



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

Abolghasem Goorabi <sup>1</sup>✉, Mojtaba Yamani <sup>2</sup>, Shirin Mohammadkhan <sup>3</sup>, Seyyed Javad Hosseini <sup>4</sup>

1. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: [goorabi@ut.ac.ir](mailto:goorabi@ut.ac.ir)

2. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: [myamani@ut.ac.ir](mailto:myamani@ut.ac.ir)

3. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: [shirinmkh@ut.ac.ir](mailto:shirinmkh@ut.ac.ir)

4. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: [sjhoseini@ut.ac.ir](mailto: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 Zanjanrud 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 Zanjanrud 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).

DOI: [10.22059/JPHGR.2023.354037.1007741](https://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.354037.1007741)

**Publisher:** University of Tehran Press

## **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. Zanzanrud 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 Zanzanrud basin using remote-sensing and geomorphometric techniques. The main objective of the research was to investigate the morphological pattern of the Zanzanrud 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 Zanzanrud 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 Zanzanrud 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 enhancement 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 Zanzanrud, which almost follows the extension of the Zanzan Fault, but in order to understand the dynamic pattern of faults and their effects on Zanzanrud, 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 Zanzanrud Basin: This study showed that Zanzanrud 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 Zanzanrud.

- Tectonic patterns of the basin: Zanzanrud 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 Zanzanrud 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.

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

ابوالقاسم گورابی<sup>۱</sup>✉، مجتبی یمانی<sup>۲</sup>، شیرین محمدخان<sup>۳</sup>، سید جواد حسینی<sup>۴</sup>

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [goorabi@ut.ac.ir](mailto:goorabi@ut.ac.ir)

۲. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [myamani@ut.ac.ir](mailto:myamani@ut.ac.ir)

۳. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [shirinmkh@ut.ac.ir](mailto:shirinmkh@ut.ac.ir)

۴. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [sjhoseini@ut.ac.ir](mailto:sjhoseini@ut.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

#### 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 فعال،

زنگان‌رود،

ژئومورفومتری،

ناهنجاری،

هیدرو ژئومورفولوژی

ژئومورفولوژی حوضه زنگان‌رود متأثر از زون‌های تکتونیکی فعال حاصل از عملکرد تعاملی گسل‌های سلطانیه، زنگان، 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 فعال گسل‌ها به سمت مرکز حوضه و محل زنگان‌رود متمرکز است. از طرفی تبعیت مورفولوژی و روندهای توپوگرافیک مختلف حوضه و همچنین کانال زنگان‌رود 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 فعال منطقه هستند. براین اساس 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 زنگان‌رود با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی و ژئومورفومتری. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۵ (۲)، ۸۹-۱۱۰.

<http://doi.org/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 فعال 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 قابل توجه ژئومورفیک متناسب با مکانیسم گسلش، چین‌خوردگی و نرخ فعالیت می‌شود. این تغییرات می‌توانند گستره وسیعی از پدیده‌های طبیعی و انسانی را در برگیرد. در این میان برخی لندفرم‌ها نسبت به تغییرات آرام تکتونیک فعال حساس بوده و این تغییرات را در مورفولوژی خود ثبت و مستند می‌کنند.

فرایندهای تکتونیک فعال 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 فعال 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 کمیت 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) فعالیت 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 به‌طور کلی فرم زمین هستند، تأثیر می‌گذارد و از این‌رو فرایندهای تکتونیک و ژئومورفیک و نتایج آن‌ها درهم‌تنیده شده‌اند (Raj, 2012).

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

ناگهانی مسیر و شیب رودخانه را تغییر دهد. چنانچه به دنبال چگونگی تأثیر تکتونیک فعال بر چشم انداز از طریق تعامل با رودخانه‌ها باشیم، رودخانه‌های آبرفتی، مانند بخش قابل توجهی از زنجار رود، 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 فعالیت‌های زمین ساخت نسبی دارند که عموماً به عنوان نرخ متغیر بالا آمدگی سطح زمین تلقی می‌شود. طی دهه گذشته علاقه زیادی به مورفومتری حوضه‌های رودخانه در ژئومورفولوژی تکتونیک نشان داده شده 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 به وضوح به آن نسبت داد؛ دوم، پیدایش مدل‌های رقومی ارتفاع و پیشرفت سریع در نرم افزارهای 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). به عنوان مثال تکنیک تحلیل سایه روشن<sup>۱</sup> می‌تواند برای شبیه سازی اثر مصنوعی مورفولوژی به کار رود (Siahaan et al., 2022). محققان بسیاری به بررسی وضعیت زمین ساخت 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 قابل توجه 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 فعال 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 تئوتکتونیکی و توان لرزه‌خیزی گسل‌ها را در حوضه نیر اردبیل مورد ارزیابی و تحلیل قرار داده و منطقه مورد نظر را دارای وضعیت تکتونیکی متوسط تشخیص دادند. عابدینی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی فعالیت‌های تئوتکتونیکی 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 مورد مطالعه از فعالیت‌های تکتونیک است که نتیجه آن پستی و بلندی زیاد و کج شدگی حوضه می‌باشد.

روش‌های ارزیابی ژئومورفیک فرایندها در رودخانه‌های آبرفتی، لندفرم‌های ایجاد شده توسط تکتونیک فعال، نرخ تکتونیک فعال، انواع تغییر شکل و شواهد تغییر شکل، اطلاعات مهمی درباره مطالعات تجربی در مورد چگونگی واکنش رودخانه‌های آبرفتی به تکتونیک فعال 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 فعال از مباحث مهم مؤثر در بررسی‌های تکتونیک فعال رودخانه‌ها است. فرایندهای مؤثر بر تغییرات جانبی و مورفولوژی

1. hillshade

رودخانه ناشی از تکتونیک فعال با گسلش امتداد لغز، گسلش عادی و بالآمدگی و پایین افتادگی نیز در این زمینه اهمیت دارند. پی بردن به شرایط زمین ساخت هر منطقه و حوضه در کنار سایر عوامل اثرگذار تأثیر بسزایی در درک فرایندهای حاکم بر آن دارد. حوضه زنجان رود به صورت یک فلات کوچک محلی و به شکلی ناهمگون با راستای توپوگرافیک ناحیه پیرامونی خودنمایی می کند. در این پژوهش تلاش شده تا تأثیر تکتونیک بر ژئومورفولوژی حوضه زنجان رود به کمک تکنیک‌های دورسنجی و ژئومورفومتری ارزیابی شده و سپس الگوی مورفولوژیک بستر زنجان رود و ارتباط آن با نو زمین ساخت فعال گسلی مورد بررسی قرار گیرد. در همین راستا، ترسیم مدل و الگوی تغییر شکل فعال مسیر زنجان رود با استفاده از این تکنیک‌ها با استخراج شواهد نو زمین ساخت فعال در حوضه زنجان رود هدف اصلی پژوهش را تشکیل می دهند.

## روش پژوهش

در این پژوهش جهت بررسی و ارزیابی اثرات گسلش بر ژئومورفولوژی حوضه زنجان رود 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، کوئیک برد، مدل‌های رقومی SRTM90&30m، ASTER-30m و همچنین مدل رقومی ۱۰ متر سازمان نقشه برداری جهت استخراج شاخص‌های ژئومورفومتری و بارزسازی عناصر مورفوتکتونیک و تجزیه و تحلیل‌های ژئومورفومتری و ارزیابی تأثیر گسل‌ها بر چشم انداز و لندفرم‌های حوضه زنجان رود استفاده شده است. علاوه بر این، در همین راستا بررسی‌های میدانی جهت اعتبارسنجی یافته‌های دورسنجی و ژئومورفومتری و تهیه داده‌های حقیقت زمینی برای مقایسه و ارزیابی دقت انجام شده است. تجزیه و تحلیل‌های ژئومورفومتری پارامترهای مورفومتری و استخراج شاخص‌های ژئومورفومتری و بارزسازی عناصر مورفوتکتونیک در قالب نرم افزارهای مختلف (ENVI, SAGA, Micro-) انجام شده‌اند.

## شاخص‌های ژئومورفومتری و بارزسازی عناصر مورفوتکتونیک

ژئومورفومتری با رویکرد مدرن تحلیلی - کارتوگرافیک به تحلیل کمی سطح زمین می پردازد (گورابی، ۱۴۰۲). با تکنیک‌های خاص این دانش و اعمال الگوریتم‌های متناسب با شاخص (متغیر، پارامتر) موردنظر روی مدل ارتفاع رقومی می توان 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 زمین ساخت و گسلش یکی از مهم ترین 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<sup>۱</sup> موسوم است. کمیت انحنا امکان درک اساسی معنای هندسی انحناها، مقاطع عمود و موازی با سطوح شیب را فراهم می نماید. انحنا هر خط، مقدار انحراف آن از خط مستقیم، و انحنا یک سطح مقداری کمی است که سطح از صفحه مسطح منحرف می شود. معمولاً برای هر نقطه از منحنی یا سطح می توان انحنا آن را تعیین کرد. با محاسبه حداقل، حداکثر و میانگین انحنا هر مقطع می توان نقاط کنیک و عطف روی دامنه را شناسایی کرد. بسیاری از گسل‌ها و محور چین‌ها را می توان با این پارامترها شناسایی کرد. انحنا گاوسی مهم ترین پارامتر در ژئومورفومتری

1. Curvature

محسوب می گردد (گورابی، ۱۴۰۱)، زیرا نه تنها می توان به کمک آن ناهنجاری های سطح توپوگرافیک را محاسبه کرد، بلکه امکان طبقه بندی دامنه ها که مهم ترین مقیاس عملکردی فرایندی در سطح توپوگرافیک است به کمک آن فراهم می گردد.

