Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Autumn 2025, Vol. 15 (3): 71 - 92

Research Article

Assessment of tectonic activity using the morphotectonic indices of the Jiroft Fault in the western boundary of the Jazmurian depression

Maryam Abdolkarimi[1], Saeede Keshavarz[1]*, Majid Shahpasandzadeh[1]

1- Department of Earth Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

Keywords: *tectonic activity, Morphotectonic indices, Jiroft fault, Kerman, Iran*

1-Introduction

Analysis of geomorphic indices using remote sensing techniques and geographic information systems is crucial and rapid for evaluating tectonic activity within areas affected by relatively fast and slow rates of active tectonics (Keller, 1986; Faghih et al., 2015). Results of such analysis are advantageous for appraising natural hazards and informing land use development and management in populated areas (Cheng et al., 2017; Pedrera et al., 2009; Faghih et al., 2011, 2012). The Iranian plateau, situated within the Alpine-Himalayan active tectonic zone, has been significantly impacted by tectonic activities throughout its history (Seraj et al., 2020). This research assessed the spatial variation of deformation and tectonic activity along the Jiroft fault by analyzing geomorphic indices. This fault is an eastern segment of the Jiroft-Sabzevaran fault system located on the western margin of the Jazmurian depression (Fig.1).

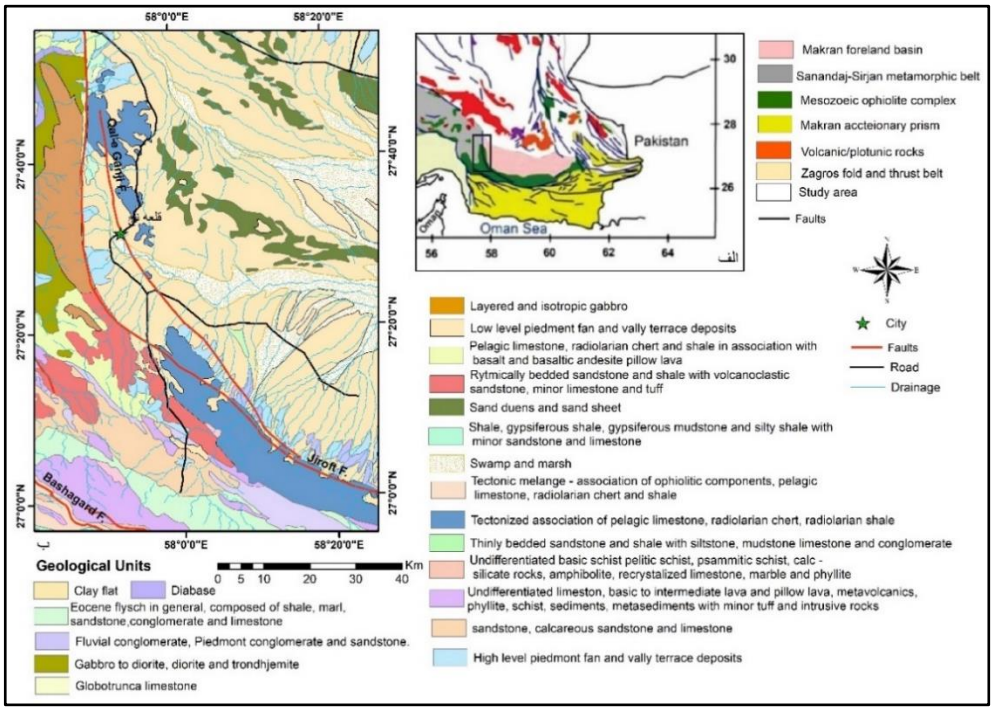


Figure 1. (a) Simplified inset map of structural and tectonic units of southeast Iran. A black rectangle shows the location of the study area, and (b) a geological map of the study area is displayed.

* Corresponding author: s.keshavarz2007@yahoo.com
DOI: 10.22055/aag.2025.48695.2495
Received: 2025-01-08
Accepted: 2025-05-03

2-Material and methods

The geomorphic indices are evaluated based on either an analysis of the drainage basin or mountain fronts (Nezamzadeh et al., 2024; Zarei et al., 2023; Gholami et al., 2023). These indices may detect anomalies in the drainage system or along mountain fronts (El Hamdouni et al., 2008). This study utilized a digital elevation model with a 30-meter resolution, a 1:50,000 topographic map, and a 1:100,000 geological map as its primary data sources. The river's network and drainage basins were extracted from the Digital Elevation Model (DEM) based on the mountain ridges. We used Arc GIS and Global Mapper software to quantify six morphotectonic indices such as stream sinuosity index (S), percentage dissected mountain fronts (Fd), mountain front sinuosity index (Smf), stream length gradient index (Sl), the ratio of valley floor width to valley height index (Vf), drainage basin shape index (Bs) in the Jiroft fault (Keller & Pinter, 2002; Ramírez-Herrera, 1998; Wells et al., 1988; Rockwell et al., 1985; El Hamdouni et. al., 2008; Keshavarz et al., 2021; Faghih et al., 2016 a). Different indices have been analyzed for 15 sub-basins and neighboring mountain ranges (Fig. 2B) and assigned different tectonic classes based on the range of values of individual geomorphic indices (Table 1). These classes are then summed, averaged, and arbitrarily divided into relative active tectonics (IRAT) indexes over the entire study area. This methodology has been successfully applied in other geological settings with active tectonics, yielding promising results (Bull, 2007; Fountoulis et al., 2015; Faghih and Nourbakhsh, 2015; Faghih et al., 2016b).

Table 1. Classification of morphotectonic indices based on tectonic activity.

No	Indices	Class3 Low Tectonic activity	Class2 Moderate tectonic activity	Class1 High tectonic activity
1	Mountain Front Sinuosity Index	Smf > 1/5	1.1<Smf < 1.5	1.1>Smf
2	Ratio Of Valley Floor Width to Valley Height Index	Vf >1	1 > Vf >0.5	0.5>Vf
3	Stream Sinuosity Index	SI>1.5	1.5>SI>1.1	1.1>SI
4	Drainage Basin Shape Index	1.5>Bs	2.3>Bs>1.5	Bs>2.3
5	Percentage Dissected Mountain Fronts	Fd>0.66%	0.66%>Fd>0.33%	0.33%>Fd
6	Stream Length Gradient Index	300>SL	500>SL>300	SL>500

3- Results and discussions

Calculated Smf and Fd values indicate that the mountain front formed by the Jiroft fault zone is tectonically active, with values ranging from 1.04 to 1.73 and percentages of 52% to 76%, respectively. The range of Vf is from 0.12(basin 7) to 1.50(basin 14). Based on these values, all measured basins fall in class 1(except basin 14) of tectonic activity and the V-shaped form of the valley. Bs ranges from 1.03 (basin 1) to 4.97 (basin 14). More than two-thirds of the analyzed basins belong to classes 1 and 2. These basins are elongated ,with higher Bs values than Class 3, and have lower Bs values and nearly circular shapes (Fig. 13B, Table 2). The SL value ranges from 174 (basin 15) to 4584 (basin 7). The values were classified as the most basin in class 1 of tectonic activity. Based on stream length-gradient index values (S), most of the basins developed in the study area are categorized as moderately active, with S values ranging from 1.04 to 1.35.

Table 2. Calculated indices and Iat classification (relative tectonic activity index) in the study area.

No	Smf	S	Sl	Vf	Fd	Bs	Iat -Value	Iat -class
1	3	2	1	1	3	1	1.86	2
2	3	2	1	2	3	1	2.00	2
3	3	2	1	1	2	1	1.66	2
4	2	2	1	---	2	1	1.60	2
5	2	2	1	1	2	2	1.66	2
6	2	2	1	---	2	1	1.60	2
7	2	2	1	1	2	1	1.50	2
8	2	2	1	1	2	3	1.80	2
9	2	1	1	1	2	2	1.50	2
10	2	2	1	1	2	2	1.66	2
11	1	2	2	1	2	2	1.66	2
12	2	2	1	1	2	2	1.66	2
13	3	2	2	1	3	2	2.16	3
14	3	2	1	3	3	3	2.50	3
15	3	2	3	---	3	3	2.80	4

By averaging the six geomorphic indices measured (Smf, Fd, Vf, Bs, SL, and S) and their classification, we recognized the distribution of relative tectonic activity (Table 2). Four classes define the degree of relative tectonic activity: class 1, very high (1.0 <IRAT < 1.5); class 2, high (1.5 <IRAT < 2); class 3, moderate (2 <IRAT < 2.5); and class 4, low (2.5< IRAT<3.5). Regarding the yielded results, the distribution of these four classes is shown on Fig. 2. On this map, the high and moderate Iat values predominate in most of the basin. The bedrock in these basins is primarily Gabbro, which has a similar resistance to erosion. The observed changes in the Iat index are due to changes in tectonic activities. Low values appear in basins 13 to 15, located in the southern part of the fault. This difference may be related to changes in lithology, such as shale, limestone, and sandstone. Also, the fault's strike near these basins changes direction to the southeast.

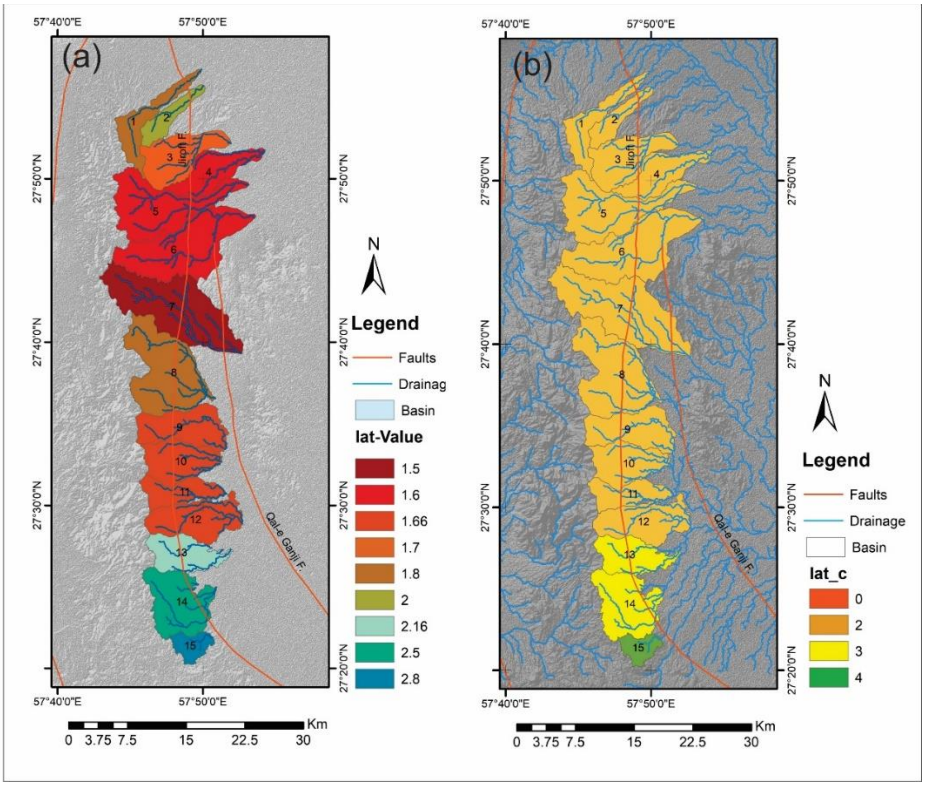


Figure 2. (a) Calculated Iat index in the study area, and (b) Classification map of the Iat index in the study area.

4-Conclusion

Combining geomorphometric indices translates to quantitative geomorphic-tectonic analysis to detect anomalies affecting the river system, mountain fronts, and topographical slopes. Morphotectonic analysis of the Jiroft fault in the western part of the Jazmourian depression shows that relative tectonic activity decreases toward the south. High tectonic activity was observed in the basin (1-12) from the north and middle part of the study area. Due to the same lithology of this basin, the difference in Iat refers to changes in active tectonics. Basins in the southern part, which exhibit low tectonic activity, are located where the fault strike changes direction to the southeast, and the lithology is more variable.

