Physical Geography ResearchQuarterly

Online ISSN: 2423-7760

Journal Homepage: jphgr.ut.ac.ir

Evaluating the effects of fault tectonics on the geomorphology of Zanjanrud basin using remote-sensing and geomorphometry techniques

Abolghasem Goorabi [1], Mojtaba Yamani [2], Shirin Mohammadkhan [3], Seyyed Javad Hosseini [4]

1. *Corresponding Author, Deoartment of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*
Email: goorabi@ut.ac.ir
2. *Deoartment of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*
Email: myamani@ut.ac.ir
3. *Deoartment of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*
Email: shirinmkh@ut.ac.ir
4. *Deoartment of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*
Email: sjhoseini@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:
Received:
1 April 2023
Received in revised form:
28 May 2023
Accepted:
29 June 2023
Available online:
2 August 2023

Keywords:
Active Tectonics, Anomaly, Geomorphometry, Hydrogeomorphology, Zanjanrud.

ABSTRACT

The geomorphology of the Zanjanroud basin is affected by the active tectonic zones resulting from the interaction of the Soltanieh, Zanjan, Tarem, and Manjil faults and the faults that have been investigated more closely in this research. The interaction of these faults has made this basin in the form of a small high plateau, heterogeneous compared to the surrounding areas and a suitable place for the establishment of human settlements. In this research, remote sensing and geomorphometric techniques have been used to identify the lineaments and tectonic evidence in order to discover the tectonic effect on the geomorphology of the basin. The contour lines have been converted into a map after checking with the help of telemetry, geomorphometry and field techniques. Then, by analyzing and interpreting the evidence, the relationship between the dynamic pattern of the faults and its effects on the morphology of different landforms is presented with an emphasis on the interactive reconstruction of drainage networks and faults. The results show that the active tectonics of the faults are concentrated towards the centre of the basin and Zanjanroud area. On the other hand, the compliance of the morphology and topographical trends of the basin, as well as the Zanjan River canal and many drainages with the extraction lines with the help of geomorphometric techniques, clearly shows the effectiveness of geomorphometry to evaluate and prove the impact of terraforming on the geomorphology of the basins. Although no destructive earthquake has been reported in the region, But the presence of morphological evidence and the interruption of Quaternary to Holocene deposits indicate the active deformation of the region. Therefore, it seems that the fault systems of the basin have the potential to create earthquakes with a much higher magnitude than what has happened so far, which indicates the necessity of planning based on a detailed study of the faults in the region.

Cite this article: Goorabi, A., Yamani, M., Mohammadkhan, Sh., & Hosseini, S. J. (2023). Evaluating the effects of fault tectonics on the geomorphology of Zanjanrud basin using remote-sensing and geomorphometry techniques. *Physical Geography Research Quarterly*, *55* (2), 89-110
http://doi.org/ 10.22059/JPHGR.2023.354037.1007741

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press
DOI: 10.22059/JPHGR.2023.354037.1007741

Extended Abstract

Introduction

Understanding the geological conditions of each region and basin, along with other influencing factors, has a significant role in understanding the governing processes. Zanjanrud basin stands out as a small local plateau and in a heterogeneous manner with the topographic alignment of the surrounding area. In this research, an attempt was made to evaluate the tectonic effect on the geomorphology of the Zanjanrud basin using remote-sensing and geomorphometric techniques. The main objective of the research was to investigate the morphological pattern of the Zanjanrud bed and its relationship with active fault tectonics.

Methodology

In this research, remote sensing and geomorphometric techniques, along with field observations, were main tools of investigating and evaluating the effects of faulting on the geomorphology of Zanjanrud basin. The data used were Sentinel-2, Landsat- 8 & 9, Quick-bird data, SRTM-DEM 90 & 30-meter, and the DEM 10-meter. The data were used to extract geomorphometric indicators and enhancement of the morphotectonic elements and geomorphometric analyzes and evaluation of the effect of faults on the landscape and landforms of Zanjanrud basin. In addition, in this regard, field surveys have been conducted to validate remote sensing and geomorphometric findings and prepare ground truth data for comparison and accuracy evaluation.

Different software (ENVI, SAGA, MicroDEM, ArcGIS, GRASS) are used to geomorphometric analysis of morphometric parameters, extraction of geomorphometric indices and characterization of morphotectonic elements. In this research, by extracting the basic parameters of the earth's surface, the elements and parameters of the topographic surface have been identified and, based on them, the anomalies of the topographic surface have been detected. Neotectonic and faulting are among the most important factors causing anomalies in topographical surfaces.

Results and Discussion

In this research, we tried to enhancment of the fault maps and the topographic, hydrological and structural trends of the basin that are used to enhancement and documenting the anomalies of the topographic surface including the effect of faults and fracture systems in the area. The map of hill-shade parameters and indicators, profile and plan curvature, and topographic surface roughness index have clearly enhanced the effect of basin faults. In the meantime, two fault systems have been confirmed in the basin with high certainty. Geomorphological analysis based on high-resolution images, digital elevation models and field observations made it possible to estimate the evolutionary pattern in the form of these active structures. Although the focus of the current research is on Zanjanrud, which almost follows the extension of the Zanjan Fault, but in order to understand the dynamic pattern of faults and their effects on Zanjanrud, neotectonic evidence based on basin geomorphometry has also been discussed.

Conclusion

In general, the results of this research are:

–Neotectonic evidences: Examining the neotectonic evidences show that the faults in the region are active faults and have a high potential for seismic activity by cutting Quaternary sediments.

–Deformation of Zanjanrud Basin: This study showed that Zanjanrud Basin has been affected by four main fault systems and several sub-faults with different scales. These changes have forced the formation of mountain, foothills, plains and changing the course of Zanjanrud.

–Tectonic patterns of the basin: Zanjanrud basin is exposed to complex tectonic stress patterns due to its geographical location and location at the meeting points of Alborz (western), Talash and Central Iran morphotectonic units. These tectonic stress patterns include north-south convergent movement in the direction of Arabia-Eurasia. Also, the performance of regional-district-local units has also played a role in the formation of the Zanjanrud basin.

−Zanjan is a fault plain: it seems that the subsidence resulted from the intersection and interaction of two northwest-southeast fault zones and north-south have a role in the formation of the plain. Zanjan. Also, the simultaneous and active action of the faults have caused morphological anomalies in the topographical level in the Zanjan river basin.

−Anomaly of Zanjanrud channel and heterogeneous topography in Zanjan plain and basin: The northern part of Zanjanrud basin has two main lines that continue towards the south. These lines have caused the interruption and displacement of Quaternary sediments on the level of the plain, barracks, beaches and Zanjan river channel.

This research shows that the morphotectonic evidence of Zanjanrud basin indicates the presence of faults and active fracture systems in the region, which has a significant effect on the formation of morphological and topographic anomalies in Zanjanrud basin.

Funding
There is no funding support.

Authors' Contribution
All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest
Authors declared no conflict of interest.

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

فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی

شاپا الکترونیکی: 2423-7760

Journal Homepage: jphgr.ut.ac.ir

ارزیابی اثرات زمین‌ساخت گسلی بر ژئومورفولوژی حوضه زنجان‌رود با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی و ژئومورفومتری

ابوالقاسم گورابی [۱]، مجتبی یمانی [۲]، شیرین محمدخان [۳]، سید جواد حسینی [۴]

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: goorabi@ut.ac.ir

۲. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: myamani@ut.ac.ir

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

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

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۱/۱۲

تاریخ بازنگری:
۱۴۰۲/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۴/۰۸

تاریخ چاپ:
۱۴۰۲/۰۵/۱۱

واژگان کلیدی:
تکتونیک فعّال،
زنجان‌رود،
ژئومورفومتری،
ناهنجاری،
هیدرو ژئومورفولوژی

چکیده

ژئومورفولوژی حوضه زنجان‌رود متأثر از زون‌های تکتونیکی فعّال حاصل از عملکرد تعاملی گسل‌های سلطانیه، زنجان، طارم، منجیل و گسل‌هایی است که در این پژوهش مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفته‌اند. تعامل این گسل‌ها این حوضه را به شکل یک فلات کوچک مرتفع ناهمگون نسبت به مناطق پیرامونی و محل مناسبی برای استقرار سکونتگاه‌های انسانی ساخته است. در این پژوهش برای کشف تأثیر تکتونیک بر ژئومورفولوژی حوضه از تکنیک‌های دورسنجی و ژئومورفومتری جهت شناسایی خطواره‌ها و شواهد زمین‌ساختی استفاده شده است. خطواره‌ها پس از بررسی به کمک تکنیک‌های دورسنجی، ژئومورفومتری و میدانی تبدیل به نقشه شده‌اند. سپس با تحلیل و تفسیر شواهد، ارتباط الگوی دینامیک گسل‌ها کشف و اثرات آن بر مورفولوژی لندفرم‌های مختلف با تأکید بر نو زمین‌ساخت تعاملی شبکه‌های زهکشی – گسل‌ها ارائه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تکتونیک فعّال گسل‌ها به سمت مرکز حوضه و محل زنجان‌رود متمرکز است. از طرفی تبعیت مورفولوژی و روندهای توپوگرافیک مختلف حوضه و همچنین کانال زنجان‌رود و بسیاری از زهکش‌ها با خطواره‌های استخراجی به کمک تکنیک‌های ژئومورفومتری، به‌وضوح کارایی ژئومورفومتری جهت ارزیابی و اثبات تأثیر زمین‌ساخت بر ژئومورفولوژی حوضه‌ها را نمایان می‌سازد. اگر چه زلزله مخربی در منطقه گزارش نشده؛ ولی وجود شواهد مورفولوژیک و قطع نهشته‌های کواترنر تا هولوسن بیانگر تغییر شکل فعّال منطقه هستند. براین‌اساس به نظر می‌رسد سیستم‌های گسلی حوضه پتانسیل ایجاد زمین‌لرزه‌های با بزرگایی بسیار بالاتر از آنچه تاکنون رخ داده‌اند را دارند که این حاکی از ضرورت برنامه‌ریزی بر مبنای مطالعه دقیق گسل‌های منطقه است.

استناد: گورابی، ابوالقاسم؛ یمانی، مجتبی؛ محمدخان، شیرین و حسینی، سید جواد. (۱۴۰۲). ارزیابی اثرات زمین‌ساخت گسلی بر ژئومورفولوژی حوضه زنجان‌رود با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی و ژئومورفومتری. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۵ (۲)، ۱۱۰-۸۹.

http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.354037.1007741

© نویسندگان

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

DOI: 10.22059/JPHGR.2023.354037.1007741

مقدمه

ایران بخشی از کمربند کوه‌زایی بزرگ آلپ – هیمالیا و حاصل همگرایی صفحات عربستان، اوراسیا، هند و اقیانوس هند است. بررسی‌های ژئو دینامیک نرخ این همگرایی و در نتیجه کوتاه شدگی را حدود ۲۲ تا ۲۵ میلی‌متر در سال نشان می‌دهند (Masson et al,2005; Vernant et al.,2004). نیروی حاصل از همگرایی حین و ضمن کوتاه شدگی، سبب ایجاد درزه‌ها، گسل‌ها، چین‌ها، فرونشینی و بالاآمدگی‌ها در قلمرو سرزمین ایران شده است. این تغییرات عمده بدون شاهد نبوده و شواهد فراوانی از عملکرد گذشته و حال آن‌ها بر چهره ناهمواری‌ها ثبت و نقش بسته‌اند. شواهدی که پژوهشگران طی پژوهش‌های خود از آن‌ها به‌مثابه کلیدهایی برای حل مسائل تکتونیک، مورفوتکتونیک، الگوی دینامیک گسل‌ها و میکروپلیت‌های درگیر و حتی ارزیابی‌های نو زمین‌ساخت منطقه‌ای جهت مدیریت و برنامه‌ریزی‌های مختلف محیطی استفاده کرده‌اند (گورابی، ۱۳۹۸).

زمین‌لرزه‌ها یکی از شواهد مهم تکتونیک فعّال و پویایی هر منطقه هستند. وقوع زمین‌لرزه‌های تاریخی بزرگ (حداقل ۴۵۰ زمین‌لرزه بزرگ از ۶۰۰ سال قبل از میلاد) به همراه زمین‌لرزه‌های بزرگی که هر ۱۰ سال یکبار ایرانیان با آن دست‌وپنجه نرم می‌کنند (بربریان، ۱۳۹۵)، همگی دلالت بر تداوم همگرایی و وجود نیروهای زمین‌ساختی حال حاضر است. علاوه بر زمین‌لرزه‌ها، تحمیل این نیرو بر عناصر لندفرمی سبب پیدایش تغییرات قابل‌توجه ژئومورفیک متناسب با مکانیسم گسلش، چین‌خوردگی و نرخ فعّالیت می‌شود. این تغییرات می‌توانند گستره وسیعی از پدیده‌های طبیعی و انسانی را در برگیرد. در این میان برخی لندفرم‌ها نسبت به تغییرات آرام تکتونیک فعّال حساس بوده و این تغییرات را در مورفولوژی خود ثبت و مستند می‌کنند.

فرایندهای تکتونیک فعّال با تغییر شکل، شیب، الگو و فرم سطحی رودخانه، ایجاد آبشار و دریاچه در مسیر رودخانه و در حالت نرخ کم به طور نامحسوس بر استفاده از منابع آبی (مانند رودخانه‌ها) تأثیر می‌گذارند. این تغییر شکل‌ها می‌توانند به‌صورت آرام و یا در هنگام وقوع زلزله به طور ناگهانی مسیر و شیب لندفرم‌های هیدروژئومورفیک، زهکش‌ها و رودخانه را تغییر دهند. رودخانه‌های آبرفتی، همانند زنجان‌رود، یکی از بهترین اشکال ژئومورفولوژیک هستند که چگونگی تأثیر و تعامل تکتونیک فعّال با رودخانه و چشم‌اندازهای آن را به نمایش می‌گذارند (Schumm et al, 2000).