**جدول ۱.** پارامترهای مورد استفاده جهت بارزسازی عناصر سطحی توپوگرافیک

| پارامترهای سطح زمین       | مقیاس عملکرد | چه چیزی را توصیف می کند؟                                    |
|---------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------|
| شیب                       | محلی         | نرخ جریان و تغییرات آن                                      |
| جهت                       | محلی         | جهت خط جریان و تغییرات آن                                   |
| انحنای پلان <sup>۱</sup>  | غیرمحلی      | کمی سازی واگرایی و همگرایی خط جریان                         |
| انحنای قائم یا نیمرخ      | غیرمحلی      | معیار نسبی کاهش سرعت و شتاب جریان های گرانشی سطح توپوگرافیک |
| انحنای تجمعی <sup>۲</sup> | 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 خطواره ها                                      |

\*روابط و فرمول های محاسبه جهت رعایت اختصار و حجم صفحات آورده نشده اند، (جهت اطلاع مراجعه کنید به گورابی، ۱۴۰۲).

هر متغیر مورفومتری در واقع یک پارامتر توصیف گر سطح توپوگرافی است. متغیرهای محلی، غیرمحلی و ترکیبی سه نوع اصلی متغیرهای مورفومتری هستند (جدول ۱). با محاسبه و در دسترس بودن نقشه های متغیرهای محلی و غیرمحلی یعنی انحنای پلان، افقی و عمودی می توان انحنای تفاضلی (کاهش نسبی همگرایی جریان ها در یک نقطه معین از سطح توپوگرافی)، انحنای مازاد افقی (میزان تحذب و تقعر هر مقطع عمودی در راستای یک کنتور)، تفاضلی و تجمعی و همچنین انواع شاخص های ژئومورفومتری را محاسبه کرد (جدول ۲). متغیرهای ترکیبی و شاخص ها نه تنها در شناسایی ناهنجاری ها بلکه در شناسایی آبجکت ها و لندفرم سطحی می توانند مؤثر باشند (گورابی، ۱۴۰۲).

**جدول ۲.** شاخص های ژئومورفومتری جهت بارزسازی عناصر و شناسایی ناهنجاری های سطحی توپوگرافیک

| شاخص                                         | چه چیزی را توصیف می کند؟                                                           |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| زبری <sup>۳</sup>                            | ناهمگنی (تباين) سطح توپوگرافی را کمی می کند.                                       |
| توان جریان یا آستانه شروع کانال <sup>۴</sup> | شناسایی رأس کانال (شروع کانال)، کانال های جوان                                     |
| همگرایی و واگرایی جریان <sup>۵</sup>         | همگرایی یا واگرایی و کاهش سرعت یا شتاب جریان (توسط انحنای پلان اندازه گیری می شود) |
| موقعیت توپوگرافی چند مقایسه <sup>۶</sup>     | خط الراس را از دره ها متمایز می کند.                                               |
| شاخص توان جریان <sup>۷</sup>                 | قدرت فرسایشی آب جاری، مکان احتمالی تشکیل خندق ها در سطوح توپوگرافیک                |
| شاخص موقعیت توپوگرافی <sup>۸</sup>           | شیب و طبقه بندی لندفرم ها                                                          |
| شاخص رطوبت توپوگرافی <sup>۹</sup>            | مکان و موقع مناطقی با پتانسیل رطوبت بالا                                           |

\*روابط و فرمول های محاسبه به جهت رعایت اختصار و حجم صفحات آورده نشده اند، (جهت اطلاع مراجعه کنید به گورابی، ۱۴۰۲)

1. Plan curvature
2. Accumulation curvature
3. Terrain Ruggedness Index (TRI)
4. Stream Power Index Channel Initiation Threshold (CIT) index برابر است با شاخص
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)



باتوجه به حوزه عملکرد هر یک از انحناها، پس از محاسبه و تهیه نقشه می‌توان به صورت بصری و کمی سطوح، خطوط و ناهنجاری‌ها را در سطح توپوگرافی شناسایی کرد. در این پژوهش به کمک مدل ارتفاع رقومی ۳۰، ۹۰ (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<sup>۱</sup> در قالب نرم‌افزارهایی که اشاره شد، استخراج و تبدیل به نقشه شده‌اند.

### روش استخراج خطواره‌های گسلی فعال 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:

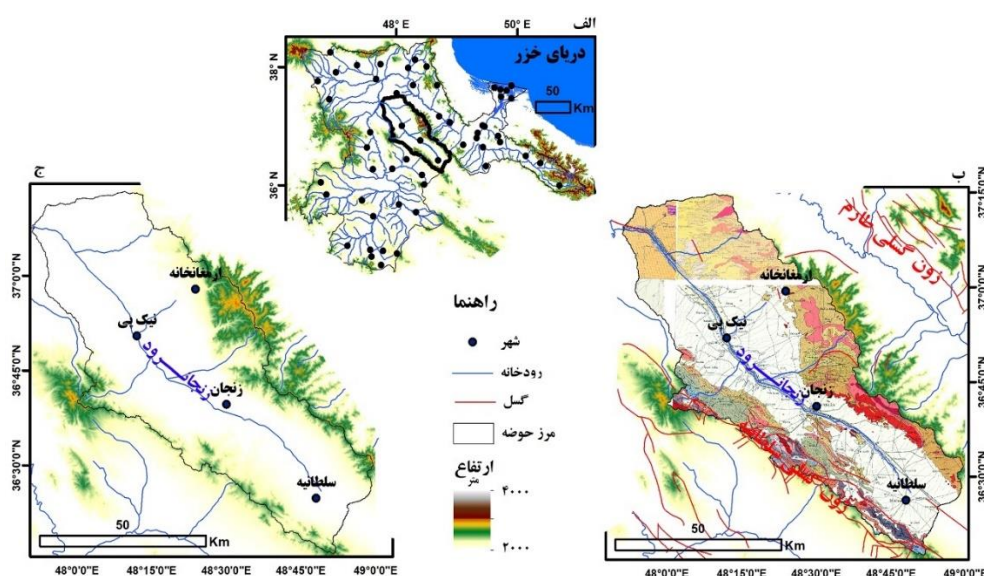
- ۱- جمع‌آوری داده‌ها: ابتدا تصاویر ماهواره‌ای (لندست و سنتینل ۲) پوشش‌دهنده منطقه مورد مطالعه دانلود شد. در این مرحله دقت شده است تا تصاویر با حداقل پوشش ابری و وضوح فضایی باشند.
- ۲- پردازش و بهبود تصویر: از تکنیک‌های مختلف بهبود تصویر جهت افزایش قابلیت مشاهده جزئیات تصویر، افزایش کنتراست، کاهش خطا 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 به صورت بصری به دقت بازرسی شدند تا خطواره‌های قابل مشاهده، 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 تجزیه و تحلیل 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- تجزیه و تحلیل 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 تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.
- ۶- تجزیه و تحلیل خطی: از ابزارهای تحلیل خطی در GIS برای تجزیه و تحلیل کمی جهت و طول و... خطواره‌های شناسایی شده 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 تجزیه و تحلیل 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 فعال را دارند. شایان ذکر است که شناسایی اثر گسل‌های فعال با استفاده از تصاویر نوری کاری چالش برانگیز است؛ زیرا علاوه بر تخصص در دورسنجی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی نیازمند داده‌های اولیه با قدرت تفکیک مناسبی هستند.

### محدوده مورد مطالعه

حوضه زنجان رود با مساحت ۴۶۷۲/۲۳ کیلومترمربع (۴۶۷۲۲۳ هکتار) از نظر هیدرولوژی و تقسیمات حوضه‌ای جزئی از حوضه قزل اوزن و سپس سفیدرود (۵۹۰۰۰ کیلومترمربع) محسوب می‌گردد. رواناب حوضه زنجان رود به قزل اوزن<sup>۱</sup> و سپس به دریای خزر زهکشی می‌شود (شکل ۱، الف و ج).



شکل ۱. حوضه مورد مطالعه؛ الف) موقع زیرحوضه زنجان رود در حوضه سفیدرود؛ ب) زمین‌شناسی حوضه (۱:۲۵۰۰۰)؛ توپوگرافی حوضه زنجان رود

از نظر زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه 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 شکل گرفته‌اند (شکل ۱، ب).

