

Research Article

Morphotectonic indices Analysis of the southern slope of Alborz in the eastern part of the Takestan curvature

Maryam Mohammadi Shahrestanaki¹, Zeinab Davoodi^{1*}, Shahryar Sadeghi¹, Raana Razavi-Pash²

1- Department of Geology, Faculty of Science, Imam Khomeini International University, Qazvinm Iran

2- Department of Earth Sciences, College of Sciences, Shiraz University, Shiraz

Keywords: *Morphotectonic indices, tectonic activity, Neotectonics, Southern slope of Alborz, Takestan curvature*

1-Introduction

Analysis of morphotectonic indices is a useful and reliable tool for investigating the active tectonics in a region (El Hamdouni et al., 2008). Rivers are important landscapes that react to the deformation resulting from tectonic activities (Holbrook and Schumm, 1999). In this research, morphotectonic indices have been analyzed in 8 subbasins adjacent to Takestan curvature and its eastern part on the southern slope of Alborz (Fig. 1). this study aims to investigate the relative active tectonics in this area.

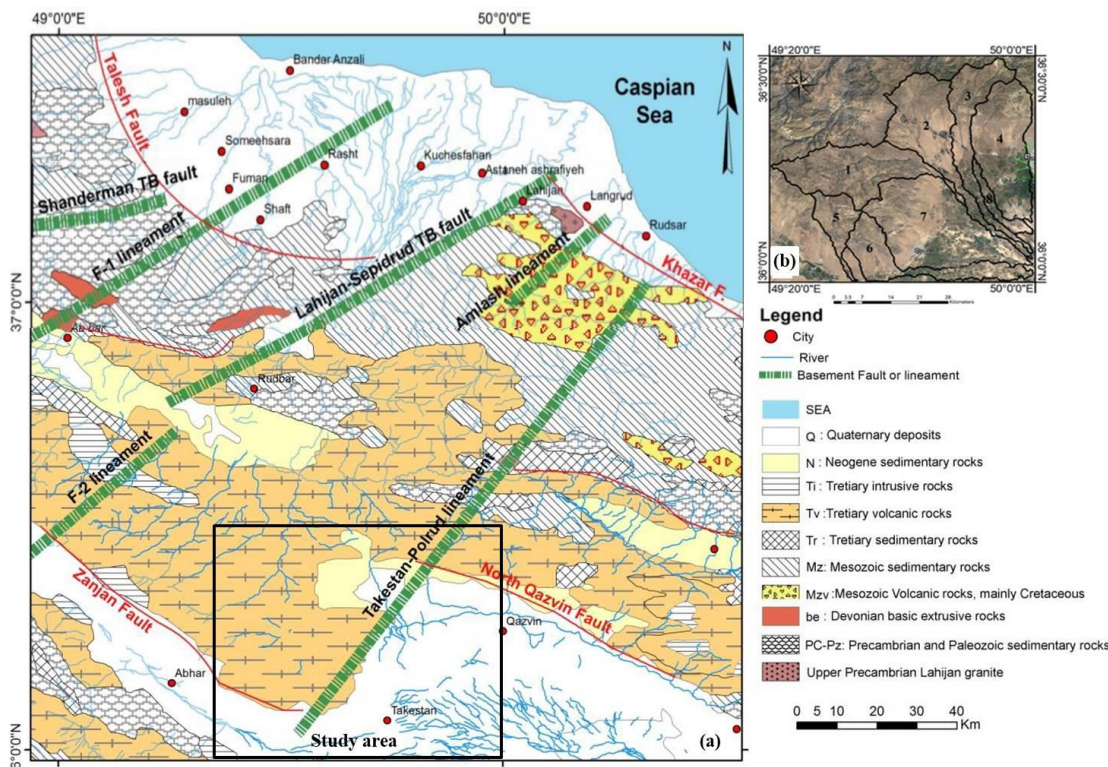


Fig. 1. (a) simplified geology map of the Qazvin-Rasht region (modified from Haghypour and Aghanabati, 1985) showing the location of the basement faults (Ehteshami-Moinabadi, 2016) and study area. (b) Satellite image of the subbasins in the study area on Google Earth. Numbers show the number of subbasins.

The study area covers the geological maps of Takestan (Mirtohidi and Mohammadi, 2000) and part of the Abhar map (Hoseini, 2016). Tertiary volcanic rocks are one of the most important formations in the

* Corresponding author: davoodi.zeinab@gmail.com

DOI: 10.22055/aag.2024.46603.2467

Received: 2024-08-09

Accepted: 2024-10-20

studied area, and they have the largest outcrop in the highlands. Young Quaternary deposits are also exposed in the south and southeast plains of the region. The studied area includes the Ashena and North Qazvin faults in the northern part, the Aghababa fault in the middle part, the Shenin fault in the southwestern part, and the Hesar fault in the western part. The most important fault in the region is the Takestan-Polrud basement fault, which caused the bending of the Takestan curvature in the southern slope of Alborz of Western Alborz.

2-Material and methods

In this research, the tectonic activity of the region has been investigated by morphotectonic indices including stream sinuosity index (S), percentage dissected mountain fronts (Fd), reverse topography symmetry index (T), mountain front sinuosity index (Smf), drainage basin asymmetry index (Af), stream length gradient index (SL), ratio of valley floor width to valley height index (Vf), drainage basin shape index (Bs). The active tectonic (Iat) Index is presented by averaging the mentioned indices. In this research, GIS and Global Mapper software are used. The basic data for extraction of drainage basins and rivers is the Digital Elevation Model (DEM), based on the ridge of the mountains (different topography). The DEM with an accuracy of 30 meters (taken from the USGS) was used to extract the drainages. The studied area includes eight subbasins. To investigate the relative tectonic activity in the region, a comparison of the Iat map with the location of the faults and the geology of the region (Takestan geology map with scale 1:100000 (Mirtohidi and Mohammadi, 2000) has been used since the activity of faults and the type of lithology have a great impact on the quantity of morphotectonics indices and thus the quantity of Iat.

3-Results and discussions

The summary of the results of the measured morphotectonic indices for eight drainage basins in the study area is shown in Table 1. Table (1) and Iat map (Fig. 2) show that three middle subbasins (subbasins 1, 2, and 3) have high tectonic activity compared to other subbasins. These subbasins (1, 2, and 3) are located adjacent to the Takestan curvature in the southern slope of Alborz of Western Alborz, and the other subbasins (subbasins 4, 8, 6, and 7) show moderate activity, which clearly shows that the Takstan-Polrud basement fault is active. Previous morphotectonics studies (Mohammadpur et al., 2024) carried out in the western part of the Takestan curvature also confirm the function of the Takestan- polrud fault as an active fault. It can also indicate the activity of important faults in the region, such as the North Qazvin, Ashena, Aghababa, and Hesar faults located in the north and northwest of the region. Comparing the SL index value with the lithology along the drainage basins in the eight profiles showed that the value of this Index in these subbasins is independent of lithology and is controlled by active tectonics because, due to the similarity of the rocks along the drainage and the lack of diversity of the rock resistance in the region, the main influencing factor in the changes of the morphotectonic indexes in the subbasins is caused by tectonic activities such as faults.

Table 1. The results of the morphotectonic indices in the subbasins of the area.

Iat class	S/n	T	S	Fd	Smf	Af	SL	Vf	Bs	Basins
2	1.87	3	2	2	1	2	2	1	2	1
2	1.75	2	2	2	1	2	2	1	2	2
2	1.5	2	2	2	1	1	2	1	1	3
3	2.37	2	3	1	2	3	3	2	3	4
3	2.37	2	2	2	2	3	3	2	3	5
3	2	1	3	2	2	1	3	3	1	6
3	2.25	2	3	1	2	1	3	3	3	7
3	2.28	2	3	1	-	3	3	3	1	8

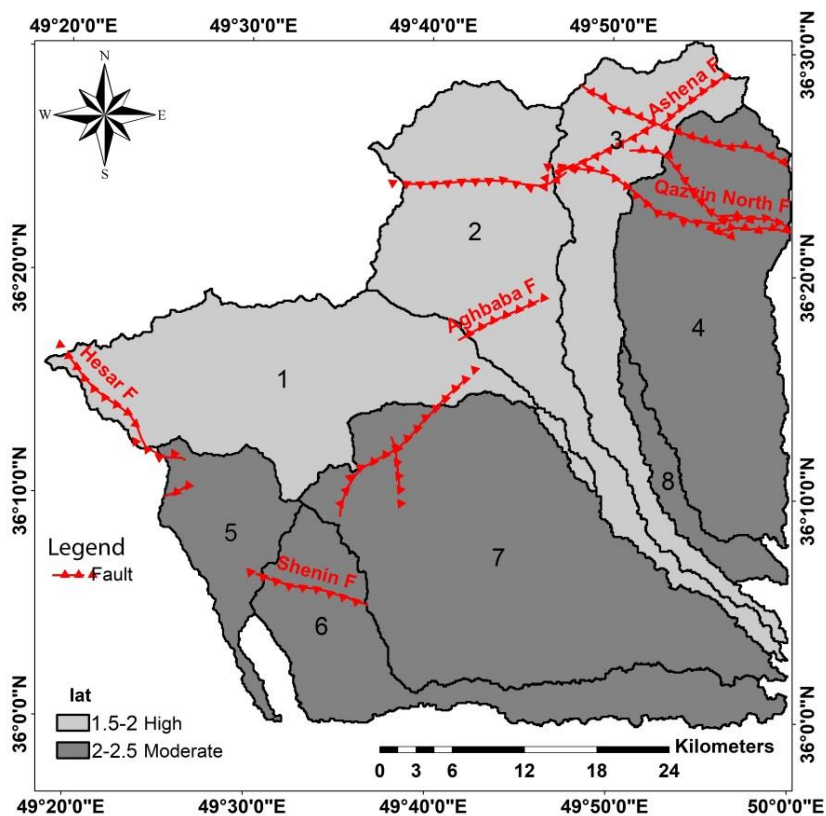


Fig. 2. Classification map of the Iat index in the study area

4- Conclusion

Analysis of morphotectonics indices and investigation of the Index of active tectonic map in the eastern part of the Takestan curvature showed that tectonic activity is high in the middle parts of the region (subbasins 1, 2, and 3 located adjacent to the Takestan curvature). The basins far from the Takestan curvature show moderate tectonic activity. The activity of faults in the region, such as the Takestan-Polrud basement fault, North Qazvin, Ashena, Aghababa, and Hesar faults located in the north and northwest of the study caused an increasing amount of Iat in these subbasins.

5- References

- Ehteshami-Moinabadi, M., 2016. Possible Basement Transverse Faults in the Western Alborz, Northern Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 27(4), 329-342.
- El Hamdouni, R.E., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacon, J., Keller E.A, 2008. Assessment of Relative Active Tectonic, South West Border of the Sierra Nevada (Southern Spain). *Geomorphology*, 96, 150-173. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.004>
- Haghipour, A., Aghanabati, A., 1985. *Geological Map of Iran (1:2500000)*. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Holbrook, J., Schumm, S.A., 1999. Geomorphic and Sedimentary Response of Rivers to Tectonic Deformation: A Brief Review and Critique of a Tool for Recognizing Subtle Epeirogenic Deformation in Modern and Ancient Settings. *Tectonophysics* 305, 287- 306. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00011-6)
- Hoseini, M., 2016. *Geological map of Abhar (1:100000)*, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Keller, E.A. and Pinter, N., 2002. *Active Tectonics, Earthquakes, Uplift and Landscape*. 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 362 P.
- Mirtohididi, A., Mohamadi, A., 2000. *Geological map of Takestan (1:100000)*, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.