نهشته‌های کوهپایه‌ای و رودخانه‌ای ضمن ثبت نوسانات اقلیمی و دینامیک تکتونیک گسل‌ها در خود، با ساخت لندفرم‌ها امکان تشخیص الگوی به‌وجودآورنده آن‌ها و کمّیت و کیفیت عوامل مؤثر در پیدایش آن‌ها را فراهم می‌کنند. در واقع افزایش و کاهش شیب و به دنبال آن حفر و رسوب‌گذاری در شبکه‌های رودخانه‌ای توسط سه عامل اصلی کنترل می‌شود: ۱) تغییرات سطح اساس ۲) نوسان آب‌وهوا و تغییر اقلیم و ۳) فعّالیت تکتونیکی. ماهیت و ضخامت نهشته‌ها و الگوی لندفرم‌های حاصل از عملکرد این سه عامل اطلاعاتی در مورد شدت فرسایش، پتانسیل انتقال رسوب و میزان تغییر شکل را ارائه می‌دهد.

چشم‌انداز هر لندفرم مرهون ترکیب نیروهای زمین‌ساختی و اقلیمی است. با تغییر شکل زمین توسط فرایندهای تکتونیکی، ارتفاع سطح زمین به‌صورت محلی تغییر کرده و این به نوبه خود بر سرعت فرایندهای ژئومورفیک که وابسته به ارتفاع و شیب و به‌طورکلی فرم زمین هستند، تأثیر می‌گذارد و ازاین‌رو فرایندهای تکتونیک و ژئومورفیک و نتایج آن‌ها درهم‌تنیده شده‌اند (Raj, 2012).

فرایندهای تکتونیک فعّال می‌توانند با تغییر شیب، الگوی رودخانه یا ایجاد دریاچه‌هایی که بر ناوبری رودخانه و کنترل سیل تأثیر می‌گذارد، استفاده از منابع رودخانه را به‌آرامی تحت‌تأثیر خود قرار دهند. تغییر شکل طی زلزله می‌تواند به طور

ناگهانی مسیر و شیب رودخانه را تغییر دهد. چنانچه به دنبال چگونگی تأثیر تکتونیک فعّال بر چشم‌انداز از طریق تعامل با رودخانه‌ها باشیم، رودخانه‌های آبرفتی، مانند بخش قابل‌توجهی از زنجان‌رود، بسیار مناسب هستند (Schumm et al, 2000).

مطالعات حوضه‌های رودخانه‌ای بر اساس استفاده از شاخص‌های مورفومتریک مرتبط با شکل‌ها، تغییرات ارتفاعی، شبکه‌های رودخانه و نیمرخ رودخانه‌ها نقش مهمی در ارزیابی فعّالیت‌های زمین‌ساخت نسبی دارند که عموماً به‌عنوان نرخ متغیر بالاآمدگی سطح زمین تلقی می‌شود. طی دهه گذشته علاقه زیادی به مورفومتری حوضه‌های رودخانه در ژئومورفولوژی تکتونیک نشان‌داده‌شده که این امر حداقل به دو علت بوده است: نخست، حوضه‌های رودخانه‌ای نمایانگر واحدهای مرجع با مرزهای کاملاً مشخص هستند که شاخص‌های مورفومتریک مربوط به نمای سطحی (دوبعدی)، مانند نسبت گردی یا کشیدگی حوضه، و تغییرات ارتفاعی (برای مثال، انتگرال هیپسومتری، ناهمواری نسبی، شیب متوسط) را می‌توان به‌وضوح به آن نسبت داد؛ دوم، پیدایش مدل‌های رقومی ارتفاع و پیشرفت سریع در نرم‌افزارهای تخصصی که به تعیین حدود آسان، سریع و عینی این حوضه‌ها کمک می‌کند (Różycka & Migoń, 2021). عامل دیگری که نباید فراموش کرد، پیشرفت دانش ژئومورفومتری است (گورابی، ۱۴۰۲). مورفومتری رقومی به کمک تصاویر ماهواره‌ای امکان ارزیابی سریع همبستگی‌های تکتونیکی را فراهم آورده است (Makrari et al., 2022). به‌عنوان‌مثال تکنیک تحلیل سایه‌روشن[1] می‌تواند برای شبیه‌سازی اثر مصنوعی مورفولوژی به کار رود (Siahaan et al., 2022). محققان بسیاری به بررسی وضعیت زمین‌ساخت حوضه‌ها با استفاده از شاخص‌های مورفومتری پرداخته‌اند که به چند مورد از آخرین پژوهش‌ها اشاره می‌شود. عبدالله و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی وضعیت نوین ساخت غرب دریاچه دوکن کردستان عراق با استفاده از روش‌های ژئومورفومتری این منطقه را متأثر از برخورد صفحه عربستان و اوراسیا دارای فعالیت قابل‌توجه ارزیابی کردند. گوتام و سینگ (۲۰۲۳) با استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیک، حوضه نانداکینی هند را از نظر پویایی تکتونیکی در رده فعال عنوان کردند. سیاهان و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تکتونیک فعّال حوضه کرونگ‌رایا اندونزی بر اساس ویژگی‌های مورفومتریک پرداختند و اشاره کردند ناهنجاری‌های مورفومتریک منطقه دلیل بر فعالیت تکتونیکی است. از جمله منابع داخلی نیز اسفندیاری و نظافت‌تکله (۱۴۰۲) فعالیت‌های نئوتکتونیکی و توان لرزه‌خیزی گسل‌ها را در حوضه نیر اردبیل مورد ارزیابی و تحلیل قرار داده و منطقه موردنظر را دارای وضعیت تکتونیکی متوسط تشخیص دادند. عابدینی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی فعالیت‌های نئوتکتونیکی با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک حوضه کوزه‌توپراقی پرداختند و بیشتر زیرحوضه‌های این منطقه را دارای سطح فعالیت تکتونیکی متوسط قلمداد کردند. مومی‌پور و معاوی (۱۴۰۱) شرایط تکتونیک و فرسایش در حوضه سد شهید عباسپور را با تکنیک‌های ژئومورفومتری تحلیل کردند و نتایج آن‌ها حاکی از متعادل بودن حوضه از نظر هیپسومتری و متأثر بودن سیمای توپوگرافیک و ژئومورفیک حوضه موردمطالعه از فعالیت‌های تکتونیک است که نتیجه آن پستی‌وبلندی زیاد و کج‌شدگی حوضه می‌باشد.

روش‌های ارزیابی ژئومورفیک فرایندها در رودخانه‌های آبرفتی، لندفرم‌های ایجاد شده توسط تکتونیک فعّال، نرخ تکتونیک فعّال، انواع تغییر شکل و شواهد تغییر شکل، اطلاعات مهمی درباره مطالعات تجربی در مورد چگونگی واکنش رودخانه‌های آبرفتی به تکتونیک فعّال و همچنین اندازه‌گیری فرایندهای تکتونیکی در رودخانه‌ها ارائه می‌دهند. فرایندهای مهم مربوط به تغییرات در مورفولوژی کانال، هیدرولوژی، هیدرولیک و رسوب‌شناسی در رودخانه‌ها و ارتباط آن با تکتونیک فعّال از مباحث مهم مؤثر در بررسی‌های تکتونیک فعّال رودخانه‌ها است. فرایندهای مؤثر بر تغییرات جانبی و مورفولوژی

1. hillshade

رودخانه ناشی از تکتونیک فعّال با گسلش امتداد لغز، گسلش عادی و بالاآمدگی و پایین‌افتادگی نیز در این زمینه اهمیت دارند.پی‌بردن به شرایط زمین‌ساخت هر منطقه و حوضه در کنار سایر عوامل اثرگذار تأثیر بسزایی در درک فرایندهای حاکم بر آن دارد. حوضه زنجان‌رود به‌صورت یک فلات کوچک محلی و به شکلی ناهمگون با راستای توپوگرافیک ناحیه پیرامونی خودنمایی می‌کند. در این پژوهش تلاش شده تا تأثیر تکتونیک بر ژئومورفولوژی حوضه زنجان‌رود به کمک تکنیک‌های دورسنجی و ژئومورفومتری ارزیابی شده و سپس الگوی مورفولوژیک بستر زنجان‌رود و ارتباط آن با نو زمین‌ساخت فعّال گسلی مورد بررسی قرار گیرد. در همین راستا، ترسیم مدل و الگوی تغییر شکل فعّال مسیر زنجان‌رود با استفاده از این تکنیک‌ها با استخراج شواهد نو زمین‌ساخت فعّال در حوضه زنجان‌رود هدف اصلی پژوهش را تشکیل می‌دهند.

روش پژوهش

در این پژوهش جهت بررسی و ارزیابی اثرات گسلش بر ژئومورفولوژی حوضه زنجان‌رود از تکنیک‌های دورسنجی و ژئومورفومتری به همراه بررسی‌های میدانی بهره گرفته شده است. از داده‌های دورسنجی مختلفی همچون تصاویر سنتینل ۲، لندست ۸ و ۹، کوئیک‌برد، مدل‌های رقومی SRTM90&30m، ASTER-30m و همچنین مدل رقومی ۱۰ متر سازمان نقشه‌برداری جهت استخراج شاخص‌های ژئومورفومتریک و بارزسازی عناصر مورفوتکتونیک و تجزیه‌وتحلیل‌های ژئومورفومتریک و ارزیابی تأثیر گسل‌ها بر چشم‌انداز و لندفرم‌های حوضه زنجان‌رود استفاده شده است. علاوه بر این، در همین راستا بررسی‌های میدانی جهت اعتبارسنجی یافته‌های دورسنجی و ژئومورفومتریک و تهیه داده‌های حقیقت زمینی برای مقایسه و ارزیابی دقت انجام شده است. تجزیه‌وتحلیل‌های ژئومورفومتریک پارامترهای مورفومتری و استخراج شاخص‌های ژئومورفومتریک و بارزسازی عناصر مورفوتکتونیک در قالب نرم‌افزارهای مختلف (ENVI, SAGA, Micro-DEM, ArcGIS, GRASS) انجام شده‌اند.

شاخص‌های ژئومورفومتریک و بارزسازی عناصر مورفوتکتونیک

ژئومورفومتری با رویکرد مدرن تحلیلی – کارتوگرافیک به تحلیل کمّی سطح زمین می‌پردازد (گورابی، ۱۴۰۲). با تکنیک‌های خاص این دانش و اعمال الگوریتم‌های متناسب با شاخص (متغیر، پارامتر) موردنظر روی مدل ارتفاع رقومی می‌توان مقادیر پارامترها و آبجکت‌ها را استخراج و تبدیل به نقشه کرد. این الگوریتم‌ها مبتنی بر توابع مشتقات اول (خطی) و دوم (ساده و انواع انحناها) هستند. در این پژوهش با استخراج پارامترهای اساسی سطح زمین (

جدول ۱)، عناصر و پارامترهای سطح توپوگرافیک شناسایی و بر اساس آن‌ها ناهنجاری‌های سطح توپوگرافیک بارزسازی شده‌اند. نو زمین‌ساخت و گسلش یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد ناهنجاری در سطوح توپوگرافیک هستند.

پس از استخراج پارامترهای اولیه (شیب و جهت) و تحلیل آن‌ها (نرخ و جهت جریان)، پارامترهای مشتقات دوم با اعمال الگوریتم‌های موردنظر روی مدل رقومی ارتفاع استخراج شده‌اند. در ژئومورفومتری تقعر و تحدب سطح پارامتری توصیفی است که به انحنا[1]موسوم است. کمیت انحنا امکان درک اساسی معنای هندسی انحناها، مقاطع عمود و موازی با سطوح شیب را فراهم می‌نماید. انحنای هر خط، مقدار انحراف آن از خط مستقیم، و انحنای یک سطح مقداری کمّی است که سطح از صفحه مسطح منحرف می‌شود. معمولاً برای هر نقطه از منحنی یا سطح می‌توان انحنای آن را تعیین کرد. با محاسبه حداقل، حداکثر و میانگین انحنای هر مقطع می‌توان نقاط کنیک و عطف روی دامنه را شناسایی کرد. بسیاری از گسل‌ها و محور چین‌ها را می‌توان با این پارامترها شناسایی کرد. انحنای گاوسی مهم‌ترین پارامتر در ژئومورفومتری

1. Curvature

محسوب می‌گردد (گورابی، ۱۴۰۱)، زیرا نه‌تنها می‌توان به کمک آن ناهنجاری‌های سطح توپوگرافیک را محاسبه کرد، بلکه امکان طبقه‌بندی دامنه‌ها که مهم‌ترین مقیاس عملکردی فرایندی در سطح توگرافیک است به کمک آن فراهم می‌گردد.

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده جهت بارزسازی عناصر سطحی توپوگرافیک

پارامترهای سطح زمین	مقیاس عملکرد	چه چیزی را توصیف می‌کند؟
شیب	محلی	نرخ جریان و تغییرات آن
جهت	محلی	جهت خط جریان و تغییرات آن
انحنای پلان[1]	غیرمحلی	کمّی‌سازی واگرایی و همگرایی خط جریان
انحنای، قائم یا نیمرخ	غیرمحلی	معیار نسبی کاهش سرعت و شتاب جریان‌های گرانشی سطح توپوگرافیک
انحنای تجمعی[2]	غیرمحلی	میزان تجمع جریان در یک نقطه معین از سطح توپوگرافی
هیپسومتری	ترکیبی	توزیع سطوح ارتفاعی و ارزیابی توان حوضه
هیلشید	ترکیبی	راستا و جهات خطواره‌ها

*روابط و فرمول‌های محاسبه جهت رعایت اختصار و حجم صفحات آورده نشده‌اند، (جهت اطلاع مراجعه کنید به گورابی، ۱۴۰۲).

هر متغیر مورفومتریک در واقع یک پارامتر توصیف‌گر سطح توپوگرافی است. متغیرهای محلی، غیرمحلی و ترکیبی سه نوع اصلی متغیرهای مورفومتریک هستند (جدول ۱). با محاسبه و در دسترس بودن نقشه‌های متغیرهای محلی و غیرمحلی یعنی انحناهای پلان، افقی و عمودی می‌توان انحنای تفاضلی (کاهش نسبی همگرایی جریان‌ها در یک نقطه معین از سطح توپوگرافی)، انحنای مازاد افقی (میزان تحدب و تقعر هر مقطع عمودی در راستای یک کنتور)، تفاضلی و تجمعی و همچنین انواع شاخص‌های ژئومورفومتریک را محاسبه کرد (جدول ۲). متغیرهای ترکیبی و شاخص‌ها نه‌تنها در شناسایی ناهنجاری‌ها بلکه در شناسایی آبجکت‌ها و لندفرم سطحی می‌توانند مؤثر باشند (گورابی، ۱۴۰۲).