5-References

Cheng, Y.L., He, C.Q., Rao, G., Yan, B., Lin, A. M., Hu, J. M., Yao, Q. ,2017 .Geomorphological and structural characterization of the southern Weihe Graben, central China: Implications for fault segmentation .Tectonophysics 722, 11–24. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.024

El Hamdouni, R.E., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacon, J., Keller, E.A., 2008. Assessment of Relative Active Tectonic, Southwest Border of the Sierra Nevada (Southern Spain). Geomorphology 96, 150-173. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.004

Faghih, A., Jamshidi, A., Nohegar, A., 2012. Geomorphic assessment of lateral growth of active folds in the Fars arc, Zagros fold-thrust belt, Iran (case study: Herang and Kuh-e-Namaki anticlines). Scientific Quarterly Journal of Geosciences 24 (95), 133-142. https://doi.org/10.22071/gsj.2015.42000

Faghih, A., Nezamzadeh, I., Kusky, T., 2016a. Geomorphometric evidence of an active pop-up structure along the Sabzpushan fault zone, Zagros Mountains, SW Iran. Journal of Earth Science 27, 945-954. https://doi.org/10.1007/s12583-016-0663-y

Faghih, A., Nourbakhsh, A., 2015. Appraisal of relative tectonic activity along the Kazerun Fault Zone, Zagros Mountains, Iran: insight from spatial analysis of geomorphic indices. Geological Journal 50 (6), 783-798. https://doi.org/10.1002/gj.2597

Faghih, A., Nourbakhsh, A., Kusky, T., 2015. GIS-based analysis of relative tectonic activity along the Kazerun Fault Zone, Zagros Mountains, Iran: insights from data mining of geomorphic data. Journal of Earth Science 26, 712-723. https://doi.org/10.1007/s12583-015-0583-2

Faghih, A., Samani, B., Khabazi, S., Roshanak, R., 2011. Geomorphological analysis of tectonic activities affecting the formation of Maharlou Lake. Advanced Applied Geology 1 (1), 62-66. https://aag.scu.ac.ir/article_11544.html?lang=en

Faghih, A., Yazdanmehr, Z., Seraj, M., 2016b. Investigation of folding lateral growth using study of erosional processes and geomorphological and hydrogeological indices (Case study: Khaviz oilfield). Environmental Erosion Research Journal 5 (4), 73-88. http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-302-en.html

Fountoulis, I., Mavroulis, S., Vassilakis, E., Papadopoulou-Vrynioti, K., 2013. Shoreline displacement and Pineios River diversions in NW Peloponnese (Greece) as result of the geology, active tectonics and human activity during the last 100 ky. Z. Geomorphol. Suppl. Issues 57, 97–123. https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/S-00146

Gholami, E., Vaghari, P., Khatib, M.M., Faghih, A., 2023. Morphotectonic Analysis of Sub-Basins along the North Termination of Anar Fault, Yazd Block, Iran. Geotectonics 57 (4), 524-538. https://doi.org/10.1134/S0016852123040076

Keller, E.A., Pinter, N., 2002. Active Tectonics, Earthquakes, Uplift and Landscape. 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, P. 362.

Keller, E.A., 1986. Investigation of active tectonics: use of surficial earth processes. In: Wallace, R.E. (Ed.), Active Tectonics, Studies in Geophysics. National Academy Press, Washington, DC, 136-147.

Keller, E.A., Pinter, N., 2002. Active Tectonics, Earthquakes, Uplift and Landscape. 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 362pp.

Keshavarz, M., Ghaemi, F., Faghih, A., Ghanadian., M., 2021. Tectonic geomorphology assessment of neotectonics in the north of Damghan region, Alborz mountain belt, Northern Iran. Iranian Journal of Earth Sciences 13 (4), 279-287. https://doi.org/10.30495/ijes.2021.685388

Nezamzadeh, I., Faghih, A., Oveisi, B., Kusky, T., Khajavi, N., Soleimani, M., Meng, J., 2024. On the use of displaced river terraces to characterize active tectonics of the Zagros orogenic belt, SW Iran. Results in Earth Sciences 2, 100045. https://doi.org/10.1016/j.rines.2024.100045

Pedrera, A., Perez-Pena, J.V., Galindo-Zaldıvar, J., Azanon, J.M., Azor, A., 2009. Testing the sensitivity of geomorphic indices in areas of low-rate active folding (eastern Betic Cordillera, Spain). Geomorphology 105, 218–231. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.026

Ramírez-Herrera, M.T., 1998. Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay graben, Mexican Volcanic Belt. Earth Surface Processes and Landforms 23, 317–332. https://doi.org/10.1002/(SICI)1096 9837(199804)23:4<317: AID-ESP845>3.3.CO;2-M

Rockwell, T.K., Keller, E.A., Johnson, D.L., 1985. Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain fronts near Ventura, California. In: Morisawa, M. (Ed.), Tectonic geomorphology. Proceedings of the 15th Annual Geomorphology Symposium. Allen and Unwin Publishers, Boston, MA. 183–207

Seraj, M., Faghih, A., Motamedi, H., Soleimany, B., 2020. Major tectonic lineaments influencing the oilfields of the Zagros Fold-Thrust Belt, SW Iran: Insights from Integration of surface and subsurface data. Journal of Earth Science 31 (3), 596–610. https://doi.org/10.1007/s12583-020-1303-0

Wells, S.G., Bullard, T.F., Menges, C.M., Drake, P.G., Karas, P.A., Kelson, K.I., Ritter, J.B., Wesling, J.R., 1988. Regional variations in tectonic geomorphology along a segmented convergent plate boundary, Pacific coast of Costa Rica. Geomorphology 1, 239–265. https://doi.org/10.1016/0169-555X(88)90016-5

Zarei, E., Faghih, A., Soleimani, M., Zarei, S., 2023. Assessment of relative tectonic activity in the Lar region, Zagros Fold-Thrust Belt, SW Iran: Insights from geomorphometric analysis. Earth Surface Processes and Landforms 49 (3), 1199-1213. https://doi.org/10.1002/esp.5753

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Abdolkarimi, M., Keshavarz, S., Shahpasandzadeh, M., 2025. Assessment of tectonic activity using the morphotectonic indices of the Jiroft Fault in the western boundary of the Jazmurian depression. Adv. Appl. Geol. 15 (3), 71-92.
DOI: 10.22055/aag.2025.48695.2495
https://aag.scu.ac.ir/article_20057.html

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

مقاله پژوهشی

ارزیابی فعالیت زمین‌ساختی با استفاده از شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی گسل جیرفت در مرز غربی فروافتادگی جازموریان

مریم عبدالکریمی
گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی وفناوری پیشرفته، کرمان، ایران
سعیده کشاورز
گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی وفناوری پیشرفته، کرمان، ایران
مجید شاه پسندزاده
گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی وفناوری پیشرفته، کرمان، ایران
s.keshavarz2007@yahoo.com
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹ تاریخ پذیرش:۱۴۰۴/۰۲/۱۳

چکیده
سرزمین ایران مجموعه ای از بلوک‌های ناپیوسته با سرگذشتی از فعالیت‌های پویای زمین‌ساختی است. تکنیک‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی ابزاری کارآمد در برآورد فعالیت‌های نسبی زمین‌ساختی می‌باشند. در این پژوهش با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰، توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای و نرم افزارهای Arc GIS و Global mapper، شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی بر روی ۱۵ حوضه‌ی متاثر از گسل جیرفت در مرز غربی فروافتادگی جازموریان اندازه‌گیری شده است. این شاخص‌ها، شامل شاخص پیچ و خم رودخانه (S)، شاخص درصد قسمت‌های بریده شده کوهستان (Fd)، شاخص پیچ و خم کوهستان (Smf)، شاخص شیب-طول رودخانه (Sl)، شاخص نسبت پهنای دره به کف دره (Vf)، و شاخص شکل حوضه (Bs) می‌باشند. هر یک از شاخص‌ها در سه دسته فعالیت بالا، متوسط و پایین طبقه‌بندی شده و پس از میانگین‌گیری بصورت شاخص نسبت فعالیت زمین‌ساختی (Iat) نشان داده شده‌اند. تغییرات میزان این شاخص تایید می‌کند که در حوضه‌های بخش شمالی و میانی منطقه مورد مطالعه فعالیت نسبی تکتونیکی بالاتری نسبت به بخش‌های جنوبی گسل دیده می‌شود. بر این اساس حوضه‌های بخش میانی در رده دو فعالیت زمین‌ساختی قرار دارند و تغییرات جزیی مقادیر Iat با توجه به تشابه جنس سنگ‌ها و مقاومت آنها با فعالیت زمین‌ساختی مرتبط است. تغییر امتداد گسل و تمایل آن به سمت جنوب شرق، تغییر در جنس سنگ‌های تشکیل‌دهنده حوضه‌های جنوبی و فعالیت کمتر زمین‌ساختی حوضه‌های جنوبی آنها را در رده پایین فعالیت نسبی قرار می‌دهد. این تغییرات و توزیع رخداد زمین لرزه‌ها تایید می‌کند که گسل جیرفت یک سامانه گسلی فعال و دارای بخش‌های (قطعات) با ویژگی‌های متفاوت ریخت‌زمین‌ساختی است.

واژه‌های کلیدی: *فعالیت زمین‌ساختی، شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی، گسل جیرفت، کرمان، ایران*

۱-مقدمه
مطالعه زمین‌ساخت فعال در ارزیابی و مدیریت مخاطرات زمین شناختی بسیار مهم است (Keller and Pinter, 2002). تفسیرهای زمین‌ریخت‌شناسی شامل ارزیابی کمّی ویژگی‌های هندسی اشکال زمین و چشم اندازها می‌باشد که از طریق شاخص‌های زمین‌ریخت‌سنجی و شاخص‌های طبقه‌بندی شده فعالیت نسبی زمین‌ساختی یک منطقه قابل بررسی است(El Hamdouni et al., 2008). این شاخص‌ها ابزار کارآمدی جهت اندازه‌گیری فعالیت‌های زمین‌ساختی در نواحی مختلف می‌باشند و توسط آن‌ها می‌توان اطلاعاتی از فعالیت‌های نسبتاً سریع یا حتی کند مناطق خاص را به دست آورد. انواع تصاویر ماهواره‌ای و قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی، کمک قابل توجهی به اندازه‌گیری این شاخص‌ها می‌نماید. از بهترین روشهای ارزیابی زمین‌ساخت فعال و نوزمین‌ساخت می‌توان به عوارض و شواهد ریخت‌زمین‌ساختی در حوضه‌های آبریز، رودخانه‌ها و پیشانی کوهستان‌ها اشاره کرد (Malik and Mahanty, 2007). بسیاری از پژوهشگران زمین‌شناسی و ژئودزی، ساختارهای زمین‌شناسی را بررسی، شناسایی و توصیف نموده و از نظر درجه و الگوی فعالیت مورد مقایسه قرار داده اند. به عنوان نمونه، Dehbozorgi و همکاران (۲۰۱۰) فعالیت‌های زمین‌ساختی منطقه سروستان را بررسی کردند. Ballabh و همکاران (۲۰۱۱) شواهد زمین‌ریخت‌سنجی