Mohammadpur, F., Davoodi, Z., Sadeghi, S., Razavi Pash, R., 2024. Assessment of tectonic activity using morphotectonic indices in the Abhar-Lushan area, south of Alborz. *Journal of Tectonics* 23, 75-92. <http://doi.org/10.22077/jt.2023.6557.1158>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Mohammadi Shahrestanaki. M., Davoodi. Z., Sadeghi. S., Razavi-Pash. R., 2025. Morphotectonic indices Analysis of the southern slope of Alborz in the eastern part of the Takestan curvature, *Adv. Appl. Geol.* 14(4), 1034-1057.

DOI: 10.22055/aag.2024.46603.2467

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_19708.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

تحلیل شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی دامنه جنوبی البرز در بخش شرقی خمش تاکستان

مریم محمدی شهرستانکی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

زینب داودی*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

شهریار صادقی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

رعنا رضوی پش

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شیراز، شیراز

* davoodi.zeinab@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹

چکیده

بررسی شاخص‌های ریخت‌زمین‌شناسی همواره در شناخت ماهیت زمین‌ساختی هر منطقه و برنامه‌ریزی‌های کلان و بلندمدت موثر است. گستره‌ی مورد مطالعه در شمال غرب استان قزوین و در منطقه قاقازان پهنه البرز مرکزی و مجاورت خمش تاکستان قرار دارد. کوهزاد البرز در پیرامون خمش تاکستان حاوی گسل‌های فعال و مهمی است که می‌تواند از جمله عوامل اصلی و کنترل‌کننده شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی در منطقه باشد. در این پژوهش فعالیت زمین‌ساختی منطقه با بهره‌گیری از شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی شامل: شاخص پیچ و خم رودخانه (S)، شاخص درصد قسمت‌های بریده شده کوهستان (Fd)، شاخص تقارن توپوگرافی معکوس (T)، شاخص پیچ و خم کوهستان (Smf)، شاخص عدم تقارن (Af)، شاخص شیب طولی رودخانه (SL)، شاخص نسبت پهنای دره به کف دره (Vf)، شاخص شکل حوضه (BS) مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی، مطالعات سنجش از دور بر روی تصاویر ماهواره‌ای و استفاده از نرم‌افزارهای Arc GIS و Global mapper به انجام رسیده است. سپس نتایج حاصل از رده‌بندی شاخص‌های محدوده با روش شاخص فعالیت نسبی زمین‌ساختی (Iat) مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر این شاخص نشانگر فعالیت زمین‌ساختی نسبی بالا در زیرحوضه‌های میانی منطقه و فعالیت زمین‌ساختی نسبی متوسط در بخش‌های شرقی و جنوبی منطقه است که به دلیل فعال بودن گسل‌های منطقه به ویژه عملکرد گسل پی‌سنگی تاکستان-پلرود و گسل شمال قزوین است.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی، فعالیت زمین‌ساختی، نو زمین‌ساخت، دامنه جنوبی البرز، خمش تاکستان.

۱- مقدمه

(2008). اندازه‌گیری کمی چشم‌اندازها بر اساس محاسبه شاخص-های ریخت‌زمین‌ساختی با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، عکس-ها و تصاویر هوایی و ماهواره‌ای و کارهای صحرائی صورت می‌گیرد. شواهد زمین‌ریخت‌شناسی در بررسی زمین‌ساخت فعال و فعالیت گسل‌های یک منطقه ابزاری مفید و مطمئن محسوب می‌شوند، زیرا از طریق مطالعه این شواهد بر مبنای شاخص‌ها می‌توان مناطقی را شناسایی کرد که در گذشته فعالیت‌های زیاد و یا کم زمین‌ساختی را پشت‌سر گذاشته‌اند (Bull and Mcfadden,

از چشم‌اندازهای مهم موجود در سطح زمین که به تغییرشکل حاصل از فعالیت‌های زمین‌ساختی واکنش نشان می‌دهند و آن را ثبت می‌کنند، رودخانه‌ها هستند (Holbrook and Schumm, 1999; Seeber and Gornitz, 1983). طبق تحقیقات به عمل آمده میزان تغییرات فعالیت زمین‌ساختی، در بهم‌ریختگی الگوی رودخانه موثر است. این تغییرات با استفاده از شاخص‌های ریخت-زمین‌ساختی قابل اندازه‌گیری هستند (El Hamdouni et al.,

کاربردی نوزمین‌ساختی در این محدوده انجام نشده است. خمش تاکستان، خمش کوهزاد البرز است که در محل گسل پی‌سنگی تاکستان-پل‌رود روی داده است (شکل ۱). این گسل قابل ردیابی در خطواره‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌هوایی است (Ehteshami-Moinabadi, 2016). در این پژوهش به منظور برآورد پتانسیل فعالیت زمین‌ساختی دامنه جنوبی البرز در بخش شرقی خمش تاکستان (شکل ۱) به مطالعه شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی در منطقه پرداخته شد. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند میزان فعالیت نسبی زمین‌ساختی منطقه را مشخص نموده و در پی‌جویی گسل‌های فعال و علت خمیدگی کوهزاد البرز راهگشا باشد.

۲- موقعیت و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

گستره‌ی مورد مطالعه در شمال‌غرب استان قزوین و در منطقه قاقازان با مساحت ۲۲۹۹ کیلومتر مربع و در بین طول‌های جغرافیایی $20^{\circ} 49'$ و $50^{\circ} 00'$ شرقی، و عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ} 00'$ و $36^{\circ} 30'$ شمالی قرار گرفته است. این منطقه از شمال به طارم، از شرق به شهر قزوین، از جنوب به شهرستان تاکستان و از غرب به شهرستان ابهر ختم می‌شود (شکل ۱). این بخش در تقسیم‌بندی Nabavi (۱۹۷۶) در پهنه البرز، و از نظر تقسیم‌بندی Stöcklin (۱۹۶۸) در پهنه البرز مرکزی قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه درون نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تاکستان (Mirtohidi and Mohammadi, 2000) و بخشی از نقشه زمین‌شناسی ابهر (Hoseini, 2016) واقع است. یکی از مهمترین سازندهای محدوده مورد مطالعه که بیشترین رخنمون را در ارتفاعات منطقه دارد، سازند کرج با سن ائوسن است (شکل ۲). نهشته‌های کواترنری جوان با منشا رسوبات فرسایشی نیز در مناطق دشتی جنوب و جنوب‌شرق منطقه رخنمون دارند. با دور شدن از ارتفاعات از درشتی دانه‌های این رسوبات کاسته می‌شود. از گسل‌های مهم منطقه مورد مطالعه می‌توان به گسل‌های پی-سنگی از جمله خطواره پی‌سنگی تاکستان-پل‌رود (که از مرز شمال‌غرب منطقه عبور می‌کند و سبب خمش تاکستان در دامنه جنوبی البرز غربی شده است) (شکل ۱-ا) و شش گسل مهم شمال قزوین، گسل آشنا و گسل مرتضی‌آباد در بخش شمالی، گسل آقابابا در بخش میانی، گسل شنین در بخش جنوب‌غربی و

بنابراین امتیاز مهم این شاخص‌ها در ارزیابی سریع میزان فعالیت زمین‌ساختی منطقه می‌باشد. پژوهش‌های زیادی در خصوص شاخص‌های فعالیت‌های زمین‌ساختی در مناطق مختلف دنیا صورت گرفته است. برای مثال می‌توان به Bull و Mcfadden (۱۹۷۷)، Keller و Pinter (۲۰۰۲)، El Hamdouni و همکاران (۲۰۰۸)، Anoop و همکاران (۲۰۱۲)، Giaconia و همکاران (۲۰۱۲)، Taherkhani و Ghafelehbashi (۲۰۲۱) اشاره کرد.

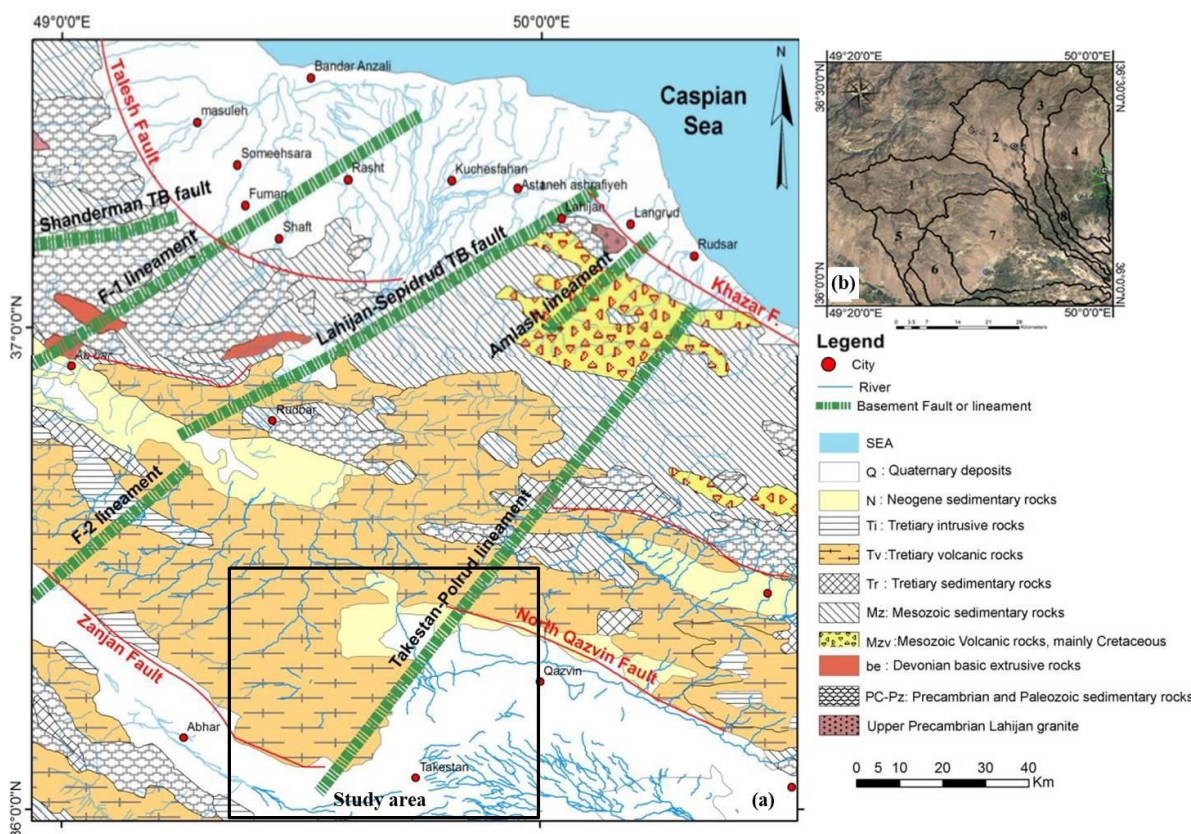
Bull و Mcfadden (۱۹۷۷) برای نخستین بار از شاخص‌های ریخت‌سنجی برای مطالعات زمین‌ساختی استفاده کردند. سپس در مناطق مختلف دنیا افرادی چون Rockwell و همکاران (۱۹۸۵) در جنوب غربی آمریکا و Wells و همکاران (۱۹۹۸) در سواحل کاستاریکا، ادامه‌دهنده این مطالعات بودند. El Hamdouni و همکاران (۲۰۰۸) با مطالعه شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی، زمین‌ساخت نسبی فعال جنوب‌غرب رشته کوه مرتفع نوادا در اسپانیا را مورد ارزیابی قرار داد. Anoop و همکاران (۲۰۱۲) به محاسبه و تجزیه و تحلیل شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی دره اسپیتی در شمال‌غرب هیمالیا پرداخت. Giaconia و همکاران (۲۰۱۲) نیز به مطالعه وضعیت ریخت‌زمین‌ساخت دامنه‌های سیرا در جنوب‌شرقی اسپانیا پرداخته است. Taherkhani (۲۰۱۰) در مطالعه خود با موضوع ریخت-زمین‌ساخت و جنبش‌های جوان گسل شمال قزوین که در بخش شرقی منطقه مورد مطالعه صورت گرفته است به بررسی وضعیت نوزمین‌ساختی پهنه گسلی شمال قزوین پرداخته است. در این پژوهش بر اساس شواهد ریخت‌زمین‌ساختی گسل شمال قزوین با طول ۸۰ کیلومتر به ۸ قطعه فعال با سازوکار متفاوت تقسیم‌بندی شده است. Ghafelehbashi (۲۰۲۱) نیز با تحلیل هندسی-جنبشی گسل شمال قزوین در شرق منطقه مورد مطالعه نشان داد که پهنه گسلی شمال قزوین یک پهنه گسلی فعال است که فعالیت‌های جوان آن به صورت معکوس چپ‌بر بر روی شاخه جنوبی گسل واقع در درون رسوبات جوان کواترنری شکل می‌گیرد. با توجه به وجود گسل‌های مهم و فعال در شمال قزوین؛ مانند گسل شمال قزوین؛ و همچنین خمش کوهزاد البرز (خمش تاکستان) در شمال‌غرب قزوین، تاکنون پژوهش جامع، دقیق و