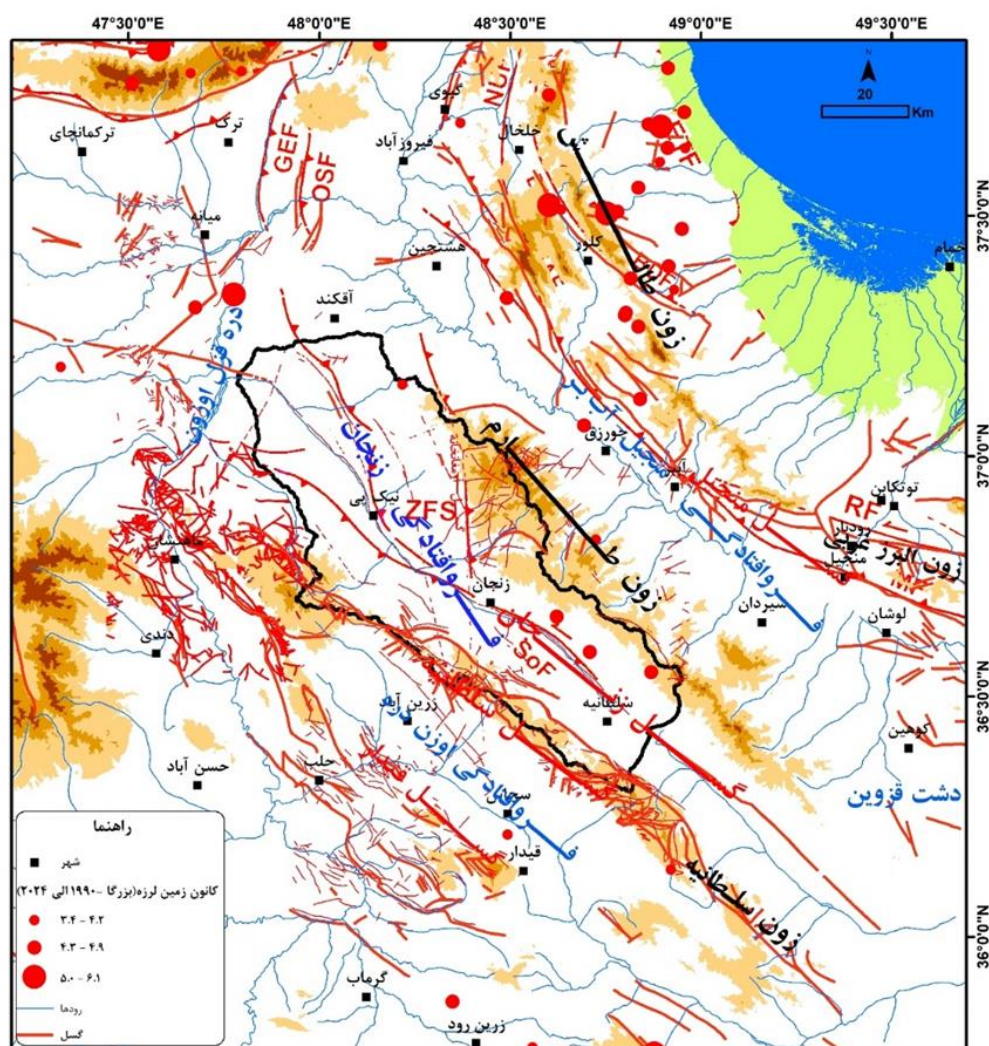
هسته اولیه ژنز و پیدایش ناحیه مورد بررسی و منطقه‌ای که در این پژوهش تحت عنوان فلات محلی زنجان از آن یاد می‌شود پس از بسته شدن حوزه اقیانوسی پالئوتتیس و باز شدن نتوتتیس آغاز گردید. فروانش نتوتتیس به زیر حاشیه جنوبی اوراسیا در اواخر مزوزوئیک ضمن تشکیل کوه‌های ایران مرکزی (ارومیه-دختر) در حاشیه غربی ایران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

کمر بند دگرگونی سنج- سیرجان، کمر بند آتشفشانی-رسوبی را در حاشیه شمالی ایران مرکزی و جنوب البرز ایجاد کرد. در ادامه این روند و پس از بسته شدن کامل نتوتیس، برخورد مستقیم صفحه عربستان با اوراسیا رخ داد و ساختار توپوگرافی امروزی منطقه مورد مطالعه را شکل داد که بین واحدهای مورفوتکتونیک البرز، شمال ایران مرکزی و جنوب دریای خزر قرار دارد. بر این اساس منطقه مورد بررسی با گسل‌های قدیمی (پالئوزوئیک و مزوزوئیک) و فعال جدید شناخته می‌شود (شکل ۲). شهر زنجان به عنوان مرکز استان در بخش مرکزی حوضه مورد مطالعه قرار دارد (شکل ۱، ب). زنجان رود در بستر سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین، پالئوزوئیک زیرین (سازند سلطانیه)، مزوزوئیک (سازند شمشک و سازند لار) و نهشته‌های ترشیاری (کنگومرای فجن، سازند کرج) و نهشته‌های اولیگوسن و پلیو- پلیستوسن و نهشته‌های کواترنری و توده‌های نفوذی مانند گرانیات 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، در حالی که 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 زنجان رود واقع شده‌اند. ۲۷۳ روستای کوچک و بزرگ و شهرهای زنجان، ابهر، نیک‌پی و ارمانخانه 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 قرار گرفتن در محل تلاقی واحدهای مورفوتکتونیک البرز (غربی)، تالش و ایران مرکزی، در معرض الگوهای تنش زمین‌ساختی پیچیده‌ای است. همگرایی فعال شمال - جنوب در راستای عربستان - اوراسیا و عملکرد واحدهای منطقه‌ای - ناحیه‌ای - محلی سبب شکل‌گیری حوضه زنجان رود به شکل فلاتی مرتفع مشخص و بارز در مقیاس منطقه‌ای شده که به دره‌های پست قزول‌اوزن در شمال و شمال غرب؛ فروافتادگی اوزن دره 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 جنوب شرق - شمال غرب معروف به دشت زنجان مشخص شده که منطبق بر مسیر رودخانه زنجان‌چای است. رودخانه زنجان‌چای از کوه‌های جنوب سلطانیه در جنوب شرق حوضه سرچشمه می‌گیرد و پس از طی دشت زنجان - ابهر در سمت شمال غرب به قزل‌اوزن می‌پیوندد. رخنمون‌هایی از سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و ماگمایی با سن پالئوزوئیک در بخش جنوبی حوضه وجود دارند. جهت کلی زنجان رود در ابتدا و انتهای حوضه جنوب شرقی - شمال غربی 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 زنجان رود

NTF: گسل شمال تبریز؛ AR: رشته کوه البرز؛ NTF: گسل شمال تبریز؛ AVF: گسل اهر-ورزقان؛ RF: گسل رودبار؛ TR: رشته کوه‌های تالش؛ SoF و ZFS: برتیت گسل‌های سلطانیه و زنجان را نشان می‌دهند.