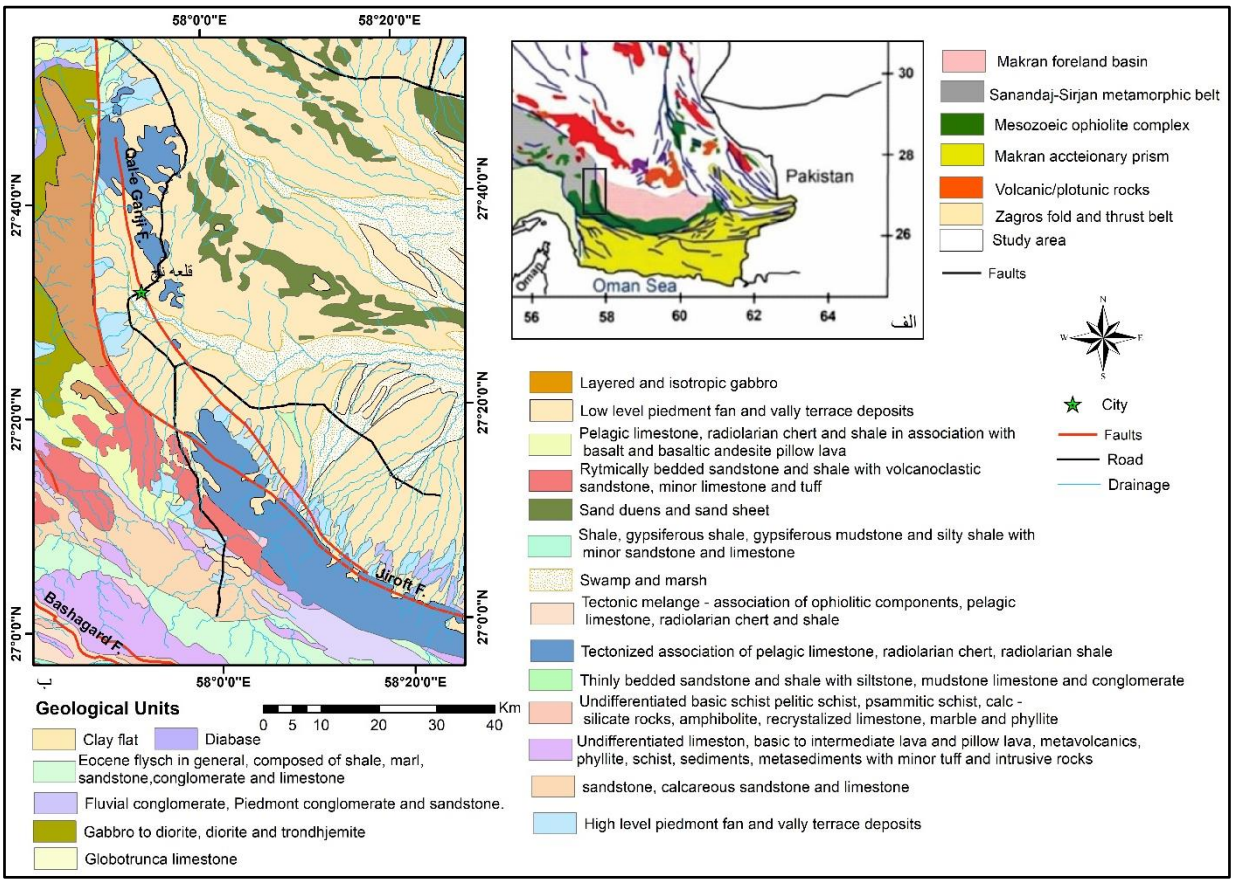
زمین‌ساخت فعال در حوضه گاد را مورد بررسی قرار دادند. Faghih و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از شاخص های ریخت زمین ساختی فعالیت نسبی تکتونیکی متفاوت در شمال شرق و جنوب شرق دریاچه مهارلو را با توجه به وضعیت گسل های مهارلو و قره نشان دادند. Maghsoudi و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از کمیت‌های توپوگرافی و شاخص‌های الگوی شبکه به بررسی فعالیت راندگی گیلان غرب پرداخته اند. مطالعه ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی حوضه می‌تواند در درک حرکات زمین‌ساختی کمک کند. Nourbakhsh و Faghih (۲۰۱۵) با استفاده از تحلیل شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی فعالیت نسبی زمین‌ساختی گسل کازرون را مورد بررسی قرار دادند. Cheng و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از شاخص‌های ریخت‌شناختی و ساختاری گرابن وی در جنوب چین به مطالعه قطعه‌بندی گسل پرداختند. Ezati و همکاران (۱۳۹۷) با کاربرد شاخص‌های ریخت‌سنجی مانند نسبت عرض کف دره به ارتفاع دره، انتگرال هیپسومتریک ، منحنی هیپسومتریک، شکل حوضه و زمین‌ساخت فعال نسبی میزان بالاآمدگی کوههای شکراب را مورد بررسی قرار دادند. به عنوان نمونه، Longkumer و همکاران (۲۰۱۹) مورفوتکتونیک و فعالیت نئوتکتونیکی کمربند اسچوپن را در هندوستان ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشاندهندهٔ منطقهٔ فعال تکتونیکی است که تغییر شکل رسوبات کواترنری و ویژگیهای مختلف ریخت شناسی ازجمله شواهد آن محسوب می شود. Zarei و همکاران (۲۰۲۳) با تحلیل شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی فعالیت تاقدیس دالان را مورد بررسی قرار دادند. Nadri و Yeganehfar (۲۰۲۳) ارتباط معناداری را بین عناصر ساختاری هندسی به عنوان مولفه های کیفی و اندازه گیری های ریخت‌سنجی به عنوان مولفه های کمی نشان دادند که متاثر از فعالیت زمین ساختی پویای گسل امتدادلغز بیدهند می‌باشند. Zarei و همکاران (۲۰۲۴) در امتداد گسل لار و گسل دیده بان تغییرات شاخص Iat را نشان دادند که با توجه به اهمیت این گسل ها نتایج آنها در کاربری اراضی قابل توجه است. Asadi و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از تصاویر راداری و شاخص‌های ریخت‌شناسی، وضعیت تکتونیکی حوضه‌های لواسان را فعال ارزیابی کرده‌اند. Mohammadi و همکاران (۲۰۲۵) فعالیت نسبی بالا در منطقه قاقازان را نتیجه‌ای از عملکرد گسل پی‌سنگی تاکستان-پل‌رود و گسل شمال قزوین دانسته‌اند.

با توجه به موقعیت جغرافیایی گسل جیرفت در منطقه‌ای لرزه‌خیز و نقش آن در انتقال تنش‌های زمین‌ساختی از جنوب شرق به شمال فلات ایران، اهمیت مطالعه این گسل برجسته می‌شود. همچنین این گسل به‌عنوان بخشی از سامانه گسلی سبزواران-جیرفت، تأثیرات مهمی بر ساختارهای زمین‌شناسی منطقه دارد و بررسی دقیق فعالیت‌های آن می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت مخاطرات زمین‌شناختی فراهم کند. وجود شواهدی از حرکات خزشی و جابه‌جایی‌های قابل توجه در نهشته‌های کواترنری و نزدیکی مناطق روستایی و پروژه‌های انسانی در مجاورت گسل جیرفت اهمیت انجام مطالعات دقیق‌تر را نشان می‌دهد.

۲-زمین‌شناسی

۲-۱- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بخش شمال غرب کوه‌های مکران قرار دارد و از شرق به حاشیه غربی حوضه جازموریان محدودد می‌گردد. این منطقه از نظر زمین‌شناسی شباهت‌هایی با منطقه سنندج- سیرجان داشته و از بخش جنوب غربی به کوههای زاگرس نیز می‌رسد. بعضی از کارشناسان ادامه پهنه سنندج-سیرجان را تا منوجان هم در نظر می‌گیرند (شکل a۱). واحدهای زمین‌شناسی در این منطقه شامل چند بلوک اصلی به نام‌های دره‌انار، بلوک آمیزه‌های رنگین، بلوک بجگان، بلوک دورکان و بلوک گنج می‌باشند (Samimi, 1980). مجموعه دگرگونی دورکان در شرق و مجموعه دگرگونی بندزیارت در غرب منطقه مورد مطالعه قرار دارند (شکل a۲). از نظر ساختاری گسل جیرفت (با روند شمال‌باختری-جنوب‌خاوری) بلوک گنج را از بلوک دره انار جدا می‌کند. در مجموعه دگرگونی گنج، دایک‌ها به صورت ناحیه‌ای به موازات گسل‌های بزرگ امتداد یافته و دارای شیب زیاد به سمت شمال خاوری می‌باشند. بلوک دره‌انار که در حد فاصل بلوک‌های گنج و بجگان قرار دارد از سه مجموعه بندزیارت، واحد دیاباز، ومجموعه دره‌انار تشکیل گردیده، که مجموعا یک توالی افیولیتی را به وجود می‌آورند (شکل a۲). منطقه مورد مطالعه در استان کرمان و در فاصله ۴۲۰ کیلومتری تا مرکز استان و در غرب شهر قلعه‌گنج و قرار گرفته است. محدوده آن در طول جغرافیایی "۵۷°۲۲'۴E تا "۵۸°۱۴'۲۷E و عرض جغرافیایی "۲۷°۲۰'۲۴N تا "۲۷°۵۷'۲۶N واقع می‌شود.



شکل ۱- (a) نقشه ساده شده واحدهای ساختاری و تکتونیکی ایران در بخش جنوب شرقی، موقعیت منطقه مورد مطالعه با مستطیل مشکی نشان داده شده است و (b) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه.

Fig. 1. (a) Simplified inset map of structural and tectonic units of southeast Iran. Location of the study area is shown by a black rectangle, and (b) the Geological map of the study area.

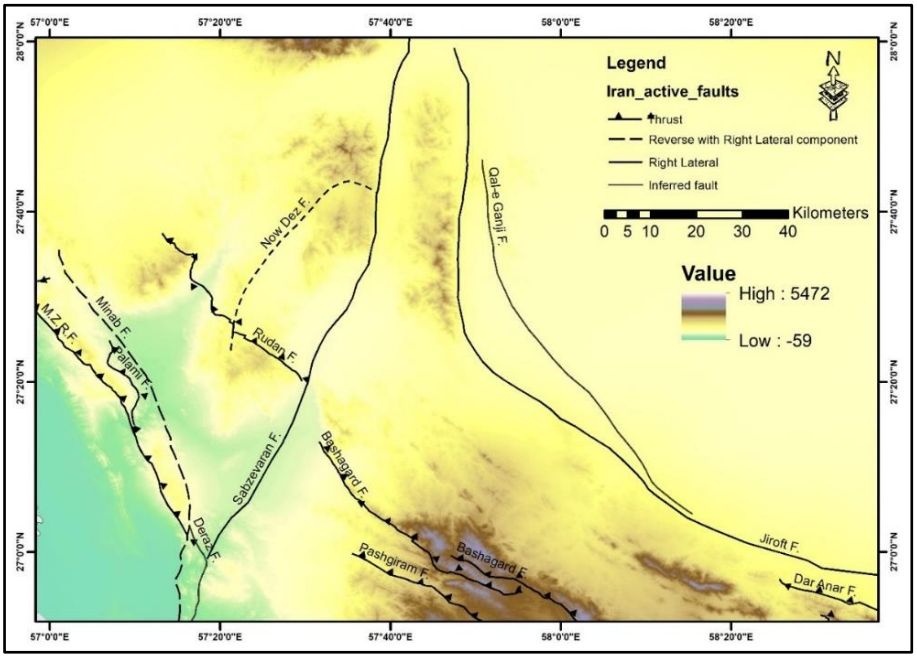
۲-۲- گسل‌های منطقه مورد مطالعه

مهمترین گسل‌های فعال این منطقه، سامانه گسلی جیرفت - سبزواران می‌باشد که در صورت فعال شدن می‌توانند اثرات عظیمی بر سازه‌ها و جوامع بشری پیرامون خود داشته باشد (Abbasnejad, 2012، شکل ۲). بر اساس مطالعات انجام شده توسط Shafiei bafti و همکاران (۲۰۰۹) سامانه گسلی سبزواران ـ جیرفت به همراه سامانه گسلی زندان ـ میناب نقش بسیار مهمی در انتقال تنش وارده از جنوب خاور ایران به بخش‌های شمالی فلات ایران ایفا می‌کند. این سامانه گسلی با پیوستن به سامانه گسلی گوک ـ نایبند در شمال در انتقال دگرشکلی همگرایی به شمال ایران در دگرشکلی البرز و کپه داغ موثر است. منطقه مورد بررسی در منطقه گذار برخورد قاره‌ای در زاگرس و زون فرورانش مکران و ایران مرکزی قرار دارد(Regard at al., 2005). گسل جیرفت در مرز فروافتادگی جازموریان و کوهستان خامه قرار دارد و شاخه ای از گسل سروستان و یا ادامه جنوبی آن در دشت جیرفت می‌باشد که نهشته‌های کواترنری را بریده است. حد شمالی و جنوبی این گسل با ابهاماتی همراه است و می‌توان حد جنوبی آنرا بخشی از گسل بشاگرد دانست زیرا در ۱۵ کیلومتری قلعه گنج به سمت جنوب خاور تغییر مسیر می دهد و به گسل بشاگرد می‌رسد. بخش شمالی گسل جیرفت به دلیل رسوبگذاری شدید در زیر آبرفت پنهان است و حدود ۵۵ کیلومتر در دشت جیرفت ادامه می یابد. بر اساس نظر Rigard و همکاران (۲۰۰۵)، حرکت این گسل به صورت راستالغز راستگرد می‌باشد و جابه‌جایی راستگرد در نهشته‌های کواترنری با مقادیر ۱۷±۴۹ و ۱۳۳±۱۸ متر اندازه‌گیری شده است. نرخ لغزش راستالغز راستگرد در راستای گسل ۰/۸±۲/۲ و ۰/۵±۲/۳ میلیمتر درسال می‌باشد. همچنین بر اساس برش عرضی توپوگرافی داده‌های GPS جابجایی

عمودی از ۲/۵ تا ۶/۷ متر تعیین شده است و بر اساس نقشه برداری های سه بعدی صفحه گسل به ترتیب دارای آزیموت و شیب57NW ,003 می باشد (Regard at al., 2005). Namati و Abbasnejad (۲۰۲۰) جابجایی معکوس در حد چند سانتیمتر و جابجایی انباشتی افقی در حدود ۱۱۰ متر برای این گسل تخمین زده اند. در نهشته‌های پلیوسن زیرین در مجاورت روستای کریم آباد، بیشینه جایی راستگرد قابل مشاهده در راستای این سامانه گسلی به میزان ۷/۸ کیلومتر می‌باشد و بر اساس برداشت‌های میدانی حرکات خزشی با سرعت ۲/۷ میلیمتر در سال را برای این گسل بدست آمده است (Shafiei bafti et al., 2009). گسل جیرفت به ویژه در بخش شرقی (دشت جیرفت) بدلیل فرسایش آبی و کشاورزی قابل پیگیری نمی‌باشد (Rashidi et al., 2020).