شاخص‌ها از نرم‌افزارهای Global mapper و Arc GIS استفاده شد. در ادامه جهت بررسی تاثیر زمین‌ساخت در زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه، از نتایج نرم‌افزارهای عنوان شده برای شاخص‌های زمین‌ریخت‌شناسی استفاده گردید. شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی مورد مطالعه در این پژوهش شامل: شاخص پیچ و خم رودخانه (S)، شاخص درصد قسمت‌های بریده شده کوهستان (Fd)، شاخص تقارن توپوگرافی معکوس (T)، شاخص پیچ و خم کوهستان (Smf)، شاخص عدم تقارن (Af)، شاخص شیب طولی رودخانه (SL)، شاخص نسبت پهنای دره به کف دره (Vf)، شاخص شکل حوضه (Bs) و در نهایت شاخص نسبت فعالیت زمین‌ساختی (Iat) است (جدول ۱).

گسل حصار در بخش غربی (شکل ۲) اشاره کرد. منطقه مورد مطالعه از ۸ زیرحوضه تشکیل شده است (شکل ۱-ب).

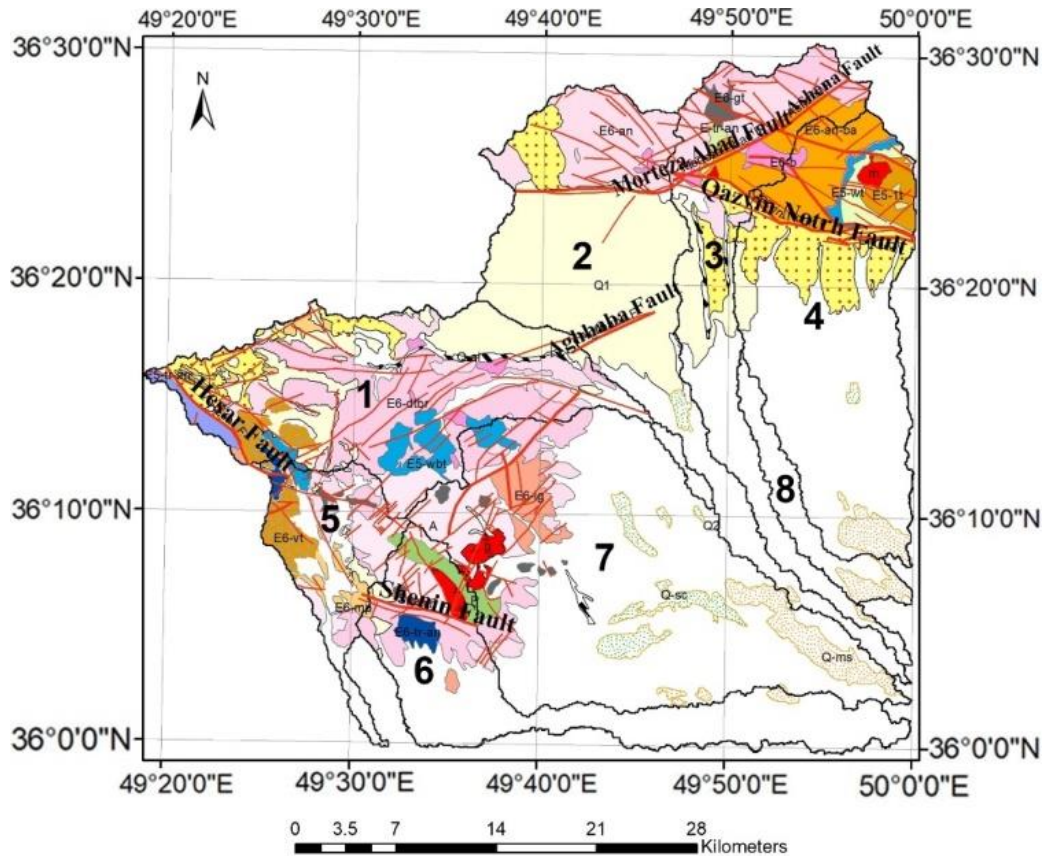
۳- روش پژوهش

ابتدا زیرحوضه‌های آبریز منطقه توسط نرم‌افزار Arc map و با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) که از وبسایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (www.usgs.gov) دریافت شد، استخراج و در نهایت منطقه به ۸ 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 در ارتفاعات پایین دست می‌ریزند. به منظور برآورد شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی و تهیه نقشه‌های خروجی نهایی این



شکل ۱- (a) نقشه زمین‌شناسی ساده شده قزوین-رشت (برگرفته از Haghypour و Aghanabati (۱۹۸۵)) که موقعیت گسل‌های پی‌سنگی البرز غربی (برگرفته از Ehteshami-Moinabadi (۲۰۱۶)) و منطقه مورد مطالعه بر روی آن مشخص شده است و (b) تصویر ماهواره‌ای از موقعیت زیرحوضه‌های آبریز منطقه مورد مطالعه بر روی گوگل ارث. اعداد شماره زیرحوضه‌ها را نشان می‌دهند.

Fig. 1. (a) Simplified geology map of the Qazvin-Rasht region (modified from Haghypour and Aghanabati, 1985) showing the location of the basement faults (modified from Ehteshami-Moinabadi, 2016) and study area, and (b) Satellite image of the subbasins in the study area on Google Earth. Numbers show the number of subbasins.



Legend

- Q-al: recent alluvium
- Q2: young terrace
- Q1: Old and high level terrace
- PLQ-c: Cream consolidated conglomerate
- g: Granite - microgranite
- m: Monzogabbro
- E6-mp: Grey - dark megaporphyric and green porphyritic quartz andesitic, dacitic lavas
- E6-vt: white grey to red colored rhyolitic - dacitic, lithic crystal vitric tuff
- E6-ig: Olive green partially red - blue rhyolitic - dacitic ignimbrite and tuff
- E6-tr-an: Red quartz trachy to andesitic lavas
- E6-an: Brown dark andesitic basaltic trachyandesitic-andesitic and quartz andesitic lavas
- E6-dtbr: Red ferrogenous rhyodasitic, dacitic lithic, vitric crystal tuff
- E6-b: Grey - dark grey basaltic lavas
- E6-an-ba: Dark massive andesitic - basaltic lavas
- E6-gt: Olive green to green andesitic - dacitic crystal - lithic vitric tuff
- E6-v: Brown to dark olivine basaltic trachybasaltic, trachyandesitic, to dark brown tuffs
- E5-wbt: green well - bedded tuffaceous limestone and limy crystal to green sandy crystal tuff and black grey shale
- E5-wt: Grey purple andesitic - trachandesitic lavas and andesitic to rhyolitic tuff
- E5-tr-an: Dark and grey to red brown amygdaloidal trachy - andesitic lavas
- E5-It: Green and cream colored epiclastic lithic crystal tuff with interclation of dark brown shale and siltstone

Symbols

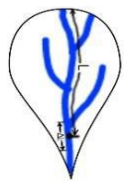
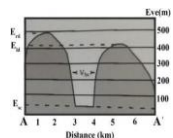
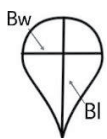
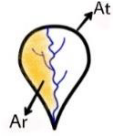
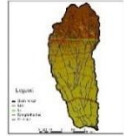
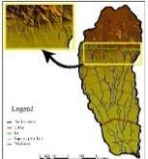
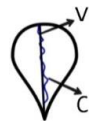
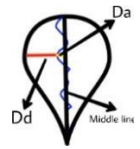
- Thrust Fault
- Normal Fault
- Strike - Slip Fault
- Basin border

شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه برگرفته از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ تاکستان (Mirtohidi and Mohammadi, 2000) و ابهر (Hoseini, 2016). شماره و محدوده زیرحوضه‌ها بر روی نقشه مشخص شده است.

Fig. 2. Geological map of the study area based on 1:100000 Geological maps of Takestan (Mirtohidi and Mohammadi, 2000) and Abhar (Hoseini, 2016). The area and number of subbasins are shown on the map.

جدول ۱- خلاصه‌ای از شاخص‌های مورد استفاده برای سنجش زمین‌ساخت فعال در محدوده مورد مطالعه.

Table 1. Summary of the morphotectonics indices used in the study area.

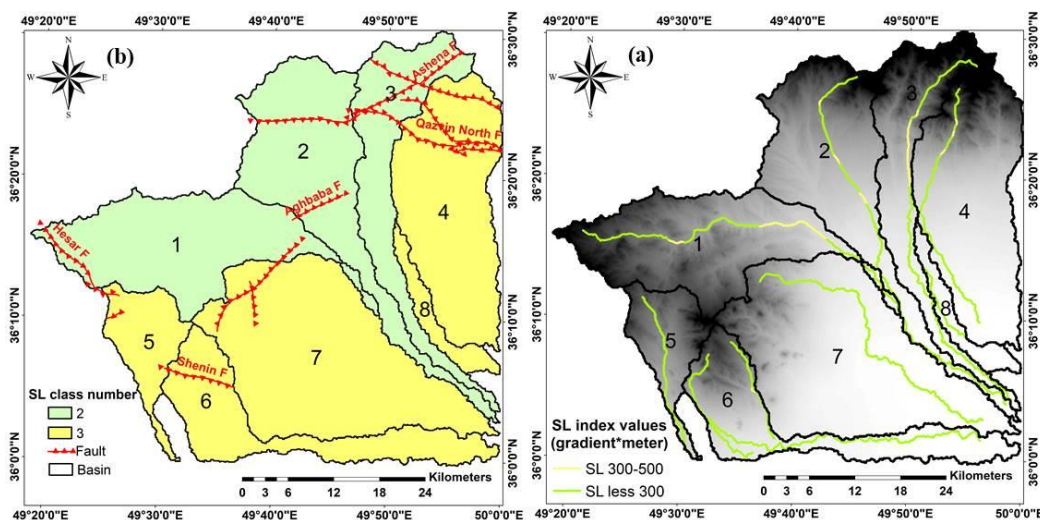
Reference	Description	Method	Formula	Index
Keller and Pinter, 2002	Δh : difference between the highest and the lowest points of a given section of the channel, Δl : horizontal projection of the studied section, L: length of the farthest point of the studied section to the headwaters of the basin, in a straight line.		$SL = \frac{\Delta H}{\Delta L} \cdot L$	Stream-Lenght index
Keller and Pinter, 2002	Vfw: valley floor width measurement, Eld and Erd: elevation of the left and right valley divide, Esc: valley floor elevation		$Vf = 2Vfw / \{(Eld - Esc) + (Erd - Esc)\}$	Valley Floor Width to Valley Height Ratio
Keller and Pinter, 2002	Bl: length between the highest point to the mouth of the watershed, Bw: width of a watershed at its widest point.		$Bs = \frac{Bl}{Bw}$	Drainage basin shape index
Keller and Pinter, 2002	At: total watershed area, Ar: area of the watershed to the right (facing downstream) of the trunk stream.		$Af = \frac{Ar}{At} \cdot 100$	Drainage basin asymmetry index
El Hamdouni et. al., 2008	Lmf: length between two points of the mountain front along its base where there is a change in slope from hills to plain, Ls: straight length between the two ends of mountain front.		$Smf = \frac{Lmf}{Ls}$	Mountain front sinuosity index
Keller and Pinter, 2002	Lmfd: length of the cut parts of the mountain fronts, Ls: straight length of the mountain front.		$Fd = \frac{Lmfd}{Ls}$	Percentage dissected mountain fronts
Keller and Pinter, 2002	C: length of the river V: length of the valley in a straight line.		$S = \frac{C}{V}$	Sinuosity index
Keller and Pinter, 2002	Dd: distance taken from the watershed midline to the watershed divide, Da: distance taken from the watershed midline to the midline of the stream.		$T = \frac{Da}{Dd}$	Reverse topography symmetry index
El Hamdouni et. al., 2008	S: Sum of the classes of calculated geomorphic indices N: Number of calculated indicators.	-	$Iat = \frac{S}{N}$	Relative tectonic activity index