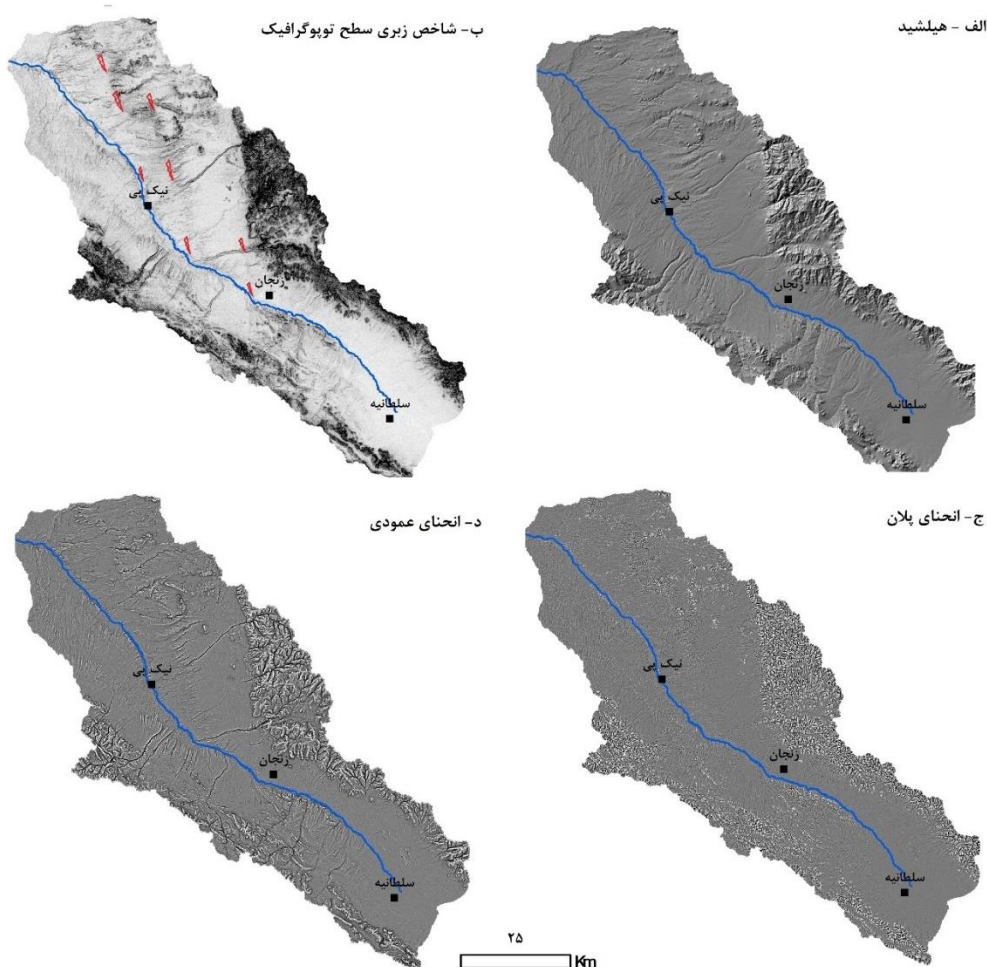
بر اساس بررسی‌های صورت گرفته (سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱، ۲۰۱۹)، پوسته شمال غرب ایران در مقایسه با اوراسیا که صفحه‌ای ثابت می‌باشد، با سرعت معادل ۲۲-۲۳ میلی‌متر در سال به سمت شمال در حرکت است، این در حالی است که ایران مرکزی با سرعت ۱۴ میلی‌متر در سال، شمال تبریز، تالش و ارمنستان به ترتیب با سرعت ۱۲ و ۸ میلی‌متر در سال به سمت شمال حرکت می‌کنند. این تغییر دینامیک قابل توجه (۳ تا ۵ میلی‌متر در سال) صرف تغییر شکل زمین در گستره مورد بحث می‌شود که عمدتاً در قالب فعالیت گسل‌ها و از جمله گسل زنجان به شکل تغییر لندفرم‌ها (سطح ژئومورفیک کوتاه‌تر و بستر زنجان رود) می‌شود.

باتوجه به چارچوب تکتونیک و دینامیک اشاره شده، به نظر می‌رسد فروافتادگی دشت زنجان حاصل عملکرد بلوک‌های گسلی سلطانیه، زنجان، طارم و منجیل باشد. با این حال، رابطه بین این سیستم‌های برخوردی و ساختارهای زمین‌ساختی موروثی بر زنجان رود و حوضه آن مسئله‌ای است که همچنان مورد بحث است.

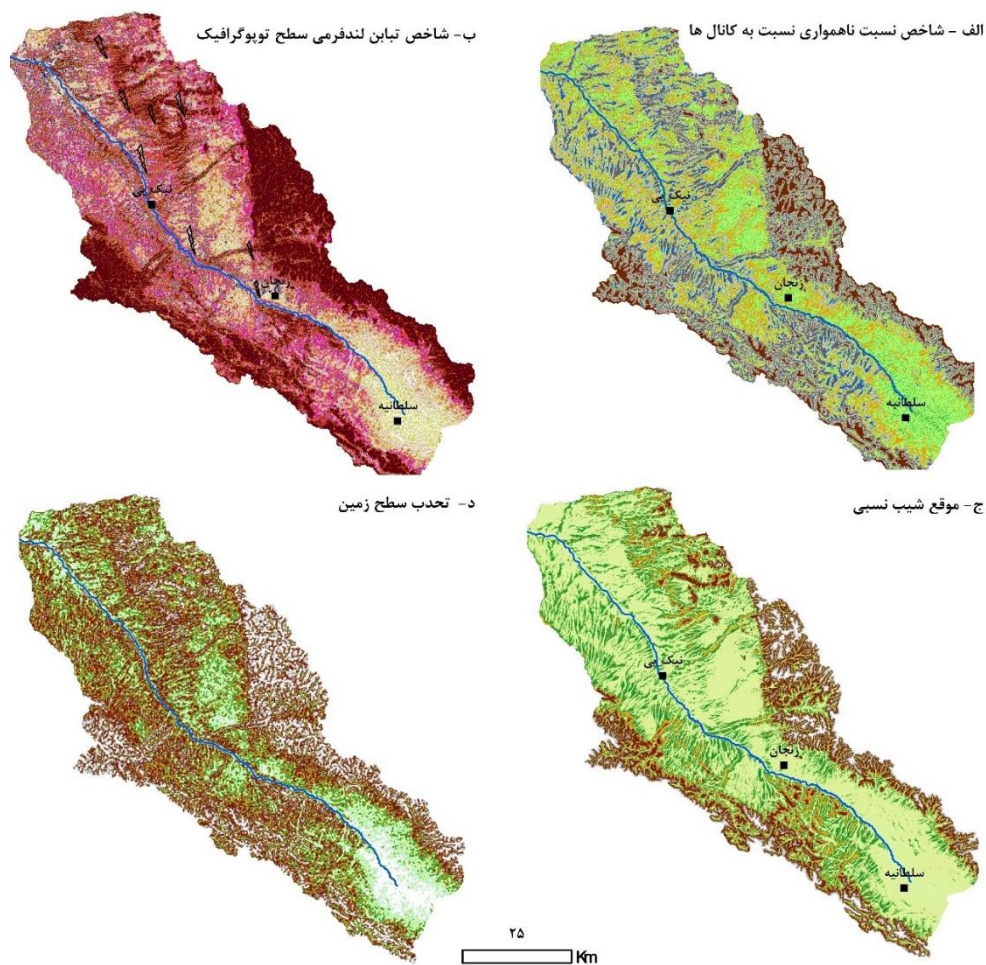
در این پژوهش، نقشه‌های خطواره‌ها و روندهای توپوگرافیک، هیدرولوژیک و ساختمانی حوضه بارزسازی و به کمک



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<sup>۱</sup>، انحنا<sup>۱</sup> 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). تجزیه و تحلیل 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 فعال تخمین زده شود (شکل ۳). اگر چه تمرکز پژوهش حاضر روی زنگان رود است که تقریباً امتداد گسل زنگان را دنبال می‌کند، ولی به منظور شناخت الگوی دینامیک گسل‌ها و اثرات آن‌ها بر زنگان رود، 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 ژئومورفومتریک (تمام پارامترها تا حدی نرمالایز شده‌اند، لذا جهت سادگی و جلوگیری از شلوغی اشکال بدون راهنما آورده شده‌اند)

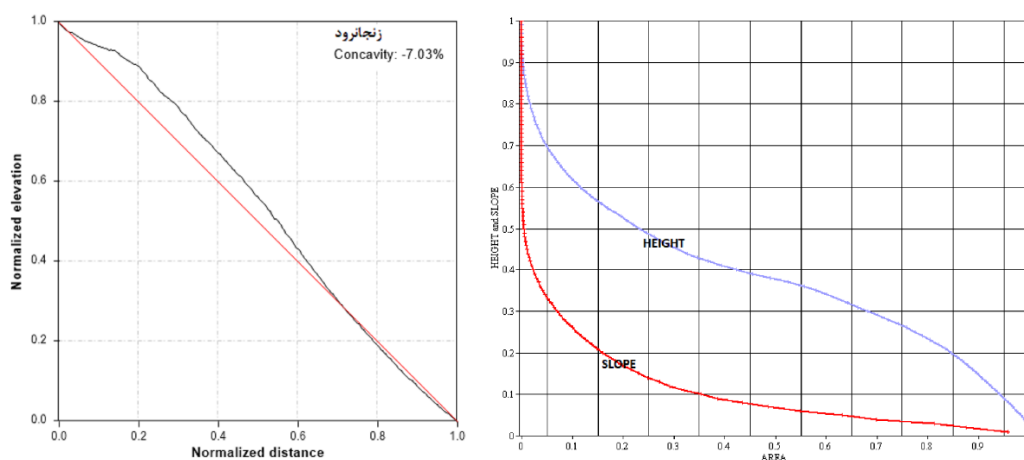


شکل ۴. بارزسازی خطواره‌ها و روندهای توپوگرافیک، هیدرولوژیک و ساختمانی حوضه به کمک متغیرهای محلی، غیرمحلی و ترکیبی (تمام پارامترها تا حدی نرمالایز شده‌اند، لذا جهت سادگی و جلوگیری از شلوغی اشکال بدون راهنما آورده شده‌اند)

مورفولوژی حوضه زنجان رود حاصل برهم کنش نیروهای زمین ساختی بین روندهای ساختمانی شمال غربی - جنوب شرقی (راستای گسل تبریز، زنجان، سلطانیه) و شمال، شمال شرق - جنوب، جنوب غربی (زون طارم، تالش و قیدار) می باشد (شکل ۲). تحلیل های ژئومورفومتری حوضه زنجان رود (شکل ۳ و شکل ۴) نشان دهنده وجود چندین خطواره ساختمانی - توپوگرافیک است که نه تنها در بلا فصل جبهه کوهستان (گسل ارمغانخانه)، بلکه سبب ناهنجاری های مورفولوژیکی در رسوبات کواترنری، شبکه زهکشی حوضه و کانال زنجان رود شده اند (شکل ۵). نیمرخ طولی رودخانه هایی که حوضه زنجان رود را زهکشی می کنند، پله های برجسته، رأس های دندانهای و مسیرهای محدب رو به بالا در پیرامون گسل های شناسایی شده نشان می دهند که بخش های پایین دست خود را متأثر ساخته اند. تحدب در نیمرخ های جریان معمولاً در جایی که رودخانه ها عمیقاً بریده شده اند، دیده می شود. در غیاب کنترل گرهای سنگ شناختی (بویژه پیرامون زنجان رود) و دشت زنجان، چنین ویژگی هایی می توانند به عنوان شواهدی بر عملکرد تکتونیکی گسل ها باشند (Burbank & Anderson, 2001).