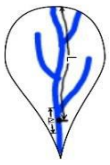
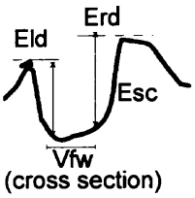
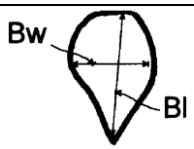
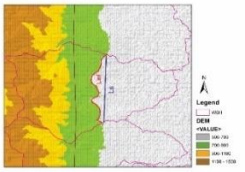
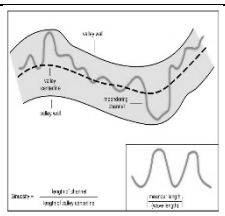
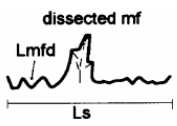
۳-روش پژوهش

حوضه‌های آبریز منطقه مورد مطالعه توسط افزونه Arc-hydro در نرم‌افزار Arc map و با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی(DEM) به روش استراهلر با استفاده از آبراهه‌های رده ۱ استخراج و در نهایت منطقه به ۳۰ زیرحوضه تقسیم‌بندی شد. این زیرحوضه‌ها بر اساس خط الراس کوه‌ها مرزبندی شده‌اند. هر زیرحوضه شامل یک آبراهه اصلی و تعدادی آبراهه‌های فرعی است که در مجاورت هم از ارتفاعات سرچشمه گرفته و به آبراهه اصلی و در نهایت به دشت می‌ریزند. برای این تقسیم‌بندی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ قلعه گنج و منوجان و همچنین تصاویرDEM سی متر، تصاویر Google Earth و Sasplanet استفاده شد. در این پژوهش از بین حوضه‌های استخراج شده، ۱۵حوضه‌ی مجاور بخش شمالی ـ جنوبی گسل جیرفت در مورد بررسی قرار گرفت. حوضه‌های سمت چپ با توجه به اینکه احتمالا از جنبش‌های گسل سبزواران متاثر می‌باشند، در موضوع این مطالعه قرار نگرفته اند. به منظور برآورد شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی و تهیه نقشه‌های خروجی نهایی شاخص‌ها از نرم‌افزارهای Global mapper و Arc GIS استفاده شد. شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی مورد مطالعه در این پژوهش شامل: شاخص پیچ و خم رودخانه (S)، شاخص درصد قسمت-های بریده شده کوهستان (Fd)، شاخص پیچ و خم کوهستان (Smf)، شاخص شیب-طول رودخانه (SL)، شاخص نسبت پهنای دره به کف دره (Vf)، شاخص شکل حوضه (Bs) و در نهایت شاخص نسبت فعالیت زمین‌ساختی (Iat) است (جدول۱).



شکل ۲- نقشه گسل‌های منطقه مورد مطالعه
Fig. 2. Faults Map in the study area.

جدول ۱- خلاصه شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی استفاده شده در بررسی فعالیت زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه
Table1. Summary of the morphometric parameters used in the analysis of tectonic activity

Morphotectonic parameter	Description	Method of measurement	Formula	References
Stream-Lenght index	ΔH/ΔL: is the slope of the stream segment L: the total length between the source and half of the segment studied		$\mathbf{SL} = \frac{\mathbf{\Delta H}}{\mathbf{\Delta L}} . \mathbf{L}$	Keller and Pinter, 2002
Valley Floor Width to Valley Height Ratio	Vfw: the width of valley floor, Eld and Erd: the respective elevations of the left and right valley divides Esc: the elevation of the valley floor		$\mathbf{Vf = 2Vfw/}$ $\mathbf{\{(Eld - Esc)}$ $+$ $\mathbf{(Erd - Esc)\}}$	Keller and Pinter, 2002
Drainage basin shape index	Bl: distance from river mouth to headwater Bw: maximum width of a drainage basin.		$\mathbf{Bs} = \frac{\mathbf{Bl}}{\mathbf{Bw}}$	Ramírez-Herrera, 1998
Mountain front sinuosity index	Lmf: the length of mountain front along the mountain–piedmont junction. Ls: the straight-line length of the front.		$\mathbf{Smf} = \frac{\mathbf{Lmf}}{\mathbf{Ls}}$	El Hamdouni et. al., 2008
Sinuosity index	C: length of the river V: length of the valley in a straight line.		$\mathbf{S} = \frac{\mathbf{C}}{\mathbf{V}}$	Keller and Pinter, 2002
Percentage dissected mountain fronts	Lmfd: the length of dissected mountain front (Ls) the length of the mountain front		$\mathbf{Fd} = \frac{\mathbf{Lmfd}}{\mathbf{Ls}}$	Wells et al., 1988
Relative Tectonic Activity Index	S: Sum of the classes of calculated geomorphic indices N: Number of calculated indicators.	-	$\mathbf{Iat} = \frac{\mathbf{S}}{\mathbf{N}}$	El Hamdouni et. al., 2008

۴- یافته‌های پژوهش

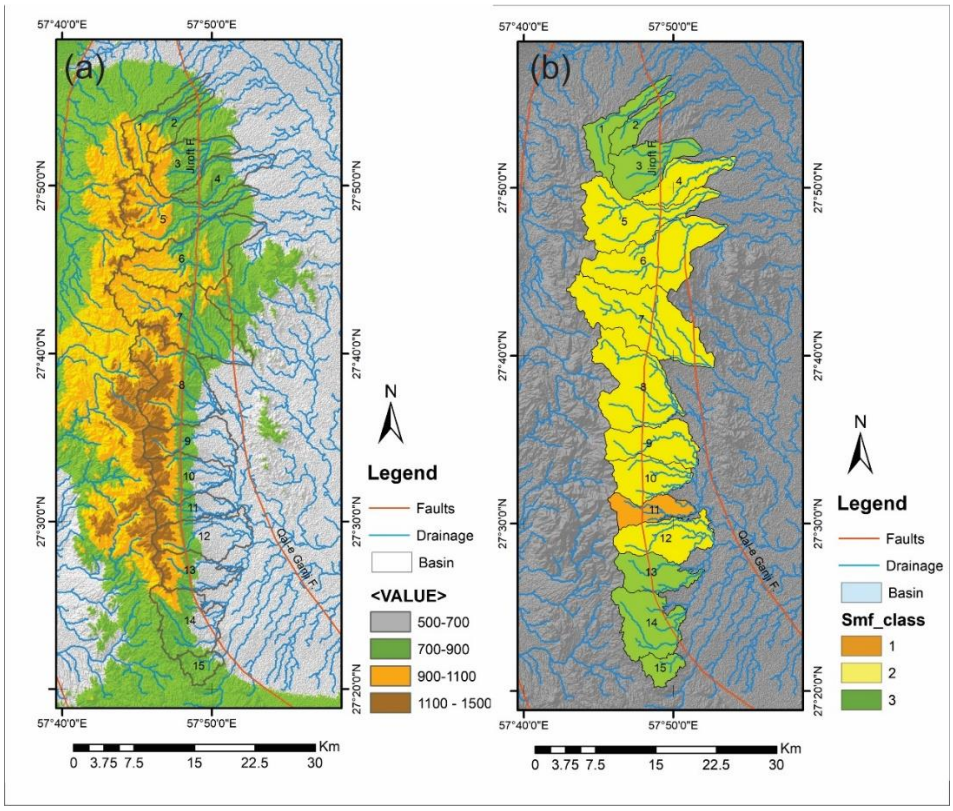
۴-۱- شاخص پیچ و خم کوهستان (Smf)

از این شاخص برای تعیین فعالیت‌های زمین‌ساختی نسبی در امتداد جبهه‌های کوهستانی با ارزیابی میزان درجه بی نظمی یا سینوسیتی در امتداد جبهه کوهستان استفاده شده است (Keller and Pinter, 2002; Silva et al., 2003). در جبهه‌های فعال کوهستانی میزان بالاآمدگی بر فرسایش فزونی می‌یابد و پیشانی مستقیم مقادیر کم این شاخص را نشان می‌دهند. اندازه‌گیری این شاخص بر اساس رابطه موجود در جدول ۱ و شکل a۳ می‌باشد. برخی مطالعات مقادیر پایین Smf (<۱/۴) را نشاندهنده فعالیت‌های زمین‌ساختی می‌دانند (Bull, 1978; Rockwell et al., 1985). در حالیکه مقادیر بالاتر (Smf>۳) برای پیشانی‌های کوهستان غیرفعال در نظر گرفته می‌شود (Bull, 2007). در جبهه هایی که مقادیر شاخص پیچ و خم کوهستان ۳ و بالاتر باشد، پیشانی کوهستان به صورت منحنی و خلیجی است و از محل ساختارهایی تکتونیکی حدود یک کیلومتر فاصله گرفته‌اند (Keller and Pinter, 2002). همچنین بر اساس طبقه‌بندی El Hamdouni et. al.، این شاخص در ۳ رده ؛ Smf <۱/۱ حوضه دارای فعالیت زیاد (رده ۱)، ۱/۵ >Smf > ۱/۱ حوضه دارای فعالیت متوسط (رده ۲)، ۱/۵ < Smf حوضه فاقد فعالیت (رده ۳) قرار می‌گیرد (جدول ۲). مقادیر Smf، در میان عوامل دیگر، به مقیاس توپوگرافی بستگی دارد. نقشه‌های توپوگرافی (۱:۲۵۰۰۰۰) در مقیاس کوچک تنها یک تخمین تقریبی از پیچ و خم پیشانی کوهستان را ارائه می‌دهند، درحالی که نقشه‌های بزرگ مقیاس و تصاویر ماهواره‌ای با وضوح تصویر بالا می‌توانند تخمین مناسبتری از این شاخص را ارائه دهند (El Hamdouni et. al., 2008). در این مطالعه پس از بررسی نیمرخ های توپوگرافی با Arc GIS و Global Mapper خط تراز ۷۰۰ متری به عنوان مرز پیشانی کوهستان در نظر گرفته شد (شکل a۳).

مقدار این شاخص در گسل جیرفت از ۱/۰۴ در مناطق فعال تا ۱/۷۳ در مناطق غیرفعال تکتونیکی متغیر می‌باشد. اغلب حوضه‌ها در منطقه مورد مطالعه از دیدگاه فعالیت تکتونیکی در رده ۲ و ۳ جای دارد(جدول ۳). شکل b۳، نقشه تغییرات میزان Smf را در امتداد گسل جیرفت نشان می‌دهد.

جدول ۲- طبقه بندی شاخص‌ها از نظر فعالیت زمین‌ساختی
Table 2. morphotectonic indies classification based on tectonics activity.

No	INDEC	Class3 Low tectonic activity	Class2 Moderate tectonic activity	Class1 High Tectonic activity
1	Mountain front sinuosity	Smf > 1/5	1.1<Smf < 1.5	1.1>Smf
2	Ratio of valley floor width to valley heigh	Vf >1	1 > Vf >0.5	0.5>Vf
3	Sinuosity index	SI>1.5	1.5>SI>1.1	1.1>SI
4	Drainage basin shape	1.5>Bs	2.3>Bs>1.5	Bs>2.3
5	Percentage dissected mountain fronts	Fd>0.66%	0.66%>Fd>0.33%	0.33%>Fd
6	Stream length-gradient index	300>SL	500>SL>300	SL>500



شکل ۳- (a) محاسبه شاخص پیچ و خم کوهستان در منطقه مورد مطالعه و (b) نقشه رده‌بندی مقادیر شاخص اندازه‌گیری شده

Fig. 2. (a) Calculation of Mountain front sinuosity in the study area and (b) classification map of measured Smf Value

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه

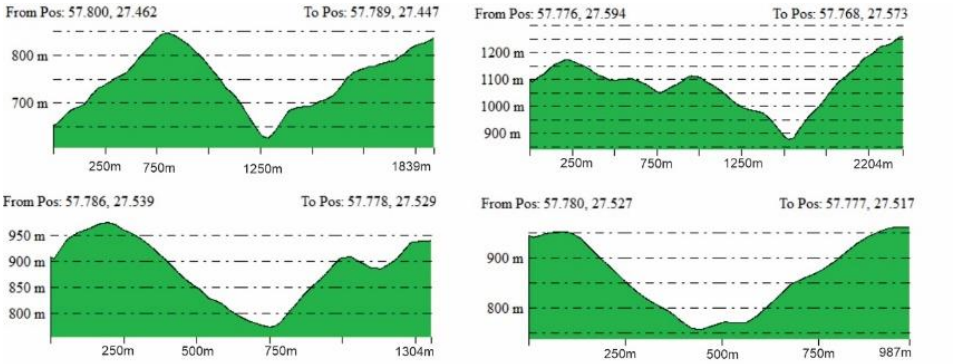
Table 3. Measured morphotectonic indices in the study area

No	Smf	S	Sl	Vf	Bs	Fd
1	1.64	1.25	1207.96	0.30	4.97	0.69
2	1.57	1.35	693.37	0.66	3.44	0.71
3	1.53	1.12	692.59	0.44	3.03	0.63
4	1.38	1.20	640.47	---	3.24	0.63
5	1.23	1.17	1055.89	0.31	1.80	0.61
6	1.24	1.29	1128.85	---	2.65	0.63
7	1.27	1.04	4854.09	0.12	2.55	0.56
8	1.40	1.12	1436.10	0.28	1.43	0.58
9	1.25	1.1	855.10	0.34	2.05	0.62
10	1.34	1.31	934.64	0.36	1.60	0.63
11	1.04	1.21	403.42	0.43	2.73	0.52
12	1.22	1.14	664.45	0.37	2.1	0.58
13	1.52	1.28	366.37	0.47	2.26	0.79
14	1.64	1.27	643.59	1.50	1.03	0.75
15	1.73	1.32	174.79	---	1.20	0.76

۴-۲- شاخص نسبت پهنای کف دره به میانگین عمق آن(Vf)