۴- یافته‌های پژوهش

۴-۱- شاخص شیب طولی رودخانه (SL)

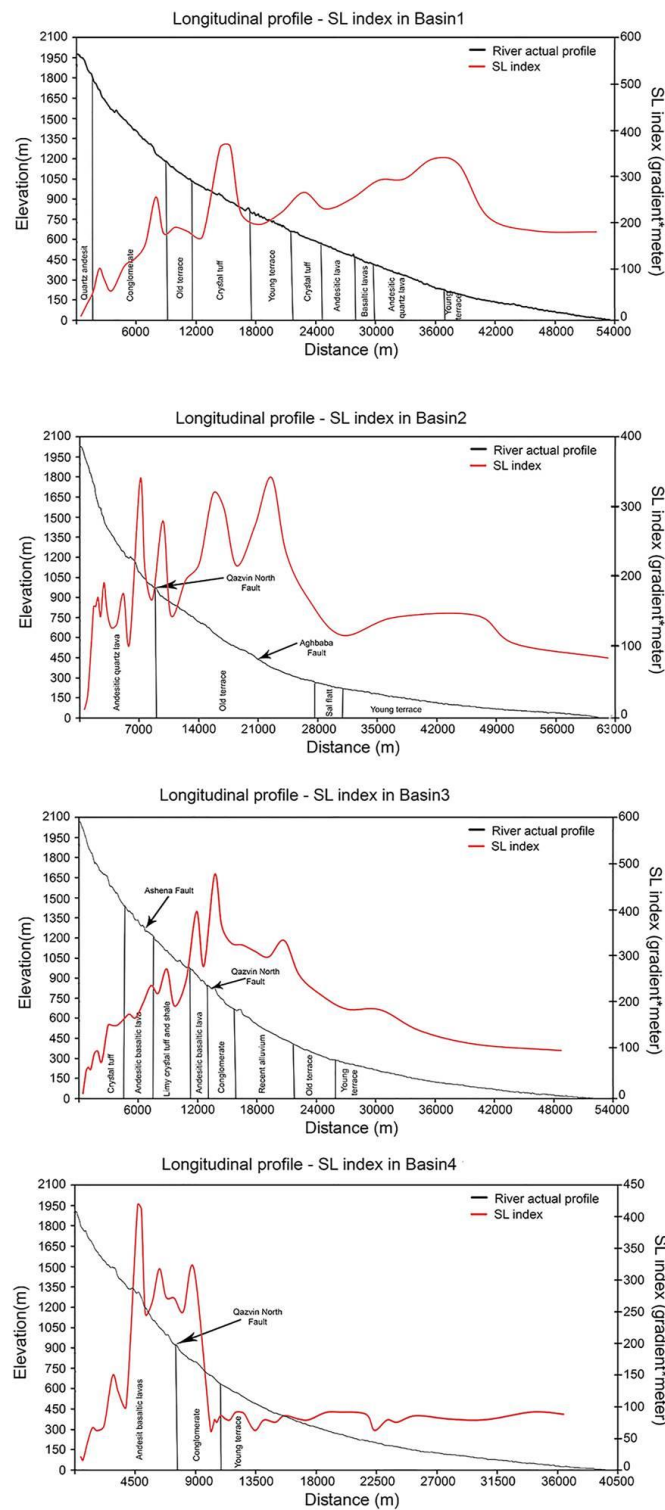
این شاخص نمایانگر تغییرات ارتفاعی در طول یک رودخانه است (Keller and Pinter, 2002). در این پژوهش، محاسبه این شاخص بر مبنای نیمرخ‌های طولی آبراهه اصلی هر زیرحوضه بر روی نقشه توپوگرافی در فاصله‌های ۲۵ متری در تمام مسیر رودخانه اصلی بر اساس توضیحات و نحوه محاسبه که در جدول ۱ و شکل ۳-a آمده است، انجام گرفت. مقادیر شاخص SL در سه دسته، رده ۱ با فعالیت بالا (بیش از ۵۰۰) و رده ۲ با فعالیت متوسط (۳۰۰-۵۰۰) و رده ۳ با فعالیت پایین (کمتر از ۳۰۰) رده‌بندی شده است (El Hamdouni et al., 2008). طبق این رده‌بندی زیرحوضه‌های منطقه در رده ۲ و ۳ قرار دارند (شکل ۳-b). در ادامه مقادیر شاخص SL در نیمرخ طولی رودخانه برای مقایسه ارتباط بین این شاخص و ساختارها و سنگ‌شناسی منطقه برای هر زیرحوضه به طور جداگانه ترسیم شد (شکل ۴). مقادیر عددی شاخص شیب طولی رودخانه زمانی که سنگ‌های بستر رودخانه مقاوم باشند و یا در مناطقی که حرکات زمین‌ساختی فعال در تغییر شکل قائم پوسته زمین موثر باشد، زیاد است. بر این اساس

مقادیر بالای شاخص در سنگ‌های دارای مقاومت کم و یا در سنگ‌هایی که از لحاظ مقاومت یکسان هستند، می‌تواند بیانگر حرکات تکتونیکی فعال و جوان باشد. منظور از تغییرات مقاومت سنگ‌ها، مقاومت نسبی است به عنوان مثال سنگ آذرین مقاوم‌تر از سنگ رسوبی است و در سنگ‌های رسوبی به ترتیب ماسه‌سنگ، سنگ آهک ضخیم لایه توده‌ای و دولومیت، سنگ آهک حفره‌دار، شیل و مارن از مقاومت نسبی بالا تا پایین برخوردارند. بیشترین رخمون سنگ‌ها در منطقه مورد مطالعه شامل آندزیت کوارتزار و توف بلوری است که تقریباً مقاومت یکسان دارند و به صورت محدود بازالت، ایگنمبریت، توف آهکی، کنگلومرا و میان لایه‌های شیل و سیلت نیز در برخی از زیرحوضه‌ها رخمون دارند. با بررسی نیمرخ‌های طولی در شکل ۴، هر چند عدم تنوع جنس سنگ‌های منطقه در طول بستر آبراهه زیرحوضه‌ها مشهود است اما نمودار شاخص SL ناهنجاری نشان می‌دهند. لذا عامل اصلی تغییرات این شاخص در زیرحوضه‌های منطقه را می‌توان ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی دانست. به عنوان مثال؛ در نیمرخ زیرحوضه‌های ۲ و ۳ انطباق پیک‌های ناهنجاری با گسل اصلی منطقه (گسل شمال قزوین) مشهود است.

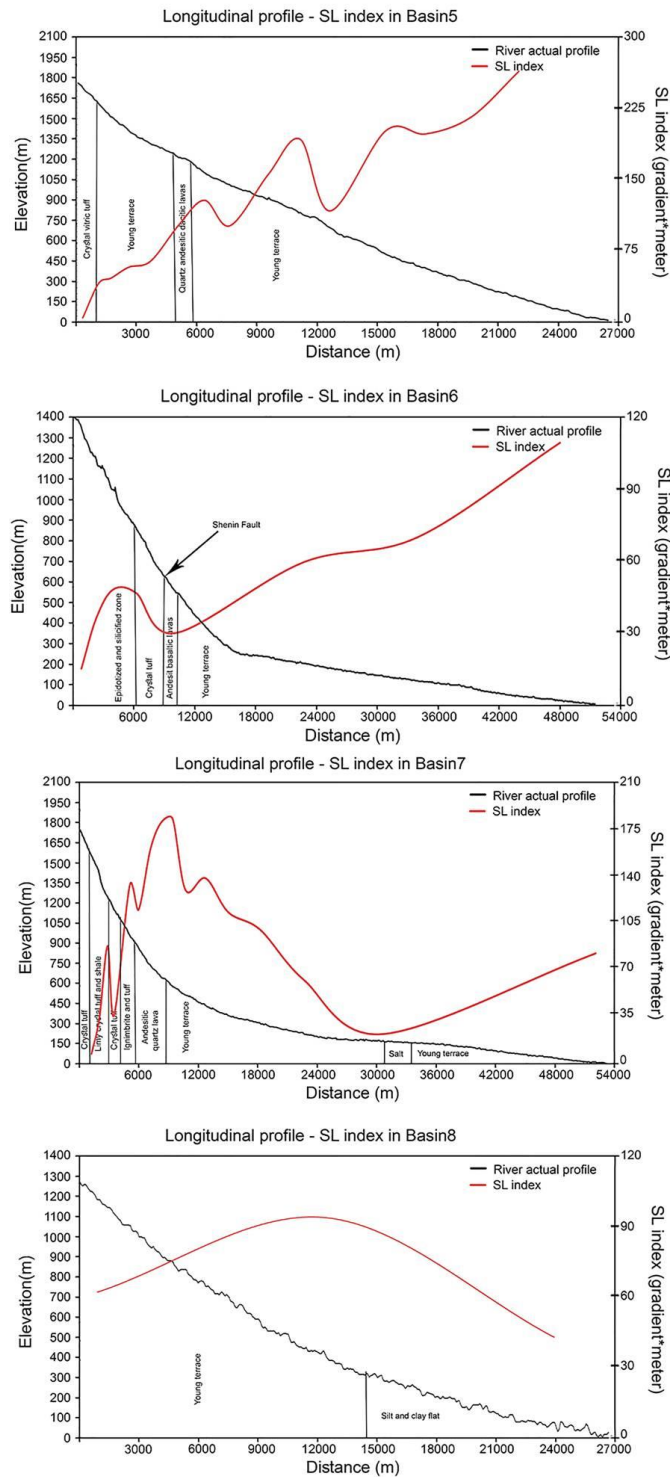


شکل ۳- (a) نقشه مدل ارتفاعی رقومی از گستره مورد مطالعه برای محاسبه مقادیر شاخص SL و (b) نقشه رده‌بندی شاخص SL در زیرحوضه‌های منطقه.

Fig. 3. (a) Digital elevation model map of the study area for calculation of SL index, and (b) Classification map of SL index in the sub-basins of the area.