جدول ۲. شاخص‌های ژئومورفومتریک جهت بارزسازی عناصر و شناسایی ناهنجاری‌های سطحی توپوگرافیک

شاخص	چه چیزی را توصیف می‌کند؟
زبری[3]	ناهمگنی (تباین) سطح توپوگرافی را کمی می‌کند.
توان جریان یا آستانه شروع کانال[4]	شناسایی رأس کانال (شروع کانال)، کانال‌های جوان
همگرایی و واگرایی جریان[5]	همگرایی یا واگرایی و کاهش سرعت یا شتاب جریان (توسط انحنای پلان اندازه‌گیری می‌شود)
موقعیت توپوگرافی چند مقایسه[6]	خط الراس را از دره‌ها متمایز می‌کند.
شاخص توان جریان[7]	قدرت فرسایشی آب جاری، مکان احتمالی تشکیل خندق‌ها در سطوح توپوگرافیک
شاخص موقعیت توپوگرافی[8]	شیب و طبقه‌بندی لندفرم‌ها
شاخص رطوبت توپوگرافی[9]	مکان و موقع مناطقی با پتانسیل رطوبت بالا

*روابط و فرمول‌های محاسبه به جهت رعایت اختصار و حجم صفحات آورده نشده‌اند، (جهت اطلاع مراجعه کنید به گورابی، ۱۴۰۲)

1. Plan curvature
2. Accumulation curvature
3. Terrain Ruggedness Index (TRI)
4. Stream Power Index برابر است با شاخص Channel Initiation Threshold (CIT) index
5. The convergence/divergence index.
6. Multi-Scale Topographic Position Index (TPI)
7. Stream Power Index
8. Topographic position index (TPI)
9. Tool Topographic Wetness Index (TWI)

باتوجه‌به حوزه عملکرد هر یک از انحناها، پس از محاسبه و تهیه نقشه می‌توان به‌صورت بصری و کمّی سطوح، خطوط و ناهنجاری‌ها را در سطح توپوگرافی شناسایی کرد. در این پژوهش به کمک مدل ارتفاع رقومی ۹۰، ۳۰ (SRTM و ASTER)، مدل ارتفاع رقومی ۱۰ متر سازمان نقشه‌برداری و کنتورها و نقاط ارتفاعی نقشه‌های توپوگرافی ۲۵۰۰۰ رقومی پارامترها و شاخص‌های ژئومورفومتریک (جدول ۱ و جدول ۲) حوضه زنجان‌رود بر اساس روابط ریاضی[1] در قالب نرم‌افزارهایی که اشاره شد، استخراج و تبدیل به نقشه شده‌اند.

روش استخراج خطواره‌های گسلی فعّال با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی

استخراج اثر گسل‌ها با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی و تصاویر نوری شامل ترکیبی از تکنیک‌های تفسیر تصاویر، تشخیص اشکال و تحلیل‌های ژئومورفیک است. در این پژوهش جهت استخراج اثر گسل‌ها با استفاده از تصاویر به شرح زیر اقدام شده است:

۱- جمع‌آوری داده‌ها: ابتدا تصاویر ماهواره‌ای (لندست و سنتینل ۲) پوشش‌دهنده منطقه موردمطالعه دانلود شد. در این مرحله دقت شده است تا تصاویر با حداقل پوشش ابری و وضوح فضایی باشند.

۲- پردازش و بهبود تصویر: از تکنیک‌های مختلف بهبود تصویر جهت افزایش قابلیت مشاهده جزئیات تصویر، افزایش کنتراست، کاهش خطا و نویز و بهبود وضوح تصویر استفاده شده است. در این پژوهش از تکنیک‌های رایج کنتراست افزایشی، فیلترینگ، تعادل رنگ، توان بندی، توزیع هیستوگرام و افزایش لبه استفاده شده است.

۳- تفسیر بصری: پس از بهبود و افزایش قابلیت مشاهده جزئیات روی تصاویر، تصاویر به‌صورت بصری به‌دقت بازرسی شدند تا خطواره‌های قابل‌مشاهده، اشکال خطی یا آثار خطی که ممکن است نشان‌دهنده اثر گسل بالقوه باشند، شناسایی شود. سعی شده تا اشکالی مانند پرتگاه‌های گسل، خطواره‌ها، اشکال جابه‌جاشده و دره‌های خطی تشخیص داده شود.

۴- شناسایی اشکال و استخراج خطواره‌ها: از الگوریتم‌های تشخیص خودکار شکلی برای شناسایی خطواره‌ها مانند تشخیص لبه، تشخیص خط، یا تجزیه‌وتحلیل تصویر مبتنی بر شیء برای شناسایی آثار گسل احتمالی کمک گرفته شده است. خطواره‌ها پس از شناسایی به محیط GIS وارد و با سایر لایه‌های مکمل (زمین‌شناسی، تصاویر، برداشت‌های میدانی) همپوشانی و بازرسی شدند.

۵- تجزیه‌وتحلیل ژئومورفومتری و توپوگرافیک: توپوگرافی در اطراف خطواره‌های شناسایی شده به کمک تکنیک‌های ژئومورفیک مختلف مانند استخراج پرتگاه‌های گسلی احتمالی (به کمک مقاطع طولی و عرضی با استفاده از DEM)، رودخانه‌های جابه‌جاشده (تصاویر اپتیک لندست و سنتینل ۲)، لایه‌های مکمل (زمین‌شناسی، تصاویر، برداشت‌های میدانی) و لایه‌های شاخص‌ها و پارامترهای ژئومورفومتری مورد بازرسی و تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند.

۶- تجزیه‌وتحلیل خطی: از ابزارهای تحلیل خطی در GIS برای تجزیه‌وتحلیل کمّی جهت و طول و... خطواره‌های شناسایی‌شده استفاده شده است. در این مرحله امکان تمایز بین خطواره‌های تکتونیکی و سایر عناصر خطی ممکن می‌شود.

۷- مقایسه با نقشه‌های زمین‌شناسی: اثر گسل‌ها روی نقشه‌های زمین‌شناسی موجود همپوشانی، مقایسه و پس از تأیید اشکال شناسایی شده با مکان‌های گسل شناخته شده در میدان اعتبارسنجی شدند.

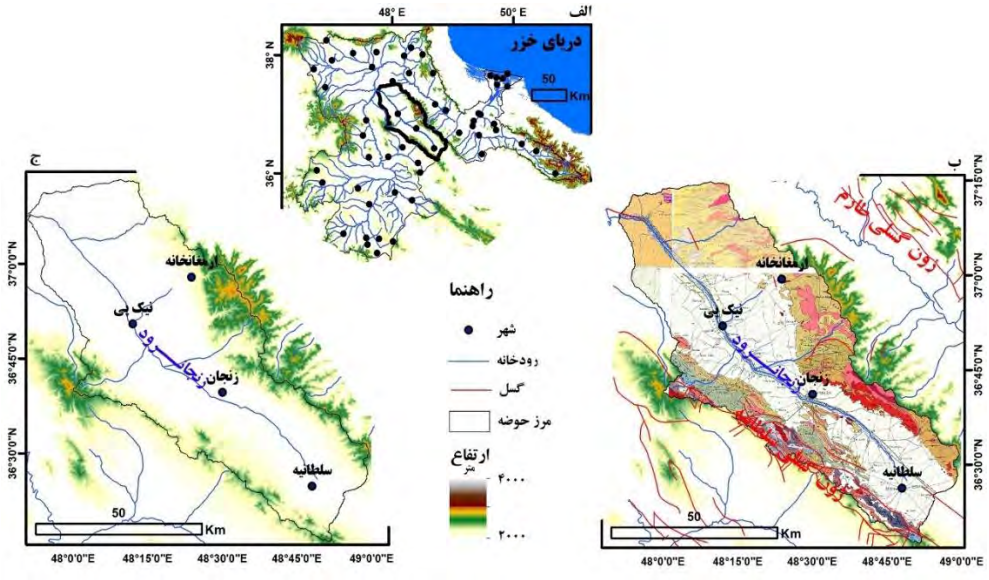
---

۱. به دلیل محدودیت صفحه از ذکر روابط ریاضی مورد استفاده جهت استخراج پارامترها و شاخص‌های ژئومورفومتریک (جدول ۱ و جدول ۲) خودداری شده است. خوانندگان محترم به فصل هفتم (استخراج پارامترها، اشکال و لندفرم‌ها از مدل‌های ارتفاع رقومی ارجاع داده می‌شوند [گورابی، ابوالقاسم (۱۴۰۲)، ژئومورفومتری کاربردی؛ داده‌ها، روش‌ها و تکنیک‌ها].

در اینجا لازم به ذکر است برخی محققان در مرحله ۲ (پردازش و بهبود تصویر) از تکنیک‌های تجزیه‌وتحلیل چند طیفی و فراطیفی و همچنین داده‌های ژئوفیزیکی (لیدار، GPS، داده‌های لرزه‌ای) نیز استفاده می‌کنند، ولی در این پژوهش مشخص شد که تکنیک‌های ژئومورفومتری به حد کفایت امکان تشخیص شواهد و آثار گسلی گسل‌های فعّال را دارند. شایان‌ذکر است که شناسایی اثر گسل‌های فعّال با استفاده از تصاویر نوری کاری چالش‌برانگیز است؛ زیرا علاوه بر تخصص در دورسنجی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی نیازمند داده‌های اولیه با قدرت تفکیک مناسبی هستند.

محدوده موردمطالعه

حوضه زنجان‌رود با مساحت ۴۶۷۲/۲۳ کیلومترمربع (۴۶۷۲۲۳ هکتار) از نظر هیدرولوژی و تقسیمات حوضه‌ای جزئی از حوضه قزل‌اوزن و سپس سفیدرود (۵۹۰۰۰ کیلومترمربع) محسوب می‌گردد. رواناب حوضه زنجان‌رود به قزل‌اوزن[۱] و سپس به دریای خزر زهکشی می‌شود (شکل ۱، الف و ج).



شکل ۱. حوضه موردمطالعه؛ الف) موقع زیرحوضه زنجان‌رود در حوضه سفیدرود؛ ب) زمین‌شناسی حوضه (۱:۲۵۰۰۰۰)؛ توپوگرافی حوضه زنجان‌رود

از نظر زمین‌ساختی منطقه موردمطالعه بین دو سیستم گسلی البرز غربی (زون طارم) و سلطانیه قرار دارد (نبوی، ۲۰۲۰). گسل سلطانیه با طول حدود ۱۴۰ کیلومتر در راستای جنوب شرقی – شمال غربی در بخش جنوبی و جنوب شرقی حوضه کشیده شده است. در اثر عملکرد این دو زون گسلی، گسل‌های فرعی متعددی با راستای شمال غربی – جنوب شرقی و یا شمال شرقی – جنوب غربی در حوضه و پیرامون آن نیز شکل‌گرفته‌اند (شکل ۱، ب).

هسته اولیه ژنز و پیدایش ناحیه مورد بررسی و منطقه‌ای که در این پژوهش تحت عنوان فلات محلی زنجان از آن یاد می‌شود پس از بسته شدن حوزه اقیانوسی پالئوتتیس و باز شدن نئوتتیس آغاز گردید. فرورانش نئوتتیس به زیر حاشیه جنوبی اوراسیا در اواخر مزوزوئیک ضمن تشکیل کوه‌های ایران مرکزی (ارومیه–دختر) در حاشیه غربی ایران مرکزی و

۱. از نظر جغرافیایی قزل اوزن به علت عبور از زمین‌های رسی و فرسایش زیاد خاک رس، همواره گل‌آلود سرخ به نظر می‌رسد و به همین جهت در زبان ترکی به نام رود سرخ خوانده می‌شود. از طرفی به لحاظ ارزش اقتصادی و منابع طبیعی قزل اوزن در زبان ترکی به معنای رود زرّین (طلایی) است.

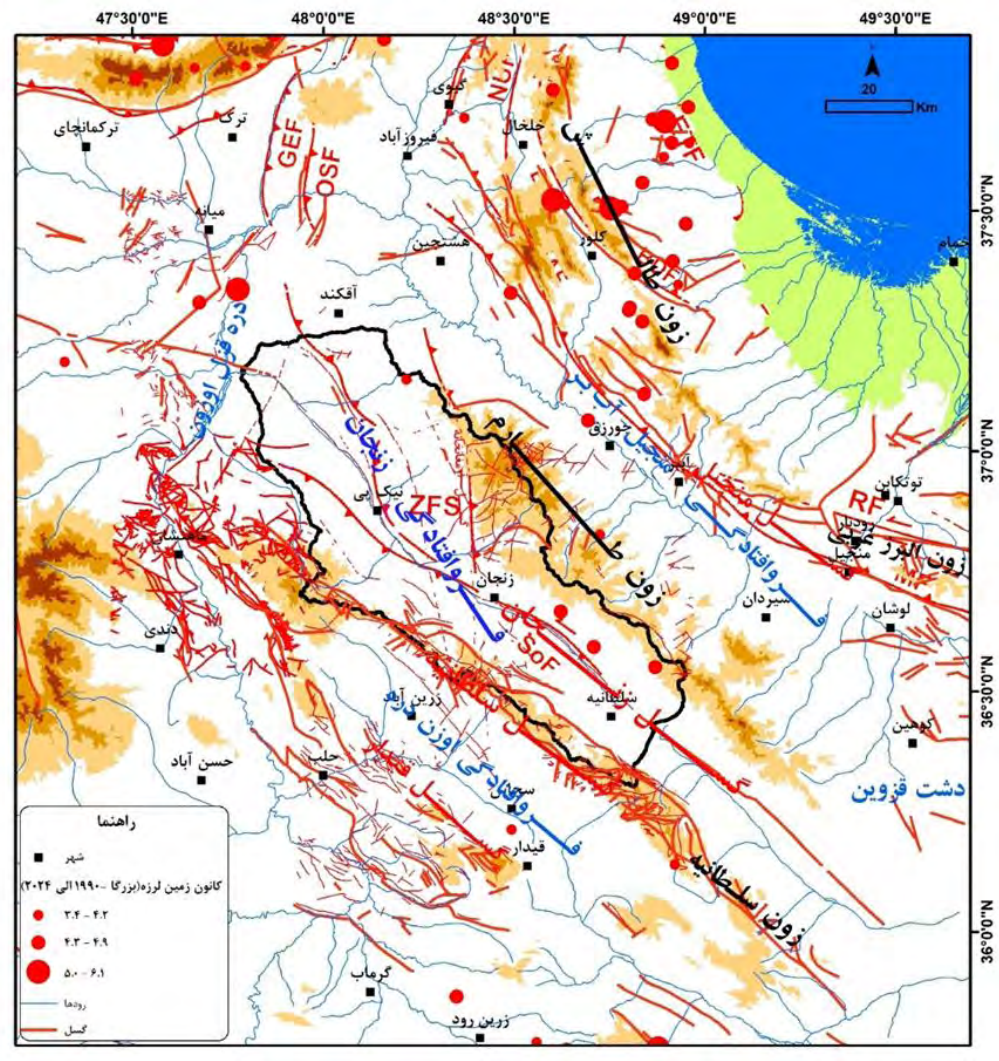
کمربند دگرگونی سنندج- سیرجان، کمربند آتشفشانی-رسوبی را در حاشیه شمالی ایران مرکزی و جنوب البرز ایجاد کرد. در ادامه این روند و پس از بسته شدن کامل نئوتتیس، برخورد مستقیم صفحه عربستان با اوراسیا رخ داد و ساختار توپوگرافی امروزی منطقه موردمطالعه را شکل داد که بین واحدهای مورفوتکتونیک البرز، شمال ایران مرکزی و جنوب دریای خزر قرار دارد. براین‌اساس منطقه مورد بررسی با گسل‌های قدیمی (پالئوزوئیک و مزوزوئیک) و فعّال جدید شناخته می‌شود (شکل ۲). شهر زنجان به‌عنوان مرکز استان در بخش مرکزی حوضه موردمطالعه قرار دارد (شکل ۱، ب). زنجان‌رود در بستر سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین، پالئوزوئیک زیرین (سازند سلطانیه)، مزوزوئیک (سازند شمشک و سازند لار) و نهشته-های ترشیاری (کنگومرای فجن، سازند کرج) و نهشته‌های اولیگوسن و پلیو- پلیئستوسن و نهشته‌های کواترنری و توده‌های نفوذی مانند گرانیت دوران جاری است (شکل ۱، ب، نقشه ۲۵۰۰۰۰ زمین‌شناسی زنجان، انزلی، تکاب و میانه).