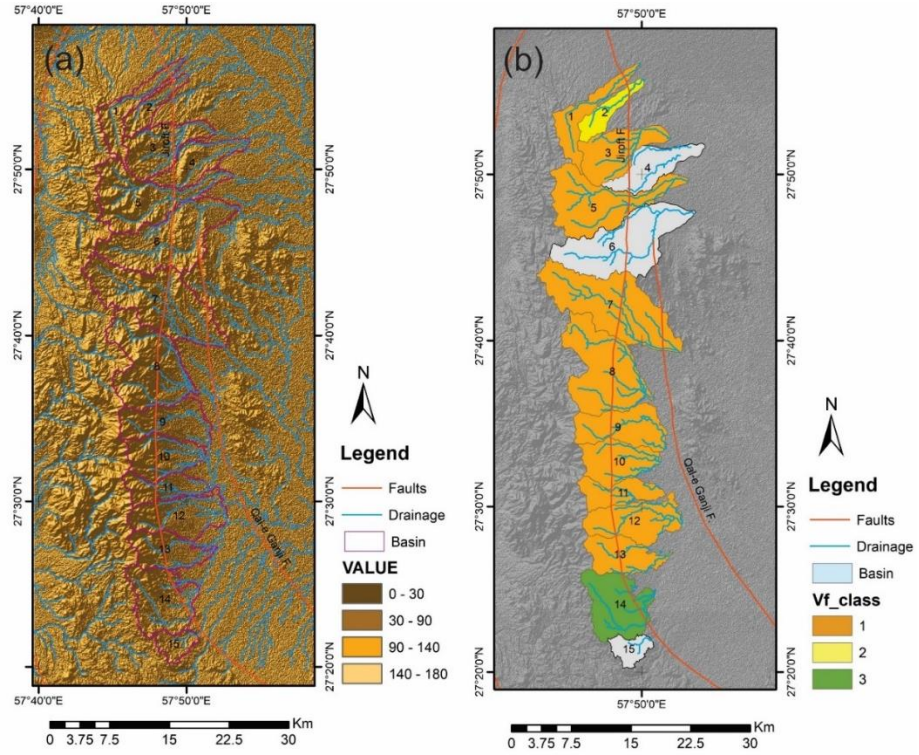
نسبت عرض به ارتفاع کف دره (Vf) یک شاخص ریخت‌شناسی است که به تغییر میزان کج‌شدگی و برخاستگی در راستای عمود بر روند کانال حساس است و به شرح جدول ۱ محاسبه می‌شود. اغلب این شاخص برای تفکیک دره‌های V شکل و U شکل با کف مسطح استفاده می‌شود (Bull and McFadden, 1977). دره‌های عمیق V شکل با مناطق در حال برخاستگی و

فعالیت زمین‌ساختی بالا در ارتباط بوده و دره‌های با کف مسطح و U شکل تاثیر فرسایش را در پاسخ به نرخ کم فعالیت‌های زمین‌ساختی نشان می‌دهند (Keller and Pinter, 2002). بر اساس دسته‌بندی El Hamdouni et. al. (2008)، این شاخص در سه گروه؛ Vf < ۰/۵ حوضه دارای فعالیت زیاد (رده ۱)، ۰/۵ < Vf <۱حوضه دارای فعالیت متوسط (رده ۲) و Vf >۱ حوضه دارای فعالیت کم (رده ۳) طبقه‌بندی می‌شوند (جدول ۲). شکل ۴ برخی از دره‌های مورد اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. این شاخص برای زیرحوضه‌های محدوده مورد مطالعه طبق شکل a۵ محاسبه شده و نقشه رده‌بندی آن تهیه گردید (شکل b۵). بر اساس اندازه گیری‌های انجام شده در این پژوهش، مقادیر Vf از ۰/۱۲ تا ۱/۵۰ تغییر می‌کند که ۸۳ درصد از حوضه‌ها دارای فعالیت بالا قرار دارند. برای سه حوضه امکان اندازه‌گیری این شاخص وجود نداشت (جدول ۳).



شکل ۴- نمونه ای از دره‌ها که شاخص Vf آنها محاسبه شده است.

Fig. 4. Some cross sections of the evaluated valley for the Vf index.

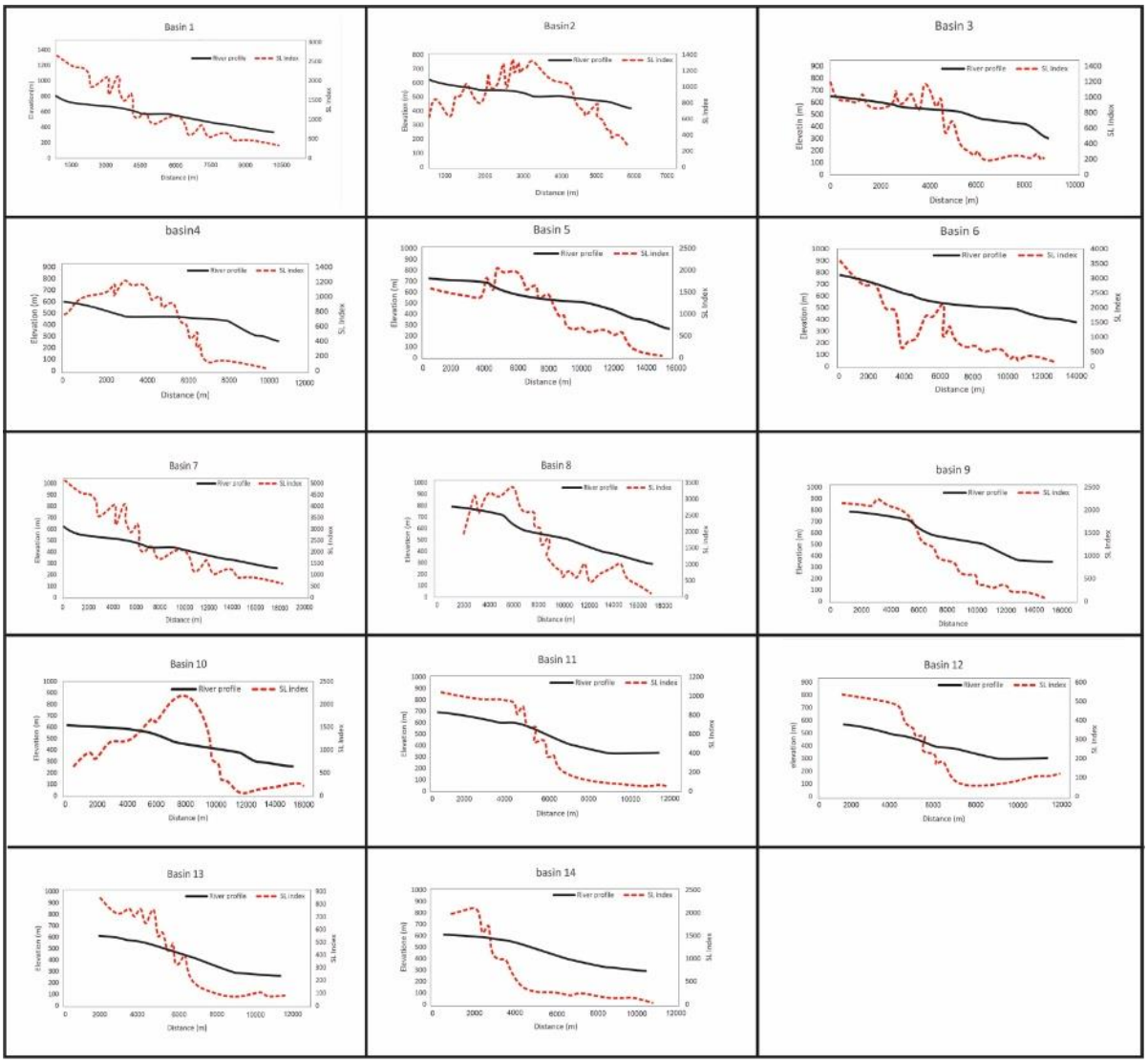


شکل ۵- (a) محاسبه نسبت پهنای کف دره به میانگین عمق و محل اندازه‌گیری در منطقه مورد مطالعه و (b) نقشه رده‌بندی مقادیر شاخص اندازه‌گیری شده.

Fig. 5. (a) Calculation ratio of valley floor width to valley height in the study area, and (b) classification map of measured Vf Value.

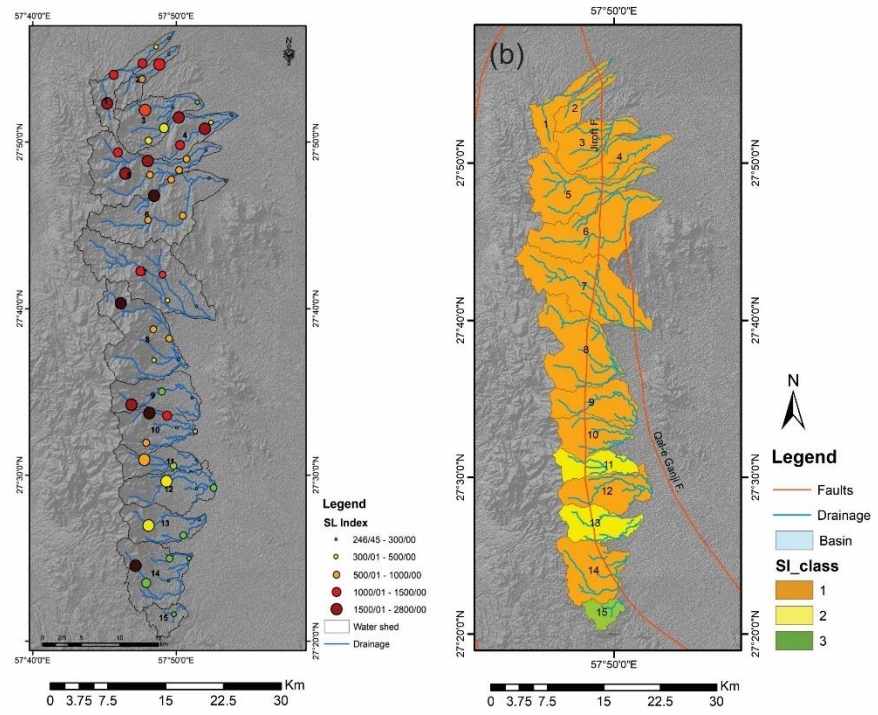
۴-۳- شاخص شیب-طول رودخانه (SL)

گسترش و بلوغ توپوگرافی نتیجه‌ای از تعامل بین فرسایش رودخانه‌ها و مقاومت سنگ‌های بستر و فرآیندهای زمین‌ساختی است که سرانجام به تعادل دینامیکی خواهند رسید. شاخص شیب طول رودخانه توسط Hack (1973) برای ارزیابی تاثیرات سنگ بستر بر تغییرات ارتفاعی در طول یک رودخانه معرفی شده است (Keller and Pinter, 2002). مقادیر شاخص SL در سه دسته، رده ۱ با بی‌هنجاری بالا (بیش از ۵۰۰) و رده ۲ با بی‌هنجاری متوسط (۳۰۰-۵۰۰) و رده ۳ با بی‌هنجاری پایین (کمتر از ۳۰۰) رده‌بندی شده است (El Hamdouni et al., 2008). این شاخص در اثر تغییر در تنش برشی تفریقی، قدرت جریان رودخانه، حرکات زمین‌ساختی، اختلاف سنگ شناسی و تغییرات آب وهوا تحت تاثیر قرار می‌گیرد (Gao et al., 2013; Ntokos et al., 2016). در این پژوهش، با توجه به نقشه رده‌بندی آبراهه‌ها، هر رودخانه قطعه‌بندی و میزان شاخص شیب طولی آن بدست آمده و رده بندی SL انجام شد(جدول ۳). نمودارهای تغییرات پروفیل رودخانه و تغییرات SL رسم شد(شکل ۶). در این نمودارها هرچند جنس لایه ها در طول پروفیل رودخانه یکسان است اما مقادیر SL آنومالی‌هایی را نشان می دهد. شکل a۷ پراکندگی مقادیر شاخص شیب طولی رودخانه را در حوضه ها نمایش می‌دهد. بر اساس رده‌بندی اغلب حوضه ها منطقه در رده ۱، دو حوضه در رده ۲ و یک حوضه در رده ۳ قرار دارند (شکل b۷).



شکل ۶- نمودارهای نیمرخ طولی و مقادیر SL اندازه گیری شده.

