

## Evaluation of Fractal Dimension of Fractures and Drainages in Determining the Tectonic Activity of Qameshlu Fault Zone (Northwestern Iran)

Zahra Rasouli-Anbar<sup>1</sup>, Reza Alipoor<sup>2</sup>, Amir Hosein Sadr<sup>3✉</sup>

1. M.Sc of Tectonics, University of Bu Ali-Sina, Hamadan, Iran  
E-mail: z.rasouli@basu.ac.ir
2. Assistant Professor of Geology, University of Bu Ali-Sina, Hamadan, Iran  
E-mail: r.alipoor@basu.ac.ir
3. Assistant Professor of Geology, University of Bu Ali-Sina, Hamadan, Iran  
✉ E-mail: a.sadr@basu.ac.ir



**How to Cite:** Rasouli-Anbar, Z; Alipoor, R; & Sadr, A H. (2023). Evaluation of Fractal Dimension of Fractures and Drainages in Determining the Tectonic Activity of Qameshlu Fault Zone (Northwestern Iran) *Geography and Development*, 20 (69), 203-229.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.22111/GDIJ.2022.7284>

**Received:**

19 February 2022

**Received in revised form:**

17 May 2022

**Accepted:**

11 June 2022

**Published online:**

30 November 2022

### ABSTRACT

The study area is located in the northwest of Iran and in the Central Iranian zone (Urmia-Dokhtar volcanic belt). The aim of this study is determination of the tectonic activity of the Qameshlu fault. Field studies, evaluation of fractal dimensions and morphometric indices have been used in order to analyze the morphotectonic evidences of the study area. Firstly, the study area was first divided into 18 basins. Then five quantitative morphometric indices including asymmetry factor index (Af), transverse topographic symmetry index (T), stream length-gradient index (SL), Valley Floor Width to Height Ratio (Vf) and Hypsometric integral index (HI) have been calculated. The relative active tectonic index (Iat) is also calculated, in order to determination of amount of relative tectonic activity. This index is divided into three classes, class 1 (high tectonic activity), class 2 (medium tectonic activity), class 3 (low tectonic activity). The quadratic method has also been used to measure the fractal dimension of active faults and streams. For this purpose, the whole region is divided into six boxes and the amount of fractal dimension in each network is calculated using logarithm-logarithm diagram. The results of fractal analysis of faults indicate that section f is the most active part of the study area, while the results of fractal analysis of streams show more tectonic activity in part b. The results obtained from the study of morphometric indices, fractal analyzes and field evidences show more activity in the central part (in the middle of Qomshloo fault) and in the northern and southern parts due to fault density.

**Keywords:**

Fractal analysis,  
Tectonic activity,  
Active faults,  
Drainages.



© the Author(s).

**Publisher:** University of Sistan and Baluchestan

### Extended Abstract

#### 1. Introduction

Fractal geometry was first proposed by Mandelbrot (Mandelbrot, 1982). After presenting fractal geometry, its application was used in other sciences. In geology, the measurable properties of an independent quantity in the basins, such as the shape of streams, structural

fractures including faults and structural lines is considered as a dependent variable in fractal studies. For example, in an area with an active tectonic regime, the higher the rate of tectonic activity caused high value of the fractal dimension. Also, the relationship between topography created by

tectonic processes, such as faults, folds and bends, or the degree of erosion and sedimentation can be investigated using fractal analysis (Turcotte, 1997). The study of active faults has a significant role in determining the activity of the study area in terms of subsurface and seismic tectonics. The Qameshlu fault with an approximate length of 48 km and a northwest-southeast trend is exposed in northwest of Iran. The surface outcrops of the study area contains the Precambrian, Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic rocks. No specific mechanism has been mentioned for the Qameshlu fault and the deformations of the region are geometrically unknown. So, in this study, fractal analysis has been used to accurately evaluate of the tectonic activity along this fault.

## 2. Materials and Methods

In this study, geological maps, digital elevation model (DEM), Google Earth images, and GIS software have been used for extraction of drainage network and fault systems along the Qameshlu fault zone. Then, the tectonic movements of the Qameshlu fault zone are estimated based on fractal analysis, the pattern governing faults and drainage network of the region by quadratic method and Log-Log diagrams. Indeed, the square counting method is used to measure the fractal dimension of active faults and streams. For this purpose, the whole region is divided into six boxes and the amount of fractal dimension in each box is calculated using logarithm-logarithm diagram.

## 3. Results and Discussion

The Qameshlu fault in the study area starts from the Sangavin village and then continues to the northwest and ends at the western alluvium of the Qameshlu village. Most of the Tertiary deposits as the Lower Red Formation (sandy and mud conglomerate), Qom Formation (limestone, tuff and red sandstone) and volcanic rocks covered the study area (Bolourchi, 1979). Based on the fractal

dimensions obtained from faults, box f ( $D_f = 1/74$ ) and box b ( $D_b = 1/75$ ) have the highest fractal dimension. According to the fractal calculations, the highest fractal dimension of the fault is in the zone f, ( $D_f = 1/74$ ), zone a, ( $D_a = 1/73$ ) and zone c, ( $D_c = 1/71$ ), and the lowest value is obtained in zone d ( $D_d = 1/61$ ). For the drainages, the highest value is in zone b ( $D_b = 1/993$ ) and c ( $D_c = 1/991$ ) and the lowest value is in the zone f ( $D_f = 1/56$ ). The eastern part of this fault zone with a length of about 28 km and the N45W trend extends from the Imamzadeh Ghasem village, to the main of the Avaj-Abgarm main road, and the outcrops of which can be visible near the Halladar village. The western part of the Qameshlu fault with a length of about 19 km extends from the Najafabad village in the southeast of the Abgarm city to the Qameshlu village with N67W trend, and the outcrops of which can be visible near the Najafabad, Beheshtian, Kandahoo and Qameshlu villages.

## 4. Conclusion

The results of fractal analysis of faults indicate that section f as the most active part of the study area, while the results of fractal analysis of drainages system show more tectonic activity in section b. but due to the greater number of earthquake events and high density of surface faults in section f, this section can be considered the most active part of the study area. The results of fractal dimensions and field observations along the Qameshlu fault zone show more relative tectonics activity of the northern part to the middle and south. According to the results of fractal studies and fault surface trend changes in this study, the Qameshlu fault zone can be divided into eastern and western segments. In general, according to field observations, mechanism of the eastern part of the Qameshlu fault zone is reverse movement and the western part is left-right strike-slip movement with reverse component.

**Keywords:** Fractal analysis, Active tectonics, Active fault, Drainage, Strike-slip.

## 5. References

- Alaee Mahabadi, Suleiman and Khalatbari, Morteza (2004). Geological map 1:100,000 Nobran, Organization of Geology and Mineral Explorations of the country.  
<https://gsi.ir/fa/map/141/-%D9%86%D9%88%D8%A8%D8%B1%D8%A7%D9%86>
- Alaee Mahabadi, Suleiman and Fouzadi, Mohammad (2006). Geological map 1:100000 Rezen, Organization of Geology and Mineral Exploration of the country.  
<https://gsi.ir/fa/map/126/-%D8%B1%D8%B2%D9%86>
- Orang, Keyvan, Mohajal, Mohammad and Tajbakhsh, Gholamreza (2014). Evidence of inversion of slip vector in Kushk-Nusrat fault, north of Saveh, Scientific-Research Quarterly of Earth Sciences, Geological Organization of Iran, No. 94,315- 328.  
<https://www.magiran.com/paper/1393409>
- Shahriari, Sohrab and Khatib, Mohammad Mahdi (1376). Fractal analysis of Nahbandan fault system, Earth Sciences Quarterly, Year 6, Number 23-24 (Spring and Summer 2016), 32-39.  
<https://www.sid.ir/paper/433996/fa>
- Alizadeh, A., Lopez Martinez, Margarita., & Sarkarinejad, Khalil (2010). 40Ar-39Ar Geochronology in a gneiss dome within the Zagros Orogenic Belt Geochronologie 40Ar-39Ar dans un doˆme gneissique de la ceinture orogenique du Zagros, C. R. Geoscience, 342, 837-846.  
<https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.07.005>
- Azor, A., Keller, E.A., & Yeats, R.S (2002). Geomorphic indicators of active fold growth: South Mountain–Oak Ridge Ventura basin, southern California. Geological Society of America Bulletin, 114, 745-753.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2002\)114<0745:GIOAFG>2.0.CO:2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2002)114<0745:GIOAFG>2.0.CO:2)
- Bolourchi, M.H (1979). Explanatory Text of the Kabudar Ahang Quadrangle Map, Iran, Scale 1:250,000. Geological Survey of Iran, 107.  
<https://lib.ui.ac.ir/inventory/2/24126.htm>
- Bolourchi, M.H (1978). Geological Quadrangle Map of Avaj, Scale 1:100,000, Sheet D 5861. Geological Survey of Iran.  
[https://geoeh.um.ac.ir/index.php/article\\_40280.html?lang=en](https://geoeh.um.ac.ir/index.php/article_40280.html?lang=en)
- Bull, W. B., & McFadden, L.D (1977). Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California, In: Doehring, D.O. (Ed.), Geomorphology in Arid Regions, Proceedings of the Eighth Annual Geomorphology Symposium, State University of New York, Binghamton. 115-138.  
<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780429299230-5/tectonic-geomorphology-north-southgarlock-fault-california-william-bull-lestlie-mcfadden>
- Burbank, D. W., & Anderson, R. S (2001). Tectonic geomorphology. Blackwell Science, 274.  
<https://scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2109864>
- Burbank, D., & Anderson, R (2011). Tectonic Geomorphology. Edit2. Blackwell Publishing.  
<https://www.wiley.com/en-us/Tectonic+Geomorphology,+2nd+Edition-p-9781444338874>
- Cox, Rt. (1994). Analysis of drainage basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible quaternary tilt –block tectonics: an example from the mississippi embayment. Bulltin of geological society of America, 106, 571-581.  
[https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkpozje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1998181](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkpozje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1998181)
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacan, J., & Keller, EA (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (southern Spain). Geomorphology, 96, 150-173.
- Font, M., Amorese, D. and Lagarde, J.L ( 2010). Dem and GIS Analysis of the Stream Gradient Index to Evaluate Effects of Tectonics: the Normandy Intraplate Area (NW France), Geomorphology, 119, 172-180.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.004>

- Hare, P.W., & Gardner, T.W (1985). Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica. In: Morisawa, M., Hack, J.T. (Eds.), *Tectonic Geomorphology. Proceedings of the 15th Annual Binghamton Geomorphology Symposium*. Allen and Unwin, Boston, MA, 123-134.  
[https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1998176](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1998176)
- Hirata, T (1989). Fractal Dimension of Fault Systems in Japan: Fractal Structure in Rock Fracture Geometry at Various Scales, *Pure appl. Geophys.*, 131, 157-170.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF00877480>
- Keller, E. A., & Pinter, N (1996). *Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape*. by Prentice-Hall, Inc. Simon and Schuster/A Viacom Company Upper Saddle River, New Jersey. 7458, 121-145.  
[https://www.scirp.org/\(S\(vtj3fa45qm1ean45vffcz55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1960389](https://www.scirp.org/(S(vtj3fa45qm1ean45vffcz55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1960389)
- Keller, E.A., Gurrola, L., & Tierney, T.E (1999). Geomorphic criteria to determine direction of lateral propagation of reverse faulting and folding, *Geology*. 27, 515-518.  
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999Geo....27..515K/abstract>
- Mandelbrot, B (1967). How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-similarity and Fractional Dimension, *Science*, 156, 636- 638.  
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.156.3775.636>
- Mandelbrot, B (1982). *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, New York 460 pp. Mandelbrot, B. B., 1983-  
The Fractal Geometry of Nature (Updated and Augmented Edition, Freeman, New York 495 pp. Mandelbrot, B.B (1983). *The Fractal Geometry of Nature (Updated and Augmented Edition)*, Freeman, New York.495.  
<https://scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1221294>
- Mandelbrot, B (1985). Self-affine fractals and fractal dimension. *Physical Script*, 32, 257-260.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-8949/32/4/001>
- Molin, P., Pazzaglia, F.J., & Dramis, F (2004). Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly-deforming forearc, sila massif, Calabria, southern Italy. *American Journal of Science*. 304, 559-589.  
<https://www.ajsonline.org/content/304/7/559>
- Sengör, A.M.C (1990). A new model for the late Palaeozoic-Mesozoic tectonic evolution of Iran and implications for Oman. *Geological Society*, 49, 797-831.  
<https://www.lyellcollection.org/doi/abs/10.1144/gsl.sp.1992.049.01.49>
- Sengör, A.M.C(1979).Mid-Mesozoic closure of Permo-Triassic Tethys and its implications. *Nature*, 279, 590-593.  
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979Natur.279..590S/abstract>
- Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C., & Bardajm, T (2003). Fault generated mountain fronts inSoutheast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and earthquake activity. *Geomorphology*, 250, 203-226.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X02002155>
- Strahler, A. N (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, *Geological Society of America Bulletin*, 63, 1117-1142.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
- Turcotte, D. L (1997). *Fractal and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge university press. Cambridge.  
<http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781139174695>
- Vicsek, T (1992). *Fractal Growth Phenomena*. 2nd ed., World Scientific, Singapore 488.  
<https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/1407>
- Yazdi, M., Taheri, M., Navi, P., & Sadati, N (2013). Landsat ETM+ imaging for mineral potential mapping: application to Avaj area, Qazvin, Iran. *International Journal of Remote Sensing*. 34, 5578-5795.  
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2013.797127>