شکل ۴- نیمرخ طولی رودخانه در ۸ زیرحوضه مورد مطالعه و شاخص SL اندازه گیری شده.
 Fig. 4. Longitudinal river profiles and SL index in 8 studied sub-basins.



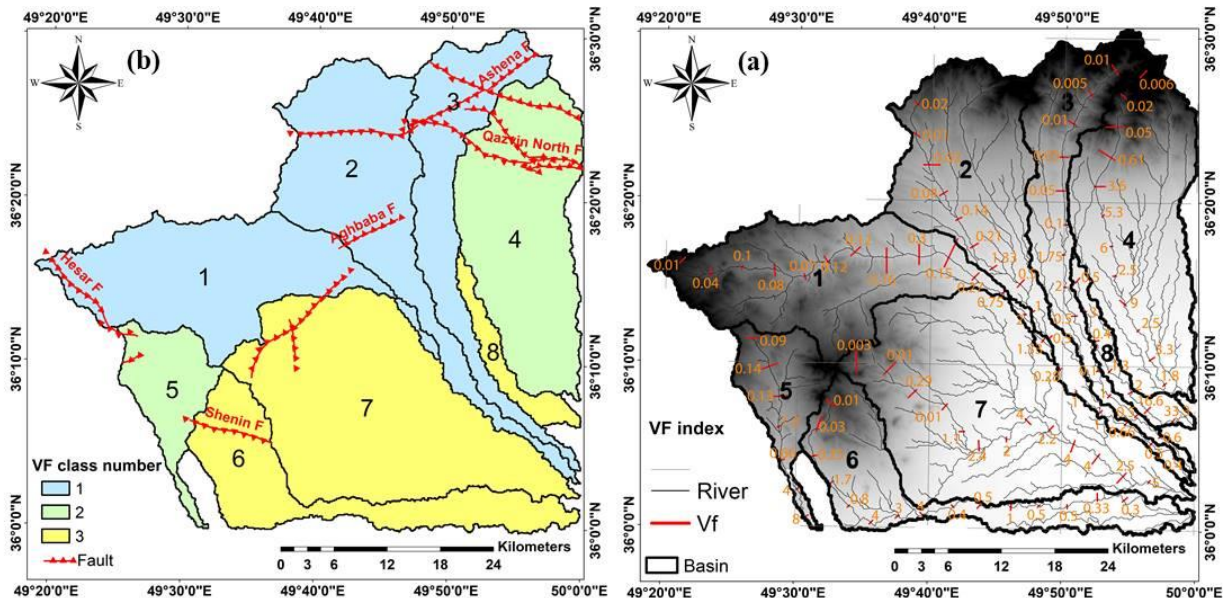
ادامه شکل ۴

Fig. 1 . Continued

فعالیت حوضه کمتر باشد، فرسایش دیواره‌ها و رودخانه به تعادل رسیده و دره U شکل است و مقدار این شاخص بالاست (Keller and Pinter, 2002). بر اساس El Hamdouni و همکاران (۲۰۰۸) این شاخص در سه گروه؛ $Vf < 0.5$ حوضه دارای فعالیت زیاد (رده ۱)، $Vf = 0.5 - 1$ حوضه دارای فعالیت متوسط (رده ۲) و $Vf > 1$ حوضه دارای فعالیت کم (رده ۳) طبقه‌بندی می‌شوند. این شاخص برای زیرحوضه‌های محدوده مورد مطالعه طبق شکل ۵-ا و جدول ۲ محاسبه شد و نقشه رده‌بندی آن تهیه گردید (شکل ۵-ب). طبق این شاخص زیرحوضه‌های ۱، ۲ و ۳ در رده ۱؛ زیرحوضه‌های ۴ و ۵ در رده ۲ و زیرحوضه‌های ۶، ۷ و ۸ در رده ۳ قرار می‌گیرد.

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

این شاخص به عنوان نسبت پهناي کف دره به میانگین عمق آن تعریف شده که به تغییر میزان کج‌شدگی در راستای عمود بر روند دره حساس است و به شرح جدول ۱ محاسبه می‌شود. برای تعیین این شاخص در هر دره باید پارامترهای مورد نیاز آن در فاصله‌های معینی از پیشانی کوهستان اندازه‌گیری شود (El Hamdouni et al., 2008). در این پژوهش با توجه به اندازه زیرحوضه‌ها، فاصله ۴ کیلومتر در نظر گرفته شد. هرچه دره باریک‌تر و دیواره‌های آن بالاتر باشد (دره‌های V شکل)، آن منطقه فعالیت زمین-ساختی بالایی دارد و میزان این شاخص کمتر است و هرچه میزان



شکل ۵- (a) شاخص نسبت پهناي کف دره به عمق آن (VF) در منطقه و (b) نقشه رده‌بندی شاخص VF در زیرحوضه‌های منطقه.

Fig. 5. (a) The ratio of valley floor width to its height (VF) in the area, and (b) Classification map of VF index in the sub-basins of the area.

جدول ۲- مقادیر شاخص Vf در زیرحوضه‌های محدوده مورد مطالعه.

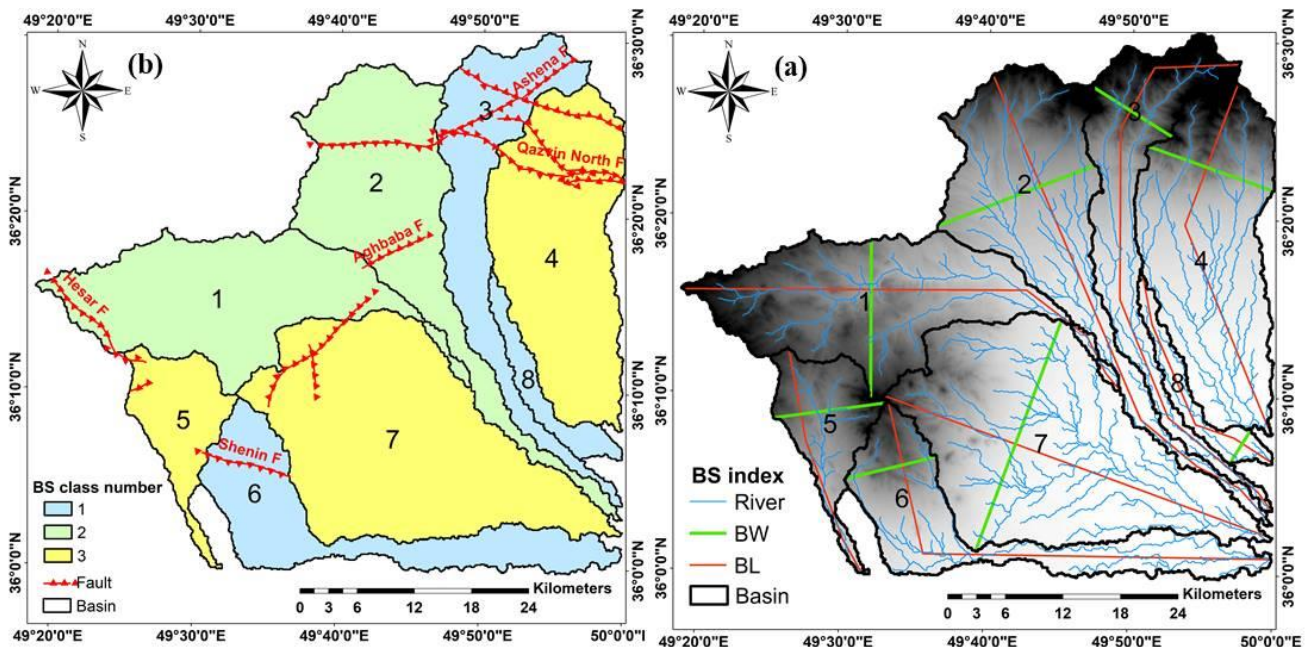
Table 2. The Vf index in the sub-basins of the area.

Category	Average Vf	Basin	Category	Average Vf	Basin
2	0.98	5	1	0.46	1
3	1.74	6	1	0.48	2
3	3.42	7	1	0.49	3
3	3.81	8	2	0.89	4

حوضه‌ها با $Bs > 4$ دارای فعالیت زمین‌ساختی زیاد و رده ۱، حوضه‌های $Bs = 3 - 4$ دارای فعالیت زمین‌ساختی متوسط و رده ۲ و حوضه‌های $Bs < 3$ دارای فعالیت زمین‌ساختی کم و رده ۳ رده‌بندی می‌شوند (El Hamdouni et al., 2008). طبق اندازه‌گیری‌های این شاخص زیرحوضه‌های ۳، ۶ و ۸ در رده ۱؛ زیرحوضه‌های ۱ و ۲ در رده ۲ و زیرحوضه‌های ۴، ۵ و ۷ در رده ۳ قرار می‌گیرد (شکل ۶-a و جدول ۳). رده‌بندی زیرحوضه‌های منطقه بر اساس این شاخص در شکل ۶-b آمده است.

۳-۴- شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs)

فعالیت‌های زمین‌ساختی تأثیر زیادی بر شکل حوضه دارد. حوضه‌های زهکشی نسبتاً جوان در مناطق فعال زمین‌ساختی به شکل کشیده در می‌آید و کاهش این فعالیت‌ها باعث گردشگری بیشتر حوضه‌ها می‌شود (Burbank and Anderson, 2001). برای محاسبه این شاخص ابتدا طول آبراهه اصلی (طول‌ترین مسیر جریان آب) اندازه‌گیری می‌شود و سپس در عرض‌ترین ناحیه حوضه، عرض آن عمود بر آبراهه محاسبه می‌شود (جدول ۱).



شکل ۶- (a) موقعیت زیرحوضه‌های منطقه بر اساس شاخص Bs و (b) نقشه رده‌بندی شاخص Bs در منطقه.

Fig. 6. (a) Location of the sub-basins of the area based on the Bs index, and (b) Classification map of the Bs index in the area.

جدول ۳- نتایج شاخص Bs برای حوضه‌های محدوده مورد مطالعه.

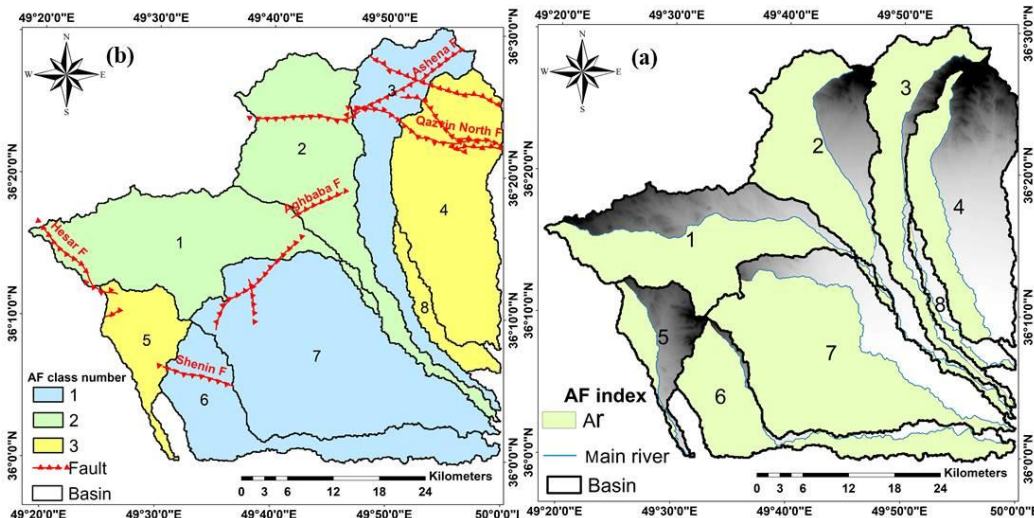
Table 3. The results of the Bs index in the sub-basins of the area.