Fig. 6. Diagrams of the longitudinal profile of drainage and calculated SL in the study area

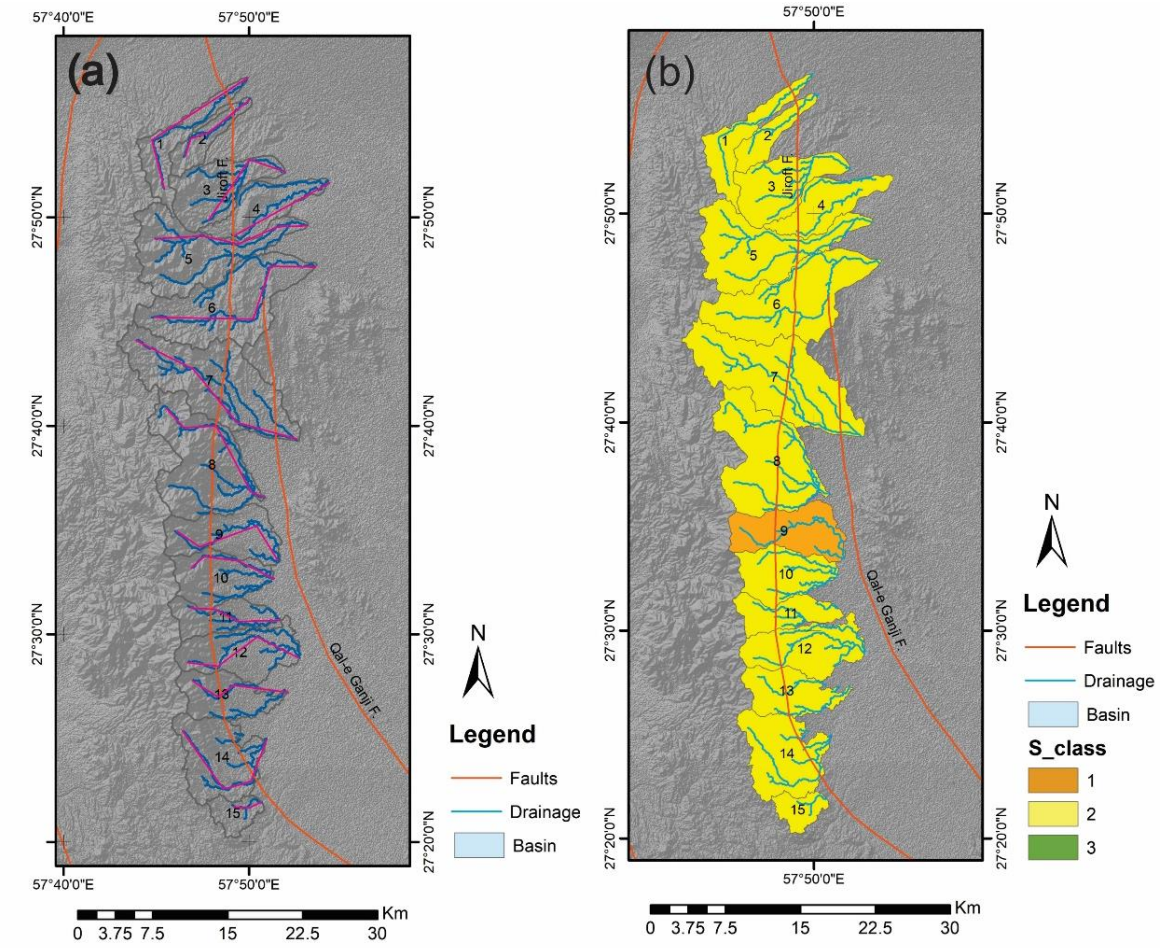


شکل ۷- (a) محل اندازه‌گیری SL در منطقه مورد مطالعه و (b) نقشه رده‌بندی مقادیر شاخص اندازه‌گیری شده

Fig. 7. (a) Location of drainage and calculated SL in the study area, and (b) classification map of measured SL Values.

۴-۴- شاخص پیچ و خم رودخانه (S)

در شرایط خاص، رودخانه‌ها به صورت کانالی با پیچ و خم منفرد تکامل می‌یابند (Brice, 1964; Rust, 1978). این رفتار عموماً تحت تأثیر فعالیت‌های زمین‌ساختی قرار می‌گیرد که در پارامترهای مربوط کانال رودخانه منعکس می‌شود (Zámolyi et al., 2010). به شرطی که سیستم رودخانه‌ای در حال حاضر در مرحله پیچ و خم باشد، این پدیده تا حد زیادی از اندازه رودخانه مستقل است، بنابراین نه تنها رودخانه‌های بزرگ، بلکه آبراهه‌های کوچکتر، برای تجزیه و تحلیل مناسب هستند به شرطی که تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی قرار نگرفته باشند. شاخص پیچ و خم کانال‌های رودخانه‌ای (S) مدرن توسط لئوپولد و ولمن (۱۹۵۷) به عنوان نسبت طول خط القعر (Thalweg) رودخانه به طول دره تعریف شد. در ادامه Brice (1964) شاخص سینوسی را به صورت نسبت طول کانال به طول محور کمربند مئاندری رودخانه پیشنهاد کرد، که این تعریف جدید امکان اندازه‌گیری ساده هر دو مسیر مستقیم و پیچ و خم سینوسی را فراهم می‌کند (Leopold and Wolman, 1957; Brice 1964; Fountoulis et al., 2015). درحالی که مستقیم بودن مسیر رودخانه بیشتر حاکی از جوان بودن منطقه و فعالیت نوزمین‌ساختی است. در رودخانه هایی که تقریبا به حالت تعادل رسیده‌اند، رودخانه جهت حفظ تعادل بین دبی و رسوبگذاری، دچار پیچ و خم می‌شود (Keller and Pinter, 2002). بر اساس روش El Hamdouni و همکاران (۲۰۰۸)، اعداد کمتر از ۱/۱ در این شاخص نشان-دهنده فعالیت زمین‌ساختی زیاد (رده ۱)، اعداد بین ۱/۵-۱/۱ نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی متوسط (رده ۲) و اعداد بیشتر از ۱/۵ نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی کم (رده ۳) می‌باشد (جدول ۲). برای اندازه‌گیری این شاخص زمانی که رودخانه اصلی نسبت به جهات جغرافیایی تغییر مسیر می‌دهد، در امتداد هر مسیر جداگانه شاخص پیچ و خم رودخانه محاسبه شده و سپس برای کل رودخانه میانگین گرفته شده است. بر اساس اندازه‌گیری انجام شده شاخص پیچ و خم رودخانه در منطقه مورد مطالعه از ۱/۰۴ تا ۱/۳۵ تغییر می‌کند (شکل a۸ و جدول ۳). اندازه‌گیری های انجام شده نشان می دهند به جز حوضه ۹، سایر حوضه‌ها در رده فعالیت نسبی متوسط قرار دارند (شکل b۸).

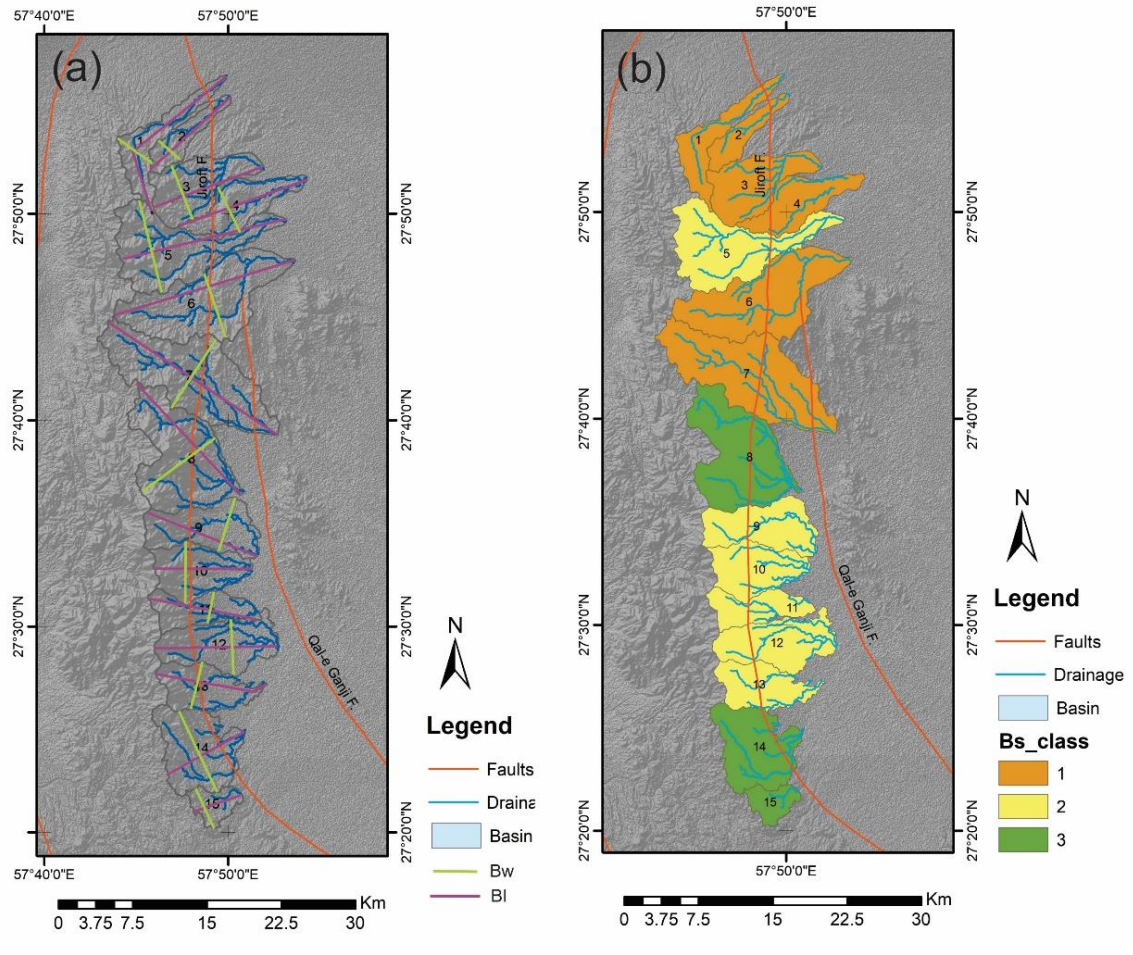


شکل ۸- (a)محاسبه شاخص پیچ و خم رودخانه و محل اندازه‌گیری در منطقه مورد مطالعه و (b) نقشه رده‌بندی مقادیر شاخص اندازه‌گیری شده

Fig. 8. (a) Calculation of the Sinuosity index in the study area and (b) classification map of measured S-Value.

۴-۵- شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs)

حوضه‌های زهکشی نسبتاً جوان در مناطق تکتونیکی فعال تمایل دارند به شکل موازی با شیب توپوگرافی کشیده شوند. با گذشت زمان و کاهش فعالیت تکتونیکی شکل کشیده حوضه‌ها به دایره تبدیل می‌شوند (El Hamdouni et al., 2008; Bull and McFadden, 1977). دلیل این امر این است که حوضه‌ها در بخش فعال جبهه کوهستان که انرژی جریان رودخانه‌ها به سمت پایین دست زیاد است حالت کشیده و باریک پیدا می‌کنند. در مقابل زمانی که برخاستگی و فعالیت زمین‌ساختی کاهش می‌یابد، حوضه‌ها پهن‌تر می‌شوند و به سمت جریان‌های بالادست گسترش می‌یابند. تصویر افقی حوضه‌ها شکل آنها یا نسبت کشیدگی را مشخص می‌سازد (Ramırez-Herrera, 1998). برای محاسبه این شاخص، طول آبراهه اصلی (از سرشاخه اصلی تا دهانه رودخانه) اندازه‌گیری می‌شود و سپس در عریض‌ترین ناحیه حوضه، عرض آن عمود بر آبراهه محاسبه می‌شود (جدول ۱و شکل a۹). حوضه‌ها با ۲/۳ < Bs دارای فعالیت زمین‌ساختی زیاد و رده ۱، حوضه‌های۱/۵ < Bs >۲/۳ دارای فعالیت زمین‌ساختی متوسط و رده ۲ و حوضه‌های ۱/۵ < Bs دارای فعالیت زمین‌ساختی کم و رده ۳ رده‌بندی می‌شوند (Cheng et al., 2017). میزان Bs اندازه‌گیری شده در حوضه‌های مورد مطالعه در بازه۱/۰۳ تا ۴/۹۷ قرار می‌گیرند(شکل b۹ و جدول۳).