## تعیین فعالیت تکنیکی پهنه گسلی قمشلو با استفاده از اندیس‌های مورفومتری و ارزیابی بُعد فرکتالی شکستگی‌ها و آبراهه‌ها (شمال باختر ایران)

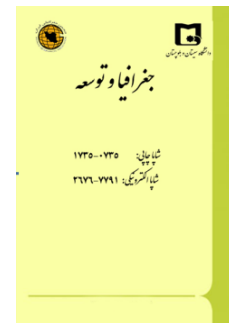
زهرا رسولی‌عنبر<sup>۱</sup>، دکتر رضا علی‌پور<sup>۲</sup>، دکتر امیرحسین صدر<sup>۳\*</sup>

### مقاله پژوهشی

جغرافیا و توسعه، شماره ۶۹، زمستان ۱۴۰۱  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰  
تاریخ بازنگری داور: ۱۴۰۱/۰۲/۲۷  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۱  
صفحات: ۲۲۹-۲۰۳

### چکیده

گستره مورد مطالعه در این پژوهش در شمال باختر ایران و در پهنه ایران مرکزی (کمر بند ولکانیکی ارومیه-دختر) واقع شده است. در این پژوهش هدف تعیین میزان فعالیت زمین‌ساختی پهنه گسل قمشلو است. به منظور تحلیل ریخت‌زمین‌ساخت منطقه مورد مطالعه، از مطالعات صحرایی، ارزیابی ابعاد فرکتالی و شاخص‌های مورفومتری استفاده شده است. بدین منظور، ابتدا محدوده مورد مطالعه به ۱۸ حوضه تقسیم شد. سپس ۵ شاخص کمی مورفومتری شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی (Af)، شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (T)، شاخص گرادیان - طول رودخانه (SL)، شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره (Vf) و منحنی انتگرال ارتفاع سنجی (Hi) محاسبه شده است. به منظور تعیین میزان فعالیت زمین‌ساختی نسبی، شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) نیز محاسبه شده است. این شاخص در منطقه مورد مطالعه به رده ۱ (فعالیت زمین‌ساختی بالا) رده ۲ (فعالیت زمین‌ساختی متوسط) و رده ۳ (فعالیت زمین‌ساختی کم)، تقسیم شده است. همچنین از روش مربع‌شمار برای اندازه‌گیری بُعد فرکتالی گسل‌های فعال و آبراهه‌ها استفاده شده است. بدین منظور کل منطقه به شش شبکه تقسیم شده و با استفاده از نمودار لگاریتم-لگاریتم میزان بُعد فرکتال در هر شبکه محاسبه شده است. نتایج تحلیل فرکتالی گسل‌ها نشان می‌دهد که بخش f پویاترین بخش منطقه مورد مطالعه است. در حالی که نتایج تحلیل فرکتالی آبراهه‌ها فعالیت زمین‌ساختی بیشتری را در بخش b بیشتر نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از بررسی شاخص‌های مورفومتری، تحلیل‌های فرکتالی و شواهد صحرایی نشان‌دهنده فعالیت بیشتر بخش مرکزی (در میانه گسل قمشلو) و در بخش‌های شمالی و جنوبی به دلیل تراکم گسلی است.



واژه‌های کلیدی:

تحلیل فرکتالی، پویایی زمین‌ساختی، گسل‌های فعال، آبراهه‌ها.

### مقدمه

بر اثر فرایندهای زمین‌ساختی یا به معنای کاربرد اصول ژئومورفیک در تحلیل مسائل زمین‌ساختی است (Keller and Pinter, 1996: 515-518). زمین‌ساخت فعال از شاخص‌های زمین‌ریخت‌شناسی که در شناخت زمین‌ساخت فعال منطقه سودمند است، استفاده می‌شود (Silva et al., 2003: 203-226; Bull and McFadden, Molin et al., 2004: 559-589; Azor et al., 2002: 745-753). مزیت استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی این است که می‌توان نتایج حاصل از چند شاخص که دارای دقت و اعتبار بیشتر است را با هم تلفیق کرد تا

از جمله روش‌های تفسیر ساختارها در علوم زمین، استفاده از تحلیل‌های ریخت‌زمین‌ساختی است که از روی داده‌های توپوگرافی و اطلاعات دورسنجی و... صورت می‌پذیرد. ریخت‌زمین‌ساخت یا زمین‌ساخت ژئومورفولوژی به مطالعه رابطه بین فرایندهای زمین‌ساختی که در جهت به وجود آوردن توپوگرافی عمل می‌کنند و فرایندهای سطحی که به حذف این پدیده‌ها می‌پردازند، گفته می‌شود (Burbank and Anderson, 2001: 274). ریخت‌زمین‌ساخت به معنای دانش مطالعه اشکال و سیماهای ایجاد شده در زمین

مرتبه فعالیت زمین‌ساختی یک منطقه تعیین شود (Keller and Pinter, 1996: 121-145).

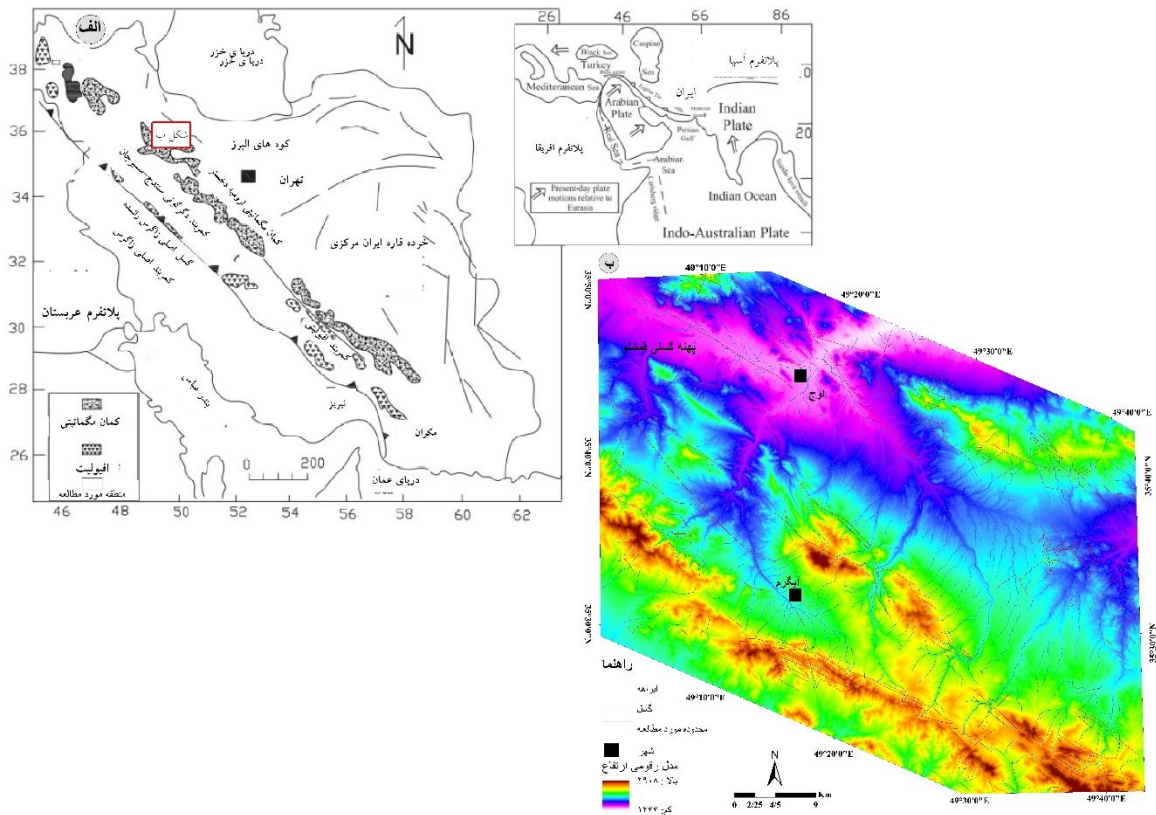
علاوه بر شاخص‌های زمین‌ریخت‌شناسی، از تحلیل فرکتالی عوارض و ساختارهای زمین‌شناسی نیز می‌توان برای تعیین پویایی زمین‌ساختی یک منطقه استفاده کرد. هندسه فرکتالی ابتدا توسط مندلیبریت (Mandelbrot, 1982:49) مطرح شد و نسبت به هندسه اقلیدسی روش بهتری برای توضیح اجسام فیزیکی دارای بُعد است. پس از ارائه هندسه فرکتالی کاربرد آن در دیگر علوم مورد استفاده قرار گرفت. از موارد استفاده از هندسه فرکتالی در زمین‌شناسی، درک تغییرات یک کمیت مستقل به واسطه بررسی ویژگی‌های قابل‌سنجش یک کمیت مستقل در حوضه مورد مطالعه، شکل آبراهه‌ها، شکستگی‌های ساختاری اعم از گسل‌ها و خطواره‌های ساختاری به‌عنوان متغیر وابسته مورد بررسی‌های فرکتالی قرار می‌گیرد؛ زیرا در یک منطقه با رژیم زمین‌ساختی به‌همان میزان که نرخ فعالیت‌های زمین‌ساختی بالا باشد در منطقه با برخاستگی فعال و میزان بالای بُعد فرکتال شکستگی‌ها روبه‌رو هستیم و در نتیجه طرح آبراهه‌ها به الگوی خطی بودن تمایل می‌یابد که این تغییرات در وضعیت شبکه زهکشی سبب کاهش بُعد فرکتالی آبراهه‌ها در مناطق فعال زمین‌ساختی می‌شود (شهریاری و خطیب، ۱۳۷۶: ۳۹-۳۲). همچنین رابطه بین توپوگرافی ایجادشده در اثر فرایندهای تکتونیکی، مانند گسل‌ها، چین‌ها و خمش‌ها یا میزان فرسایش‌پذیری و رسوبگذاری را می‌توان با استفاده از تحلیل فرکتالی مورد بررسی قرار داد. منطقه مورد مطالعه در شمال باختر ایران و در پهنه ایران مرکزی (زون ارومیه- دختر) واقع شده است. از نظر ساختاری منطقه شامل گسل‌ها و چین‌خوردگی‌های فعال است که سیمایی زمین‌ریختی آن را تحت‌تأثیر قرار داده است. مهم‌ترین ساختار گسلی تأثیرگذار بر منطقه مورد مطالعه، سامانه گسلی کوشک‌نصرت با راستای تقریباً خاوری-باختری است که از گسل‌های اصلی بخش

شمال‌باختری بلوک ایران مرکزی است. این گسل با طول تقریبی ۲۰۰ کیلومتر، از جنوب دریاچه حوض سلطان و جنوب روستای کوشک‌نصرت آغاز و پس از عبور از شمال ساوه، در باختر روستای سنگاوین (در خاور منطقه آوج) پایان می‌پذیرد، سپس رو به شمال باختر ادامه یافته و در انتها در آبرفت‌های باختر روستای قمشلو پایان می‌پذیرد. براساس نحوه رخمون سطحی گسل، می‌توان سامانه گسلی کوشک‌نصرت را دست کم به دو قطعه گسل اصلی کوشک‌نصرت (از روستای کوشک نصرت تا روستای سنگاوین) و گسل قمشلو (از روستای سنگاوین تا روستای قمشلو) تفکیک کرد (اورنگ و همکاران، ۱۳۹۳: ۳۲۸-۳۱۵).

گسل قمشلو با طول تقریبی ۴۸ کیلومتر و روند شمال‌باختر- جنوب‌خاور در منطقه مورد مطالعه قرار دارد. با توجه به اینکه برای قطعه گسلی قمشلو قبلاً سازوکار معینی ذکر نشده است و دگرشکلی‌های منطقه از نظر هندسی ناشناخته است، هدف از این پژوهش، بررسی نوزمین‌ساخت و ریخت‌زمین‌ساخت پهنه گسلی قمشلو، با استفاده از اندازه‌گیری شاخص‌های ریخت‌سنجی و تلفیق نتایج با برداشت‌های صحرایی و تحلیل‌های فرکتالی است. به‌طور دقیق، میزان فعالیت نسبی زمین‌ساختی پهنه گسل قمشلو را در حوضه‌های مشخص شده تعیین و با استفاده از تحلیل‌های فرکتالی، الگوی حاکم بر گسل‌ها و شبکه زهکشی منطقه به روش مربع شمار و نمودارهای Log - Log، مورد بررسی قرار گرفته است.

### موقعیت جغرافیایی

گستره مورد مطالعه در این پژوهش دارای محدوده طول جغرافیایی  $49^{\circ} 10'$  تا  $49^{\circ} 40'$  خاوری و عرض جغرافیایی  $35^{\circ} 30'$  تا  $35^{\circ} 40'$  شمالی است که در شمال باختر ایران و در پهنه ایران مرکزی (کمر بند ولکانیکی ارومیه- دختر) واقع شده است (شکل ۱).