Category	Bs	Bw (km)	Bl (km)	Basin	Category	Bs	Bw (km)	Bl (km)	Basin
3	2.1	11.7	27.8	5	2	3.07	16.4	55.8	1
1	5.37	9.7	56.4	6	2	3.22	17.6	66.9	2
3	1.68	2.5	55.2	7	1	6.34	9.7	63.8	3
1	6.31	4.1	29.3	8	3	2.8	14	42.3	4

فرايش است. مقادير بيشتر و كمتر از ۵۰ بيانگر كج شدگي حوضه و عملكرد فرايش به ترتيب در سمت راست و چپ آبراهه اصلي است. بر اساس اين شاخص حوضه‌ها در سه گروه رده‌بندي مي‌شوند؛ $Af-50 > 15$ حوضه داراي فعاليت بالا (رده ۱)، $7 < Af-15 < 50$ حوضه داراي فعاليت متوسط (رده ۲) و $Af-50 < 7$ حوضه داراي فعاليت كم يا غيرفعال (رده ۳) (Keller and Pinter, 2002). طبق اندازه‌گيري‌هاي اين شاخص زيرحوضه‌هاي ۳، ۶ و ۷ در رده ۱؛ زيرحوضه‌هاي ۱ و ۲ در رده ۲ و زيرحوضه‌هاي ۴، ۵ و ۸ در رده ۳ قرار مي‌گيرد (شكل ۷-a و جدول ۴). نقشه رده‌بندي زيرحوضه‌هاي منطقه بر اساس اين شاخص در شكل ۷-b آمده است.

۴-۴- شاخص عدم تقارن حوضه (Af)

شاخص عدم تقارن حوضه روشي براي تشخيص وجود كج شدگي ناشي از فعاليت‌هاي زمين‌ساختي در حوضه‌هاي زهكشي است (El Hamdouni et. al., 2008). با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS مساحت كل حوضه و مساحت سمت راست حوضه اندازه‌گيري و شاخص طبق فرمول (جدول ۱) محاسبه گرديد. اين شاخص به تغيير ميزان كج شدگي در راستاي عمود بر روند مجرا كه به طور معمول ناشي از فرايش و فرونشست در بستر رود است، حساس است (Keller and Pinter, 2002). اگر حوضه‌اي در شرايط پايدار باشد شاخص Af برابر ۵۰ است كه بيانگر تقارن زهكش‌هاي فرعي نسبت به آبراهه اصلي و در نتيجه عدم كج شدگي بر اثر



شكل ۷- (a) موقعيت زيرحوضه‌هاي گستره بر اساس شاخص Af و (b) نقشه رده‌بندي شاخص Af در گستره.

Fig. 7. (a) Location of the sub-basins of the area based on Af index, and (b) Classification map of the Af index in the area.

جدول ۴- نتايج شاخص Af براي حوضه‌هاي محدوده مورد مطالعه.

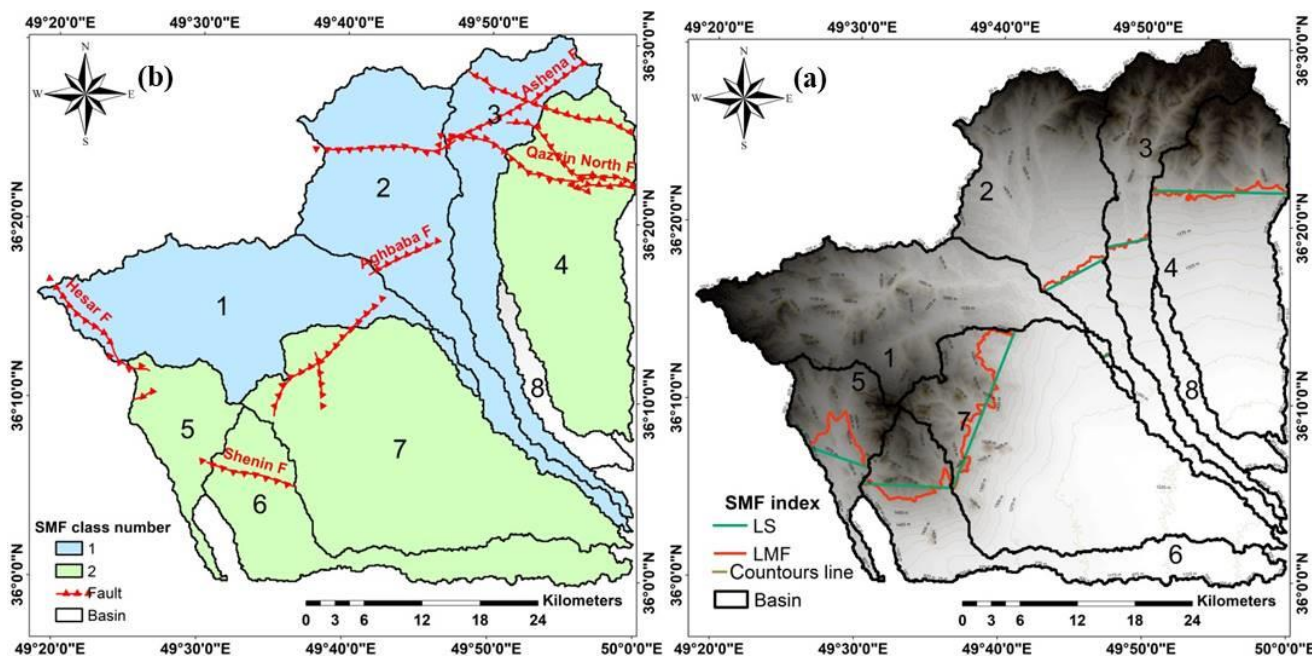
Table 4. The results of the Af index in the sub-basins of the area.

Category	Af-50	At (km ²)	Ar (km ²)	Basin	Category	Af-50	At (km ²)	Ar (km ²)	Basin
3	-17	116.9	39.6	5	2	13	362.3	229.2	1
1	35	230.4	196.5	6	2	12	356.3	223	2
1	22	551.5	397.2	7	1	17	242.7	188.1	3
3	-18	53.2	17.3	8	3	-20	385.4	118.6	4

۴-۵- شاخص پیچ و خم کوهستان (Smf)

یکی از شاخص‌هایی که با ارزیابی تغییرات ریخت‌شناسی جبهه‌های کوهستانی میزان نسبی فعالیت زمین‌ساختی را امکان‌پذیر ساخته است، شاخص پیچ و خم (سینوسی) جبهه کوهستان است. این شاخص نشانگر تعادل بین فرایندهای فرسایشی که تمایل به فرسایش و ایجاد فرورفتگی در جبهه کوهستان دارند و نیروهای زمین‌ساختی است که ایجادکننده جبهه‌های کوهستانی مستقیم همزمان با چین‌ها و گسل‌های فعال هستند (Bull and Mcfadden, 1977). جبهه‌های کوهستانی فعال با مقادیر کم Smf، و جبهه‌های کوهستانی با فعالیت کم یا بدون فعالیت با مقادیر Smf بالایی همراه است. این شاخص طبق فرمول جدول ۱ محاسبه می‌شود. بر اساس طبقه‌بندی El Hamdouni و همکاران (۲۰۰۸)، این شاخص در ۳ رده: $Smf < 1.1$ حوضه دارای فعالیت زیاد (رده ۱)، $1.1 < Smf < 1/5$ حوضه دارای فعالیت متوسط

(رده ۲)، $Smf > 1.5$ حوضه فاقد فعالیت (رده ۳) قرار می‌گیرد. در محدوده مورد مطالعه شاخص Smf برای هر زیرحوضه محاسبه شده است (شکل ۸-ا و جدول ۵). همانطور که در شکل ۸-ا مشاهده می‌شود جبهه کوهستان فقط یک خط تراز مشخص نیست و در زیرحوضه‌های مختلف یک منطقه به توجه به توپوگرافی و با در نظر گرفتن اصل مفهوم این مولفه (که خط شکستگی کوهستان، قسمتی که شیب کوهستان می‌شکند و کاهش می‌یابد یا محل اتصال کوه به دشت است) روی ترازهای مختلف قرار می‌گیرد. این مولفه در زیرحوضه ۱ روی تراز ۱۲۷۵ متر، در زیرحوضه ۲ روی تراز ۱۳۵۰، در زیرحوضه ۳ روی تراز ۱۳۷۵، در زیرحوضه ۴ روی تراز ۱۵۰۰، در زیرحوضه ۵ روی تراز ۱۶۲۵، در زیرحوضه ۶ روی تراز ۱۵۵۰ و در زیرحوضه ۷ روی تراز ۱۵۲۵ متر قرار دارد. طبق شاخص پیچ و خم کوهستان، زیرحوضه‌های ۱ تا ۳ در رده ۱ و زیرحوضه‌های ۴ تا ۷ در رده ۲ قرار می‌گیرد (شکل ۸-ب).



شکل ۸- (a) محاسبه شاخص Smf در گستره مورد مطالعه و (b) رده‌بندی شاخص Smf در منطقه مورد مطالعه.
Fig. 8. (a) Calculation of the Smf index in area, and (b) Classification of the Smf index in the study area.

جدول ۵- مقادیر شاخص Smf برای حوضه‌های محدوده مورد مطالعه.
Table 5. The results of the Smf index in the sub-basins of the area.

Category	Smf	Ls (km)	Lmf (km)	Basin	Category	Smf	Ls (km)	Lmf (km)	Basin
2	1.49	5.52	8.22	5	1	1.01	0.87	0.9	1
2	1.36	9.33	12.68	6	1	1.07	7.2	7.70	2
2	1.21	17.83	21.57	7	1	1.09	4.6	5.01	3
-	Immeasurable	-	-	8	2	1.17	14.2	16.61	4

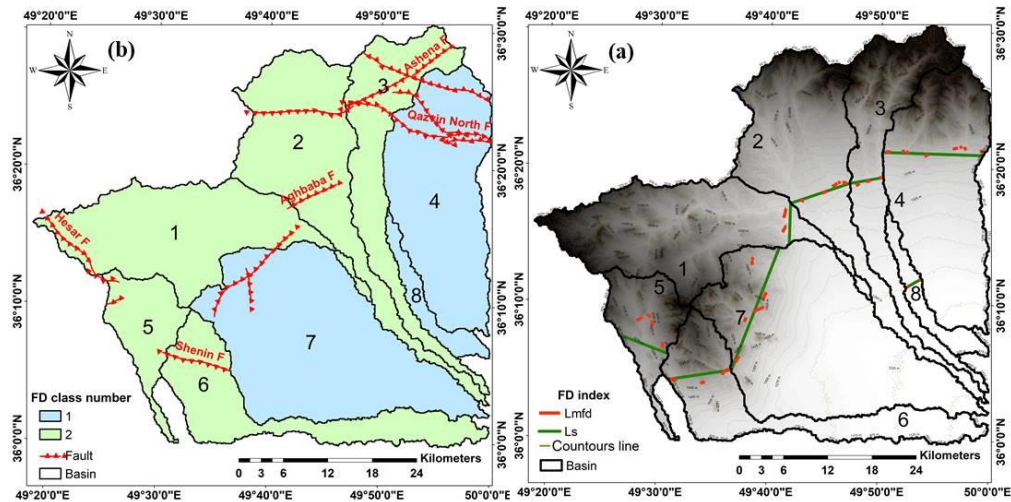
حوضه‌های شماره ۷ و ۸ با عدد شاخص ۰/۲۹ (رده ۱) است. نقشه رده‌بندی این شاخص در شکل ۹-b آمده است.