در یک نگاه کلی، حوضه زنجان رود با انتگرال هیپسومتری برابر  $0/38$  حوضه ای بالغ با سطوحی کم شیب می باشد که نمایانگر پتانسیل دینامیک پایین است (شکل ۵) بیش از  $53$  درصد حوضه را دشت و زمین های 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

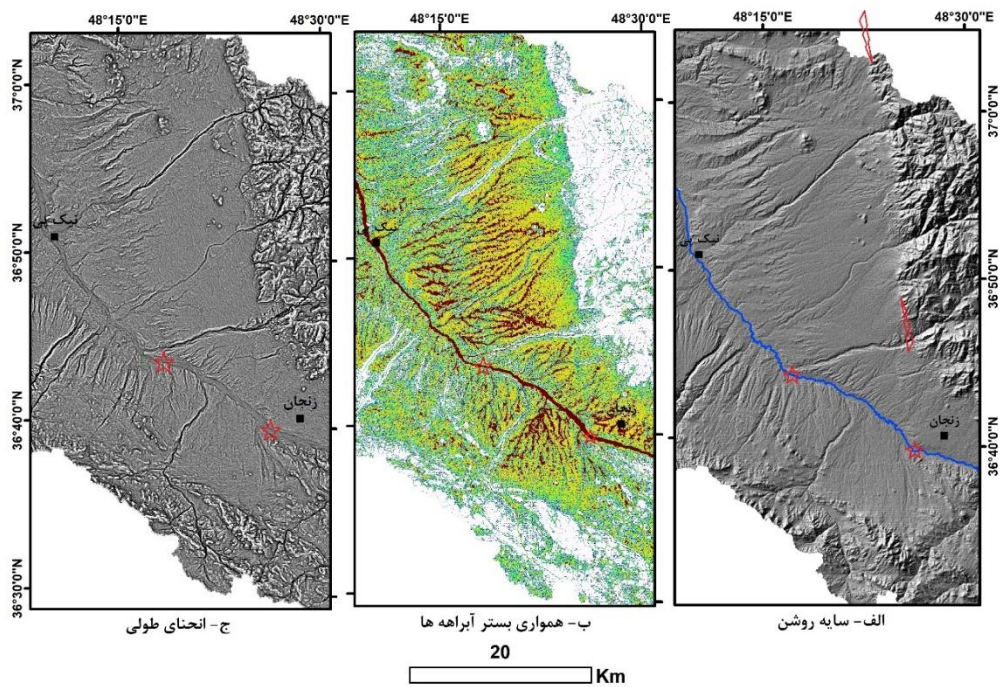
جهت تحلیل شواهد مورفوتکتونیک حوضه زنجان‌رود، حوضه به سه بخش تقسیم شده و شواهد هر بخش به‌اختصار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است:

#### شواهد مورفوتکتونیک بخش شمالی حوضه

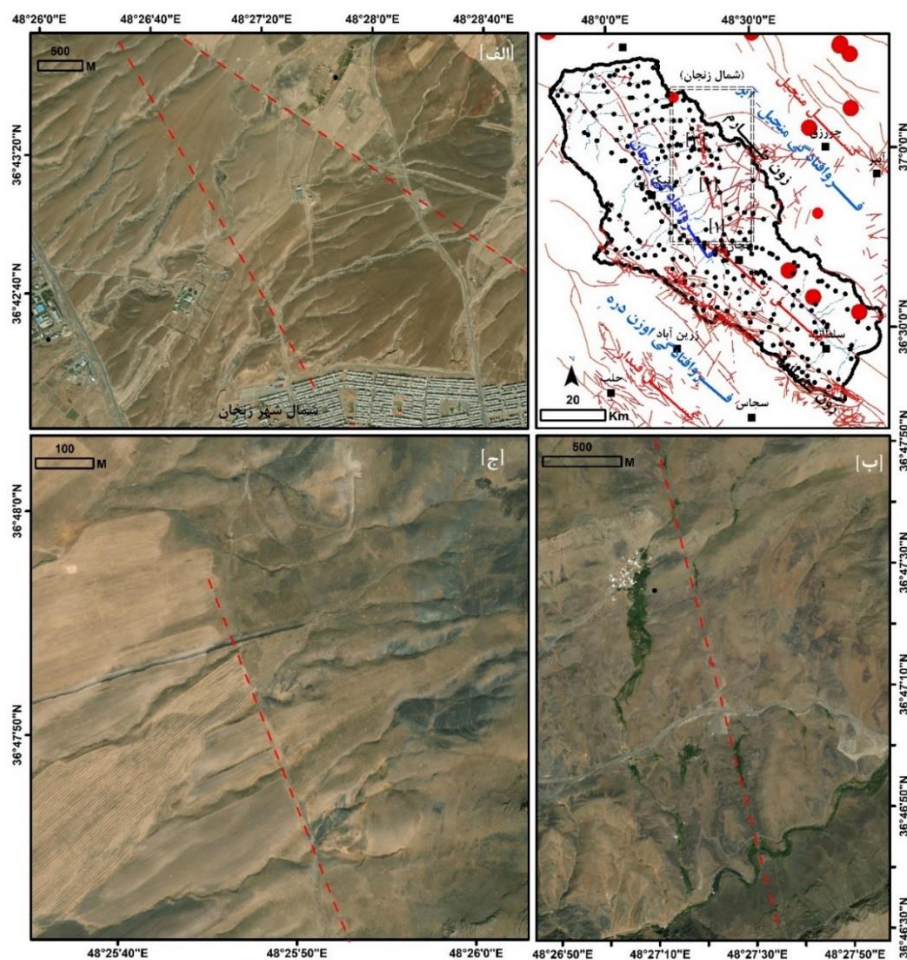
چنانچه نگاهی کلی به نقشه زنجان‌رود در مقیاس حوضه این رودخانه داشته باشیم، مسیر آن در نزدیکی شهر زنجان (غرب) از راستای جنوب شرقی- شمال غربی منحرف و به سمت جنوب تمایل پیدا می‌کند (شکل ۳ و شکل ۴). در نقشه‌های شاخص ژئومورفومتریک (شکل ۵)، مرز بین کوهستان چهل‌خانه در شمال شهر زنجان و دشت آبرفتی زنجان یک خطواره 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 ژئومورفولوژیک تشخیص داده می‌شود که با زاویه‌ای ۱۵° الی ۲۵° درجه نسبت به خطواره اصلی و به‌طور 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 ۶). انحنا طولی، پهنا و گستردگی کف و بستر آبراهه‌ها (شکل ۷ ب و ج) و سایر شاخص‌ها در این سه بخش تفاوت معناداری دارند. باتوجه به ناهنجاری‌های سطحی این قلمروها در واقع توسط گسل‌های فعال از یکدیگر جدا شده‌اند.





شکل ۶. شاخص های ژئومورفومتریک و ناهنجاری های سطح توپوگرافیک در بخش شمالی حوضه (ن.ک شکل)



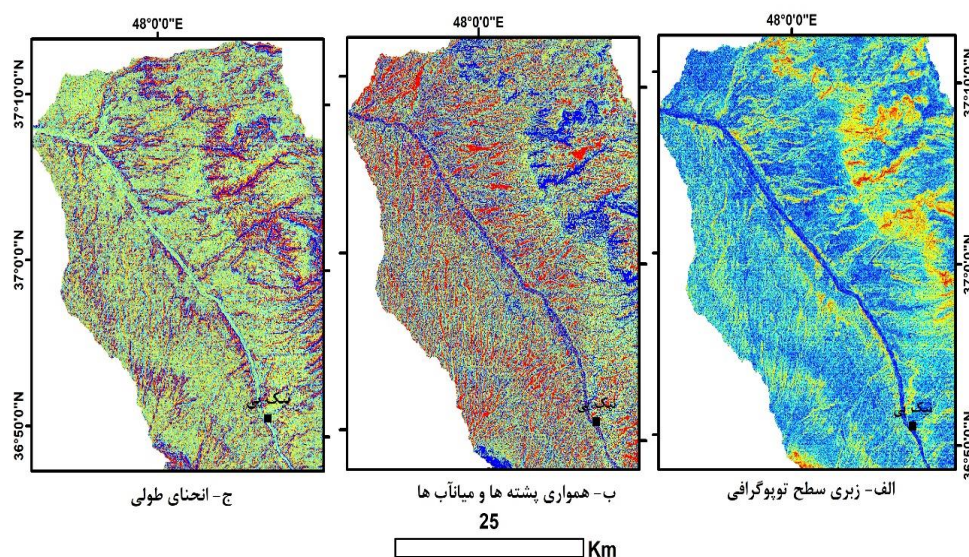
شکل ۷. شواهد زمین ساختی دینامیک گسلی در بخش شمالی حوضه



علاوه بر تجزیه و تحلیل‌های ژئومورفومتری جهت بارزسازی ناهنجاری‌ها، به کمک تصاویر دورسنجی از تصاویر کوئیک‌برد و سنتینل ۲ جهت شناسایی آثار گسلی و شواهد مورفوتکتونیک فعال برای به دست آوردن اطلاعاتی در مورد راستای تکتونیکی و بازسازی الگوی احتمالی فعالیت آن‌ها در زمان‌های اخیر استفاده شده است (شکل). شواهد مذکور نشان‌دهنده ناهنجاری‌های قابل توجه در سیستم‌های زهکشی به صورت 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 فعال منطقه مورد بررسی هستند.