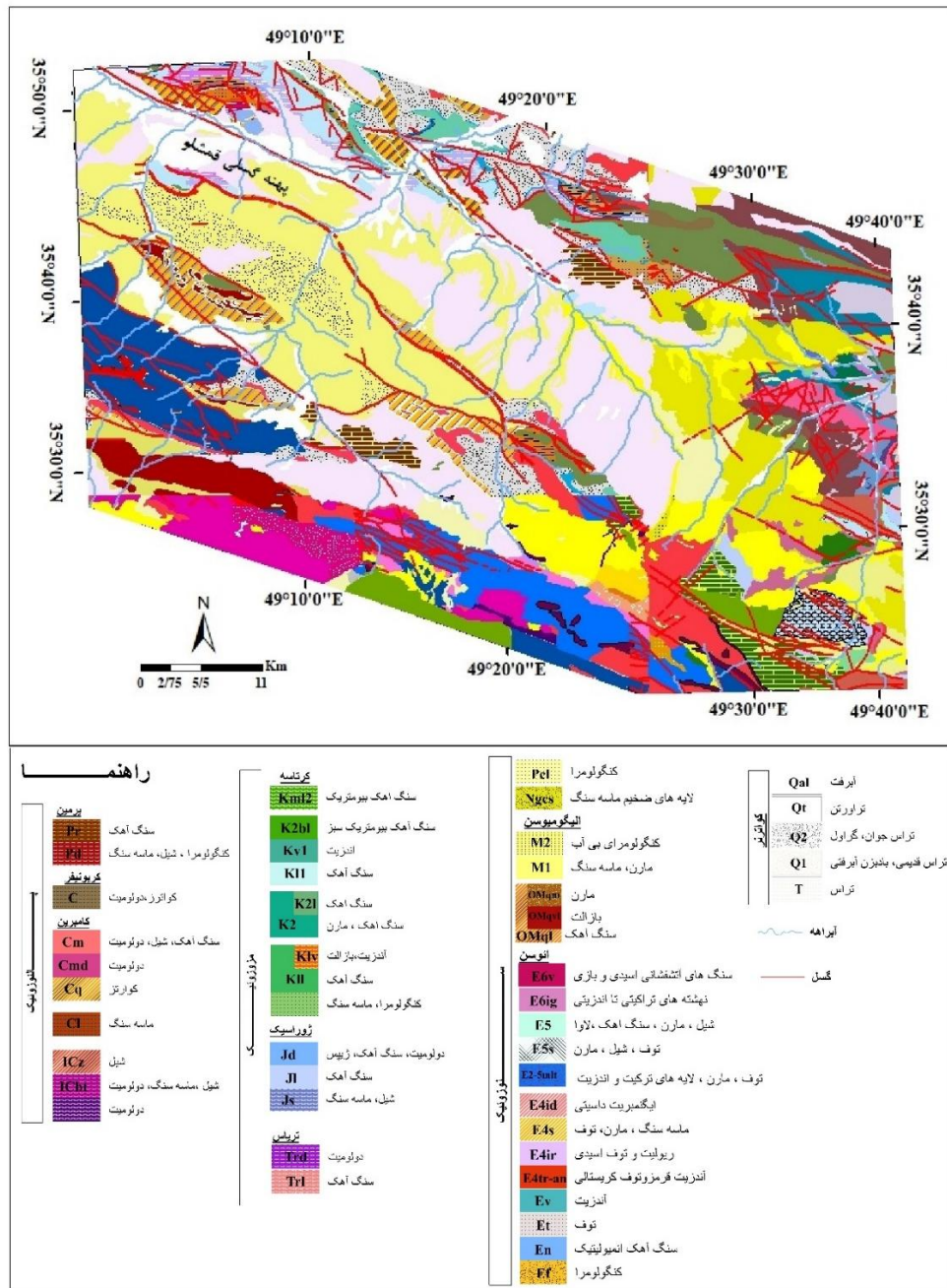
شکل ۱: الف) نقشه پهنه‌های ساختاری-زمین‌شناسی ایران، موقعیت محدوده مورد مطالعه به رنگ قرمز نشان داده شده است (Alizadeh et al., 2010). ب) نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده منطقه مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

### زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

از نظر چینه‌شناسی منطقه شامل سنگ‌های پرکامبرین، پالئوزوئیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک است، اما بیشتر نهشته‌های دوران سوم (سنوزوئیک) رخنمون دارند و از سازند قرمز پایینی (کنگلومرای ماسه‌ای و گلی)، سازند قم (سنگ‌آهک، توف و سنگ‌های آتشفشانی) و سازند قرمز بالایی تشکیل شده است. سازند قرمز بالایی به‌طور هم‌شیب و گاه با دگرشیبی روی سازند قم قرار گرفته

است. این سازند به سن میوسن در زیرپهنه آبگرم گسترش وسیعی دارد و می‌توان آن را به دو بخش تقسیم کرد: ۱- بخش پایینی (لایه‌های قرمز آوج): شامل رخساره‌های قاره‌ای و تبخیری، مارن و ماسه‌سنگ است. ۲- بخش بالایی (کنگلومرای بی‌آب): به‌صورت عدسی‌های است که به‌طور جانبی به ماسه‌سنگ و مارن تبدیل می‌شود و از کنگلومرای یکسانی تشکیل شده است (Bolourchi, 1979: 107)، (شکل ۲).



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ رزن (اعلایی‌مهابادی و فوزادی، ۱۳۸۶)، نوبران (اعلایی‌مهابادی، خلعتبری، ۱۳۸۳)، و آوج (Bolourchi, 1978)). تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

نقشه‌های ساختاری، شبکه زهکشی و مدل رقومی ارتفاعی<sup>۲</sup> گستره مورد مطالعه به‌عنوان داده ارتفاعی پایه تهیه شده است.

### مواد و روش

در این پژوهش با استفاده از داده‌های حاصل از نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه به‌عنوان داده‌های پایه در محیط نرم‌افزار جی.ای.اس<sup>۱</sup>،

اساس ارزیابی میزان فعالیت نسبی در یک ناحیه به‌شمار می‌رود، تهیه شده است. همچنین در این مطالعه برای بررسی تکتونیک فعال مرتبط با پهنه گسلی قمشلو، علاوه بر اندازه‌گیری اندیس‌های مورفومتری، از روش مربع‌شمار و اندازه‌گیری بعد فرکتالی گسل‌ها و آبراه‌ها استفاده شده است. با استفاده از روش شمارش مربعات که متداول‌ترین روش در تحلیل فرکتالی شکستگی‌های ساختاری اعم از گسل‌ها و خطواره‌ها است (Turcotte, 1997: 204) و توسط بسیاری از محققان به‌کار گرفته شده است. به‌منظور استفاده از این روش ایجاد شبکه‌بندی مناسب در محدوده مورد مطالعه امری ضروری است (شکل ۳).

در مرحله بعدی، درجهت محاسبه شاخص‌های ریخت‌سنجی و با به‌کارگیری تکنیک‌های نرم‌افزاری، محدوده مورد مطالعه به ۱۸ حوضه تقسیم شد. سپس با توجه به ویژگی‌های ساختاری، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه، شاخص فاکتور عدم‌تقارن حوضه زهکشی (Af)، شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (T)، شاخص طول جریان-شیب رود (SL)، شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره یا شاخص (Vf) و منحنی و انتگرال ارتفاع‌سنجی (Hi) برای گستره مورد مطالعه محاسبه و با همپوشانی لایه‌های ساختاری، مقاومت سنگ‌های منطقه مورد مطالعه و نتایج و نقشه شاخص‌های ریخت‌سنجی، نقشه پهنه‌بندی فعالیت نسبی زمین‌ساختی این منطقه که



شکل ۳: طرح شماتیک نحوه شبکه‌بندی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

تقسیم‌شد. تا آن‌جا که طول کوچک‌ترین مربع فرعی برابر با یک کیلومتر شد. توزیع فرکتالی شکستگی‌ها یا ابعاد فرکتال یک گسل بیانگر نحوه فعالیت گسل و گسترش آن است. در این رابطه،  $D$  شیب خط و نشان‌دهنده بعد فرکتالی پهنه برشی است. توزیع فرکتالی شکستگی‌ها یا ابعاد فرکتال یک پهنه گسلی بیانگر نحوه فعالیت گسل و گسترش آن است.

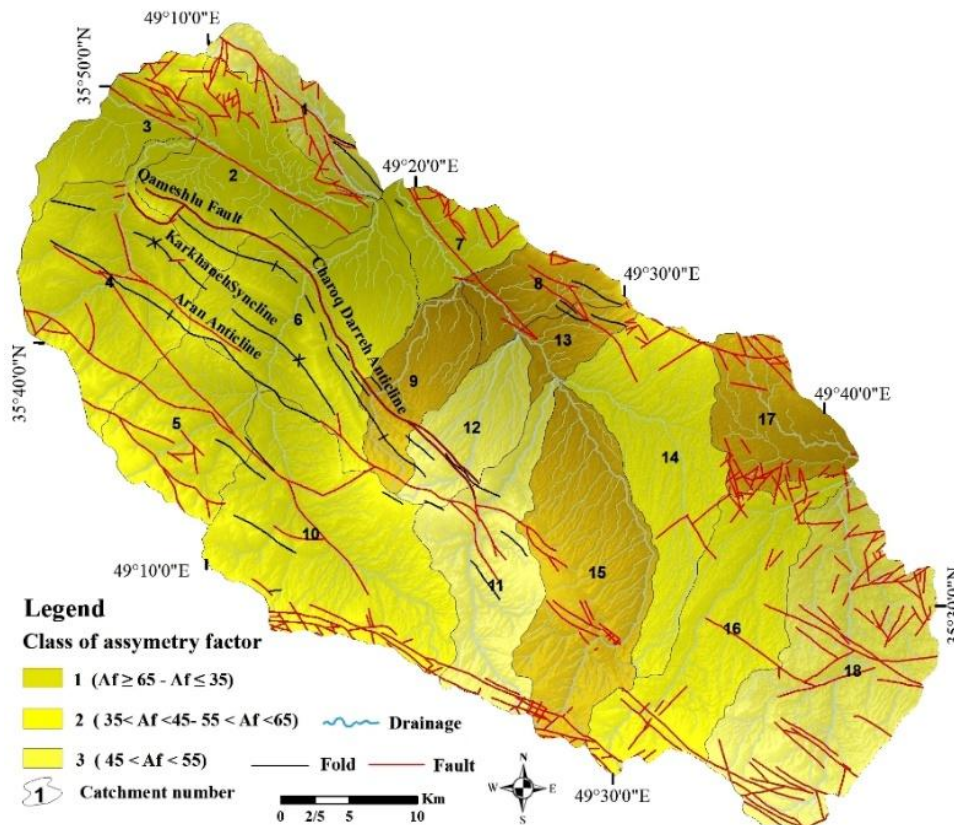
برای به‌دست‌آوردن بعد فرکتالی رابطه  $\text{Log}(N_n) = C + D \text{Log}(1/r_n)$  (Turcotte, 1997:204) مورد استفاده قرار گرفته است. در واقع تحلیل‌ها براساس نمودار  $\text{Log}/\text{Log}$  از تعداد مربع‌های دارای شکستگی ( $N_n$ ) برحسب طول شبکه‌های ایجادشده ( $r_n$ ) یا عکس آن ( $1/r_n$ ) صورت گرفته است. در بررسی فرکتال منطقه هرکدام از این شش مربع، جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و برای هر مربع یک بعد فرکتالی محاسبه شد ( $D_f$  تا  $D_a$ ). سپس هر مربع به‌طور متوالی به مربعات کوچک‌تری با اضلاعی معادل نصف اضلاع مربعات قبلی

1. Drainage basin asymmetry factor
2. Transverse topographic symmetry factor
3. Stream length gradient index
4. Ratio of valley floor to valley height
5. Hypsometric integral

## شاخص عدم تقارن حوضه آبریز (Af)

ژئومتری رودخانه‌ها به چندین روش کیفی و کمی شرح داده شده است. حوضه‌های زهکشی در مناطقی که تحت تأثیر تغییر شکل‌های زمین‌ساختی فعال بوده، یک ژئومتری مشخص دارد. فاکتور نامتقارنی حوضه زهکشی را می‌توان تا حدودی برای تحلیل کج‌شدگی زمین‌ساختی در مقیاس حوضه‌ها یا مناطق بزرگ‌تر که در مجاورت گسل‌های فعال قرار داشته، معرفی کرد (Grander & Hare, 1985: 123-134). شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی از رابطه  $AF=100(Ar/At)$  به دست

می‌آید: در این رابطه Af: شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی، Ar: مساحت حوضه دربرگیرنده زهکش‌های فرعی در سمت راست آبراهه اصلی (دید به سمت پایین‌دست آبراهه اصلی) و At: مساحت کل حوضه زهکشی (دربرگیرنده زهکش‌های فرعی سمت چپ و راست آبراهه اصلی) است. برای اکثر شبکه‌های آبراهه‌ای که تازه تشکیل شده و در آن‌ها جریان ادامه دارد و در حال تقارن هستند، میزان این شاخص در حدود ۵۰ درصد است.



