فعالیت‌های تکتونیکی در حوضه مورد مطالعه، توصیه می‌شود برنامه‌های پایش بلندمدت با استفاده از سامانه‌های رصد ماهواره‌ای و ایستگاه‌های زمینی (از محدودیت‌های تحقیق حاضر است) اجرا شود تا تغییرات جابجایی به‌طور دقیق و به‌موقع شناسایی گردد. همچنین انجام مطالعات زمین‌لرزه‌شناسی و بررسی گسل‌های فعال برای شناخت بهتر مخاطرات و تعیین نقاط پرخطر ضروری است. علاوه بر این، انجام مطالعات مهندسی ژئوتکنیک در نواحی با بیش‌ترین میزان جابجایی برای حفظ پایداری سازه‌ها و زیرساخت‌ها توصیه می‌شود. در نهایت، ارتقای آموزش و آگاهی‌بخشی به جوامع محلی درباره پیامدهای فعالیت‌های تکتونیکی و روش‌های مقابله با آن، نقش مهمی در کاهش آسیب‌های انسانی و مالی خواهد داشت.

حامی مالی

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهام نویسندگان در پژوهش

نویسنده اول: تدوین چارچوب نظری، نظارت علمی بر فرآیند پژوهش

نویسنده دوم: گردآوری و تحلیل داده‌ها و نگارش اولیه

تضاد منافع

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

تقدیر و تشکر

نویسندگان از تمامی افرادی که در گردآوری داده‌های مورد نیاز با آن‌ها همکاری کرده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

۱. اسدی، معصومه؛ گنجائیان، حمید و جاودانی، مهناز (۱۴۰۳). تحلیل وضعیت تکتونیکی زیرحوضه‌های لواسان با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و تصاویر راداری. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۵(۱)، ۷۳-۸۸. <https://doi.org/10.22108/gep.2023.133365.1518>
۲. آرین، مهران و فرشی، منوچهر (۱۳۸۹). *تکتونیک/یران*. انتشارات مربع آبی، تهران.