آب‌وهوای محدوده مطالعاتی در ۳ طبقه اقلیمی نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای و مرطوب قرار گرفته است. مناطق مرتفع از جمله ارتفاعات شمالی و همچنین بخش کوچکی در مناطق جنوب شرقی در طبقات اقلیمی مرطوب قرار دارند، درحالی‌که مناطق مرکزی و غربی و بخش فروافتادگی زنجان دارای آب‌وهوایی نیمه‌خشک هستند (سالنامه آماری زنجان، ۱۳۹۸).

تمام شهرستان زنجان و قسمتی از شهرستان‌های ابهر، میانه و چند روستا از شهرستان‌های خدابنده و ایجرود در حوضه زنجان‌رود واقع شده‌اند. ۲۷۳ روستای کوچک و بزرگ و شهرهای زنجان، ابهر، نیک‌پی و ارمغانخانه در این حوضه قرار دارند. بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۰ مرکز آمار ایران، جمعیتی برابر ۱۵۵۷۰۰۰ نفر در شهرستان زنجان زندگی می‌کنند. به این جمعیت باید جمعیت شهر ابهر و ۳۰ روستای آن و چند روستا از شهرستان‌های خدابنده و ایجرود و میانه (۱۰ روستا) را نیز اضافه کرد (سالنامه آماری مرکز آمار ایران، ۱۳۹۰).

یافته‌ها

شبه فلات زنجان به دلیل قرارگرفتن در محل تلاقی واحدهای مورفوتکتونیک البرز (غربی)، تالش و ایران مرکزی، در معرض الگوهای تنش زمین‌ساختی پیچیده‌ای است. همگرایی فعّال شمال – جنوب در راستای عربستان – اوراسیا و عملکرد واحدهای منطقه‌ای – ناحیه‌ای – محلی سبب شکل‌گیری حوضه زنجان‌رود به شکل فلاتی مرتفع مشخص و بارز در مقیاس منطقه‌ای شده که به دره‌های پست قزول‌اوزن در شمال و شمال غرب؛ فروافتادگی اوزن‌دره در جنوب؛ و دشت قزوین در شرق مشرف است (شکل ۲). منطقه مورد بررسی در بخش میانی خود توسط یک فرورفتگی به عرض ۲۰ تا ۳۰ کیلومتر در راستای جنوب‌شرق- شمال غرب معروف به دشت زنجان مشخص شده که منطبق بر مسیر رودخانه زنجان‌چای است. رودخانه زنجان‌چای از کوه‌های جنوب سلطانیه در جنوب‌شرق حوضه سرچشمه می‌گیرد و پس از طی دشت زنجان- ابهر در سمت شمال غرب به قزل اوزن می‌پیوندد. رخنمون‌هایی از سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و ماگمایی با سن پالئوزوئیک در بخش جنوبی حوضه وجود دارند. جهت کلی زنجان‌رود در ابتدا و انتهای حوضه جنوب شرقی- شمال‌غربی است اما در بخش میانی ناهنجاری‌هایی را نسبت به جهت کلی مذکور نشان می‌دهد. بررسی‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که این ناهنجاری‌ها ناشی از عملکرد دو زون گسلی شمالی و جنوبی (طارم، سلطانیه)، گسل زنجان و گسل‌های محلی است که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است (شکل ۲).



شکل ۲. مورفوتکتونیک ناحیه زنجان‌رود

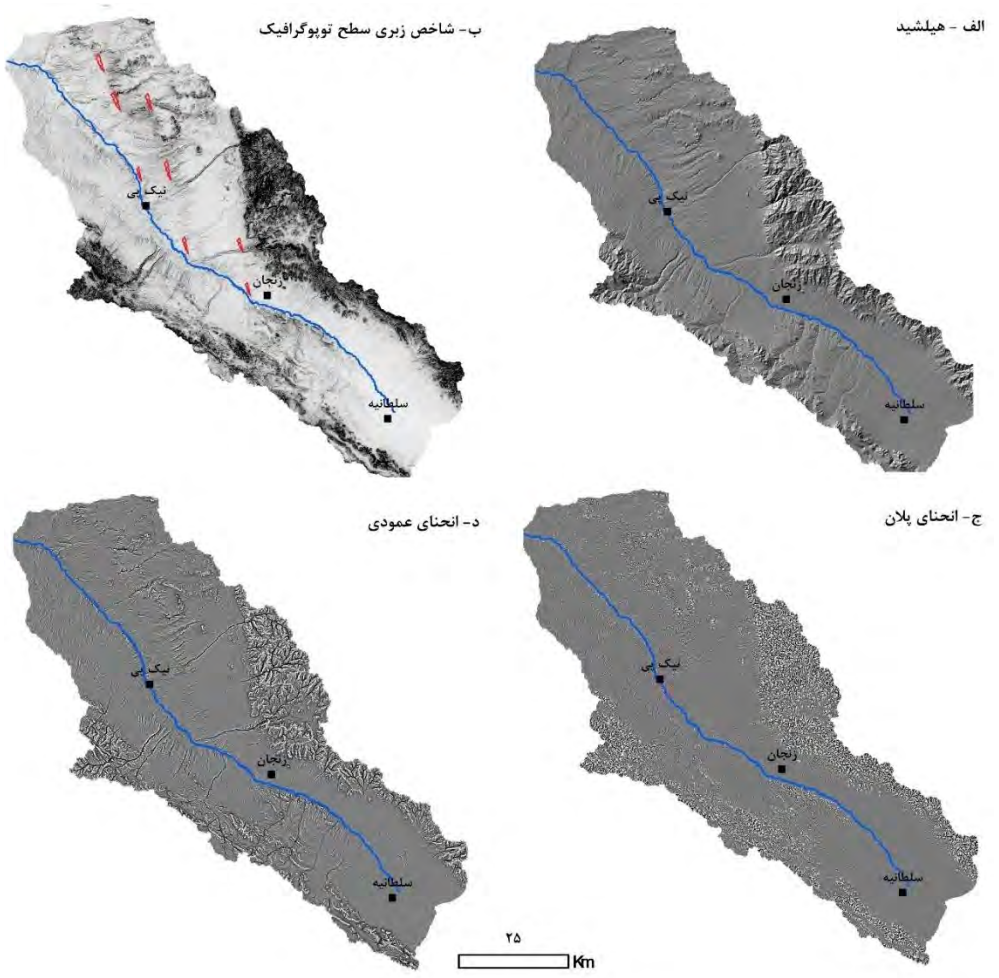
NTF: گسل شمال تبریز؛ AR: رشته‌کوه البرز؛ NTF: گسل شمال تبریز؛ AVF: گسل اهر–ورزقان؛ RF: گسل رودبار؛ TR: رشته‌کوه‌های تالش؛ SoF و ZFS بترتیب گسل‌های سلطانیه و زنجان را نشان می‌دهند.

بر اساس بررسی‌های صورت‌گرفته (سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱، ۲۰۱۹)، پوسته شمال غرب ایران در مقایسه با اوراسیا که صفحه‌ای ثابت می‌باشد، با سرعت معادل ۲۲–۲۳ میلی‌متر در سال به سمت شمال در حرکت است، این در حالی است که ایران مرکزی با سرعت ۱۴ میلی‌متر در سال، شمال تبریز، تالش و ارمنستان به ترتیب با سرعت ۱۲ و ۸ میلی‌متر در سال به سمت شمال حرکت می‌کنند. این تغییر دینامیک قابل‌توجه (۳ تا ۵ میلی‌متر در سال) صرف تغییر شکل زمین در گستره موردبحث می‌شود که عمدتاً در قالب فعّالیت گسل‌ها و از جمله گسل زنجان به شکل تغییر لندفرم‌ها (سطح ژئومورفیک کواترنر و بستر زنجان‌رود) می‌شود.

باتوجه‌به چارچوب تکتونیک و دینامیک اشاره شده، به نظر می‌رسد فروافتادگی دشت زنجان حاصل عملکرد بلوک‌های گسلی سلطانیه، زنجان، طارم و منجیل باشد. بااین‌حال، رابطه بین این سیستم‌های برخوردی و ساختارهای زمین‌ساختی موروثی بر زنجان‌رود و حوضه آن مسئله‌ای است که همچنان موردبحث است.

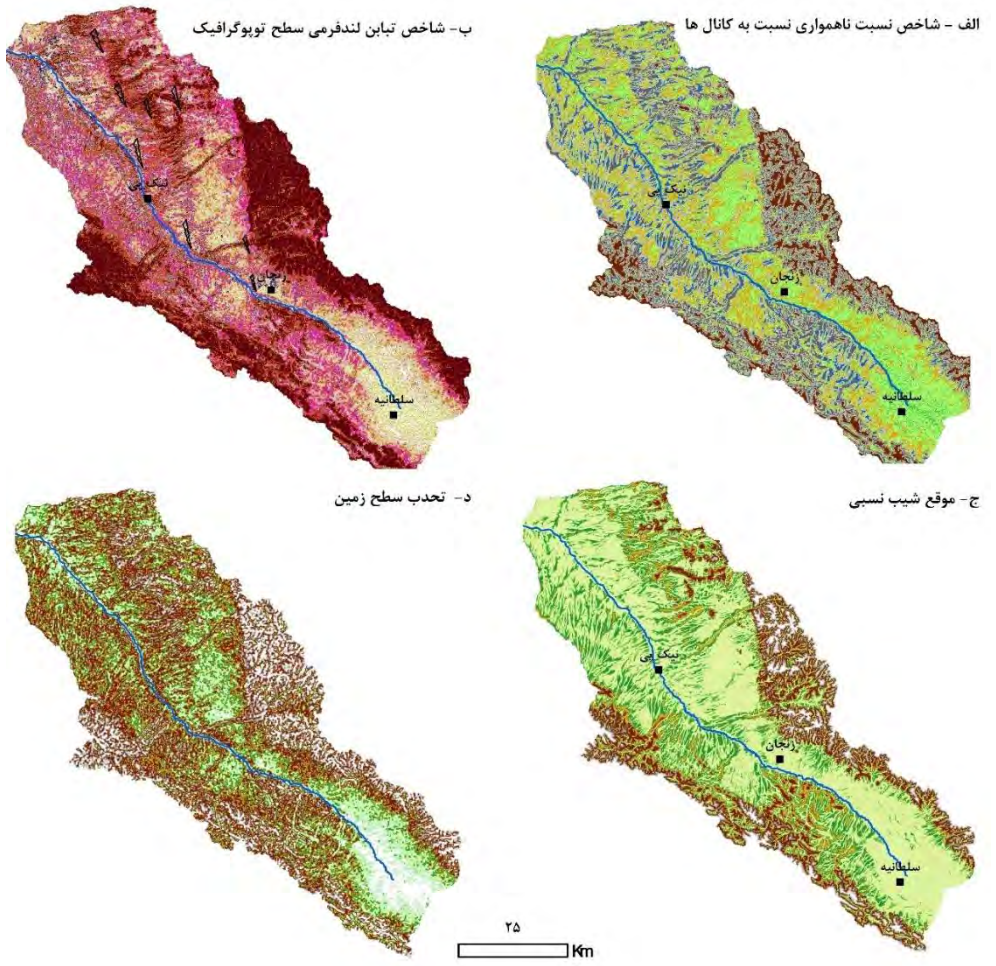
در این پژوهش، نقشه‌های خطواره‌ها و روندهای توپوگرافیک، هیدرولوژیک و ساختمانی حوضه بارزسازی و به کمک

آن‌ها ناهنجاری‌های سطح توپوگرافیک و از جمله اثر گسل‌ها و سیستم‌های شکستگی منطقه بارزسازی و مستند شد (شکل ۳ و شکل ۴). همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، نقشه پارامترها و شاخص‌های سایه روشن[1]، انحنای نیمرخ و پلان و شاخص زبری سطح توپوگرافیک، به وضوح اثر گسل‌های حوضه را بارزسازی کرده‌اند. در این میان دخالت ۲ سیستم گسلی برای اولین بار در حوضه با قطعیت بالا تأیید می‌شود (شکل ۳ و شکل ۴، محل آن‌ها با پیکان‌های قرمز و سیاه رنگ مشخص شده است (به دلیل واضح بودن خطواره مشخص شده، سایر اشکال بدون تغییر و پیکان آورده شده‌اند). تجزیه‌وتحلیل ژئومورفولوژیکی بر اساس تصاویر با وضوح بالا، مدل‌های رقومی ارتفاع و مشاهدات میدانی این امکان را فراهم آورد تا الگوی تکاملی در قالب این ساختارهای فعّال تخمین زده شود (شکل ۳). اگر چه تمرکز پژوهش حاضر روی زنجان‌رود است که تقریبا امتداد گسل زنجان را دنبال می‌کند، ولی به منظور شناخت الگوی دینامیک گسل‌ها و اثرات آن‌ها بر زنجان‌رود، به شواهد نو زمین‌ساختی مبتنی بر ژئومورفومتری حوضه نیز پرداخته شده است (شکل ۳ و شکل ۴).