شکل ۳: نقشه شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی (Af) در منطقه مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

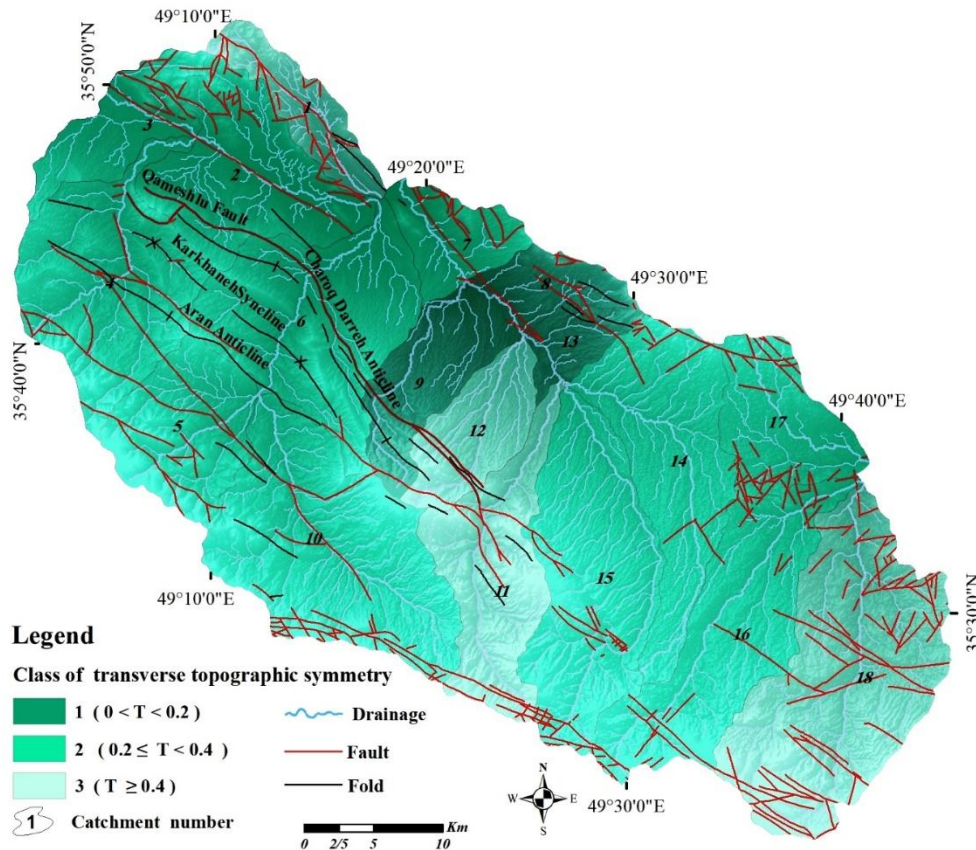
## تقارن توپوگرافی عرض رود (T)

شاخص دیگری که می‌توان در ارزیابی نامتقارن بودن حوضه آبخیز و به تبع آن، در بررسی فعالیت حرکات زمین‌ساختی استفاده کرد، شاخص تقارن توپوگرافی عرضی است (Keller & Pinter, 1996: 121-145).

محاسبه این شاخص، روشی برای ارزیابی یک رودخانه درون حوضه و تغییرات میزان نامتقارنی در بخش‌های مختلف دره است. مقادیر T برای قطعات مختلف دره محاسبه می‌شود و مهاجرت ترجیحی آبراهه‌ها عمود بر محور زهکشی مشخص می‌شود. برای محاسبه این

شاخص، رابطه  $T = Da / Dd$  تعریف شده است که  $T$ : شاخص تقارن توپوگرافی عرض  $(T_{av} = T_1 + T_2 + T_3 / 3)$ ،  $Da$ : فاصله نوار مئاندر فعال از خط میانی حوضه

زهکشی و  $Dd$ : فاصله خط میانی حوضه زهکشی از خط مرز حوضه (خط تقسیم حوضه)، است.

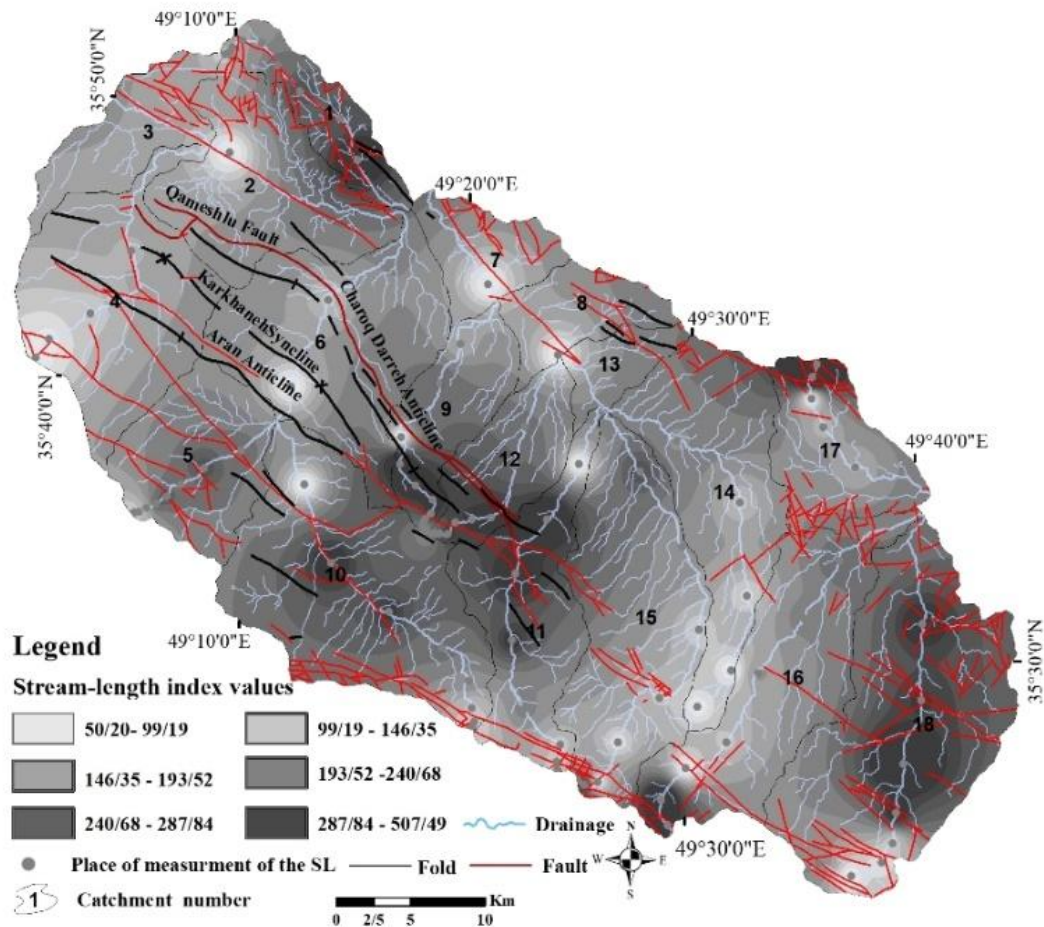


شکل ۴: نقشه شاخص تقارن توپوگرافی عرضی ( $T$ ) در منطقه مورد مطالعه تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

### شاخص گرادیان - طول رود (SL)

ایجاد توپوگرافی نتیجه موازنه بین نیروهای فرسایش دهنده همچون آبراهه‌ها و رودخانه‌هاست که روی سنگ‌های با مقاومت مختلف جریان دارند و این موازنه در نهایت منجر به تعادل دینامیکی می‌شود ( $Keller et al., 1999: 515-518$ ) شاخص گرادیان (شیب) - طول رود یکی از شاخص‌های ارزیابی زمین‌ساخت فعال در ارتباط با شکل کانال رودها است. شاخص SL مطابق با این رابطه  $SL = (\Delta H / \Delta L) \cdot L$

محاسبه می‌شود. SL: شاخص گرادیان - طول رود،  $\Delta H$ : تغییرات ارتفاع بین دو قطعه؛  $\Delta L$ : طول قطعه و L: طول رود (از نقطه میانی قطعه‌ای که شاخص برای آن محاسبه می‌شود، به سمت بالادست رود تا خط تقسیم آب) است، درواقع  $\Delta H / \Delta L$  همان شیب قطعه است که می‌توان با استفاده از آن، رودخانه‌های کوچک با نیمرخ‌های پرشیب و رودخانه‌های بزرگ‌تر با نیمرخ ملایم‌تر را با هم مقایسه کرد ( $Font et al., 2010: 172-180$ )

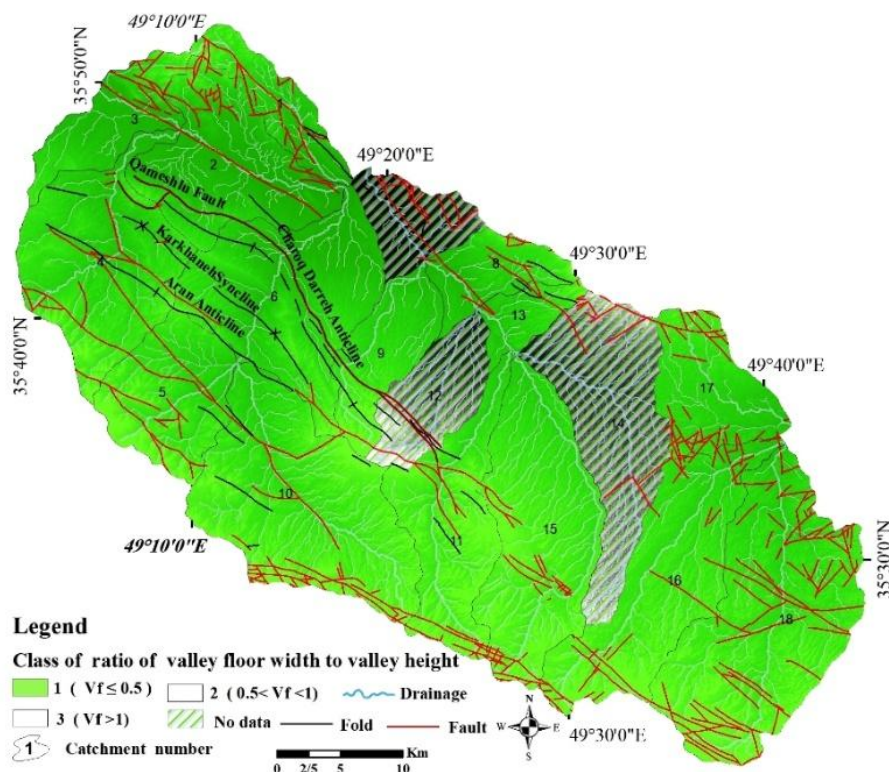


شکل ۵: نقشه شاخص گرادیان-طول رودخانه (SL) در منطقه مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

ریخت‌سنجی در کاربرد آن در ارزیابی دوره زمانی طولانی‌تر است. این شاخص عبارت است از نسبت دوبرابر عرض کف دره به مجموع اختلاف ارتفاع دیواره دو سمت آن با ارتفاع کف دره، که از رابطه  $Vf = 2Vf_w$  محاسبه می‌شود (Bull and Mc Fadden, 1997: 115-138).

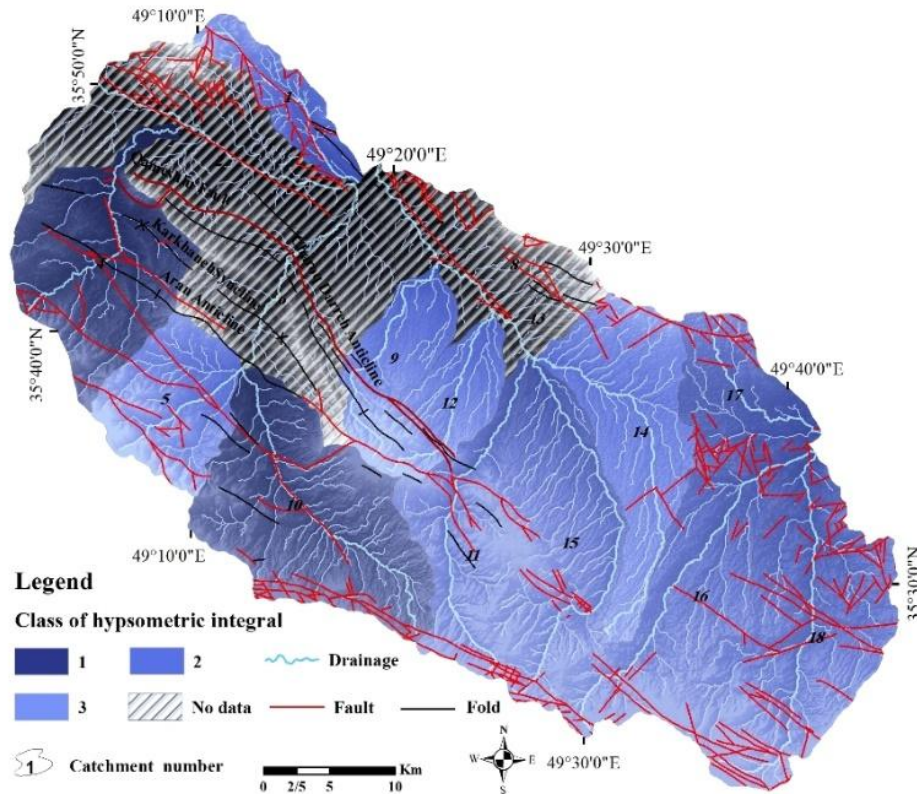
شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره (Vf) فرسایش دره‌های رودخانه‌ای و ریخت‌شناسی دره‌ها در مقطع قائم یکی دیگر از ابزارهایی است که ما را در تفسیر و بررسی میزان فعالیت نیروهای زمین‌ساختی یاری می‌کند. این امر با استفاده از شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره یا Vf امکان‌پذیر است. تفاوت عمده این شاخص با دیگر شاخص‌های



شکل ۶: نقشه شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره (Vf)، در منطقه مورد مطالعه تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

مساحت نسبی) به وجود می‌آید. با تحلیل منحنی هیپسومترى حوضه زهکشی رودخانه‌های مجاور گسل‌ها تا حدودی امکان مقایسه مناطق فعال و غیرفعال در مجاور گسل‌ها ممکن است (Strahler, 1952: 1117-1142).