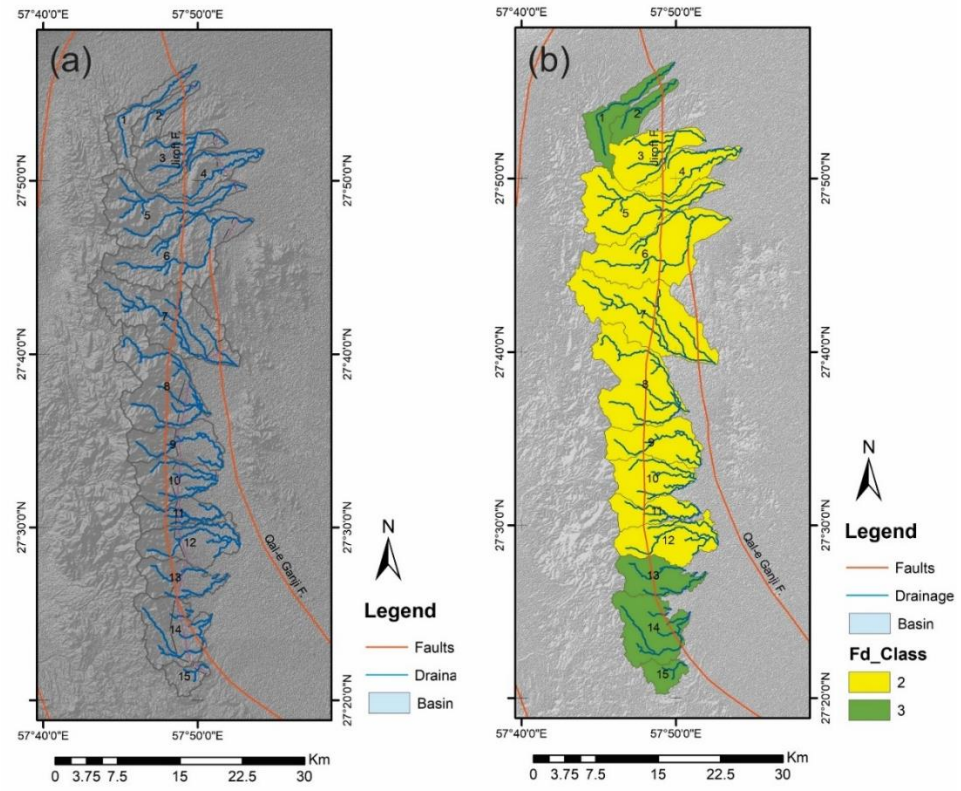


شکل ۹- (a) محاسبه شاخص شکل حوضه زهکشی در منطقه مورد مطالعه و (b) نقشه رده‌بندی مقادیر شاخص اندازه‌گیری شده

Fig. 9. (a) Calculation of drainage basin shape index in the study area, and (b) classification map of measured Bs-Value.

۴-۶-شاخص درصد قسمت‌های بریده شده کوهستان (Fd)

این شاخص از تقسیم بخش‌های بریده شده پیشانی کوهستان به کل طول پیشانی کوهستان بدست می‌آید. بخش‌های بریده گاها سطوح مثلثی facet یا چند ضلعی در جبهه کوهستان هستند که توسط دره‌ها و آبراهه‌ها از هم جدا می‌شوند و قاعده جبهه‌های کوهستانی را می‌سازند. مناطق با فعالیتهای زمین‌ساختی بالا سطوح مثلثی بزرگتری ایجاد می‌کنند و تمایل دارند کمتر بریده شده و مقادیر Fd کوچکتری خواهند داشت (Wells et al, 1998; Ramírez-Herrera, 1998). مقادیر حاصل از این شاخص معمولا بصورت کمیتی بین صفر و ۱۰۰ درصد تعریف می‌شود. هر چقدر مقدار این شاخص به عدد صفر نزدیک باشد، نشانگر فعالتر بودن جبهه‌های کوهستانی از نظر فعالیت‌های زمین‌ساختی می‌باشد (Ramírez-Herrera, 1998 ; Fountoulis et al., 2015). اندازه‌گیری شاخص Fd در محدوده مورد مطالعه طبق فرمول جدول ۱ و شکل a۱۰ انجام شد. بازه تغییرات این شاخص به سه بازه ۰تا ۰/۳۳ درصد (رده۱)، ۰/۳۳ تا ۰/۶۶ (رده۲) و ۰/۶۶ تا ۱ (رده۳) تقسیم می‌شود که به ترتیب نشان دهنده مناطق فعال، نیمه فعال و غیرفعال است (جدول ۲). نتایج حاصل از محاسبه این شاخص در زیرحوضه‌های منطقه، دو رده‌بندی با فعالیت متوسط و پایین را نشان می‌دهد. بیشترین فعالیت زمین‌ساختی طبق شاخص Fd مربوط به حوضه شماره ۶ با عدد شاخص ۰/۵۴ (رده ۲) است(جدول ۳)؛ همچنین کمترین فعالیت مربوط به حوضه‌های شماره ۱۳ تا ۱۵ با عدد شاخص ۰/۷۶ (رده۳) است. نقشه رده‌بندی این شاخص در شکل b۱۰ آمده است.



شکل ۱۰- (a) محاسبه شاخص درصد قسمت‌های بریده شده کوهستان در منطقه مورد مطالعه و (b) نقشه رده‌بندی مقادیر شاخص اندازه‌گیری شده

Fig. 10. (a) Calculation of the Percentage dissected mountain fronts index in the study area, and (b) classification map of measured Fd-Value.

۵- بحث

ریخت‌سنجی به عنوان علمی برای اندازه‌گیری کمّی شکل عوارض زمین تعریف می‌شود و با تبدیل تعاریف کیفی به اندازه‌گیری‌های کمّی امکان مقایسه دقیق‌تر پارامترها و شاخص‌های زمین‌ریختی را فراهم می نماید(Keller and Pinter, 2002)، همچنین با استفاده از آن می‌توان ویژگی‌های خاص یک منطقه مانند فعالیت زمین‌ساختی آن را نیز تعیین کرد. نتایج این مطالعات در تخمین مخاطرات طبیعی، کاربری زمین‌ها و مدیریت توسعه شهری در مناطق پرجمعیت دارای اهمیت است (Pedrera et al., 2009). در مطالعات ریخت‌سنجی، با توجه به هدف مطالعه و شرایط منطقه و عوارض زمین‌شناسی برجسته، از شاخص‌های زمین‌ریختی متفاوتی استفاده می شود. در این پژوهش شاخص‌های مربوط به حوضه و پیشانی کوهستان با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (۳۰ متر) منطقه برای ۱۵ حوضه محاسبه شده است.

با توجه به محاسبات انجام شده ، مقدار شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان (Smf) در طول گسل جیرفت از ۱/۰۴ در مناطق فعال تا ۱/۷۳ در مناطق غیرفعال تکتونیکی متغیر می باشد. اغلب حوضه‌ها در منطقه مورد مطالعه از دیدگاه فعالیت تکتونیکی در رده ۲ و ۳ تقسیم‌بندی Elhamdouni و همکاران (۲۰۰۸) جای دارند (جدول ۳). بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده از شاخص پیچ و خم رودخانه (S)، حوضه‌های مورد مطالعه به جز حوضه ۹ در کلاس ۲ قرار دارند. حوضه ۹ فعالیت زمین‌ساختی در رده ۱ را نشان می‌دهد. بعضی از فاکتورهای جغرافیایی و هیدرولوژیکی و نیروهای ناشی از آنها سبب می‌شوند که رودخانه در طول مسیر خود، از منشا تا دهانه، از میسر مستقیم پیروی نکند و دچار انحراف شود. عموماً پیچ و خم یک رودخانه با افزایش شیب، افزایش می‌یابد. این تغییر خود نشانه‌ای از تغییر در نرخ فعالیت زمین‌ساختی می‌باشد. به همین ترتیب با افزایش شیب، مورفولوژی کانال رود به شکل شاخه شاخه نزدیکتر می‌شود که این امر دلیل مناسبی جهت

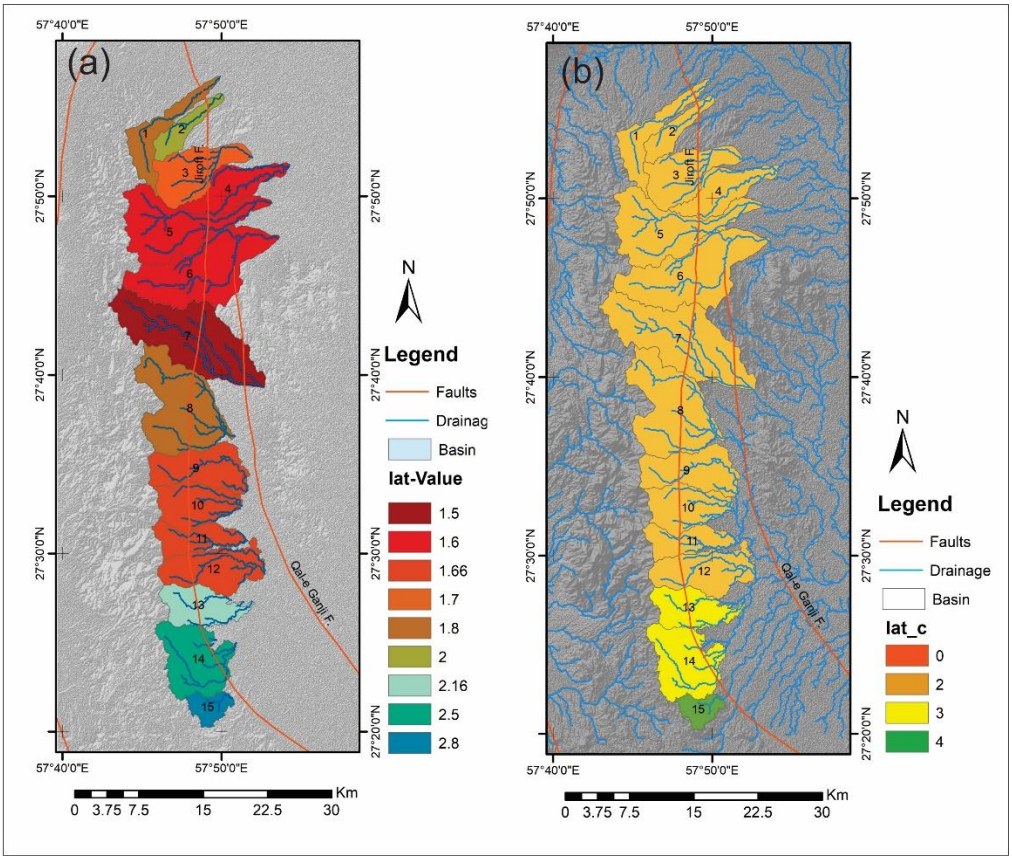
استنباط برخاستگی زمین‌ساختی است (Bhatt et al., 2007). مقادیر شاخص درصد قسمت‌های بریده شده کوهستان(Fd) از ٪۵۲ تا ٪۷۹ تغییر می‌کند که اغلب حوضه‌ها را درکلاس ۲ فعالیت زمین‌ساختی قرار می‌دهد. درحالی که حوضه‌های پایانه‌های شمالی و جنوبی گسل در کلاس ۳ قرار می‌گیرند. مقادیر شکل حوضه زهکشی (Bs) محاسبه شده در بازه ۱/۰۳ تا ۴/۹۷ تغییر می‌کند که تایید می‌کند حوضه‌ها اغلب در کلاس ۱ با فعالیت زمین‌ساختی بالا هستند. مقادیر Vf از ۰/۱۲ تا ۱/۵۰ تغییر می‌کند و تنها حوضه ۱۴ در کلاس ۳ قرار گرفته است که می‌تواند ناشی از تغییر جنس سنگ‌های تشکیل‌دهنده حوضه باشد. سایر حوضه‌ها در بستری از سنگ‌های گابرویی با درجه مقاومت بالا قرار دارند درحالیکه حوضه ۱۴ دارای بستری از شیل، ماسه‌سنگ و سنگ آهک می‌باشد. شاخص‌های کلاس‌بندی شده بر اساس فعالیت زمین‌ساختی، در قالب شاخص فعالیت نسبی زمین‌ساختی (Iat) تجمیع و ارزیابی می‌شوند. این شاخص در واقع میانگینی از شاخص‌های اندازه‌گیری شده را در ۴ کلاس طبقه‌بندی می‌کند (جدول ۲).

در رده ۱، حوضه دارای ۱/۵ > Iat > ۱ با فعالیت زمین-ساختی خیلی بالا، حوضه دارای۲ > Iat > ۱/۵ رده ۲ و فعالیت زمین‌ساختی بالا، در رده ۳ حوضه دارای۲/۵ > Iat > ۲ و فعالیت زمین‌ساختی متوسط و در رده ۴ حوضه دارای۳ Iat > ۲/۵ و فعالیت زمین‌ساختی کم است (El Hamdouni et al., 2008). با محاسبه شاخص Iat در منطقه مورد مطالعه نتایج زیر حاصل گردید (شکل ۱۱a و جدول۴): ۷۳/۳ درصد از حوضه‌های منطقه در رده ۲ و دارای فعالیت زمین‌ساختی بالا هستند. ۲۰ درصد حوضه‌ها فعالیت زمین‌ساختی متوسط داشته و ۶/۷ درصد دارای فعالیت زمین‌ساختی کم هستند. همانطور که در شکل ۱۱b مشاهده می‌شود حوضه‌هایی که در بخش جنوبی گسل قرار گرفته‌اند فعالیت زمین‌ساختی کمتری را نشان می‌دهند. از کنترل کننده‌های شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی در حوضه‌های آبریز می‌توان به جنس و مقاومت سنگ های بستر، شیب توپوگرافی کانال آبراهه و ساختارهای گسلی اشاره نمود که با توجه به عدم تنوع جنس مقاومت سنگ‌های بستر (سنگ‌های گابرویی) در حوضه‌های بخش شمالی و میانی محدوده مورد مطالعه چنانچه تغییرات جزیی که در شاخص‌های اندازه‌گیری شده دیده می‌شود ناشی از تاثیر فعالیت زمین‌ساختی است. البته در حوضه های ۱۳ تا ۱۵ که در بخش جنوبی قرار دارند تغییر جنس (شیل، ماسه سنگ و سنگ آهک) و به تبع آن تغییر مقاومت سنگ‌ها دیده می‌شود که منجر به تغییر در نسبت فعالیت این حوضه‌هاست. همچنین در این بخش خمش گسلی و تغییر امتداد گسل به سمت جنوب شرق اتفاق افتاده است. وجود این شواهد می‌تواند نشانه مناسبی جهت قطعه‌بندی گسل می‌باشد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، بررسی سایر شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی، تعامل گسل جیرفت با سایر گسل‌های اطراف، بهره‌گیری از تصاویر راداری (SAR) برای شناسایی حرکات خزشی و تغییر شکل سطح زمین، تحلیل خطرات احتمالی برای سکونتگاه‌ها و پروژه‌های انسانی مجاور انجام شود. اجرای این پیشنهادات می‌تواند به درک بهتر رفتار گسل جیرفت، مدیریت مخاطرات زمین‌شناختی، و توسعه پایدار منطقه کمک کند.