شکل ۳. بارزسازی خطواره‌ها و روندهای توپوگرافیک، هیدرولوژیک و ساختمانی حوضه به کمک تکنیک‌های ژئومورفومتررریک (تمام پارامترها تا حدی نرمالایز شده‌اند، لذا جهت سادگی و جلوگیری از شلوغی اشکال بدون راهنما آورده شده‌اند)

1. Hill-shade

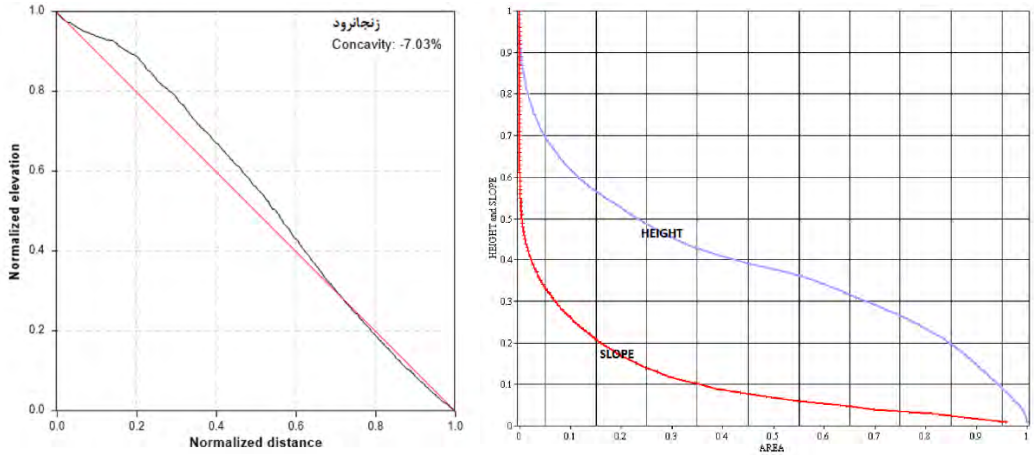


شکل ٤. بارزسازی خطواره‌ها و روندهای توپوگرافیک، هیدرولوژیک و ساختمانی حوضه به کمک متغیرهای محلی، غیرمحلی و ترکیبی (تمام پارامترها تا حدی نرمالایز شده‌اند، لذا جهت سادگی و جلوگیری از شلوغی اشکال بدون راهنما أورده شده‌اند)

مورفولوژی حوضه زنجان‌رود حاصل برهم‌کنش نیروهای زمین‌ساختی بین روندهای ساختمانی شمال غربی- جنوب شرقی (راستای گسل تبریز، زنجان، سلطانیه) و شمال، شمال‌شرق-جنوب، جنوب‌غربی (زون طارم، تالش و قیدار) می‌باشد (شکل ۲). تحلیل‌های ژئومورفرمتری حوضه زنجان‌رود (شکل ۳ و شکل ۴) نشان دهنده وجود چندین خطواره ساختمانی- توپوگرافیک است که نه‌تنها در بلافصل جبهه کوهستان (گسل ارمغانخانه)، بلکه سبب ناهنجاری‌های مورفولوژیکی در رسوبات کواترنری، شبکه زهکشی حوضه و کانال زنجان‌رود شده‌اند (شکل). نیمرخ طولی رودخانه‌هایی که حوضه زنجان‌رود را زهکشی می‌کنند، پله‌های برجسته، رأس‌های دندانه‌ای و مسیرهای محدّب رو به بالا در پیرامون گسل‌های شناسایی شده نشان می‌دهند که بخش‌های پایین‌دست خود را متأثر ساخته‌اند. تحدّب در نیمرخ‌های جریان معمولاً در جایی که رودخانه‌ها عمیقاً بریده شده‌اند، دیده می‌شود. در غیاب کنترل‌گرهای سنگ‌شناختی (بویژه پیرامون زنجان‌رود) و دشت زنجان، چنین ویژگی‌هایی می‌توانند به‌عنوان شواهدی بر عملکرد تکتونیکی گسل‌ها باشند (Burbank & Anderson,2001).

در یک نگاه کلی، حوضه زنجان‌رود با انتگرال هیپسومتری برابر ۰/۳۸ حوضه‌ای بالغ با سطوحی کم شیب می‌باشد که نمایانگر پتانسیل دینامیک پایین است (شکل ۵) بیش از ۵۳ درصد حوضه را دشت و زمین‌های کم شیب به خود اختصاص

داده است، در حالی که نواحی کوهستانی و پرتگاه‌ها حدود ۱۲ درصد از حوضه را اشغال کرده‌اند.



شکل ۵. راست: هیپسومتری حوضه، توزیع نرمال شده سطوح ژئومورفیک و شیب در ارتفاع، انتگرال هیپسومتری حوضه برابر ۰/۳۸ است. چپ: نیمرخ طولی نرمال شده زنجان‌رود و میزان تحدب کانال در بخش‌های بالایی را نشان می‌دهد.

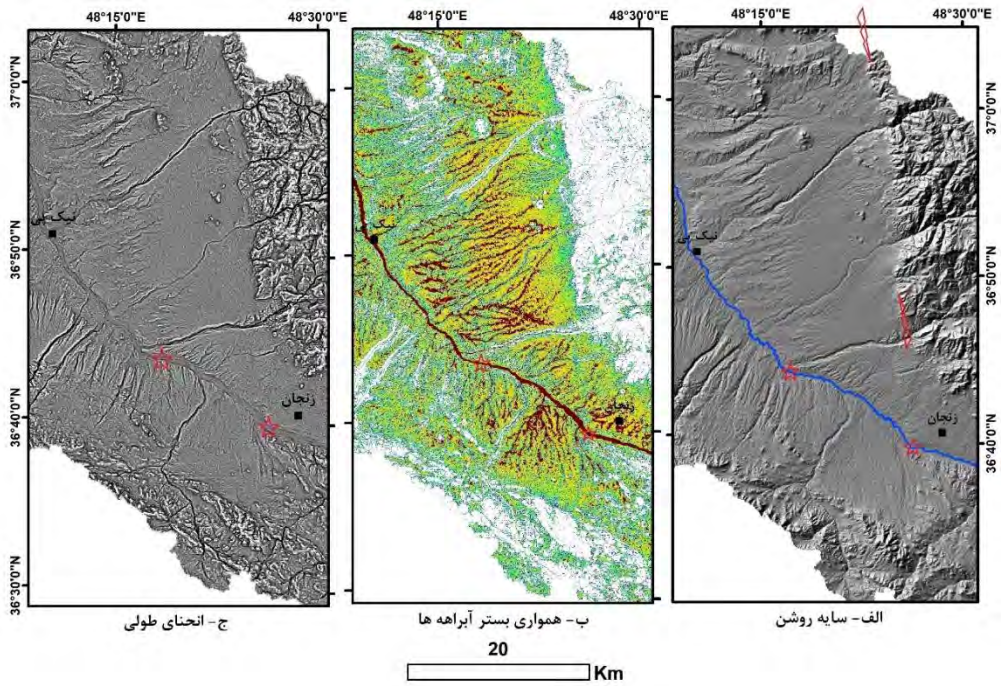
شواهد مورفوتکتونیک

جهت تحلیل شواهد مورفوتکتونیک حوضه زنجان‌رود، حوضه به سه بخش تقسیم شده و شواهد هر بخش به‌اختصار مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است:

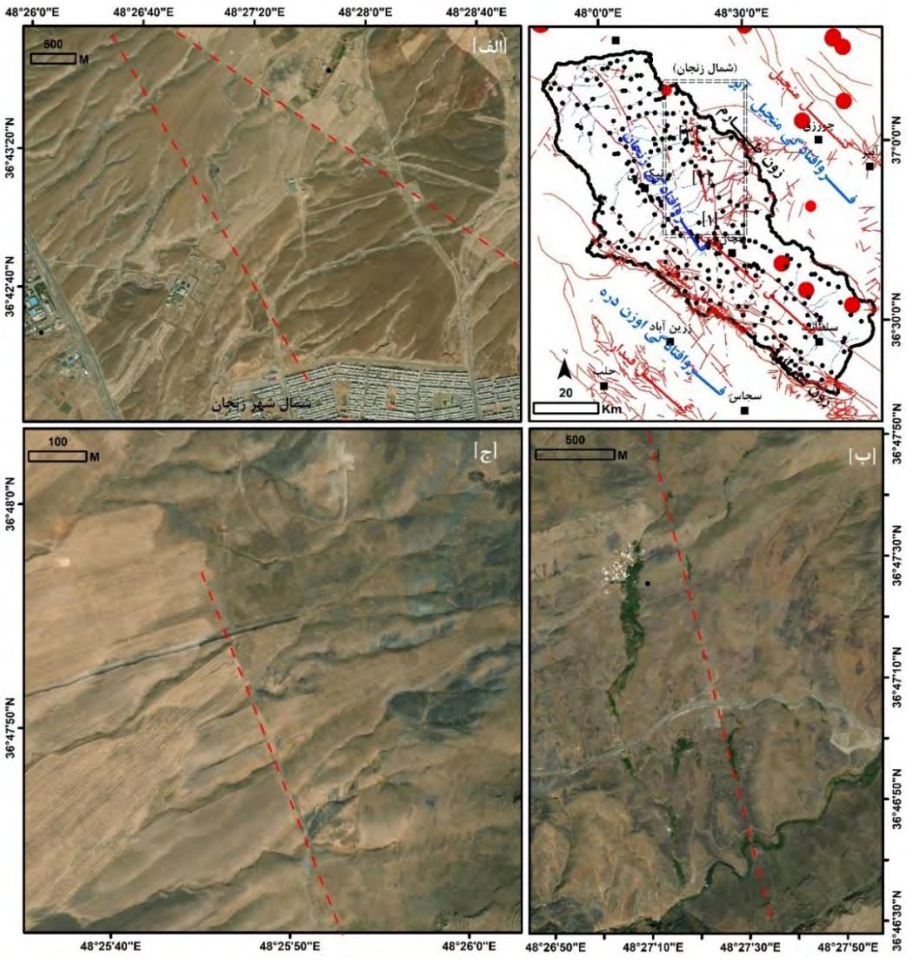
شواهد مورفوتکتونیک بخش شمالی حوضه

چنانچه نگاهی کلی به نقشه زنجان‌رود در مقیاس حوضه این رودخانه داشته باشیم، مسیر آن در نزدیکی شهر زنجان (غرب) از راستای جنوب شرقی- شمال غربی منحرف و به سمت جنوب تمایل پیدا می‌کند (شکل ۳ و شکل ۴). در نقشه‌های شاخص ژئومورفومتریک (شکل)، مرز بین کوهستان چهل‌خانه در شمال شهر زنجان و دشت آبرفتی زنجان یک خطواره ساختمانی است که به وضوح در شکل قابل شناسایی است (فاصله بین دو پیکان قرمز رنگ). از این خطواره به‌طرف غرب و در ۱۰ کیلومتری این گسل جبهه کوهستان، یک خطواره ژئوموفولوژیک تشخیص داده می‌شود که با زاویه‌ای ۱۵~ الی ۲۵~ درجه نسبت به خطواره اصلی و به طور همگرا از شمال به جنوب کشید شده است. علاوه بر این ۲ خطواره، در مقیاس بزرگتر، چندین ناهنجاری ژئومورفیک دیگر در سطح توپوگرافی کوهپایه-دشت شناسایی شده‌اند که با راستای دو خطواره مذکور به‌صورت کمانی و زاویه‌دار گسترده شده‌اند. قاعده برخی از مخروط‌افکنه‌ها بر این خطواره‌ها منطبق هستند.

دو خطواره اصلی مذکور به سمت جنوب ادامه دارند. در محل تلاقی این دو خطواره (ستاره‌ها در شکل) مسیر زنجان‌رود منحرف و کانال و پادگانه‌های آن جابجا شده است. مشاهدات صورت‌گرفته روی تصاویر، نقشه‌های شاخص‌های ژئومورفومتریک و بررسی‌های میدانی بیانگر ادامه خطواره‌ها در جنوب زنجان‌رود هستند. این خطواره‌ها مخروط‌افکنه‌های دامنه‌های شمالی کوهستان بایندر در جنوب حوضه را قطع کرده‌اند. بر اساس مشاهدات، این بخش از حوضه را می‌توان به ۳ واحد ژئومورفولوژیک تقسیم کرد که توسط خطواره‌های فوق از هم جدا شده‌اند (شکل). انحنای طولی، پهنا و گستردگی کف و بستر آبراهه‌ها (شکل ب و ج) و سایر شاخص‌ها در این سه بخش تفاوت معناداری دارند. باتوجه‌به ناهنجاری‌های سطحی این قلمروها در واقع توسط گسل‌های فعّال از یکدیگر جدا شده‌اند.