منحنی ارتفاع‌سنجی و انتگرال ارتفاع‌سنجی (Hi) انتگرال ارتفاع‌سنجی، توزیع ارتفاع را در یک ناحیه از زمین، از یک حوضه زهکشی نشان می‌دهد. منحنی ارتفاع‌سنجی از پیاده‌کردن نسبت کل ارتفاع حوضه (ارتفاع نسبی) در مقابل نسبت کل مساحت حوضه



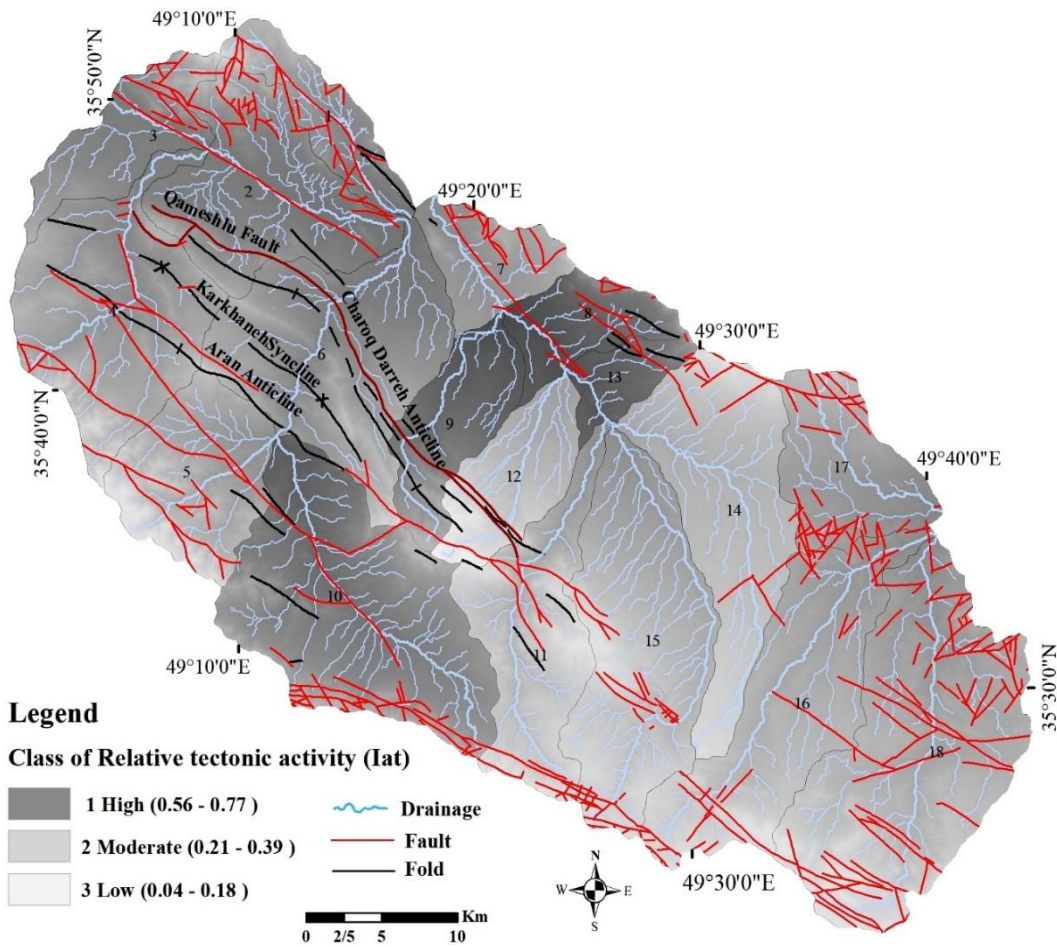
شکل ۷: نقشه شاخص انتگرال ارتفاع سنجی (Hi) در منطقه مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

### رده‌بندی فعالیت نسبی زمین‌ساختی

شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی علاوه بر انعکاس وضعیت زمین‌ساختی منطقه، تحت‌تأثیر وضعیت آب‌وهوایی، ساختار، مقاومت و جنس سنگ‌های منطقه نیز قرار می‌گیرند؛ بنابراین نمی‌توان حد و مرز مشخصی برای شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی جهت ارائه یک طبقه‌بندی دقیق برای فعالیت زمین‌ساختی تعیین کرد و بدین ترتیب ارزش واقعی این شاخص‌ها در تفکیک

پیشانی‌های فعال، نیمه‌فعال و غیرفعال کوهستان‌ها محدود نمی‌شود (Keller & Pinter, 1996: 121-145). به‌طور کلی شاخص (Iat) از متوسط کلاس‌های مختلف شاخص‌های زمین‌ساختی به‌دست می‌آید و با رابطه  $IAT=S/N$  محاسبه می‌شود: S: مجموع کلاس‌های شاخص‌های ژئومورفیک محاسبه‌شده، N: تعداد شاخص‌های محاسبه‌شده (El Hamdouni et al, 2008: 150-173).



شکل ۸: نقشه پهنه‌بندی میزان فعالیت زمین‌ساختی نسبی (Iat) در منطقه مورد مطالعه تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

### محاسبه ابعاد فرکتالی شبکه گسلی

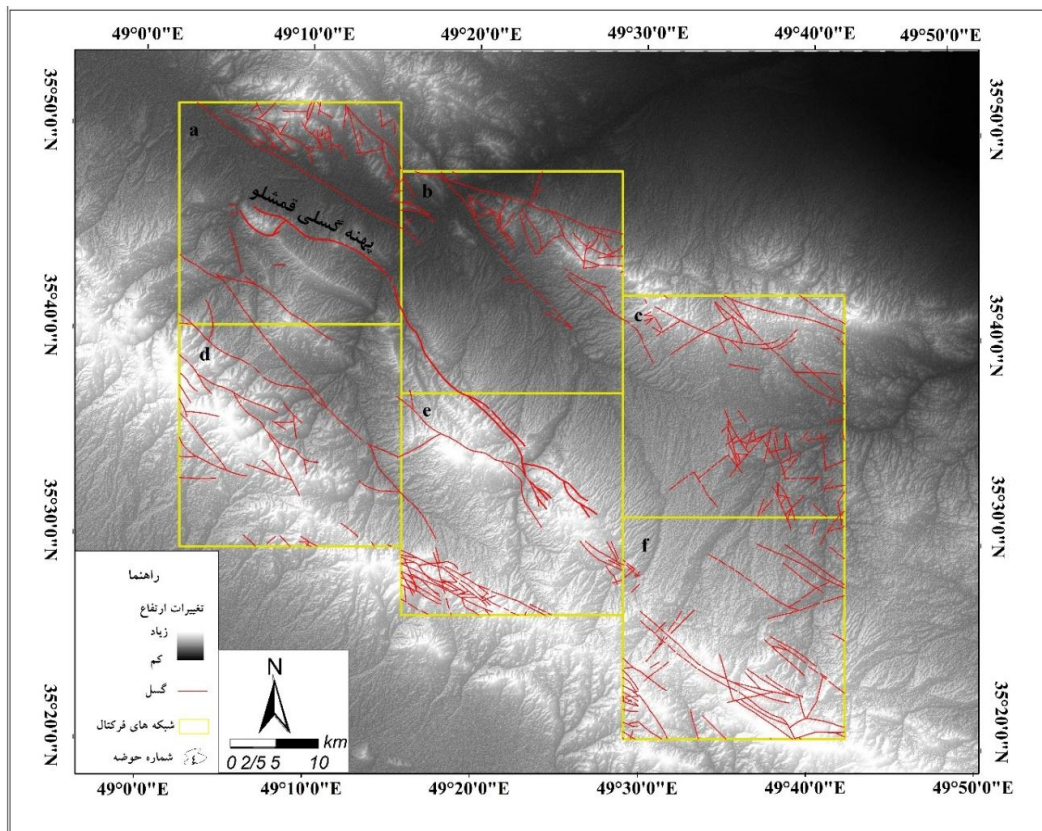
پرکاربردترین روش محاسبه و بررسی ابعاد فرکتالی سیستم‌های گسلی، روش مربع‌شمار است. این روش برای سیستم‌های گسلی ژاپن (Hirata, 1989:168)، محاسبه هندسه فرکتالی سیستم گسلی سن‌آندریاس استفاده شده است. برای محاسبه ابعاد فرکتالی سیستم گسلی فعال در منطقه، با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای نقشه سامانه گسلی منطقه تهیه و با توجه به وضعیت ژئومورفولوژی منطقه، برای اعمال روش مربع‌شمار، منطقه مورد مطالعه به شش مربع با ابعاد شانزده کیلومتر تقسیم‌بندی شد. در بررسی فرکتال سیستم گسلی منطقه هر کدام از

مربع‌ها، جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفت و برای هر یک بعد فرکتالی محاسبه شد. در شکل چهار نقشه شبکه‌بندی و پارامترهای تحلیل فرکتال حاصل از بررسی سیستم گسلی منطقه نشان داده شده است. با رسم نمودارهای مربوط به هر مربع، یک بعد فرکتالی به دست آمد. وجود اختلاف بعد فرکتالی در بخش‌های متفاوت پهنه گسلی نشانگر تفاوت هندسه سیستم گسلی آن بخش‌ها با یکدیگر است (شهریاری و خطیب، ۱۳۷۶: ۳۹-۳۲).

مقدار کم بعد فرکتالی نشانگر این خواهد بود که گستره سطحی سیستم گسل محدود بوده و دگرشکلی در آن به حد نهایی رسیده است و مقدار زیاد بعد

شکستگی‌های ساختاری (گسل‌ها)، توپوگرافی مرتفع بخش جنوبی منطقه و عملکرد فعال نیروهای زمین‌ساختی در این منطقه براساس شواهد میدانی، نشان از برخاستگی فعال در پهنه f و تأییدی بر محاسبات انجام‌شده در این پژوهش دارد (شکل ۱۲).