۳. درخشانی، رضا و سالاری، شیرین (۱۳۹۵). تکتونیک فعال. انتشارات جهاد دانشگاهی استان کرمان، کرمان.
۴. شه‌ماری، رفعت (۱۳۹۶). ارزیابی فعالیت‌های نوزمین‌ساخت در حوضه‌های آبخیز غرب استان گیلان. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۶ (۲)، ۱۴۸-۱۶۵. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1396.6.2.10.9>
۵. علی‌پور، رضا و جهانگیری، علی. (۱۳۹۹). ارزیابی تکتونیک فعال مرتبط با تاقدیس قلاجه با استفاده از ناهنجاری سلسله مراتبی شبکه آبراهه‌ها، غرب ایران. *فصلنامه کوآترنری ایران*، ۶ (۴)، ۵۲۷-۵۴۶. <https://doi.org/10.22034/irqua.2021.702403>
۶. گنجائیان، حمید (۱۴۰۲). تحلیل وضعیت تکتونیکی طاق‌دیس‌های شمال غربی زاگرس و ارتباط آن با کانون‌های زمین‌لرزه. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۲ (۴)، ۲۷۵-۲۹۰. <https://doi.org/10.22067/geoch.2022.75370.1182>
۷. گنجائیان، حمید؛ یمانی، مجتبی؛ گورابی، ابوالقاسم و مقصودی، مهران (۱۳۹۹). انطباق شاخص‌های مورفوتکتونیک با کانون‌های زمین‌لرزه در زاگرس شمال غرب (حوضه‌های سیروان و قره‌سو). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۱ (۴)، ۱۱۳-۱۳۰. <https://doi.org/10.22108/gep.2021.124247.1335>
۸. گورابی، ابوالقاسم و احمد نوحه‌گر (۱۳۸۶). شواهد ژئومورفولوژیکی تکتونیک فعال حوضه آبخیز درکه. *جغرافیای طبیعی*، ۶۰ (۱)، ۱۹۶-۱۷۷. <https://www.sid.ir/paper/5491/fa>
۹. گورابی، ابوالقاسم و امامی، کامیار. (۱۳۹۶). تأثیرات نوزمین‌ساخت بر تغییرات مورفولوژیک حوضه‌های زهکشی سواحل مکران، جنوب شرق ایران. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۶ (۱)، ۸۹-۷۴. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1396.6.1.5.2>
۱۰. محمدخان، شیرین و فتح‌اله‌زاده، محمد (۱۴۰۰). بررسی خصوصیات هیدروژئومورفولوژی حوضه آبریز سد لتیان با استفاده از مدل SWOT، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۹ (۴)، ۲۱۳-۲۰۳. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2021.131023>
۱۱. مختاری، داود (۱۳۸۴). نقش نوزمین‌ساخت در تکامل سیستم‌های رودخانه‌ای در کوآترنر مورد نمونه: رودخانه‌های دامنه شمالی میشوداغ. *علوم زمین*، ۵۷ (۱۵)، ۷۷-۶۴. https://www.gsjournal.ir/article_218689.html
۱۲. نایب‌زاده، فرین؛ مددی، عقیل و عزیزی، قاسم (۱۳۹۷). بررسی فعالیت تکتونیکی در حوضه دشت اشتهارد با استفاده از تداخل‌نگار راداری. *مجله جغرافیا و پایداری محیط*، ۸ (۱)، ۲۷-۱۵. https://ges.razi.ac.ir/article_894.html
۱۳. نگهبان، سعید؛ گنجائیان، حمید؛ سعیدی، شهلا و قاسمی، افشان (۱۳۹۹). مطالعه جابه‌جایی قائم حاصل از زمین‌لرزه ۹/۸/۱۷ ترکمانچای با استفاده از روش InSAR، فیزیک زمین و فضا، ۴۶ (۳)، ۴۵۶-۴۴۵. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2020.295046.1007182>
۱۴. یمانی، مجتبی؛ گورابی، ابوالقاسم؛ مقصودی، مهران و محبوبی، صدیقه. (۱۴۰۰). تأثیر نوزمین‌ساخت بر ژئومورفولوژی گالی‌ها در دشت‌سرهای جنوب البرز شرقی (محدوده گرمسار- سمنان). *پژوهش‌های دانش زمین*، ۱۱۲ (۱)، ۱۵۱-۱۳۱. <https://doi.org/10.52547/esrj.12.1.131>
۱۵. یمانی، مجتبی و علیزاده، شهناز (۱۳۹۵). بررسی فعالیت‌های نوزمین‌ساخت حوضه آبخیز کرج از طریق شاخص‌های ژئومورفیک. *جغرافیای طبیعی*، ۹ (۳۱)، ۱۸-۱. <https://www.sid.ir/paper/185050/fa>
16. Agarwal, C. S. (1998). Study of drainage pattern through aerial data in Naugarh area of Varanasi District, U.P. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 26, 169–175. <https://doi.org/10.1007/BF02990795>
17. Arefpanah, S., & Sharafi, A. (2022). Calculated the tectonic activity of catchments in the Saez geomorphology unit (Iran and Kurdistan) using morphometric indices. *JoCEF*, 3(2), 61–66. <https://doi.org/10.38094/jocf30253>
18. Chen, Y., Ding, R., Zhang, S., Jiang, D., Li, L., & Hua, D. (2024). Characteristics and tectonic implications of the geomorphic indices of the watersheds around the Lijiang–Jinpingshan Fault. *Remote Sensing*, 16(20), 3826. <https://doi.org/10.3390/rs16203826>
19. Deh Bozorgi, M., Pour Kermani, M., Arian, M., Matkan, A. A., Motamedi, H., & Hosseini Asl, A. (2010). Quantitative analysis of relative tectonic activity in the Sarvestan area. *Geomorphology*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.05.002>
20. El-Rayes, A. E., Hegazi, A. M., & Arnous, M. O. (2025). Morpho-tectonic hazard zonation over rift shoulder domains utilizing geomorphic indices and seismicity data: An example from Wadi Ghweiba Basin, Northwestern Gulf of Suez coast, Egypt. *Journal of Coastal Conservation*, 29, 76. <https://doi.org/10.1007/s11852-025-01159-1>
21. Ganjaeian, H. (2024). Spatial and temporal analysis of earthquakes in Iran during the years 1907 to 2023. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 222–243. <https://doi.org/10.22067/geoch.2024.87246.1470>
22. Ganjaeian, H. (2025). Evaluating the seismic potential of megacities in Iran. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 33(132), 173–188. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2024.2019284.3047>