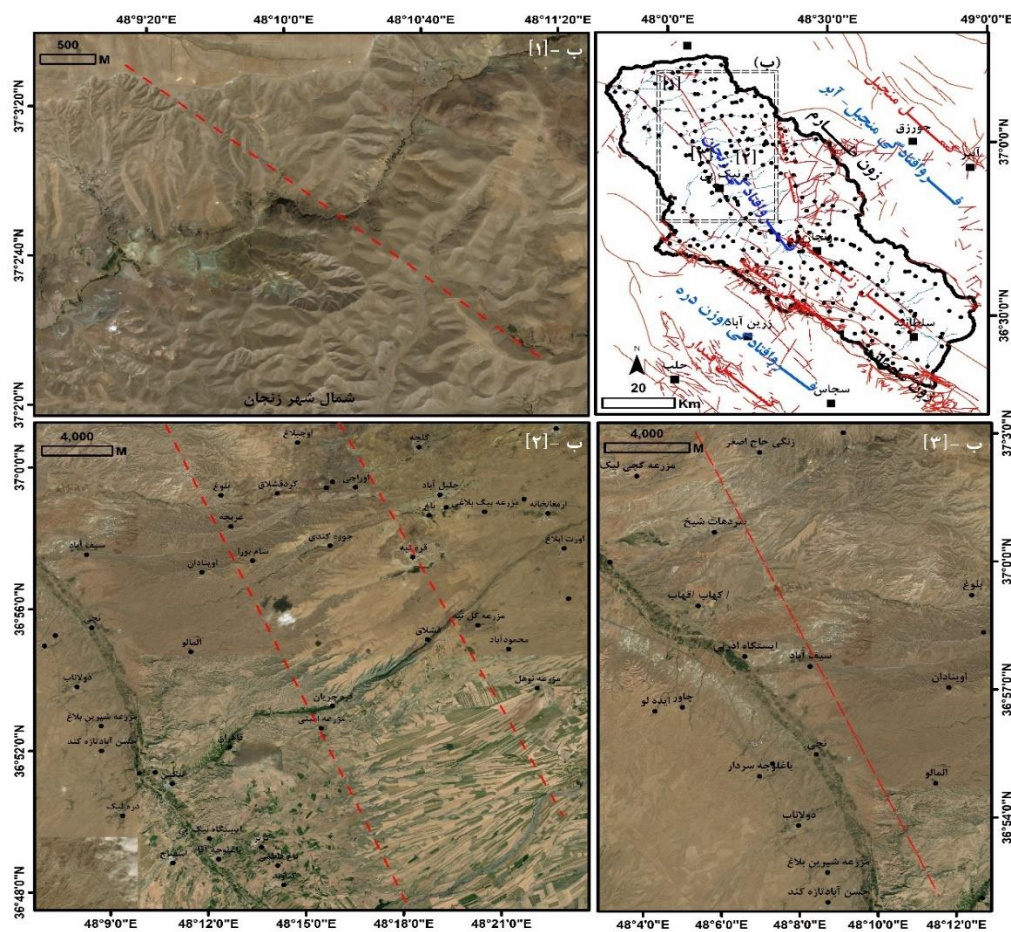
#### شواهد نو زمین‌ساختی در مرکز و شمال غرب حوضه

بیشتر بخش مرکزی حوضه و پیرامون زنجان‌رود را زمین‌های کم شیب و تپه‌ماهوری فراگرفته و به طرف 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 انحنا 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 فعالی 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).



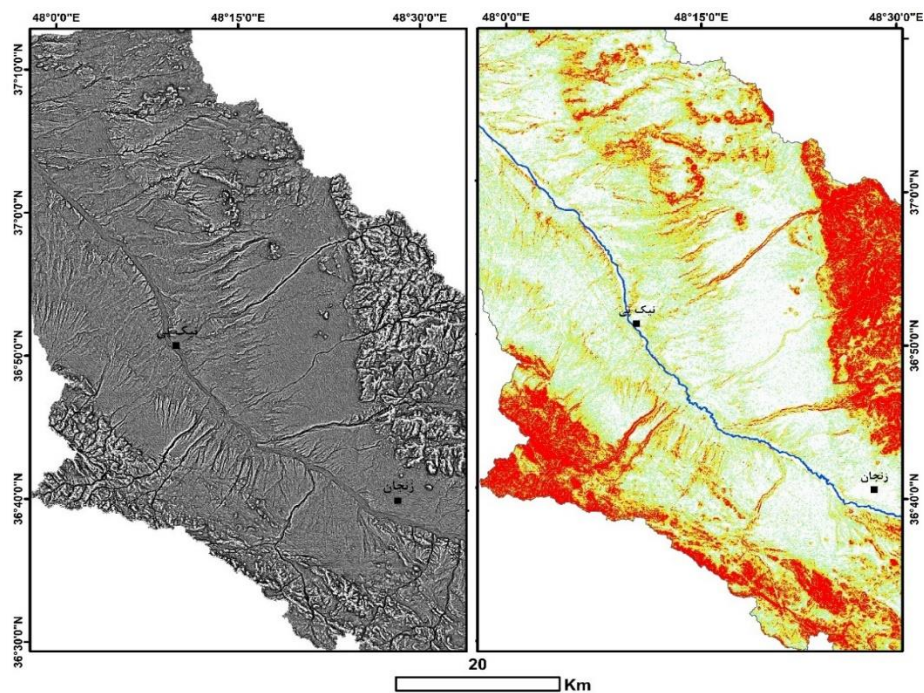
شکل ۹. شواهد زمین ساختی دینامیک گسل ها در بخش مرکزی و غرب حوضه

#### شواهد نو زمین ساختی بخش جنوب - جنوب شرقی حوضه

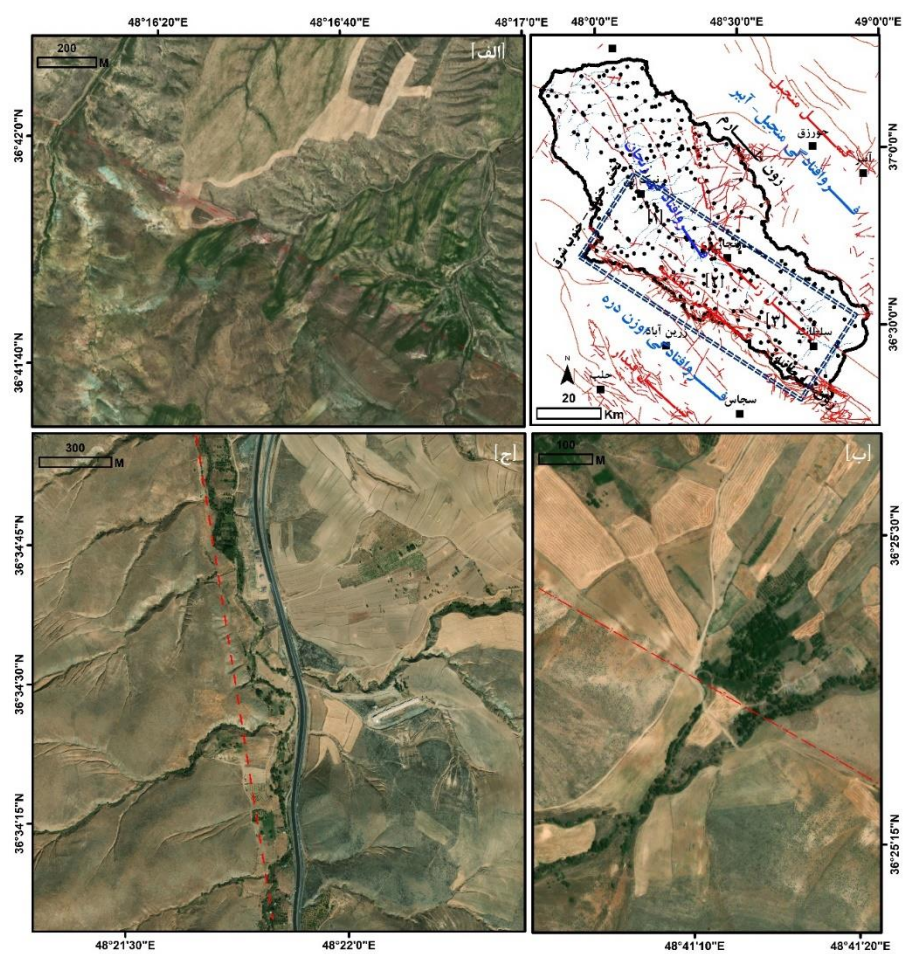
تنوع لیتولوژیک، زمانی و ساختمانی بخش جنوبی حوضه نسبت به بخش های پیشین بسیار بیشتر است. قدیمی ترین سازنده های منطقه مربوطه به اوایل پالئوزوئیک (کامبرین) هستند (شیل های چپقلو، دولومیت های سلطانیه و بایندر؛ ماسه سنگ های لالون؛ آهک های سازند باروت و زایگون و تاپ کوارتزیت سازند میلا). وجود تاپ کوارتزیت کامبرین در این بخش از حوضه و مقاومت آن در برابر فرسایش باعث شده تا این بخش از حوضه توپوگرافی متنوعی داشته باشد. آهک و شیل های مزوزوئیک سازنده های شمشک و لار در منطقه رخنمون چندانی ندارند. سازنده های پالئوزوئیک و مزوزوئیک هسته کوهستان جنوب منطقه را ساخته اند. برخلاف سازنده های فوق، سازنده های سنوزوئیک (قرمز پایینی، قم، فجن و زیارت) بخش های پایکوهی و کم ارتفاع تر کوهستان جنوبی حوضه را پوشانده اند.