فرکتالی نشانگر گستره سطحی زیاد سیستم گسلی و تکامل کمتر سیستم گسل است (شهریاری و خطیب، ۱۳۷۶: ۳۹-۳۲). در منطقه مورد مطالعه شبکه f دارای بیشترین بعد فرکتالی ( $D_f = 1/74$ )، پهنه a ( $D_a = 1/73$ ) و پهنه c ( $D_c = 1/71$ ) است (شکل ۱۳). تراکم بالایی

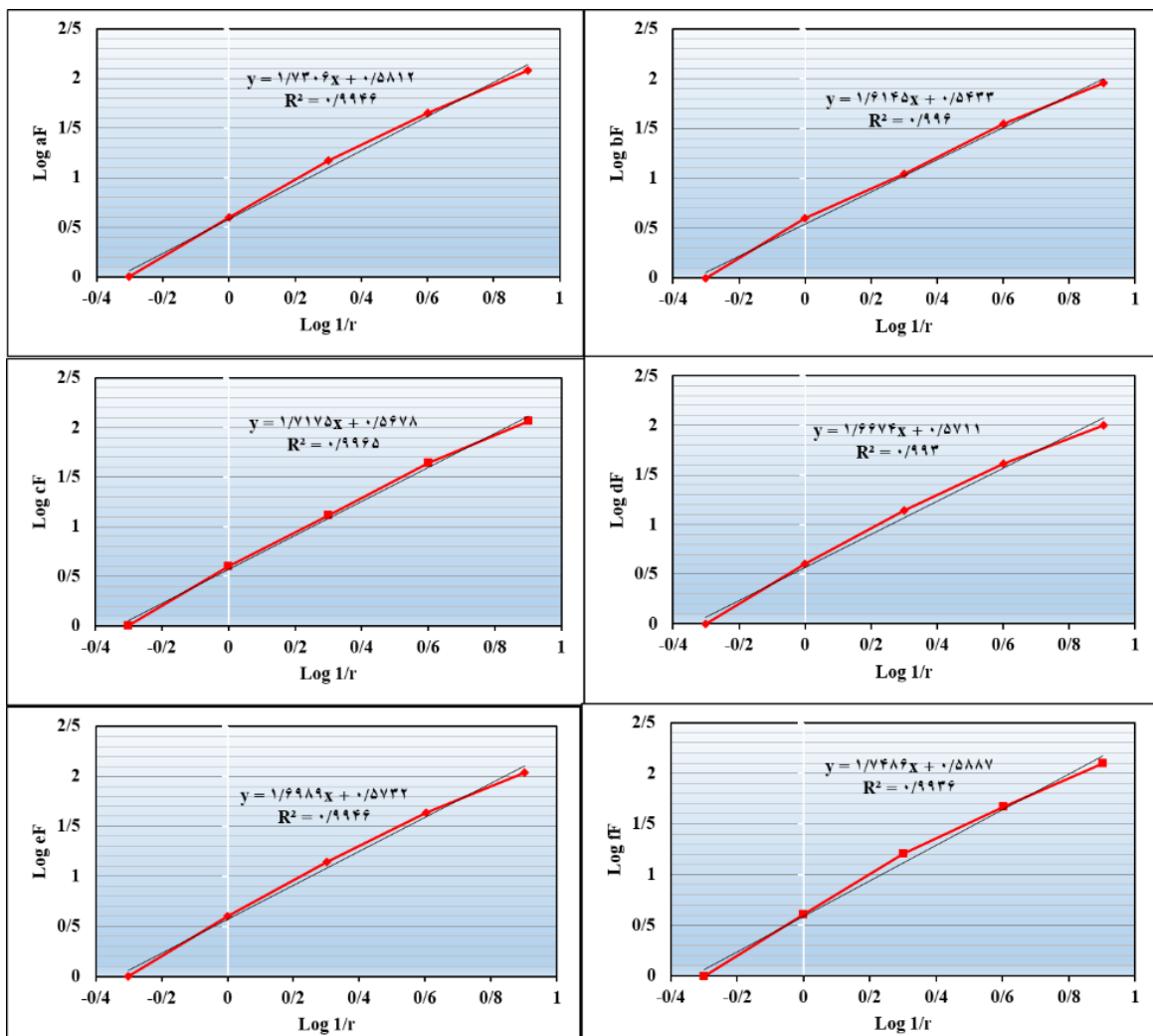


شکل ۱۲: نقشه گسل‌های منطقه مورد مطالعه و شبکه‌بندی که برای اعمال روش مربع‌شمار در به‌دست‌آوردن بعد فرکتال ترسیم شده است تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

جدول ۱: محاسبه ابعاد فرکتالی گسل در منطقه مورد مطالعه

r(km)	1/r	a/F	b/F	c/F	d/F	e/F	f/F
۲	۰/۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱	۱	۴	۴	۴	۴	۴	۴
۰/۵	۲	۱۵	۱۱	۱۳	۱۴	۱۴	۱۶
۰/۲۵	۴	۴۵	۳۵	۴۴	۴۱	۴۳	۴۷
۰/۱۲۵	۸	۱۲۰	۹۱	۱۱۶	۱۰۱	۱۱۰	۱۲۵

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۰



شکل ۱۳: نمودارهای لگاریتمی عکس طول ضلع مربع‌ها به تعداد مربع‌هایی که حاوی گسل هستند

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

### محاسبه ابعاد فرکتالی شبکه زهکشی

برای محاسبه ابعاد فرکتالی شبکه زهکشی منطقه، با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای در محیط نرم‌افزار ArcMap، لایه شبکه زهکشی منطقه مورد مطالعه تهیه و روی این نقشه، به منظور محاسبه پارامترها در روش مربع‌شمار، شبکه‌بندی مطابق با شکل ۱۶، منظور شده است. این شبکه‌بندی مشابه با شبکه‌بندی فرکتال گسل‌ها است. در بررسی فرکتال شبکه زهکشی، هر کدام از شبکه‌ها، جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته و برای هر یک، بعد فرکتالی

محاسبه شده است (شکل ۱۶). با توجه به نتایج ابعاد فرکتالی محاسبه‌شده، مشاهده می‌شود که این اعداد دارای تفاوت‌هایی است (شکل ۱۵). پهنه  $b$  با میزان بعد فرکتال ( $D_b=1/993$ ) و به ترتیب پهنه  $b$  و  $d$  ( $D_c=1/991 - D_d=1/989$ ) دارای بیشترین بعد فرکتال در منطقه مورد مطالعه است. مقادیر به دست آمده با تفاوت‌های ژئومورفیک در هر پهنه قابل توجه است. به این ترتیب که هرچه منطقه مرتفع‌تر باشد، آبراه‌ها به طرح موازی و خطی تمایل پیدا می‌کنند. در این صورت بعد فرکتالی کاهش می‌یابد (شکل ۱۴).

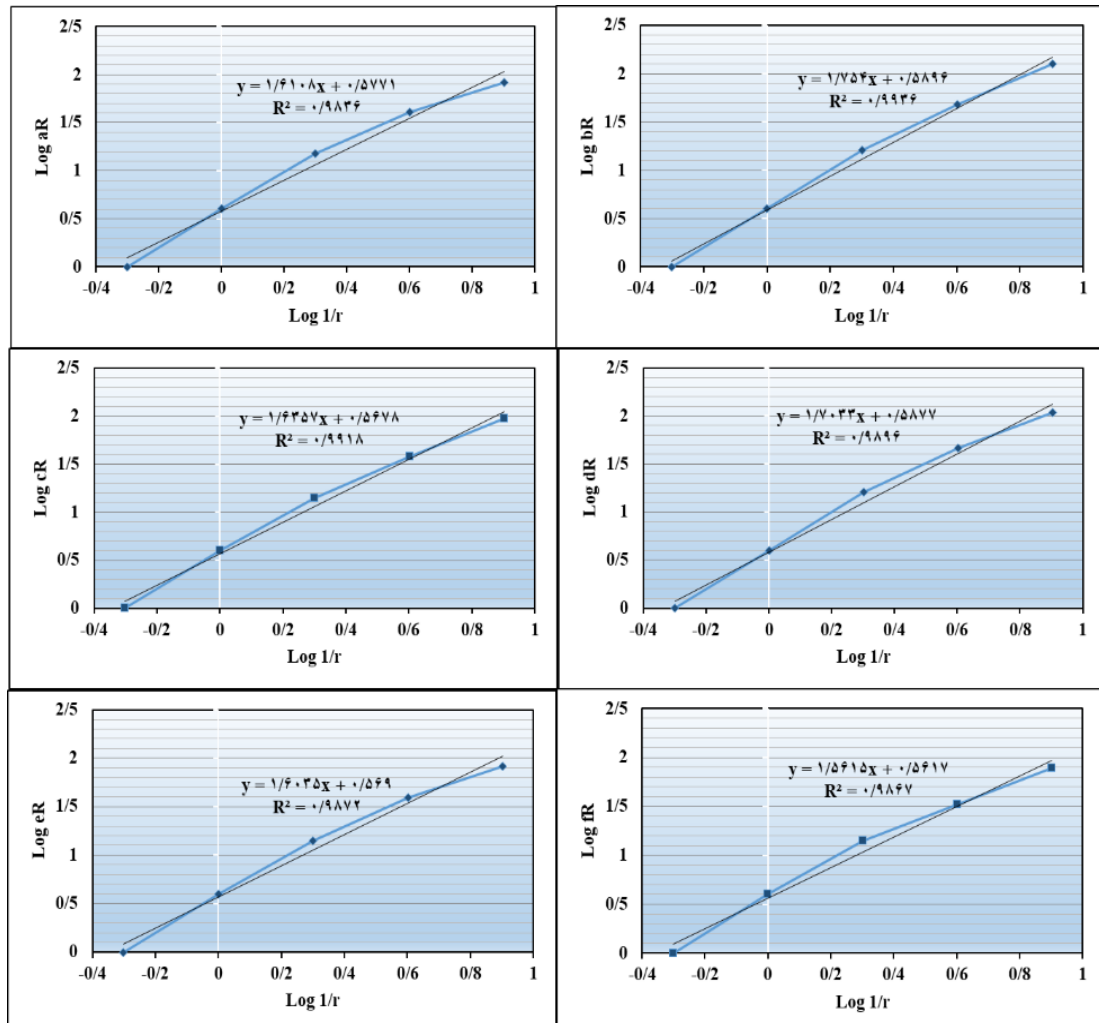


شکل ۱۴: نمایی از طرح موازی آبراهه‌ها در منطقه مورد مطالعه در روستای هلادر  
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

جدول ۲: محاسبه ابعاد فرکتالی آبراهه در منطقه مورد مطالعه

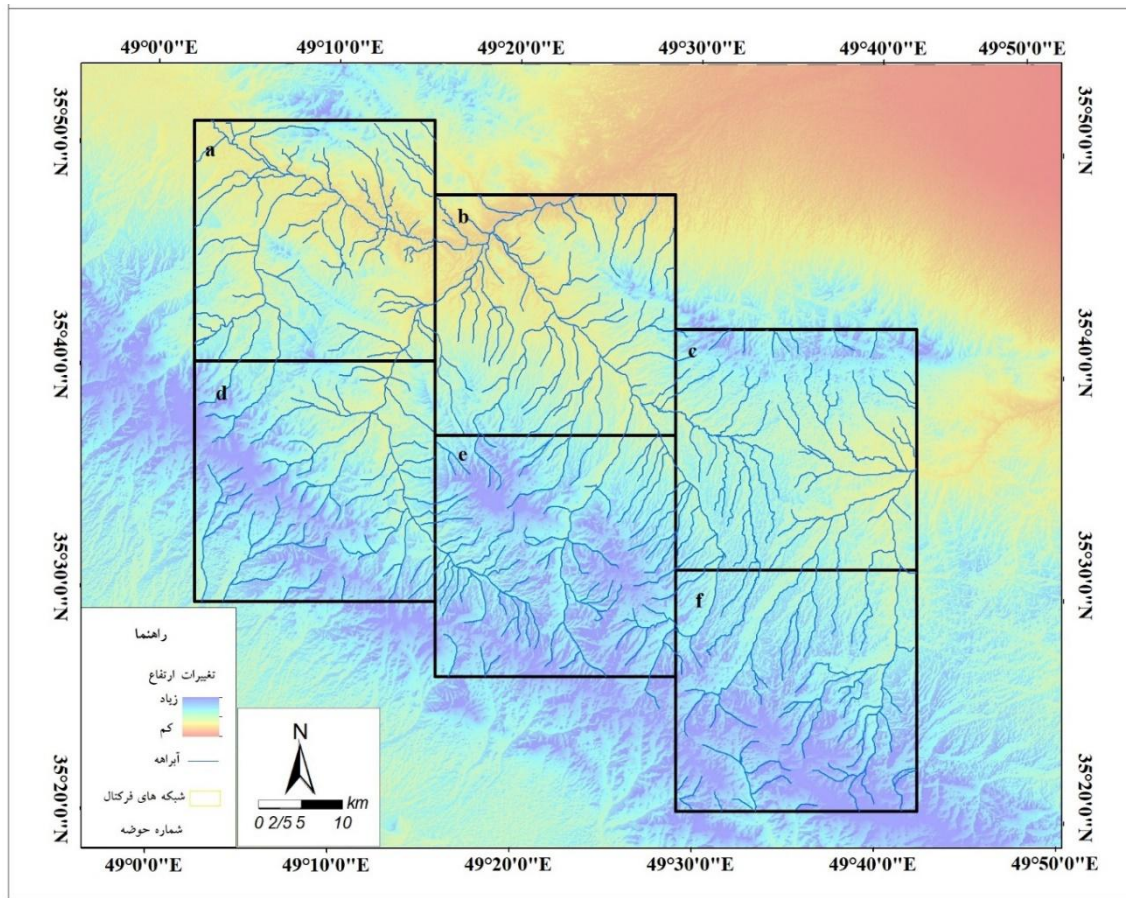
r(km)	1/r	aR	bR	cR	dR	eR	fR
۲	۰/۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱	۱	۴	۴	۴	۴	۴	۴
۰/۵	۲	۱۵	۱۶	۱۴	۱۶	۱۴	۱۴
۰/۲۵	۴	۴۱	۴۸	۳۸	۴۶	۳۹	۳۳
۰/۱۲۵	۸	۸۳	۱۲۶	۹۴	۱۰۸	۸۳	۷۸

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۰



شکل ۱۵: نمودارهای لگاریتمی عکس طول ضلع مربع‌ها به تعداد مربع‌هایی که حاوی آبراهه هستند