۴-۷- شاخص پیچ و خم رودخانه (S)

تغییرات پیچ و خم مسیر رودخانه‌ها، ناشی از بالاآمدگی و فرونشست‌های بستر رود است (Keller and Pinter, 2002). در رودخانه‌هایی که تقریباً به حالت تعادل رسیده‌اند، رودخانه جهت حفظ تعادل بین دبی و رسوبگذاری، پیچ می‌خورد. به عبارت دیگر رودخانه‌هایی که دارای پیچ و خم زیاد هستند به حالت تعادل نزدیک شده، درحالی که مستقیم بودن مسیر رودخانه بیشتر حاکی از جوان بودن منطقه و فعالیت نوزمین‌ساختی است. به منظور محاسبه دقیق این شاخص، طول رودخانه به سه قسمت تقسیم و در هر قسمت شاخص طبق فرمول (جدول ۱) محاسبه شد و سپس میانگین شاخص در هر زیرحوضه محاسبه گردید (شکل ۱۰-a و جدول ۷). بر اساس روش El Hamdouni و همکاران (۲۰۰۸)، اعداد کمتر از ۱/۱ در این شاخص نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی زیاد (رده ۱)، اعداد بین ۱/۵-۱/۱ نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی متوسط (رده ۲) و اعداد بیشتر از ۱/۵ نشان-دهنده فعالیت زمین‌ساختی کم (رده ۳) می‌باشد. طبق شاخص پیچ و خم رودخانه، زیرحوضه‌های ۱، ۲، ۳ و ۵ در رده ۲ و زیرحوضه‌های ۴، ۶، ۷ و ۸ در رده ۳ قرار می‌گیرد (شکل ۱۰-b).

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

جبهه‌های کوهستانی در مناطق فعال زمین‌ساختی به دلیل اینکه نیروهای زمین‌ساختی معمولاً پیشانی‌های خطی و مستقیمی ایجاد می‌کنند، کمتر بریده می‌شوند. بنابراین مقادیر شاخص Fd در آنها پایین خواهد بود (Wells et al, 1998). مقادیر حاصل از این شاخص معمولاً بصورت کمیتی بین ۱ - ۰ تعریف می‌شود. هر چقدر مقدار این شاخص به عدد صفر نزدیک باشد، نشانگر فعال‌تر بودن جبهه‌های کوهستانی و هر چقدر مقدار این شاخص به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان از غیرفعال بودن جبهه‌های کوهستانی از لحاظ فعالیت‌های زمین‌ساختی می‌باشد (Wells et al, 1998 و Keller and Pinter, 2002). پارامترهای شاخص Fd در محدوده مورد مطالعه طبق فرمول جدول ۱ و شکل ۱۰-الف اندازه‌گیری شد. عدد ۰ تا ۱ در این شاخص بصورت برداری به سه بازه ۰ تا ۰/۳۳ (رده ۱)، ۰/۳۳ تا ۰/۶۶ (رده ۲) و ۰/۶۶ تا ۱ (رده ۳) تقسیم می‌شود (Keller and Pinter, 2002) که به ترتیب نمایانگر مناطق فعال، نیمه فعال و غیرفعال است. نتایج حاصل از محاسبه این شاخص در زیرحوضه‌های منطقه (جدول ۶ و شکل ۹-a) دو رده‌بندی با فعالیت بالا و متوسط را نشان می‌دهد. کمترین فعالیت زمین‌ساختی طبق شاخص Fd مربوط به حوضه شماره ۵ با عدد شاخص ۰/۴۵ (رده ۲) است؛ همچنین بیشترین فعالیت مربوط به

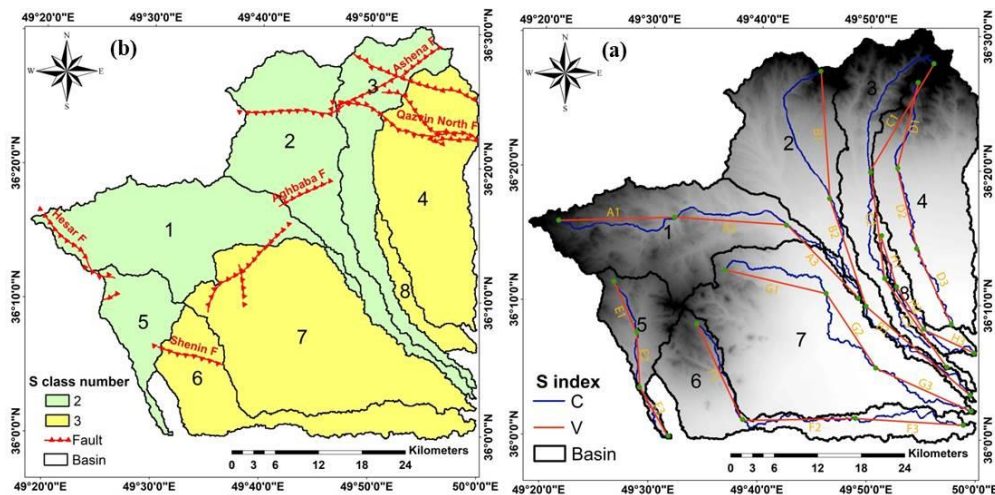


شکل ۹- (a) موقعیت زیرحوضه‌های منطقه بر اساس شاخص Fd و (b) نقشه رده‌بندی شاخص Fd در گستره مورد مطالعه.
 Fig. 9. (a) Location of the sub-basins based on the Fd index, and (b) Classification map of the Fd index in the study area.

جدول ۶- مقادیر شاخص Fd برای حوضه‌های محدوده مورد مطالعه.

Table 6. The results of the Fd index in the sub-basins of the area.

Category	Fd	Ls (km)	Lmfd (km)	Basin	Category	Fd	Ls (km)	Lmfd (km)	Basin
2	0.45	6.89	3.1	5	2	0.39	5.54	2.2	1
2	0.35	8.73	3.13	6	2	0.35	8.5	3.04	2
1	0.29	17.89	5.27	7	2	0.38	4.59	1.78	3
1	0.29	2.36	6.87	8	1	0.32	13.53	4.36	4



شکل ۱۰- (a) شاخص S در زیرحوضه‌های گستره مورد مطالعه و (b) نقشه رده‌بندی شاخص S در منطقه مورد مطالعه.
 Fig. 10. (a) S index in the sub-basins of the area, and (b) Classification map of the S index in the study area.

جدول ۷- مقادیر شاخص S برای حوضه‌های محدوده مورد مطالعه.

Table 7. The results of the S index in the sub-basins of the area.

Category	Average S	S	C (km)	V (km)	Basin	Category	Average S	S	C (km)	V (km)	Basin
2	1.11	0.9	8.8	6.1	5	2	1.16	1.16	18.4	15.86	1
		1.24	8.8	7				1.2	18.4	15.3	
		1.19	8.8	7.3				1.12	18.4	16.4	
3	1.51	1.2	22.9	19	6	2	1.16	1.09	22.3	20.4	2
		1.73	22.9	13.2				1.22	22.3	18.2	
		1.6	22.9	14.3				1.17	22.3	19	
3	1.69	1.45	22.1	15.2	7	2	1.16	1.02	17.9	17.5	3
		1.82	22.1	12.1				1.32	17.9	13.5	
		1.8	22.1	12.2				1.14	17.9	15.7	
3	1.57	1.3	11.5	8.8	8	3	1.53	1.42	21	14.7	4
		1.76	11.5	6.5				1.61	21	13	
		1.65	11.5	6.9				1.56	21	13.4	

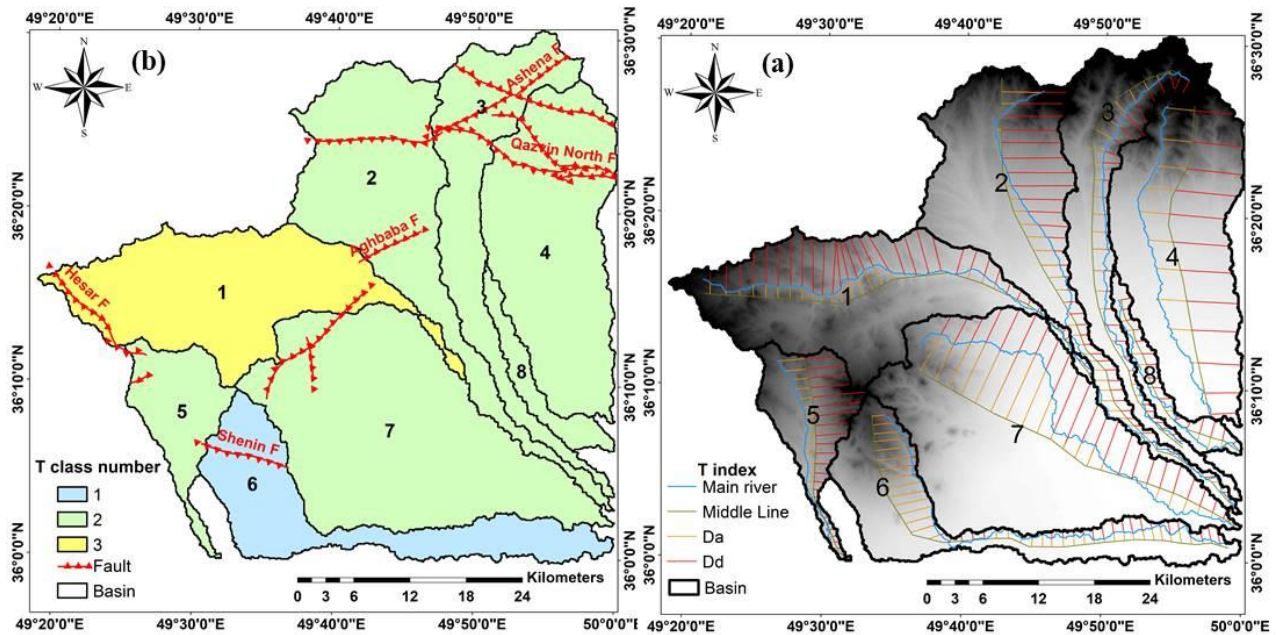
و ۶ به ترتیب در رده ۳ و ۱ و بقیه زیرحوضه‌ها در رده ۲ قرار می‌گیرند (شکل ۱۱-ب).

۴-۹- شاخص فعالیت نسبی زمین‌ساختی (Iat)

این شاخص در تجزیه و تحلیل شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی و جمع‌بندی نتایج آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد تا وضعیت نسبی فعالیت‌های زمین‌ساختی در منطقه مشخص گردد (El Hamdouni et. al., 2008). در این مطالعه برای بررسی شاخص فعالیت نسبی زمین‌ساختی گستره، از ۸ شاخص ریخت‌زمین‌ساختی در ۸ زیرحوضه استفاده شد و در هر شاخص زیرحوضه‌ها در سه رده فعال، با فعالیت متوسط و غیرفعال به ترتیب رده‌های ۱ تا ۳ تقسیم‌بندی شدند. در آخر برای تعیین شاخص فعالیت نسبی زمین‌ساختی از ۸ شاخص مطابق جدول ۱ میانگین گرفته شد (جدول ۹). El Hamdouni و همکاران (۲۰۰۸) بر اساس شاخص Iat حوضه‌ها را در ۴ رده طبقه‌بندی می‌کند. در رده ۱ حوضه دارای $1.5 < Iat < 1$ با فعالیت زمین‌ساختی خیلی بالا، در رده ۲ حوضه دارای $2 < Iat < 1.5$ و فعالیت زمین‌ساختی بالا، در رده ۳ حوضه دارای $2.5 < Iat < 2$ و فعالیت زمین‌ساختی متوسط و در رده ۴ حوضه دارای $3 < Iat < 2.5$ و فعالیت زمین‌ساختی کم است. رده‌بندی زیرحوضه‌های مورد مطالعه بر اساس این شاخص در شکل ۱۲ آمده است.