شکل ٦. شاخص‌های ژئومورفومتریک و ناهنجاری‌های سطح توپوگرافیک در بخش شمالی حوضه (ن.ک شکل)

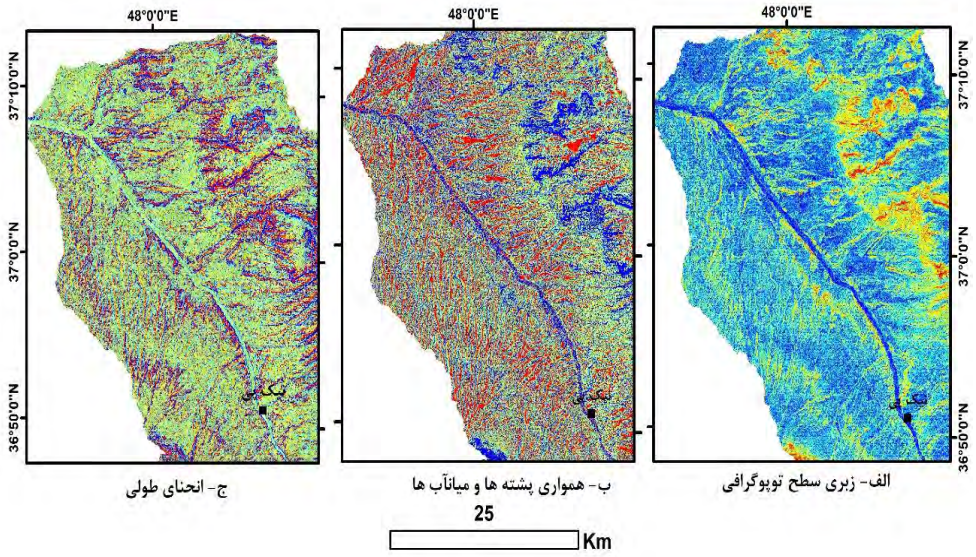


شکل ۷. شواهد زمین‌ساختی دینامیک گسلی در بخش شمالی حوضه

علاوه بر تجزیه‌وتحلیل‌های ژئومورفومتری جهت بارزسازی ناهنجاری‌ها، به کمک تصاویر دورسنجی از تصاویر کوئیک‌برد و سنتینل ۲ جهت شناسایی آثار گسلی و شواهد مورفوتکتونیک فعّال برای به‌دست‌آوردن اطلاعاتی در مورد راستای تکتونیکی و بازسازی الگوی احتمالی فعّالیت آن‌ها در زمان‌های اخیر استفاده شده است (شکل). شواهد مذکور نشان‌دهنده ناهنجاری‌های قابل‌توجه در سیستم‌های زهکشی به‌صورت عدم تقارن قوی در برخی از نواحی، تغییر چگالی، ازدیاد طول شاخه‌های خاص، انحراف آبراهه‌ها، تغییر عمق و پهنای بستر آبراهه، سازمان‌دهی ضعیف در شبکه هیدروگرافی، و هم‌ترازی زیاد بین جریان‌های رتبه‌های پایین‌تر نزدیک خطواره‌ها همگی بیانگر تکتونیک فعّال منطقه مورد بررسی هستند.

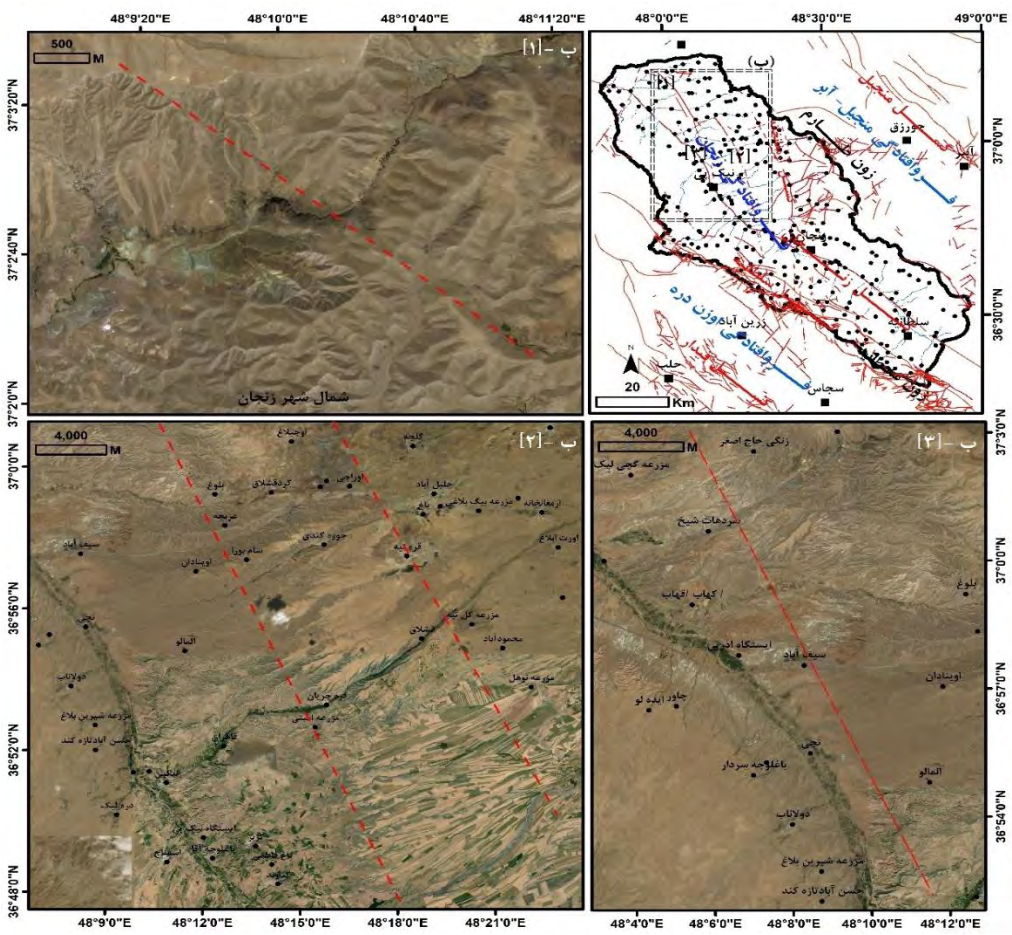
شواهد نو زمین‌ساختی در مرکز و شمال غرب حوضه

بیشتر بخش مرکزی حوضه و پیرامون زنجان‌رود را زمین‌های کم شیب و تپه‌ماهوری فراگرفته و به‌طرف شمال و غرب شیب افزایش می‌یابد. ارزیابی ناهنجاری‌های سطوح توپوگرافیک توسط شاخص‌های ژئومورفومتریک نشان می‌دهد که ناهنجاری‌های سطحی قال توجهی در این بخش از حوضه وجود دارد. مقایسه نقشه‌های شاخص‌های انحنای طولی، زبری و همواری پشته‌ها و میاناب‌ها بیانگر وجود یک خطواره اصلی در شمال کانال زنجان‌رود در راستای شمال غربی – جنوب شرقی است (شکل ۸). این خطواره زمین‌های تپه‌ماهوری را از زمین‌های کم شیب جدا کرده است.



شکل ۸. شاخص‌های ژئومورفومتریک و ناهنجاری‌های سطح توپوگرافیک در بخش مرکز و شمال غرب حوضه (ن.ک شکل)

پی‌جویی محل ناهنجاری‌ها روی تصاویر اپتیک و بررسی‌های میدانی دلالت بر انطباق ناهنجاری‌ها بر گسل‌های فعّالی است که موجب قطع و جابجاشدگی رسوبات کواترنر در سطح دشت، پادگانه‌ها، سواحل و کانال زنجان‌رود در این بخش از حوضه زنجان‌رود است (شکل و شکل ۲).



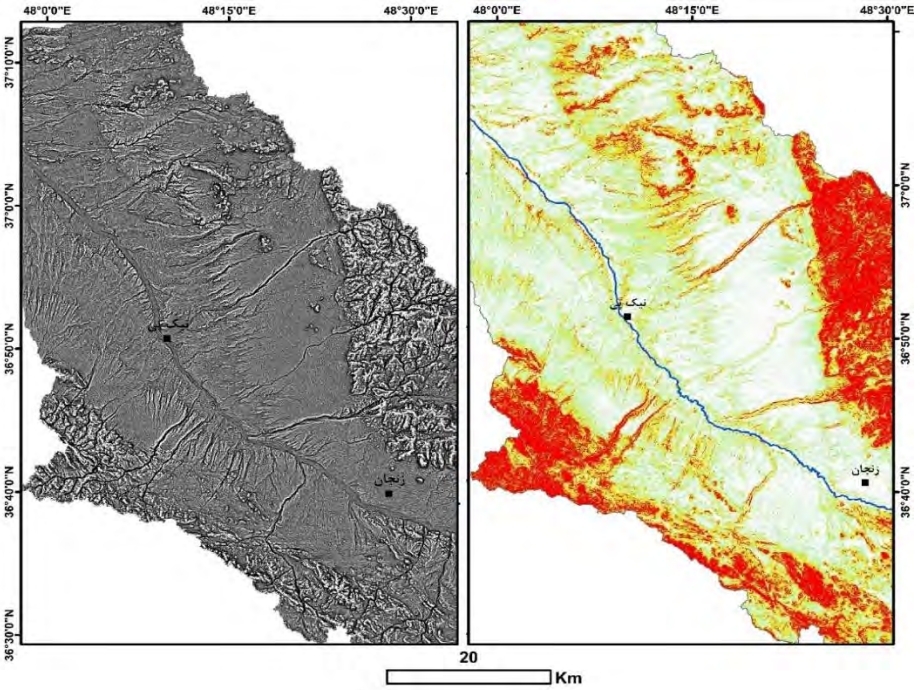
شکل ۹. شواهد زمین‌ساختی دینامیک گسل ها در بخش مرکزی و غرب حوضه

شواهد نو زمین‌ساختی بخش جنوب - جنوب شرقی حوضه

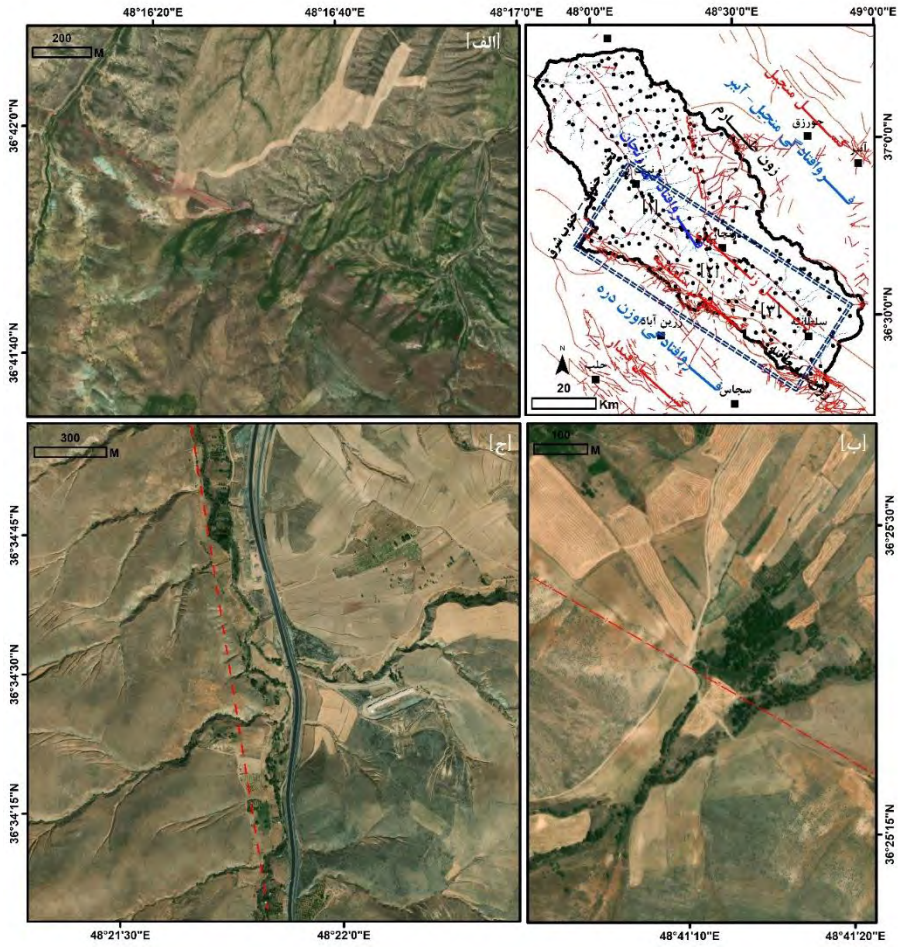
تنوع لیتولوژیک، زمانی و ساختمانی بخش جنوبی حوضه نسبت به بخش‌های پیشین بسیار بیشتر است. قدیمی‌ترین سازنده‌های منطقه مربوطه به اوایل پالئوزوئیک (کامبرین) هستند (شیل‌های چپقلو، دولومیت‌های سلطانیه و بایندر؛ ماسه‌سنگ‌های لالون؛ آهک‌های سازند باروت و زایگون و تاپ‌کوارتزیت سازند میلا). وجود تاپ‌کوارتزیت کامبرین در این بخش از حوضه و مقاومت آن در برابر فرسایش باعث شده تا این بخش از حوضه توپوگرافی متنوعی داشته باشد. آهک و شیل‌های مزوزوئیک سازندهای شمشک و لار در منطقه رخنمون چندانی ندارند. سازندهای پالئوزوئیک و مزوزوئیک هسته کوهستان جنوب منطقه را ساخته‌اند. برخلاف سازندهای فوق، سازندهای سنوزوئیک (قرمز پایینی، قم، فجن و زیارت) بخش‌های پایکوهی و کم‌ارتفاع‌تر کوهستان جنوبی حوضه را پوشانده‌اند.

زون گسلی سلطانیه این بخش را شدیداً تحت‌تأثیر قرار داده است. گسل سلطانیه گسلی معکوس با روند شمال غربی از مجاور سلطانیه (در شرق حوضه) آغاز و به‌طرف شمال غرب تا کوهپایه‌های جنوبی زنجان امتدادیافته است. مطالعات صورت‌گرفته نشان می‌دهند که حرکت امتدادلغز معکوس مربوط به فعّالیت‌های اخیر گسل‌های سلطانیه قابل‌توجه بوده و سبب برخی از زمین‌لرزه‌های تاریخی (زمین‌لرزه تاریخی سلطانیه در سال ۱۸۰۳) بوده است (جاویدفخر و احمدیان، ۲۰۱۹).

شکل ۱۰ نقشه شاخص‌های ژئومورفومتریک زبری سطح (راست) و انحنای طولی (چپ)، ناهنجاری‌های سطح توپوگرافیک را نشان می‌دهد. گسل‌های قدیمی و فعّال کنونی بر این ناهنجاری‌ها منطبق هستند (شکل).