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

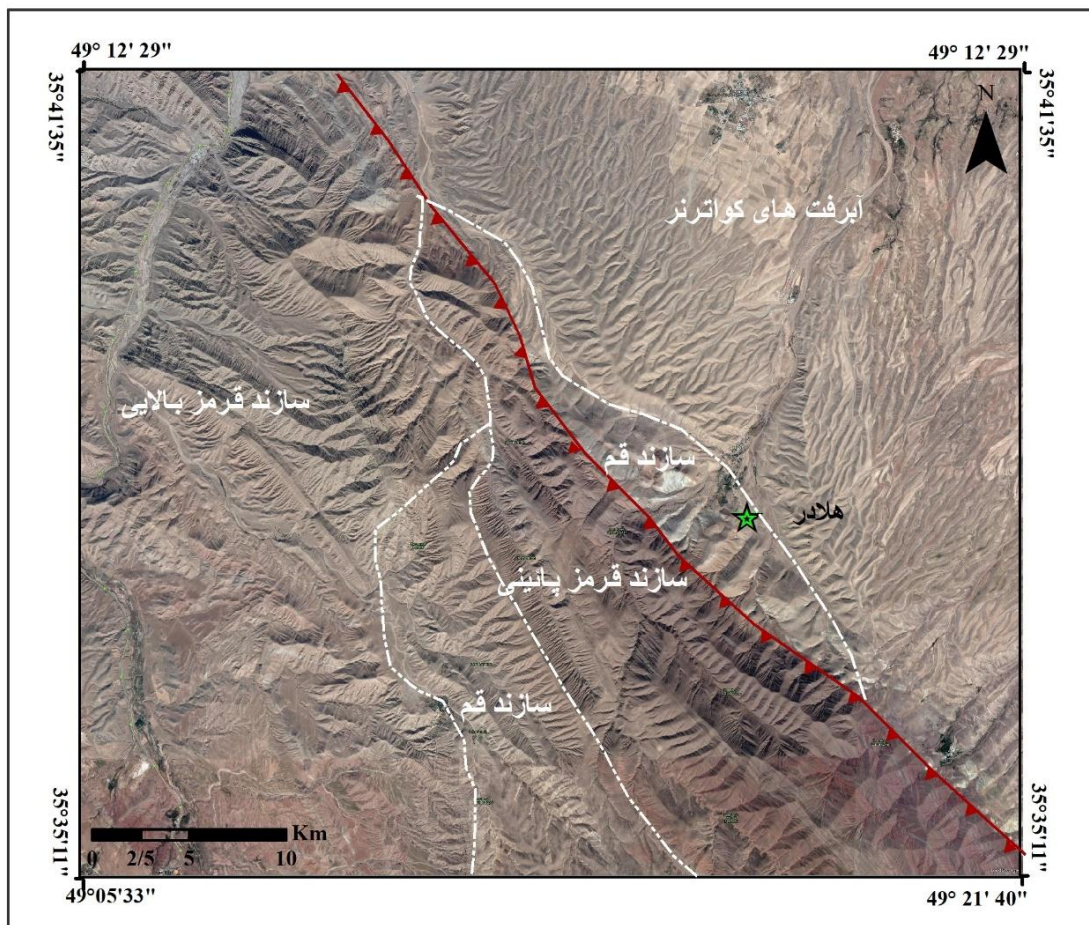


شکل ۱۶: نقشه شبکه زهکشی منطقه مورد مطالعه و شبکه‌بندی که برای اعمال روش مربع‌شمار در به‌دست‌آوردن بُعد فرکتال ترسیم شده است  
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

### تحلیل هندسی پهنه گسلی قمشلو

مطالعه گسل‌های فعال در تعیین میزان فعالیت منطقه از نظر نوزمین‌ساخت و لرزه‌زمین‌ساخت نقش بسزایی دارد. گسل‌های فعال به کمک نقشه‌های زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی و مطالعات صحرایی شناسایی و نحوه عملکرد آن بر سطح زمین بررسی شده است. گسل قمشلو در منطقه مورد مطالعه از روستای سنگاوپن شروع شده و سپس رو به شمال باختر ادامه یافته و در انتها در آبرفت‌های باختر

روستای قمشلو پایان می‌پذیرد. این گسل به طول ۴۸ کیلومتر و امتداد شمال‌باختری-جنوب‌خاوری در محدوده مورد مطالعه قرار دارد که سازوکار مشخصی برای آن تعیین نشده بود. گسل قمشلو را براساس تغییر روند به دو بخش خاوری و باختری می‌توان تقسیم کرد: بخش خاوری پهنه گسل قمشلو با طول ۲۸ کیلومتر و روند N45W از روستایی امام‌زاده قاسم تا جاده اصلی آوج-آبگرم امتداد دارد که رخنمون‌های آن در روستای هلادر دیده می‌شود (شکل ۱۷).



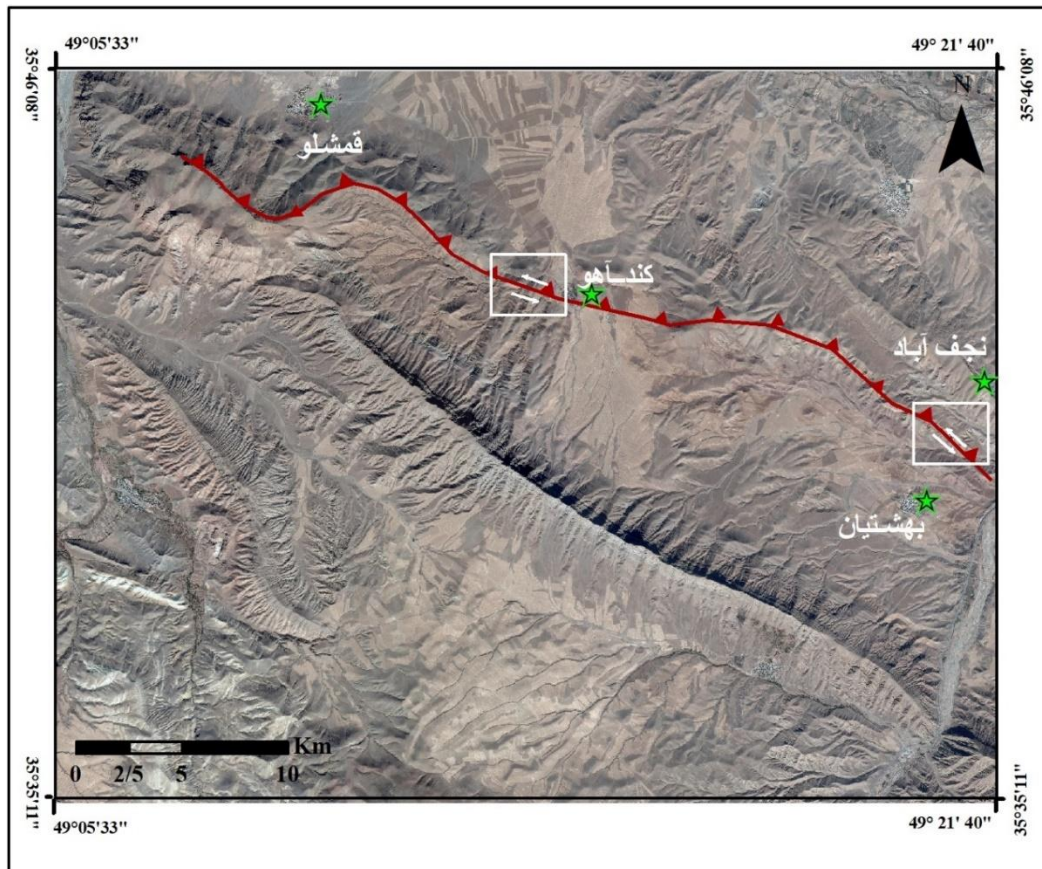
شکل ۱۷: تصویر ماهواره‌ای گوگل‌ارت<sup>۱</sup> از بخش خاوری پهنه گسل قمشلو، سازند قرمز پایینی (L.R.F).

سازند قرمز بالایی (U.R.F)، سازند قم (Q.F)، آبرفت‌های کوتاه‌تر (Q.A)

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

رخمون‌های آن در روستای نجف‌آباد، بهشتیان،  
کندآهو و قمشلو قابل مشاهده است (شکل ۱۸).

بخش باختری گسل قمشلو به طول ۱۹ کیلومتر  
از روستای نجف‌آباد در جنوب شرق شهرستان آبگرم تا  
روستای قمشلو با روند N67W امتداد دارد که



شکل ۱۸: تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث از بخش باختری پهنه گسل قمشلو

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

قرار داده است و باتوجه به این شواهد، به نظر می‌رسد میزان جابه‌جایی از سمت جنوب خاور به سمت شمال باختر کاهش می‌یابد. عمدتاً رخنمون این گسل را در درون دره‌ای در جنوب روستایی هلادر می‌توان مشاهده کرد؛ اما در سایر بخش‌ها گسل کاملاً پوشیده شده و قابل مشاهده نیست. همان‌طور که در نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، تصاویر ماهواره‌ای و مشاهدات صحرایی دیده شده است، در بخش خاوری گسل، سازند قرمزپایینی در کنار سازند قم قرار گرفته است که نابرجا محسوب شده و از جنوب غرب به شمال شرق منطقه نپ شده و توالی رسوبی منطقه را برهم ریخته است (شکل ۱۹).

شواهد حاکی از وجود شبکه‌ای از عناصر ریخت‌زمین‌ساختی در اثر عملکرد این گسل است. براساس مطالعات صحرایی انجام‌شده در بخش‌های مختلف پهنه گسلی فعال قمشلو سازوکار گسل به شرح ذیل است: در بخش خاوری پهنه گسلی قمشلو و در شمال روستایی هلادر، در راستای گسل سازند قرمز زیرین در کنار آبرفت‌های کوتاه‌تر قرار گرفته است؛ در حالی که به سمت شمال باختری سازند قرمز بالایی در کنار آبرفت‌ها مشاهده می‌شود. با این توصیف می‌توان نتیجه گرفت که گسل از نوع راندگی بوده و سازند قرمز زیرین و بالایی روی آبرفت‌های کوتاه‌تر رانده شده است. در نتیجه یک برخاستگی شدید در بلوک فرادیواره (در جنوب گسل)، به وقوع پیوسته که عناصر ریخت‌زمین‌ساختی را تحت تأثیر



شکل ۱۹: الف) مرز بین سازند قرمز زیرین (L.R.F) و سازند قم (Q.F) در بخش خاوری قمشلو

ب) نمایی نزدیک از صفحه گسل با موقعیت N250/70

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

ژئوپس در اینجا متمرکز شده، در واقع در اینجا پهنه گسلی<sup>۱</sup> تشکیل شده است. بلوک شمال باختری با امتداد شمال باختری-جنوب خاوری (NW-SE) و شیب شمال باختری (NW) روی بلوک جنوب باختری رانده شده است. گسل در این بخش دارای موقعیت 044/85 و ریک بردار لغزش ۳۵ درجه جنوب خاوری است. فیبرهای ژئوپس در جهت حرکت گسل جهت یافته شده اند که با توجه به جهت آنها می توان حرکت گسل را تشخیص داد که با توجه به ریک برداشت شده گسل مورب لغز است و هر دو مؤلفه امتداد لغز و شیب لغز را به همراه دارد که مؤلفه امتداد لغز آن بیشتر از شیب لغز است و مؤلفه امتداد لغز آن چپگرد و مؤلفه شیب لغز آن معکوس است (شکل ۲۰).

در بخش باختری گسل همان طور که قبلاً ذکر شده، روند گسل از N45W به N67W تغییر کرده است. علاوه بر امتداد گسل، همانطور که در تصاویر ماهواره ای و مشاهدات صحرایی قابل مشاهده است، شیب گسل نیز در این بخش از جنوب باختری بخش شرقی به شمال خاوری بخش باختری تغییر کرده است. در بین روستای نجف آباد و بهشتیان که در واقع بخش جنوبی قطعه باختری است، گسل از بخش (M1)، لایه های قرمز آوج عبور کرده است. از شواهد گسل در این بخش می توان به تغییر شیب لایه ها اشاره کرد که به تدریج با حرکت به سمت گسل امتداد، شیب و جهت شیب لایه تغییر می کند. حرکت گسل سبب تغییر شکل شدید لایه ها در جنوب گسل شده و در نتیجه حرکت گسل کانی



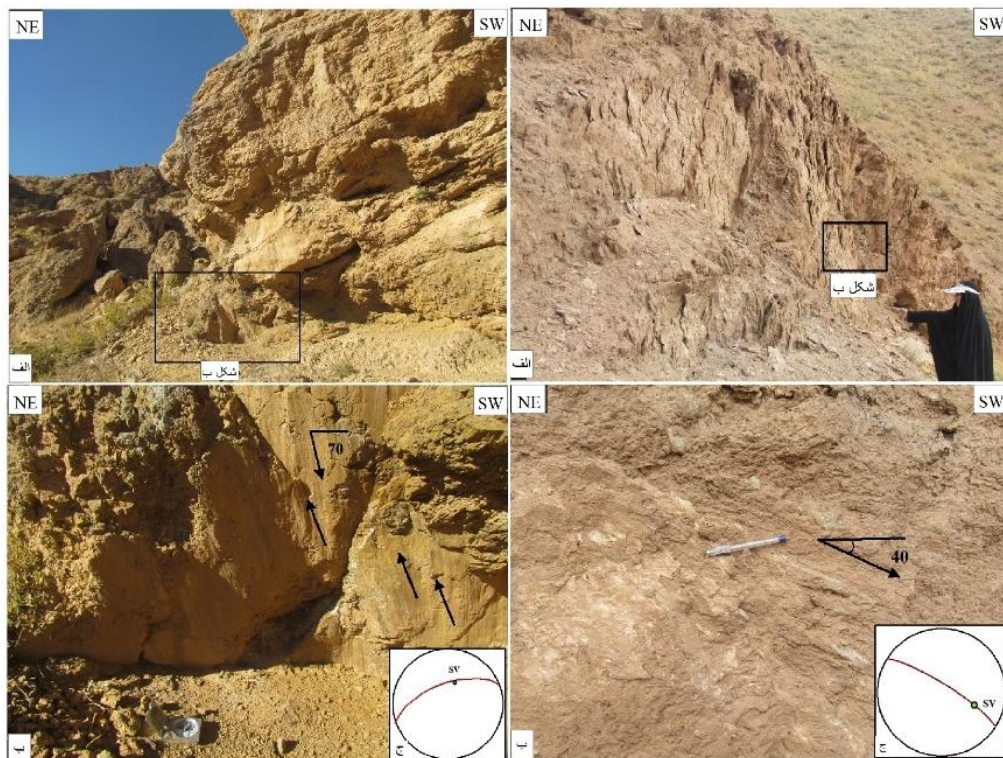
شکل ۲۰: الف) رخنمونی از صفحه گسل در بخش (M1)، لایه‌های قرمز آوج، چهارگوش سیاه‌رنگ مکان شکل ب را نشان می‌دهد،

ب) ریک 35° جنوب‌خاوری در پهنه گسلی حرکت مورب لغز را نشان می‌دهد، ج) استریوگرام رسم‌شده از موقعیت صفحه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

جنوبی آورده شده است (شکل ۲۱). در بخش شمالی گسل در روستای کندآهو (دشت آهو)، در آهک‌های سازندلار نیز صفحه گسل‌های برداشت‌شده که برای نمونه در شکل زیر آورده شده است که داری موقعیت 340/60 و ریک‌خش لغزش ۷۰ درجه شمال شرقی است (شکل ۲۱).