زون گسلی سلطانیه این بخش را شدیداً تحت تأثیر قرار داده است. گسل سلطانیه گسلی معکوس با روند شمال غربی از مجاور سلطانیه (در شرق حوضه) آغاز و به طرف شمال غرب تا کوهپایه های جنوبی زنجان امتداد یافته است. مطالعات صورت گرفته نشان می دهند که حرکت امتداد لغز معکوس مربوط به فعالیت های اخیر گسل های سلطانیه قابل توجه بوده و سبب برخی از زمین لرزه های تاریخی (زمین لرزه تاریخی سلطانیه در سال ۱۸۰۳) بوده است (جاوید فخر و احمدیان، ۲۰۱۹). شکل ۱۰ نقشه شاخص های ژئومورفورمتریک زبری سطح (راست) و انحنا ی طولی (چپ)، ناهنجاری های سطح توپوگرافیک را نشان می دهد. گسل های قدیمی و فعال کنونی بر این ناهنجاری ها منطبق هستند (شکل).





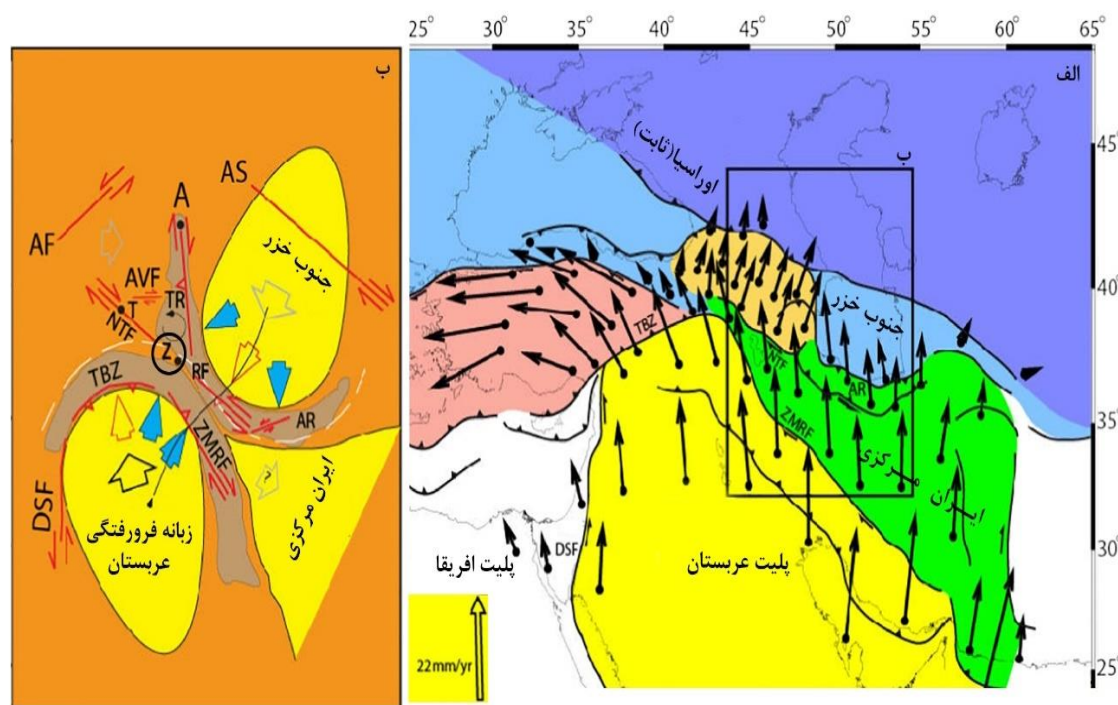
شکل ۱۰. اثرات زمین‌ساخت بر ایجاد ناهنجاری‌های سطح توپوگرافیک در بخش جنوب- جنوب شرق حوضه (ن.ک شکل)



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

## بحث

بر اساس بررسی‌های مورفوتکتونیک و ژئودینامیکی صورت گرفته روی ناحیه شمال غرب، غرب، البرز غربی و شرق منطقه مورد بررسی و همچنین مطالعات صورت گرفته 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 فعالیت بالای گسل‌های شمال غرب و ناحیه مورد بررسی هستند.



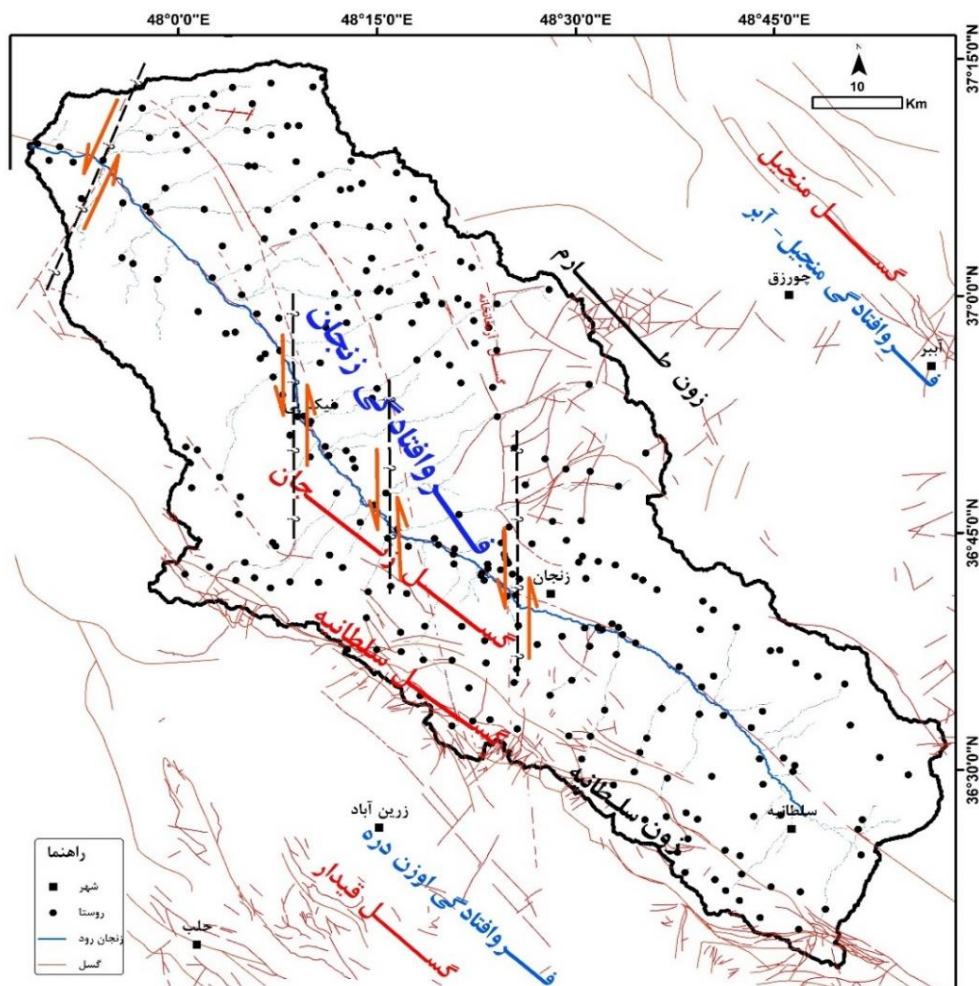
شکل ۱۲. تغییر شکل فعال شمال غرب ایران و موقعیت منطقه مورد مطالعه (دایره Z در شکل ب موقع تقریبی حوضه زنجان رود را نشان می‌دهد)  
 NTF: گسل شمال تبریز؛ AR: رشته‌کوه البرز؛ AF: گسل ارس؛ AS: ناحیه فرورانش آپشرون سیل؛ NTF: گسل شمال تبریز؛ AVF: گسل اهر-ورزقان؛ RF: گسل رودبار؛ DSF: گسل بحرالمیت؛ ZMRF: گسل اخیر 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 صورت گرفته 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 باتوجه به مکانیسم دینامیک نسبی بین بلوک‌های گسلی سبب توسعه سیستم‌های خم، پله‌ای، جابجایی عمودی قابل توجه و لغزش‌های موازی شده‌اند.