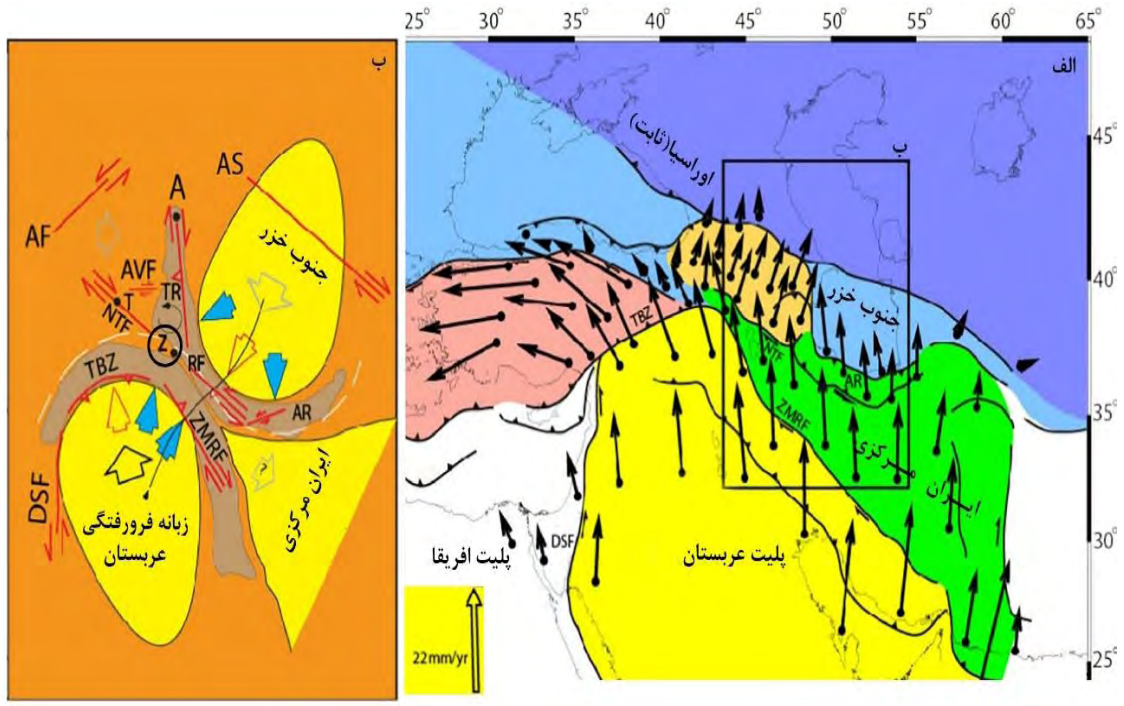
شکل ۱۰. اثرات زمین‌ساخت بر ایجاد ناهنجاری‌های سطح توپوگرافیک در بخش جنوب- جنوب‌شرق حوضه (ن.ک شکل)



شکل ۱۱. شواهد زمین‌ساختی دینامیک گسل‌ها در بخش جنوب- جنوب‌شرق حوضه

بحث

بر اساس بررسی‌های مورفوتکتونیکی و ژئودینامیکی صورت‌گرفته روی ناحیه شمال غرب، غرب، البرز غربی و شرق منطقه مورد بررسی و همچنین مطالعات صورت‌گرفته روی گسل‌های سلطانیه، زنجان و تبریز (جاویدفخر و احمدیان، ۲۰۱۹؛ توری و سید اوغلو، ۲۰۱۴؛ سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱؛ ۲۰۱۹؛ عسکری و همکاران، ۱۳۸۵؛ ثبوتی و قدس، ۱۳۹۲؛ زالی، ۱۳۹۴، بدوزاده، ۳۹۷)، منطقه مورد بررسی در بخش مرکزی منطقه برخوردی صفحه عربستان، اوراسیا (جنوب خزر) و میکروپلیت ایران مرکزی واقع شده است (شکل). زمین‌لرزه‌های بزرگ رودبار (۱۳۶۸)، تبریز و سلطانیه همگی نشانه‌هایی از پتانسیل فعّالیت بالای گسل‌های شمال غرب و ناحیه مورد بررسی هستند.

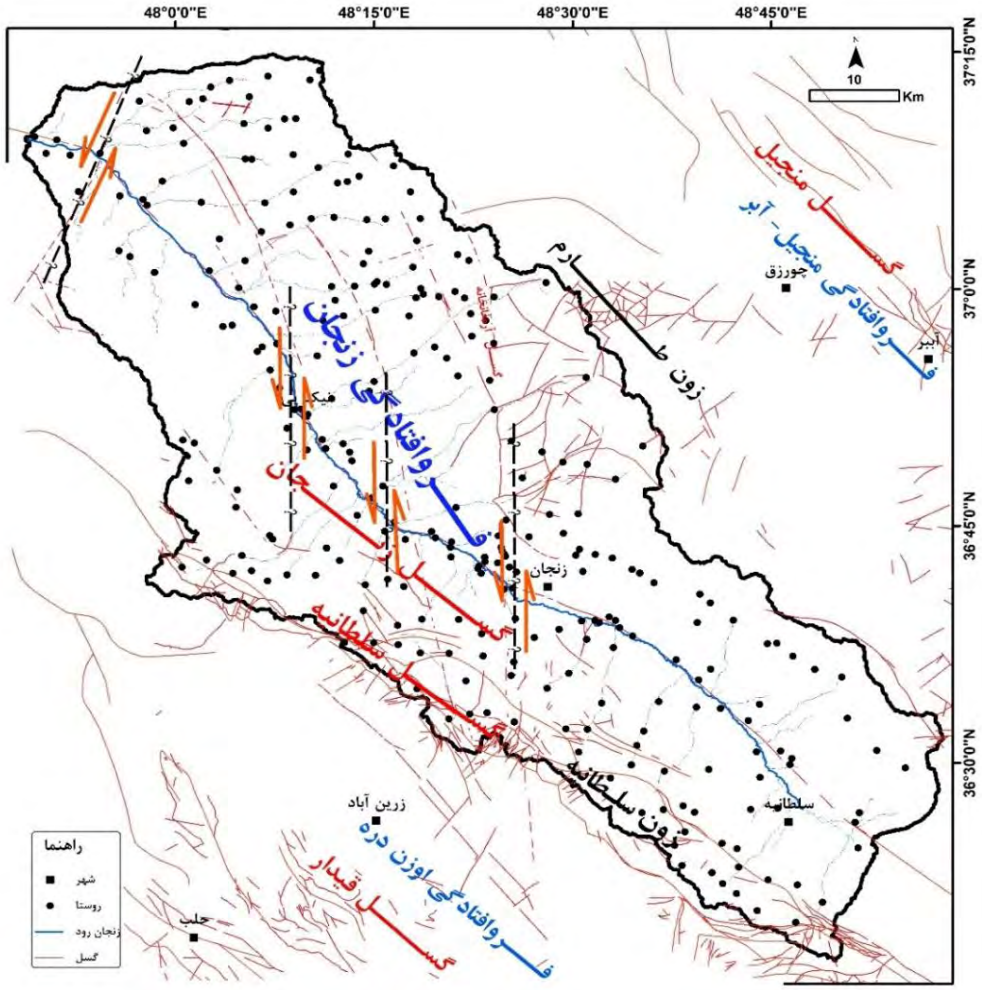


شکل ۱۲. تغییر شکل فعّال شمال غرب ایران و موقعیت منطقه موردمطالعه (دایره Z در شکل ب موقع تقریبی حوضه زنجان‌رود را نشان می‌دهد) NTF: گسل شمال تبریز؛ AR: رشته‌کوه البرز؛ AF: گسل ارس؛ AS: ناحیه فرورانش آپشرون سیل؛ NTF: گسل شمال تبریز؛ AVF: گسل اهر- ورزقان؛ RF: گسل رودبار؛ DSF: گسل بحرالمیت؛ ZMRF: گسل اخیر اصلی زاگرس؛ TR: رشته‌کوه‌های تالش؛ AR؛ رشته‌کوه البرز؛ TBZ: توروز - بیتلیس-زاگرس (ترکیه - ایران)؛ T و Z به ترتیب گسل‌های تبریز و زنجان را نشان می‌دهند (برگرفته از سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۹).

بیشتر گسل‌های حوضه به وضوح با قطع رسوبات کواترنر در سطح نمایان بوده و شواهد نو زمین‌ساختی فراوانی را به نمایش گذاشته‌اند (شکل ، شکل و شکل). بررسی صورت‌گرفته روی شبکه‌های گسلی عادی و روابط فضایی آن‌ها در سری رسوبی پلیو-کواترنر فرورفتگی زنجان (نبوی و همکاران، ۲۰۲۰) نشان می‌دهد که برهمکنش گسل‌ها سبب ایجاد بلوک‌های گسلی متعددی شده که باتوجه‌به مکانیسم دینامیک نسبی بین بلوک‌های گسلی سبب توسعه سیستم‌های خم، پله‌ای، جابجایی عمودی قابل‌توجه و لغزش‌های موازی شده‌اند.

زنجان‌رود به‌عنوان شاهرگ حیاتی منطقه در حوضه یک لندفرم هیدرو- مورفوتکتونیکی است که در گذر زمان تکامل یافته است. گسل زنجان به همراه مجموعه زون‌های گسلی که در این پژوهش مورد شناسایی قرار گرفتند (شکل ، شکل ۱۰) در تغییر شکل پلانیمتریک و ارتفاع عرصه و حریم زنجان‌رود نقش مهمی داشته‌اند. شواهد نو زمین‌ساختی بیانگر

جابجاشدگی مکرر مسیر زنجان‌رود در راستای زون گسل زنجان (شمال‌غربی- جنوب شرقی) و همچنین جهت عمود بر مسیر جریان (شمالی -جنوبی تا شمال غربی- جنوب شرقی) هستند. اگرچه به نظر می‌رسد عامل اولیه و مؤثر در شکل‌گیری زنجان‌رود ناشی از عملکرد زون گسلی زنجان باشد ولی عملکرد گسل‌های دیگر در تغییر مسیرهای متوالی آن نقش مهمی داشته است. از جنوب به سمت شمال غرب نو زمین‌ساخت حاکم بر حوضه زنجان‌رود سبب چهار تغییر عمده در مسیر این رودخانه شده است. تغییر مسیر اول در محل تلاقی زنجان‌رود و گسل ارمغانخانه در جنوب غرب شهر زنجان روی داده است (شکل و شکل). به‌طرف شمال غرب دومین تغییر عمده در مسیر زنجان‌رود ناشی از جابجایی شمالی-جنوبی است که در جنوب روستای ینگیجه (شمال روستای امین‌آباد) به وقوع پیوسته است (شکل). به‌طرف شمال غرب به طور مکرر شواهدی از تغییر بستر و حریم زنجان‌رود توسط گسل‌های فعّال مشاهده می‌شود (جنوب کناوند). یکی از مهمرین تغییرات مسیر زنجان‌رود در شمال شهر نیک‌پی رخ داده است. این تغییر مسیر و ایجاد پیچ هلالی رو به شمال‌شرق در مسیر زنجان‌رود ناشی از گسلی است که به موازات زنجان‌رود عمل کرده است. در محل شهر نیک‌پی تلاقی گسل‌های زنجان‌رود و گسل فرعی نیک‌پی با بستر زنجان‌رود آن را به شکل چپگرد جابجا نموده است. سه گسل فوق‌الذکر بیشترین تغییر شکل را بر مسیر زنجان‌رود تحمیل کرده‌اند. آخرین تغییر عمده در مسیر زنجان‌رود احتمالاً ناشی از عملکرد گسل فرعی در قسمت انتهایی حوضه باشد که به طور قابل‌توجهی مسیر زنجان‌رود را ۳۰~ تا ۳۵~ درجه به‌طرف جنوب منحرف کرده است.



شکل ۵. الگوی دینامیک گسل‌ها و تأثیر آن‌ها در بستر زنجان‌رود

شکل نتیجه تحلیلی و الگوی پیشنهادی حاکم بر دینامیک گسل‌های حوضه زنجان‌رود را ارائه داده است. بر اساس این

الگو مورفولوژی حوضه زنجان‌رود تحت‌تأثیر چهار سیستم گسلی با مقیاس‌های متفاوت قرار گرفته است. مهم‌ترین خطواره گسلی که از غرب زنجان و در راستای شمالی- جنوبی کشیده شده است، در ایجاد واحد کوهستان و کوهپایه و دشت و همچنین تغییر مسیر زنجان‌رود نقش مهمی داشته است. دو گسل بعدی همانطور که در شکل مشخص هستند منطبق بر محل بیشترین نقطه تغییر مسیر زنجان‌رود می‌باشند. راستای گسل سوم و مسیر زنجان‌رود ابتدا یکی بوده و سپس به سمت شمال غرب از مسیر زنجان‌رود فاصله می‌گیرد. ذکر این نکته در اینجا لازم است که بر اساس شاخص‌های ژئومورفومتریک (شکل ، شکل ۸ و شکل ۱۰) بسیاری از گسل‌ها در حوضه امتداد مستقیم نداشته و جهت ساده‌سازی امتداد آن‌ها در شکل به‌صورت مستقیم در نظر گرفته شده است.

به‌طورکلی، کنترل‌گر کلیدی در تکامل شبکه‌های زهکشی حوضه در بلندمدت، بر همکنش‌های گسل‌ها و نحوه هم‌پیوندی بلوک‌های گسلی است. بررسی نبوی و همکاران (۲۰۲۰) بیانگر لغزش موازی گسل‌ها است. این بررسی تغییر شکل مکرر بستر زنجان‌رود را ناشی از عملکرد مزدوج گسل‌ها می‌داند که با نتایج بررسی گسل‌ها در مقاطع عمودی در منطقه مورد بررسی همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش به توصیف ژئو دینامیک گسل‌ها و مورفوتکتونیک حوضه زنجان‌رود پرداخته است. حوضه زنجان‌رود در کنش و واکنش بین زون‌های گسلی طارم در شمال، سلطانیه در جنوب و همچنین گسل زنجان که زنجان‌رود روی آن جاری است، به شکل فلاتی مشخص بین فرورفتگی افتادگی‌های گسلی منجیل – آب‌بر در شمال، اوزون دره در جنوب، دره قزل‌اوزن در غرب و همچنین دشت قزوین در شرق قرار گرفته است. بررسی حاضر نشان داد که می‌توان با به‌کارگیری تکنیک‌های دورسنجی و ژئومورفومتری و با استفاده از داده‌های ارتفاع رقومی اقدام به بارزسازی خطواره‌ها و روندهای توپوگرافیک، هیدرولوژیک و ساختمانی حوضه نمود و الگوی مورفوتکتونیک ناشی از تعامل گسل‌ها را شناسایی و تکتونیک فعّال در یک حوضه را ارزیابی کرد.