همچنین در بخش باختری و جنوب پهنه گسلی قمشلو در مابین روستای بهشتیان و نجف‌آباد که دارای واحدهای سنگی به جنس ژئوپس و مارن (شیل و ماسه‌سنگ)، هستند. در این بخش چندین صفحه گسل برداشت شده که به‌عنوان نمونه صفحه گسل زیر با موقعیت 032/79 و ریک بردار لغزش ۴۰ درجه



شکل ۲۱: الف) رخنمون‌های از صفحه گسل چهارگوش سیاه‌رنگ مکان شکل ب را نشان می‌دهد  
 ب) نمایی نزدیک از صفحه گسل‌ها، ج) استریوگرام رسم‌شده از موقعیت صفحه گسل  
 تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

حوضه‌های بخش مرکزی منطقه (۸،۹،۱۰،۱۳)، از میزان فعالیت زمین‌ساختی نسبی بیشتری در قیاس با دیگر حوضه‌ها در محدوده مورد مطالعه برخوردار هستند که تراکم گسل‌ها و فعالیت پهنه‌گسلی قمشلو در این منطقه خود شاهی بر این ادعا است. همچنین بعد فرکتالی در ۶ شبکه در منطقه مورد مطالعه برای الگوی گسل‌ها و شبکه زهکشی منطقه به روش مربع‌شمار، نمودارهای Log - Log محاسبه و نتایج به دست آمده از محاسبات فرکتالی انجام شده در محدوده مورد مطالعه بیشترین بعد فرکتالی گسل به ترتیب در پهنه f،  $(D_f = 1/74)$ ، پهنه a،  $(D_a = 1/73)$  و پهنه c،  $(D_c = 1/71)$ ، و کمترین بعد گسلی فرکتال در پهنه d،  $(D_d = 1/61)$ ، به دست آمده است. در محاسبات بعد فرکتالی آبراه‌ها نیز بیشترین میزان بعد فرکتال در  $(D_b = 1/993)$  و به ترتیب پهنه b و  $(D_d = 1/989)$  -

به طور کلی طبق برداشت‌های مذکور، سازوکار گسل قمشلو را می‌توان دارای حرکت معکوس چپگرد قدیمی و امتداد لغز<sup>۱</sup>، جوان در نظر گرفت.

### نتیجه

در این پژوهش در جهت برآورد شاخص ارزیابی فعالیت نسبی زمین‌ساختی در گستره عملکرد پهنه گسل قمشلو، پنج شاخص ریخت‌سنجی، شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی (Af)، شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (T)، شاخص گرادیان-طول رودخانه (SL)، شاخص نسبت عرض کف دره به ارتفاع آن (Vf) و شاخص منحنی فرازسنجی (Hi) محاسبه شد. با توجه به نقشه پهنه‌بندی نهایی از میزان فعالیت زمین‌ساختی نسبی در منطقه مورد مطالعه می‌توان بیان کرد که

گسل قمشلو مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته است. گسل قمشلو، با طول ۴۸ کیلومتر و روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری، در منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است که باتوجه به تغییر روند این گسل می‌توان آن را به دو بخش خاوری و باختری تقسیم کرد. بخش خاوری دارای روند N45W و بخش باختری دارای روند N67W است. به‌طور کلی مطابق با برداشت‌های مذکور سازوکار قطعه خاوری گسل قمشلو، حرکت معکوس و قطعه باختری حرکت راستالغز چپگرد با مؤلفه شیب‌لغز معکوس است.

$D_c=1/991$  و کمترین بُعد فرکتالی آبراهه در مربع  $f$  ( $D_f = 1/56$ ) به‌دست آمده است. بالابودن بُعد فرکتالی گسل‌ها نشان‌دهنده تراکم بالای شکستگی‌های منطقه است. تفاوت نتایج بُعد فرکتالی گسل‌ها در قیاس با بُعد فرکتالی آبراهه‌ها را می‌توان به دلیل گوناگونی سنگ‌شناسی در شبکه‌های مختلف در نظر گرفته شده، نسبت داد که جهت محاسبه بُعد فرکتال در منطقه مورد مطالعه است. باتوجه به ارزیابی فعالیت نسبی زمین‌ساختی و ابعاد فرکتالی برای سیستم گسلی فعال و شبکه زهکشی در محدوده متأثر از عملکرد پهنه

## منابع

اعلایی‌مهابادی، سلیمان؛ مرتضی خلعتبری (۱۳۸۳). نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نوبران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

<https://gsi.ir/fa/map/141/-/D9%86%D9%88%D8%A8%D8%B1%D8%A7%D9%86>

اعلایی‌مهابادی، سلیمان؛ محمد فوزادی (۱۳۸۶). نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ رزن، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

<https://gsi.ir/fa/map/126/-/D8%B1%D8%B2%D9%86>

اورنگ، کیوان؛ محمد محجل؛ غلامرضا تاجبخش (۱۳۹۳). شواهد وارونگی بردار لغزش در گسل کوشک‌نصرت، شمال ساوه، فصلنامه علمی- پژوهشی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور، شماره ۹۴، صفحات ۳۱۵-۳۲۸.

<https://www.magiran.com/paper/1393409>

شهریاری، سهراب؛ محمد مهدی خطیب (۱۳۷۶). تحلیل فرکتالی سیستم گسلی نهبندان، فصلنامه علوم زمین. سال ششم. شماره ۲۴-۲۳ (بهار و تابستان ۱۳۷۶). صفحات ۳۹-۳۲.

<https://www.sid.ir/paper/433996/fa>

## References

Alizadeh, A., Lopez Martinez, Margarita., & Sarkarinejad, Khalil (2010). 40Ar-39Ar Geochronology in a gneiss dome within the Zagros Orogenic Belt Geochronologie 40Ar-39Ar dans un do'me gneissique de la ceinture orogenique du Zagros, C. R. Geoscience, 342, 837-846.

<https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.07.005>

Azor, A., Keller, E.A., & Yeats, R.S (2002). Geomorphic indicators of active fold growth: South Mountain-Oak Ridge Ventura basin, southern California. Geological Society of America Bulletin, 114, 745-753.

[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2002\)114<0745:GIOAFG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2002)114<0745:GIOAFG>2.0.CO;2)

Bolourchi, M.H (1979). Explanatory Text of the Kabudar Ahang Quadrangle Map, Iran, Scale 1:250,000. Geological Survey of Iran, 107.

<https://lib.ui.ac.ir/inventory/2/24126.htm>

Bolourchi, M.H (1978). Geological Quadrangle Map of Avaj, Scale 1:100,000, Sheet D 5861. Geological Survey of Iran.

[https://geoeh.um.ac.ir/index.php/article\\_40280.html?lang=en](https://geoeh.um.ac.ir/index.php/article_40280.html?lang=en)

Bull, W. B., & McFadden, L.D (1977). Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California, In: Doehring, D.O. (Ed.), Geomorphology in Arid Regions, Proceedings of the Eighth Annual Geomorphology Symposium, State University of New York, Binghamton. 115-138.

<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780429299230-5/tectonic-geomorphology-north-southgarlock-fault-california-william-bull-leslie-mcfadden>

- Burbank, D. W., & Anderson, R. S (2001). Tectonic geomorphology. Blackwell Science, 274.  
<https://scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2109864>
- Burbank, D., & Anderson, R (2011). Tectonic Geomorphology. Edit2. Blackwell Publishing.  
<https://www.wiley.com/en-us/Tectonic+Geomorphology,+2nd+Edition-p-9781444338874>
- Cox, Rt (1994). Analysis of drainage basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible quaternary tilt-block tectonics: an example from the mississippi embayment. Bulltin of geological society of America, 106, 571-581.  
[https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1998181](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1998181)
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacan, J., & Keller, EA (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (southern Spain). Geomorphology, 96.
- Font, M., Amorese, D. and Lagarde, J.L (2010). Dem and GIS Analysis of the Stream Gradient Index to Evaluate Effects of Tectonics: the Normandy Intraplate Area (NW France), Geomorphology, 119, 172-180.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.004>
- Hare, P.W., & Gardner, T.W (1985). Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica. In: Morisawa, M., Hack, J.T. (Eds.), Tectonic Geomorphology. Proceedings of the 15th Annual Binghamton Geomorphology Symposium. Allen & Unwin, Boston, MA, 123-134.  
[https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1998176](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1998176)
- Hirata, T (1989). Fractal Dimension of Fault Systems in Japan: Fractal Structure in Rock Fracture Geometry at Various Scales, Pure appl. Geophys, 131, 157-170.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF00877480>
- Keller, E. A., & Pinter, N (1996). Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape. by Prentice-Hall, Inc. Simon and Schuster/A Viacom Company Upper Saddle River, New Jersey. 7458, 121-145.  
[https://www.scirp.org/\(S\(vtj3fa45qm1ean45vffcz55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1960389](https://www.scirp.org/(S(vtj3fa45qm1ean45vffcz55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1960389)
- Keller, E.A., Gurrola, L., & Tierney, T.E (1999). Geomorphic criteria to determine direction of lateral propagation of reverse faulting and folding, Geology. 27, 515-518.  
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999Geo....27..515K/abstract>
- Mandelbrot, B (1967). How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-similarity and Fractional Dimension, Science, 156, 636- 638.  
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.156.3775.636>
- Mandelbrot, B (1982). The Fractal Geometry of Nature. Freeman, New York 460 pp. Mandelbrot, B. B., 1983- The Fractal Geometry of Nature (Updated and Augmented Edition, Freeman, New York 495.
- Mandelbrot, B.B (1983). The Fractal Geometry of Nature (Updated and Augmented Edition), Freeman, New York. 495.  
<https://scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1221294>
- Mandelbrot, B. (1985). Self-affine fractals and fractal dimension. Physical Script, 32, 257-260.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-8949/32/4/001>
- Molin, P., Pazzaglia, F.J., & Dramis, F (2004). Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly-deforming forearc, sila massif, Calabria, southern Italy. American Journal of Science. 304, 559-589.  
<https://www.ajsonline.org/content/304/7/559>
- Sengör, A.M.C (1990). A new model for the late Palaeozoic-Mesozoic tectonic evolution of Iran and implications for Oman. Geological Society, 49, 797-831.  
<https://www.lyellcollection.org/doi/abs/10.1144/gsl.sp.1992.049.01.49>
- Sengör, A.M.C (1979). Mid-Mesozoic closure of Permo-Triassic Tethys and its implications. Nature, 279, 590-593.  
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979Natur.279..590S/abstract>
- Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C., & Bardajm, T (2003). Fault generated mountain fronts in Southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and earthquake activity. Geomorphology, 250, 203-226.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X02002155>
- Strahler, A. N (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, Geological Society of America Bulletin, 63, 1117-1142.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
- Turcotte, D. L (1997). Fractal and Chaos in Geology and Geophysics. Cambridge university press. Cambridge.  
<http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781139174695>
- Vicsek, T (1992). Fractal Growth Phenomena. 2nd ed., World Scientific, Singapore 488.  
<https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/1407>
- Yazdi, M., Taheri, M., Navi, P., & Sadati, N (2013). Landsat ETM+ imaging for mineral potential mapping: application to Avaj area, Qazvin, Iran. International Journal of Remote Sensing. 34, 5578-5795.  
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2013.797127>