جدول ۴- طبقه بندی شاخص های اندازه‌گیری شده و مقادیر شاخص Iat برای حوضه‌های محدوده مورد مطالعه

Table 4. Classified value of measured morphotectonic indices and Iat- value in the study area.

No	Smf	S	Sl	Vf	Fd	Bs	Iat-Value	Iat-Class
1	3	2	1	1	3	1	1.86	2
2	3	2	1	2	3	1	2.00	2
3	3	2	1	1	2	1	1.66	2
4	2	2	1	---	2	1	1.60	2
5	2	2	1	1	2	2	1.66	2
6	2	2	1	---	2	1	1.60	2
7	2	2	1	1	2	1	1.50	2
8	2	2	1	1	2	3	1.80	2
9	2	1	1	1	2	2	1.50	2
10	2	2	1	1	2	2	1.66	2
11	1	2	2	1	2	2	1.66	2
12	2	2	1	1	2	2	1.66	2
13	3	2	2	1	3	2	2.16	3
14	3	2	1	3	3	3	2.50	3
15	3	2	3	---	3	3	2.80	4



شکل ۱۱- (a)مقادیر شاخص فعالیت نسبی زمین‌ساختی اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه و (b) نقشه رده‌بندی فعالیت زمین‌ساختی
Fig. 11. (a) Calculated the Iat index in the study area and (b) Classification map of the Iat index in the study area.

۶- نتیجه‌گیری

شاخص‌های زمین‌ریختی می‌توانند طبقه‌بندی نسبی از فعالیت زمین‌ساختی یک منطقه ارائه دهند و برای بررسی میزان تاثیر زمین‌ساخت در منطقه مفید می‌باشند. وقتی چندین شاخص زمین‌ریختی در یک ناحیه خاص استفاده شود نتایج با معناتر و کاملتری بدست خواهد آمد. این شاخص‌ها معمولاً برای کشف واکنش زمین‌منظرها به فرایندهای تغییر شکل اخیر استفاده می‌شود و به عنوان یکی از ابزارهای کارآمد برای پی بردن به وضعیت و میزان تاثیر فعالیت‌های نو زمین‌ساخت در سطح زمین می‌باشندکه بارها توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این شاخص‌ها واکنش زمین‌منظرها مانند حوضه های آبریز، پیشانی کوهستان‌ها، دره‌ها و .... را به فرایندها و فعالیت‌های اخیر نشان می‌دهند. نتایج این مطالعات در طرح‌های توسعه شهری و مناطق پرجمعیت و شناخت بهتر مخاطرات طبیعی موثر است و به عنوان ابزاری کارآمد برای پی بردن به وضعیت و میزان تاثیر فعالیت‌های نو زمین‌ساخت در سطح زمین استفاده می‌شود. بررسی شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی در گسل جیرفت در بخش غربی فروافتادگی جازموریان نشان داد که میزان فعالیت‌های نسبی در بخش شمالی و میانی گسل بیشتر است و به سمت جنوب کاهش می‌یابد. از آنجا که در حوضه‌های ۱تا ۱۲ جنس واحدهای سازنده و مقاومت سنگ بستر عمدتاً یکسان است تغییرات مشاهده شده در آنها ناشی از تغییر در فعالیت زمین‌ساختی می‌باشد. در حوضه‌های بخش جنوبی (۱۳ تا ۱۵) جنس سنگ‌ها شیل، سنگ آهک و ماسه سنگ است. همچنین در محل این حوضه‌ها راستای گسل به سمت جنوب شرق تمایل می‌یابد. بروز تغییر در مقادیر شاخص‌ها و فعالیت زمین‌ساختی در این بخش را می‌توان نشانه‌ای از وجود یک قطعه گسلی با ویژگی‌های متفاوت، در نظر گرفت.

مراجع

Abbasnejad, A., 2012.The Huge Jiroft Landslide: Introduction, Indications and Characteristics. Science Quarterly Journal 21, 41–48. https://doi.org/ 20.1001.1.10237429.1391.21.83.6.7

Asadi, M., Gnjaeian, H., Javedian, M., 2024. Analysis of Tectonic Status of Lavasan Sub-Basins Using Geomorphic Indicators and Radar Images. Geography and Environmental Planning 35, 73–85. http://10.22108/gep.2023.133365.1518

Ballabh, H., Devi Datt, CH., Mahendra Singh, L., 2011. Geomorphic Evidence of Active Tectonics in the Dhundsir Gad Watershed of Alaknada Basin, Uttrakhand, India, Nature and Science 9, 1–6. http://www.sciencepub.net.

Brice, J.C., 1964. Channel Patterns and Terraces of the Loup Rivers in Nebraska, U.S. Geological Survey Professional Paper 422-D, Washington, 41 PP. https://pubs.usgs.gov/pp/0422d/report.pdf

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, A Proceedings of Eighth Annual Geomorphology Symposium, State University of New York, Binghamton 23-24, 115–138. 10.4324/9780429299230-5

Bull, W.B., 1978. Geomorphic Tectonic Activity Classes of the South Front of the San Gabriel Mountains, California. U.S. Geological Survey Contract Report 14-08- 001-G-394, 59. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1960383

Cheng, Y.L., He, C.Q., Rao, G., Yan, B., Lin, A. M., Hu, J. M., Yao, Q., 2017 .Geomorphological and structural characterization of the southern Weihe Graben, central China: Implications for fault segmentation. Tectonophysics 722, 11–24. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.024

Ezati. M., Gholami, E., Moussavi. SM., 2019. Investigation of tectonic uplift in Shekarab Mountain located in North of Birjand (Southern Khorasan) using morphotectonic evidence. Quantitative Geomorphological Research 7, 181–195. https://doi.org/120.1001.1.22519424.1397.7.3.11.9

El Hamdouni, R.E., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacon, J., Keller, E.A., 2008. Assessment of Relative Active Tectonic, Southwest Border of the Sierra Nevada (Southern Spain). Geomorphology 96, 150-173. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.004

Faghih, A., Samani, B., Khabazi, S., Roshanak, R., 2011. Geomorphological analysis of tectonic activities affecting the formation of Maharlou Lake. Advanced Applied Geology 1 (1), 62–66. https://aag.scu.ac.ir/article_11544.html?lang=en

Faghih, A., Nourbakhsh, A., 2015. Appraisal of relative tectonic activity along the Kazerun Fault Zone, Zagros Mountains, Iran: insight from spatial analysis of geomorphic indices. Geological Journal 50, 783–798. https://doi.org/10.1002/gj.2597

Fountoulis, I., Mavroulis, S., Vassilakis, E., Papadopoulou-Vrynioti, K., 2013. Shoreline displacement and Pineios River diversions in NW Peloponnese (Greece) as result of the geology, active tectonics and human activity during the last 100 ky. Z. Geomorphology Supplementary 57, 97–123. https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/S-00146

Gao, M., Zeilinger, Xu, X., Wang, Q., Hao, M., 2013. DEM and GIS analysis of geomorphic indices for evaluating recent uplift of the northeastern margin of the Tibetan Plateau, China. Geomorphology 190, 61–72. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.02.008

Hack, J.T., 1973. Stream-profiles analysis and stream-gradient index. Journal Research of United States Geological Survey 1, 421–429. https://pubs.usgs.gov/publication/70161653

Keller, E.A., Pinter, N., 2002. Active Tectonics, Earthquakes, Uplift and Landscape. 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, P. 362.

Leopold, L.B., Wolman, M.G., 1957. River channel patterns: braided, meandering and straight. U.S. Geological Survey Professional Paper 282-B, Washington, 85 PP. https://doi.org/10.3133/pp282B

Longkumer, L., Luirei, K., Moiya, J.N., Thong, G.T., 2019. Morphotectonics and neotectonic activity of the Schuppen Belt of Mokokchung, Nagaland, India, Journal of Asian Earth Sciences 170, 138–154, https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.11.010.

Maghsoudi, M., Bagheri, S., Davoodi, M., 2011. Gilan Gharb thrusting, using indices and morphotectonics, is evidenced. Geography and Development 21, 137–158. https://doi.org/10.22111/gdij.2011.585.

Malik, J.N., Mohanty. C., 2007. Active tectonic influence on the evolution of drainage and landscape: Geomorphic signatures from frontal and hinterland areas along the Northwestern Himalaya, India. Journal of Asian Earth Sciences 29, 604–618. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.03.010

Mohammadi Shahrestanaki1, M., Davoodi, Z., Sadeghi, Sh., Razavi-Pash, R., 2025. Morphotectonic indices analysis of the southern slope of Alborz in the eastern part of the Takestan curvature. Advanced Applied Geology 14, 1034–1057. https://doi.org/10.22055/aag.2024.46603.2467

Nadri, R., Yeganehfar, H., 2023. Relative evaluation of active tectonics using quantitative morphometric and structural investigation of geology in South Qom Basin. Advanced Applied Geology 13, 877–891. https://doi.org/10.22055/aag.2023.42651.2338

Nemati, M., Abbasnejad. A., 2020. Geomorphology and active tectonic related to the faults in Kerman Province, SE Iran. Geotectonics 17, 1-18. https://doi.org/10.22077/JT.2021.4176.1109

Ntokos, D., Lykoudi, E., Rondoyanni, T., 2016. Geomorphic analysis in areas of low-rate neotectonic deformation: South Epirus (Greece) as a case study. Geomorphology 263, 156–169. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.005

Pedrera, A., Perez-Pena, J.V., Galindo-Zaldıvar, J., Azanon, J.M., Azor, A., 2009. Testing the sensitivity of geomorphic indices in areas of low-rate active folding (eastern Betic Cordillera, Spain). Geomorphology 105, 218–231. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.026

Ramírez-Herrera, M.T., 1998. Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay graben, Mexican Volcanic Belt. Earth Surface Processes and Landforms 23, 317–332. https://doi.org/10.1002/(SICI)1096 9837(199804)23:4<317: AID-ESP845>3.3.CO;2-M

Rashidi, A., Abbassi, M.R., Nilfouroushan, F., Shafiei, S.H., Derakhshani, R., Nemat, M., 2020. Morphotectonic and earthquake data analysis of interactional faults in Sabzevaran Area, SE Iran. Journal of Structural Geology 139, https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104147.

Regard, V., Bellier, O., Thomas, J.C., Abbassi, M.R., Mercier, J., Shabanian, E., Fegghi, K., Soleymani, S., 2004. The accommodation of Arabia-Eurasia convergence in the Zagros-Makran transfer zone, SE Iran: a transition between collision and subduction through a young deforming system, Tectonics 23, TC4007, https://doi.org/10.1029/2003TC001599

Rockwell, T.K., Keller, E.A., Johnson, D.L., 1985. Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain fronts near Ventura, California. In: Morisawa, M. (Ed.), Tectonic geomorphology. Proceedings of the 15th Annual Geomorphology Symposium. Allen and Unwin Publishers, Boston, MA. 183–207

Rust, B.R., 1978. A classification of alluvial channel systems. In: Miall, A.D. (Ed.), Fluvial Sedimentology, Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 5, 187–19. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:129207437

Samimi, N., 1980. 1/100000 geological map of Kahnuj. Geological and mineral survey of Iran.

Shafiei Bafti A., Jafari HR., Shahpasandzadeh, M., 2009. Active tectonics and estimation of seismic hazard in the Sabzevaran region, southeast of central Iran. Journal of Geotechnical Geology 5, 230–239. https://www.sid.ir/paper/127144/fa

Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C., Bardajı, T., 2003. Fault-generated Mountain fronts in southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity. Geomorphology 50, 203–22. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00215-5

Zarei, S., Faghih, A., Keshavarz. S., Zarei. E. 2023. Growth history and linkage pattern of fault-related folds deciphered from geomorphic analysis: A case study from the Dalan Anticline, Zagros Mountains, SW Iran. Journal of African Earth Sciences 202 (6), 104927. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.104927