زنجان رود به عنوان شاه‌رگ حیاتی منطقه در حوضه یک لندفرم هیدرو-مورفوتکتونیک 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 زنجان رود نقش مهمی داشته‌اند. شواهد نو زمین‌ساختی بیانگر



جابجاشدگی مکرر مسیر زنجان‌رود در راستای زون گسل زنجان (شمال غربی - 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). به طرف شمال غرب دومین تغییر عمده در مسیر زنجان‌رود ناشی از جابجایی شمالی-جنوبی است که در جنوب روستای ینگچه (شمال روستای امین‌آباد) به وقوع پیوسته است (شکل). به طرف شمال غرب به طور مکرر شواهدی از تغییر بستر و حریم زنجان‌رود توسط گسل‌های فعال مشاهده می‌شود (جنوب کنواند). یکی از مهم‌ترین تغییرات مسیر زنجان‌رود در شمال شهر نیک‌پی رخ داده است. این تغییر مسیر و ایجاد پیچ هلالی رو به شمال شرق 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 به طرف 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 زنجان رود تحت تأثیر چهار سیستم گسلی با مقیاس های متفاوت قرار گرفته است. مهم ترین 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 زنجان رود نقش مهمی داشته است. دو گسل بعدی همانطور که در شکل مشخص هستند منطبق بر محل بیشترین نقطه تغییر مسیر زنجان رود می باشند. راستای گسل سوم و مسیر زنجان رود ابتدا یکی بوده و سپس به سمت شمال غرب از مسیر زنجان رود فاصله می گیرد. ذکر این نکته در اینجا لازم است که بر اساس شاخص های ژئومورفومتریک (شکل ۸، شکل ۱۰) بسیاری از گسل ها در حوضه امتداد مستقیم نداشته و جهت ساده سازی امتداد آن ها در شکل به صورت مستقیم در نظر گرفته شده است.

به طور کلی، کنترل گر کلیدی در تکامل شبکه های زهکشی حوضه در بلندمدت، بر هم کنش های گسل ها و نحوه هم پیوندی بلوک های گسلی است. بررسی نبوی و همکاران (۲۰۲۰) بیانگر لغزش موازی گسل ها است. این بررسی تغییر شکل مکرر بستر زنجان رود را ناشی از عملکرد مزدوج گسل ها می داند که با نتایج بررسی گسل ها در مقاطع عمودی در منطقه مورد بررسی همخوانی دارد.

### نتیجه گیری

این پژوهش به توصیف ژئو دینامیک گسل ها و مورفوتکتونیک حوضه زنجان رود پرداخته است. حوضه زنجان رود در کنش و واکنش بین زون های گسلی طارم در شمال، سلطانیه در جنوب و همچنین گسل زنجان که زنجان رود روی آن جاری است، به شکل فلاتی مشخص بین فرورفتگی افتادگی های گسلی منجیل - آببر در شمال، اوزون دره در جنوب، دره قزل اوزن در غرب و همچنین دشت قزوین در شرق قرار گرفته است. بررسی حاضر نشان داد که می توان با به کارگیری تکنیک های دورسنجی و ژئومورفومتری و با استفاده از داده های ارتفاع رقومی اقدام به بازسازی خطواره ها و روندهای توپوگرافیک، هیدرولوژیک و ساختمانی حوضه نمود و الگوی مورفوتکتونیک ناشی از تعامل گسل ها را شناسایی و تکتونیک فعال در یک حوضه را ارزیابی کرد.

نتایج کلی این پژوهش عبارتند از:

شواهد نو زمین ساختی: بررسی شواهد نو زمین ساختی نشان می دهند که گسل های منطقه با قطع رسوبات کواترنر، گسل هایی فعال بوده و دارای پتانسیل بالای فعالیت لرزه هستند.

برهم کنش های گسلی و تأثیر آن ها بر مسیر زنجان رود: گسل ها در ایجاد بلوک های گسلی و توسعه سیستم های چین و گسل، ساختمان پله ای، جابه جایی عمودی و افقی قابل توجه و لغزش های موازی نقش مهمی داشته اند. مطالعه شبکه های گسلی و روابط فضایی آن ها در سری رسوبی پلیو - کواترنر فرورفتگی زنجان نشان می دهد که این برهم کنش ها منجر به تغییر مسیر زنجان رود شده اند.

تغییر شکل حوضه زنجان رود: این بررسی نشان داد که حوضه زنجان رود تحت تأثیر چهار سیستم گسلی اصلی و چند گسل فرعی با مقیاس های متفاوت قرار گرفته است. این تغییرات شکل گیری واحد کوهستان، کوهپایه، دشت و تغییر مسیر زنجان رود را تحمیل کرده اند.

کنترل گر کلیدی در تکامل شبکه های زهکشی حوضه: برهم کنش های گسل ها و نحوه هم پیوندی بلوک های گسلی از جمله عوامل مهم در تکامل شبکه های زهکشی حوضه به شمار می آیند.

الگوهای زمین ساختی حوضه: حوضه زنجان رود باتوجه به 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 فعال 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 فعال 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 فعال در منطقه است که تأثیر چشمگیری بر شکل‌گیری ناهنجاری‌های مورفولوژیکی و توپوگرافیک در حوضه زنجان‌رود دارد.

به‌طور کلی، این پژوهش می‌تواند نقش مهمی در درک فعالیت گسل‌ها، تغییرات شکل‌گیری حوضه‌ها و اثرات آن‌ها بر مسیر رودخانه‌ها داشته باشد. با توجه به 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

- استفان، شانوف و کنستانتین، کوستوف. (۱۳۹۸). تکتونیک فعال و کارست. ترجمه ابوالقاسم گورابی. تهران: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
- اسفندیاری درآباد، فریبا و نظافت تکه، بهروز. (۱۴۰۲). ارزیابی و تحلیل فعالیت‌های نئوتکتونیک و توان لرزه‌خیزی گسل‌ها (مطالعه موردی: حوضه آبخیز نیر). *جغرافیا و روابط انسانی*، ۵(۴)، ۵۶۸-۵۸۹. doi: 10.22034/gahr.2023.393039.1844
- بدوزاده، منصور. (۱۳۹۷). تکتونیک فعال و تکه‌بندی گسله شمال زنجان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. به راهنمایی اسماعیل شبانین، زنجان: دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه.
- بربریان، مانوئل. (۱۳۹۵). *زمین‌لرزه و گسلش سطحی هم‌لرزه در فلات ایران با رویکرد تاریخی اجتماعی و فیزیکی*. ترجمه حمید نظری. تهران: نشر همراه علم.
- 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.
- زالی، زهرا. (۱۳۹۴). بررسی هندسه و سازوکار سامانه گسلی شمال باختر زنجان با به‌کارگیری روش‌های نئوتکتونیک و

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

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

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

(۹) عابدینی، موسی؛ پاسبان، امیرحسام؛ نظافت تکل، بهروز و پورقاسمی، الهامه. (۱۴۰۱). بررسی فعالیت های نئوتکتونیک با استفاده از شاخص های ژئومورفیک و توان لرزه زایی گسل ها (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کوزه توپراقی). *مطالعات علوم محیط زیست*,

(۲)۷، ۵۰۵۲-۵۰۴۳. doi:10.22034/jess.2022.334604.1750

(۱۰) عسکری، روح الله؛ قدس، عبدالرضا و ثبوتی، فرهاد. (۱۳۸۵). بررسی فعالیت لرزه ای سامانه های گسلی در استان زنجان و مناطق مجاور با استفاده از مکان یابی دوباره زمین لرزه ها. بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین، تهران.

(۱۱) گورابی، ابوالقاسم. (۱۴۰۲). ژئومورفومتری کاربردی؛ داده ها، روش ها و تکنیک ها. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

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

## References

- 1) Abdullah, L.H., Al Daghestani, H.S., & Bety, A.K.S.. (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, P.K., & Singh, A.K. (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/aer.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 inferred 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.jseas.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].