23. Ganjaeian, H., Yamani, M., Goorabi, M., & Maghsoudi, M. (2024). Evaluating the impacts of the earthquake in Ezgeleh, Kermanshah (Iran) (occurred on 2017/11/12). *Current Research in Environmental Science and Ecology Letters*, 1(1), 1–10. <https://doi.org/10.33140/CRESEL.01.01.06>
24. Guarnieri, P., & Pirrotta, C. (2008). The response of drainage basins to the late Quaternary tectonics in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily). *Geomorphology*, 95, 260–273. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.013>
25. Guo, J., Xu, S. H., & Fan, H. (2017). Neotectonic interpretations and PS-InSAR monitoring of crustal deformations in the Fujian area of China. *Open Geosciences*, 9, 126–132. <https://doi.org/10.1515/geo-2017-0010>
26. 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, 150–173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.004>
27. Ioannis, M. T., Ioannis, K. K., & Pavlides, S. (2006). Tectonic geomorphology of the easternmost extension of the Gulf of Corinth (Beotia, central Greece). *Tectonophysics*, 453, 211–232. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.06.015>
28. Kale, V. S., Sengupta, S., Achyuthan, H., & Jaiswal, M. K. (2014). Tectonic controls upon Kaveri River drainage, cratonic Peninsular India: Inferences from longitudinal profiles, morphotectonic indices, hanging valleys and fluvial records. *Geomorphology*, 227, 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.07.027>
29. Khan, S. D., Faiz, M. I., Gadea, C. A., & Ahmad, A. (2023). Study of land subsidence by radar interferometry and hot spot analysis techniques in the Peshawar Basin, Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(1), 173–184. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.02.001>
30. Kumar, N., Dumka, R. K., Mohan, K., & Chopra, S. (2022). Relative active tectonics evaluation using geomorphic and drainage indices in Dadra and Nagar Haveli, western India. *Geodesy and Geodynamics*, 13(3), 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.01.001>
31. Longkumer, L., Luirei, K., Moiya, J. N., & Thong, G. T. (2019). Morphotectonics and neotectonic activity of the Schuppen Belt of Mokokchung, Nagaland, India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 170, 138–154. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2018.11.010>
32. Nautiyal, M. D. (2024). Morphometric analysis of a drainage basin, district Dehradun, Uttar Pradesh. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 22(4), 251–261. <https://doi.org/10.1007/BF03026526>
33. Necula, N., Niculita, M., & Floris, M. (2018). Using Sentinel-1 SAR data to detect earth surface changes related to neotectonics in the Focșani Basin (Eastern Romania). *PeerJ Preprints*, 6, e27084v1. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.27084v1>
34. Razi, P., Sumantyo, J. T. S., Chua, M. Y., Perissin, D., & Tadono, T. (2023). Monitoring of tectonic deformation in the seismic gap of the Mentawai Islands using ALOS-1 and ALOS-2. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 30. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.06012>
35. Sahu, S. R., Rawat, K. S., & Singh, S. K. (2024). Analysis of drainage morphometry and spectral indices using Earth observation datasets in Palar River basin, India. *Discover Geoscience*, 2, 41. <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00038-w>
36. Shen, K., Dong, S., & Wang, Y. (2023). Active tectonics assessment using geomorphic and drainage indices in the Sertengshan, Hetao Basin, China. *Remote Sensing*, 15(13), 3230. <https://doi.org/10.3390/rs1513323>
37. Talampas, W., & Cabahug, R. (2018). Morphotectonic characteristics of the Iponan River watershed in Cagayan de Oro City, Philippines. *Mindanao Journal of Science and Technology*, 16, 115–131. <https://www.researchgate.net/publication/329915674>