نتایج کلی این پژوهش عبارتند از:

شواهد نو زمین‌ساختی: بررسی شواهد نو زمین‌ساختی نشان می‌دهند که گسل‌های منطقه با قطع رسوبات کواترنر، گسل‌هایی فعّال بوده و دارای پتانسیل بالای فعّالیت لرزه هستند.

برهم‌کنش‌های گسلی و تأثیر آن‌ها بر مسیر زنجان‌رود: گسل‌ها در ایجاد بلوک‌های گسلی و توسعه سیستم‌های چین و گسل، ساختمان پله‌ای، جابه‌جایی عمودی و افقی قابل‌توجه و لغزش‌های موازی نقش مهمی داشته‌اند. مطالعه شبکه‌های گسلی و روابط فضایی آن‌ها در سری رسوبی پلیو – کواترنر فرورفتگی زنجان نشان می‌دهد که این برهم‌کنش‌ها منجر به تغییر مسیر زنجان‌رود شده‌اند.

تغییر شکل حوضه زنجان‌رود: این بررسی نشان داد که حوضه زنجان‌رود تحت‌تأثیر چهار سیستم گسلی اصلی و چند گسل فرعی با مقیاس‌های متفاوت قرار گرفته است. این تغییرات شکل‌گیری واحد کوهستان، کوهپایه، دشت و تغییر مسیر زنجان‌رود را تحمیل کرده‌اند.

کنترل‌گر کلیدی در تکامل شبکه‌های زهکشی حوضه: برهم‌کنش‌های گسل‌ها و نحوه هم‌پیوندی بلوک‌های گسلی از جمله عوامل مهم در تکامل شبکه‌های زهکشی حوضه به شمار می‌آیند.

الگوهای زمین‌ساختی حوضه: حوضه زنجان‌رود باتوجه‌به موقعیت جغرافیایی و قرارگیری در نقاط تلاقی واحدهای

مورفوتکتونیک البرز (غربی)، تالش و ایران مرکزی، در معرض الگوهای تنش زمین‌ساختی پیچیده‌ای قرار دارد. این الگوهای تنش زمین‌ساختی شامل حرکت همگرای شمال – جنوب در راستای عربستان – اوراسیا می‌شود. همچنین، عملکرد واحدهای منطقه‌ای – ناحیه‌ای – محلی نیز در تشکیل حوضه زنجان‌رود نقش داشته است.

زنجان دشتی گسلی است: به نظر می‌رسد فروافتادگی حاصل از تلاقی و تعامل دو زون گسلی شمال غربی – جنوب شرقی (زنجان و سلطانیه در جنوب و طارم و تالش در شمال) و شمالی – جنوبی (گسل ارمغانخانه) در شکل‌گیری دشت زنجان نقش داشته باشد. همچنین عملکرد همزمان و فعّال گسل‌ها موجب ایجاد ناهنجاری‌های مورفولوژیکی در سطح توپوگرافی در حوضه زنجان‌رود شده‌اند.

ناهنجاری کانال زنجان‌رود و توپوگرافی ناهمگون در دشت زنجان و حوضه: بخش شمالی حوضه زنجان‌رود دارای دو خطواره اصلی است که به سمت جنوب ادامه دارند. این خطواره‌ها باعث قطع و جابه‌جاشدگی رسوبات کواترنر در سطح دشت، پادگانه‌ها، سواحل و کانال زنجان‌رود شده‌اند. بخش مرکزی حوضه نیز دارای یک خطواره اصلی است که زمین‌های تپه‌ماهوری را از زمین‌های کم شیب جدا کرده است. همچنین، بخش جنوبی و جنوب شرقی حوضه، تأثیر فعّال زون گسلی سلطانیه و گسل‌های زیاد محلی موجب ایجاد ناهنجاری‌های فراوانی در سطح توپوگرافیک و تنوع مورفولوژیک شده است.

این پژوهش نشان می‌دهد که شواهد مورفوتکتونیک حوضه زنجان‌رود نشان‌دهنده وجود عملکرد گسل‌ها و سیستم‌های شکستگی فعّال در منطقه است که تأثیر چشمگیری بر شکل‌گیری ناهنجاری‌های مورفولوژیکی و توپوگرافیک در حوضه زنجان‌رود دارد.

به‌طورکلی، این پژوهش می‌تواند نقش مهمی در درک فعّالیت گسل‌ها، تغییرات شکل‌گیری حوضه‌ها و اثرات آن‌ها بر مسیر رودخانه‌ها داشته باشد. باتوجه‌به اهمیت این موارد در مطالعات ژئومورفولوژیکی، ژئودینامیکی و زلزله‌شناسی، این نتایج می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع طبیعی و آمایش محیطی و زمینی مطرح شوند.

تشکر و قدردانی

بر اساس اظهار نویسندگان این مقاله حامی مالی نداشته است.

منابع

۱) استفان، شانوف و کنستانتین، کوستوف. (۱۳۹۸). *تکتونیک فعال و کارست*. ترجمهٔ ابوالقاسم گورابی. تهران: مؤسسهٔ انتشارات دانشگاه تهران.

۲) اسفندیاری درآباد، فریبا و نظافت تکله، بهروز. (۱۴۰۲). ارزیابی و تحلیل فعّالیت‌های نئوتکتونیکی و توان لرزه‌خیزی گسل‌ها (مطالعه موردی: حوضه آبخیز نیر). *جغرافیا و روابط انسانی*، ۵(۴)، ۵۶۸–۵۸۹. doi: 10.22034/gahr.2023.393039.1844

۳) بدوزاده، منصور. (۱۳۹۷). تکتونیک فعّال و تکه‌بندی گسله شمال زنجان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. به راهنمایی اسماعیل شبانیان، زنجان: دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه.

۴) بربریان، مانوئل. (۱۳۹۵). *زمین‌لرزه و گسلش سطحی هم‌لرز در فلات ایران با رویکرد تاریخی اجتماعی و فیزیکی*. ترجمهٔ حمید نظری. تهران: نشر همراه علم.

۵) ثبوتی، فرهاد و قدس، عبدالرضا. (۱۳۹۲). مطالعه لرزه‌خیزی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه برای شهر زنجان و منطقه طارم استان زنجان. دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.

۶) زالی، زهرا. (۱۳۹۴). بررسی هندسه و سازوکار سامانه گسلی شمال باختر زنجان با به‌کارگیری روش‌های نئوتکتونیکی و

ژئوفیزیکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. به راهنمایی فرهاد ثبوتی و اسماعیل شبانیان. زنجان: دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه.

۷) سالنامه آماری استان زنجان. (۱۳۹۸). مرکز ملّی آمار ایران.

۸) سالنامه آماری ایران. (۱۳۹۰) مرکز ملّی آمار ایران.

۹) عابدینی، موسی؛ پاسبان، امیرحسام؛ نظافت تکله، بهروز و پورقاسمی، الهامه. (۱۴۰۱). بررسی فعالیت‌های نئوتکتونیکی با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و توان‌لرزه‌زایی گسل‌ها (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کوزه‌توپراقی). *مطالعات علوم محیط زیست*، ۷(۲)، ۵۰۴۳-۵۰۵۲. doi:10.22034/jess.2022.334604.1750

۱۰) عسکری، روح‌الله؛ قدس، عبدالرضا و ثبوتی، فرهاد. (۱۳۸۵). بررسی فعّالیت لرزه‌ای سامانه‌های گسلی در استان زنجان و مناطق مجاور با استفاده از مکان‌یابی دوباره زمین‌لرزه‌ها. بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین، تهران.

۱۱) گورابی، ابوالقاسم. (۱۴۰۲). *ژئومورفومتری کاربردی؛ داده‌ها، روش‌ها و تکنیک‌ها*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

۱۲) هنگل، تامیسلاو و رویتر، هانس. (۱۴۰۱). *ژئومورفومتری: مفاهیم، نرم افزار، کاربردها*. ترجمهٔ ابوالقاسم گورابی. تهران: نشر انتخاب.

References

1) Abdullah, LH., Al Daghastani, HS., & Bety, AKS.. (2023). Evaluation of neotectonic activity using watershed geomorphic analysis: A case study in the west of Dokan Lake, Kurdistan Region, Iraq. Heliyon; 9(2), e13187. doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13187

2) Abedini, M., Pasban, A., Nezafat takle, B., & pourgasemi, E. (2022). Investigation of neotectonic activities using geomorphic and seismic potentials of faults (Case study: Pine-basin watershed). Journal of Environmental Science Studies, 7(2), 5043-5052. doi:10.22034/jess.2022.334604.1750 [In Persian].

3) Askari, R., Quds, A., & Sobouti, F., (2015). Investigating the seismic activity of fault systems in Zanjan province and nearby areas using re-locating of earthquakes. *25th Earth Sciences Meeting, Tehran, Iran*. [In Persian].

4) Badoozadeh, M. (2018). *Active tectonics and segmentation of the North Zanjan fault*. Master's Thesis, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Department of Earth Sciences, Zanjan, Iran. (In Persian).

5) Berberian, M. (2016). *Earthquakes and Coseismic Surface Faulting on the Iranian Plateau with a historical, social and physical approach*. Translated By Nazari, Hamid. Tehran: Nashre Elm Press.

6) Burbank, D.W. & Anderson, R.S. (2011). *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science, Malden, 273 p.

7) Esfandyari, F., & nezafat taklhe, B. (2023). Evaluation and Analysis of Neutactonic Activities and Fault Seismic Power (Case Study: Nir Watershed Basin). *Geography and Human Relationships*, *5*(4), 568-589. doi: 10.22034/gahr.2023.393039.1844 [In Persian].

8) Gautam, PK., & Singh, AK. (2023). Evaluation of Active Tectonic Features of Nandakini River Basin, Lesser Himalaya, India by Using Morphometric Indices: A GIS Approach. *Advances in Environmental and Engineering Research, 4*(1), 014. doi:10.21926/aeer.2301014

9) Goorabi, A., (2023). *Applied Geomorphometry: Data, methods and techniques*. Tehran, University of Tehran Press. [In Persian].

10) Hengl, T., & Reuter, H., (2022). *Geomorphometry: concepts, software, applications.* Translated By Abolghasem, Goorabi, Tehran, Nashre Entekhab Press. [In Persian].

11) Javidfakhr, B., & Seiran, A. (2019). Structural Concepts for Soltanieh Fault Zone (NW Iran). *Iranian Journal of Earth Sciences, 11* (4), 290–304. doi.org/10.30495/ijes.2019.669402

12) Makrari, Sh., Gopal, Sh., Ajay, K., Taloor, M., Somorjit Singh, K.K., & Sarma, S.P.A. (2022). Assessment of the geomorphic indices in relation to tectonics along selected sectors of Borpani

River Basin, Assam using Cartosat DEM data. *Geosystems and Geoenvironment, 1* (3), 1-16. doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100068

13) Masson, F., Chery, J., Hatzfeld, D., Martinod, J., Vernant, P., Tavakoli, F. and GhaforyAshtiani, M., (2005). Seismic versus aseismic deformation in Iran infrred from earthquakes and geodetic data. *Geophys. J. Int., 160*, 217-226. doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02465.x
14) Milena, R., & Piotr, M. (2021). Morphometric properties of river basins as indicators of relative tectonic activity – Problems of data handling and interpretation. *Geomorphology, 389*. doi:10.1016/j.geomorph.2021.107807
15) Nabavi, S. T., Alavi, S. A., Christopher A., Wibberley, J., & Jahangiri, M. (2020). Normal Fault Networks and Their Spatial Relationships in Plio-Quaternary Sedimentary Series: A Case Study in the Zanjan Depression, NW Iran. *Journal of Structural Geology, 136*. doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104072
16) Rachna Raj, (2012), Active tectonics of NE Gujarat (India) by morphometric and morpho-structural studies of Vatrak River basin. *Asian Earth Sciences, 50*, 66-78. doi:10.1016/j.jseaes.2012.01.010
17) Sobouti, F., & Quds, A. (2012) *Seismicity study and earthquake risk zoning for Zanjan city and Tarom region of Zanjan province.* Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Department of Earth Sciences, Zanjan, Iran. [In Persian].
18) Shanov, S., (2018). Active tectonics and karst, Translated By Abolghasem, Goorabi, Tehran, Univeristy of Tehran Press. [In Persian].
19) Siahaan, R. P., Sukiyah E., Sulaksana N., Haryanto A. D., (2022). Assessment of Active Tectonic from Morphometric Properties in Krueng Raya Watershed, Aceh Besar, Indonesia, Engineering Letters, 30:3.
20) Stanley, A., Schumm, Jean F., Dumont, J., & Holbrook, M. (2000). *Active Tectonics and Alluvial Rivers*. Cambridge University Press.
21) Statistical Yearbook of Iran. (2013). National Statistical Center of Iran. [In Persian].
22) Statistical Yearbook of Zanjan Province. (2018). National Statistical Center of Iran. [In Persian].
23) Solaymani Azad, Sh., Nemati, M., Abbassi, M., Foroutan, M., Hessami Kh., Dominguez S., Bolourchi M., & Shahpasandzadeh, M. (2019). Active-Couple Indentation in Geodynamics of NNW Iran: Evidence from Synchronous Left- and Right-Lateral Co-Linear Seismogenic Faults in Western Alborz and Iranian Azerbaijan Domains. *Tectonophysics, 754*, 1–17. doi:10.1016/j.tecto.2019.01.013
24) Solaymani Azad, Sh., S. Dominguez, H. Philip, K. Hessami, M. R. Forutan, M. Shahpasan Zadeh, & Ritz, J. F. (2011). The Zandjan Fault System: Morphological and Tectonic Evidences of a New Active Fault Network in the NW of Iran. *Tectonophysics, 506* (1), 73–85. doi:10.1016/j.tecto.2011.04.012
25) Toori, M., & Seyitoğlu, G. (2014), Neotectonics of the Zanjan–Kazvin area, Central Iran: Left lateral strike slip induced restraining stepovers. *Turkish J Earth Sci, 23*, 260-276. doi.org/10.3906/yer-1307-11
26) Vernant, Ph., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M.R., Vigny, C., Masson, M., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, E.R., Tavakoli, F., & Chery, J. (2004). Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophys. J. Int., 157*, 381-398. doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02222.x
27) Zali, Z. (2015). *Determination of the Kinematics and Shallow Geometry of the North-West Zanjan Fault System Through Neotectonic and Geophysical Investigations*. Master's Thesis, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Department of Earth Sciences, Zanjan, Iran. [In Persian].