۴-۸- شاخص تقارن توپوگرافی معکوس (T)

شاخص T برای سنجش عدم تقارن حوضه نسبت به آبراهه اصلی استفاده می‌شود. برای محاسبه این شاخص اول خط میانی زیرحوضه رسم شد و سپس پارامترهای Da و Dd در فاصله‌های مساوی و در مقاطع مختلف در هر زیرحوضه (شکل ۱۱-ا) تعیین و با استفاده از فرمول جدول ۱ شاخص در هر مقطع محاسبه و میانگین آنها به عنوان شاخص در هر زیرحوضه در جدول ۸ آورده شد. مقدار این شاخص بین ۱ - ۰ متغیر است. در محاسبه این شاخص فرض بر این است که شیب طبقات در مهاجرت آبراهه اصلی رودخانه تأثیر اندکی داشته است. بنابراین مقدار عددی این شاخص برای حوضه‌های کاملاً متقارن برابر صفر می‌باشد، در حالی که با افزایش عدم تقارن توپوگرافی در یک حوضه، مقدار این شاخص نیز افزایش نشان می‌دهد و به عدد یک نزدیک‌تر می‌شود. Keller و Pinter (۲۰۰۲) بر اساس این شاخص، حوضه‌ها را در سه رده تقسیم‌بندی می‌کند. در رده ۱ مقادیر شاخص بیش از 0.4 و منطقه از لحاظ زمین‌ساخت فعال است؛ در رده ۲ مقادیر شاخص بین 0.4 تا 0.2 و منطقه از لحاظ زمین‌ساخت نیمه فعال است و در رده ۳ مقادیر شاخص کمتر از 0.2 و منطقه از لحاظ زمین‌ساخت غیرفعال می‌باشد. در منطقه مورد مطالعه زیرحوضه‌های ۱



شکل ۱۱- (a) محاسبه شاخص T در گستره مورد مطالعه و (b) نقشه رده‌بندی شاخص T در منطقه مورد مطالعه.
Fig. 11. (a) Calculation of the T index in the study area, and (b) T index classification map in the study area.

جدول ۸- مقادیر شاخص T برای حوضه‌های محدوده مورد مطالعه.

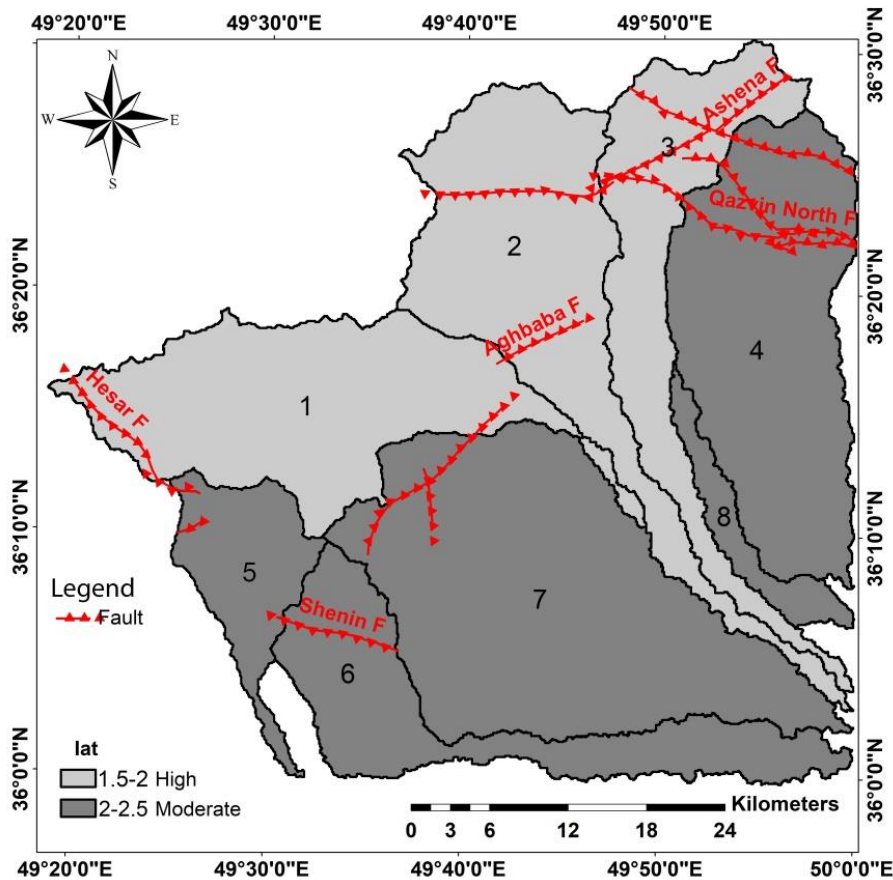
Table 8. The results of the T index in the sub-basins of the area.

Category	T	Dd (km)	Da (km)	Basin	Category	T	Dd (km)	Da (km)	Basin
2	0.41	3.4	1.4	5	3	0.21	5.2	1.1	1
1	0.60	2.8	1.7	6	2	0.41	3.6	1.5	2
2	0.40	17.2	7	7	2	0.40	2.5	1	3
2	0.42	1.4	0.6	8	2	0.40	13.5	5.5	4

جدول ۹- مقادیر شاخص Iat برای حوضه‌های محدوده مورد مطالعه.

Table 9. The results of the Iat index in the sub-basins of the area.

Iat class	S/n	T	S	Fd	Smf	Af	SL	Vf	Bs	Basins
2	1.87	3	2	2	1	2	2	1	2	1
2	1.75	2	2	2	1	2	2	1	2	2
2	1.5	2	2	2	1	1	2	1	1	3
3	2.37	2	3	1	2	3	3	2	3	4
3	2.37	2	2	2	2	3	3	2	3	5
3	2	1	3	2	2	1	3	3	1	6
3	2.25	2	3	1	2	1	3	3	3	7
3	2.28	2	3	1	-	3	3	3	1	8



شکل ۱۲- نقشه رده‌بندی شاخص فعالیت نسبی زمین‌ساختی در منطقه مورد مطالعه.

Fig. 12. Classification map of the Iat index in the study area.

۵- بحث

می‌دهند از خمش تاکستان دورتر هستند. این امر به خوبی نشان از فعال بودن گسل پی‌سنگی تاکستان-پل‌رود (شکل ۱-ا) دارد. مطالعات ریخت‌زمین‌ساختی قبلی (Mohammadpur et al., 2024) که در قسمت غربی خمش تاکستان انجام شده است نیز عملکرد گسل تاکستان-پل‌رود را به عنوان یک گسل فعال تأیید می‌کند. همچنین مقایسه گسل‌های دیگر منطقه با نتایج شاخص Iat (شکل ۱۲) می‌تواند نشان‌دهنده فعالیت گسل‌های مهم منطقه مانند گسل شمال قزوین، آشنا، آقابابا و حصار واقع در شمال و شمال غرب منطقه باشد. همچنین در زیرحوضه‌های بخش‌های شمال و شمال شرق (حوضه‌های ۲، ۳ و ۴) تراکم خطواره‌ها بالاتر از سایر زیرحوضه‌های منطقه است که می‌تواند سبب بالا رفتن فعالیت زمین‌ساختی شده باشد در حالی که در قسمت‌های جنوب و جنوب غرب (حوضه‌های ۵، ۶ و ۷) میزان تراکم گسلها کمتر است

نتایج حاصل از شاخص فعالیت نسبی زمین‌ساخت (شکل ۱۲) نشان می‌دهد که بخش‌های شمال و شمال شرق منطقه نسبت به بخش‌های جنوب و جنوب غرب منطقه از فعالیت زمین‌ساختی بالایی برخوردار است. به طوری که این شاخص در زیرحوضه‌های ۱، ۲ و ۳ فعالیت بالا، در زیرحوضه‌های ۴، ۶، ۷ و ۸ فعالیت متوسط و در زیرحوضه ۵ فعالیت کم را نشان می‌دهد. لذا می‌توان زیرحوضه‌های منطقه را از نظر فعالیت زمین‌ساختی در سه رده فعال، نسبتاً فعال و کم فعال تقسیم‌بندی کرد. مقایسه شکل‌های ۱-ا با یافته‌های حاصل از محاسبات شاخص Iat (جدول ۹ و شکل ۱۲) نشان می‌دهد زیرحوضه‌های ۱، ۲ و ۳ در مجاورت خمش تاکستان در دامنه جنوبی البرز قرار دارند و سایر زیرحوضه‌ها (زیرحوضه‌های ۴، ۵، ۶ و ۷) که فعالیت متوسطی از خود نشان

Af نسبت به تاب برداشتی عمود بر روند کانال اصلی رودخانه، حساس است. بیشترین مقدار این شاخص در زیرحوضه‌های ۳، ۶ و ۷ و کمترین فعالیت مربوط به زیرحوضه‌های ۴، ۵ و ۸ می‌باشد. در شاخص Smf، حوضه‌های ۲، ۱ و ۳ بیشترین مقدار فعالیت را نشان می‌دهند که منطبق با مناطق با فعالیت بالا در شاخص Iat هستند. در شاخص Fd زیرحوضه‌های ۴، ۷ و ۸ دارای فعالیت شدید شناخته شده‌اند. می‌توان فعالیت زمین‌ساختی گسل شمال قزوین در زیرحوضه ۴ و ایجاد خطوط پیشانی مستقیم که هنوز فرصت فرسایش پیدا نکرده‌اند را با فعال بودن این شاخص مرتبط دانست. همچنین در بخش شمال غرب زیرحوضه ۷ نیز می‌توان به فعال بودن ادامه گسل آقابابا پی برد. این شاخص در سایر زیرحوضه‌ها فعالیت متوسط را نشان می‌دهد. در زیرحوضه‌های ۱، ۲، ۳، ۵، ۸ و ۹ شاخص S دارای مقادیر ۱/۱۱ تا ۱/۱۶ بوده که نشان‌دهنده به تعادل نرسیدن و نقش نیروهای درونی در تغییرات زمین‌ریختی در این زیرحوضه‌ها می‌باشد. این موضوع می‌تواند با فعالیت گسل-های شمال قزوین، آشنا، آقابابا و حصار که با فعالیت خود و ایجاد بالآمدگی و شیب زیاد هنوز فرصت فرسایش و رسوبگذاری را به رودخانه نداده‌اند باشد. در زیرحوضه‌های ۴، ۶، ۷ و ۸ که بخش اعظم آنها در بخش منتهی به دشت قرار دارد، با کاهش شیب و کاهش اثر فعالیت گسل‌ها مناطق با فعالیت کم را شاهد هستیم. در شاخص T بیشتر زیرحوضه‌های منطقه دارای انحراف از خط میانی زیرحوضه و خط آبریز هستند و در رده ۲ و ۳ مناطق با فعالیت متوسط محسوب می‌شوند. به طور کلی نتایج مطالعات نشان می‌دهد که سه زیرحوضه میانی (زیرحوضه‌های ۱، ۲ و ۳) دارای فعالیت زیاد نسبت به سایر زیرحوضه‌ها هستند (جدول ۹). این زیرحوضه‌ها بیشتر مناطق شمال و شمال غرب که مجاور خمش تاکستان در کوهزاد البرز است را دربر می‌گیرد (شکل ۱۲) و زیرحوضه‌های حاشیه این خمش (زیرحوضه‌های ۴، ۸، ۷ و ۶) دارای فعالیت متوسط هستند. Mohammadpur و همکاران (۲۰۲۴) نیز با تعیین شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی در زیرحوضه‌های بخش غرب خمش تاکستان نشان داد که زیرحوضه‌های منطبق بر این خمش در کوهزاد البرز دارای فعالیت بالاتری نسبت به نواحی مجاور هستند. ایشان علت این امر را بیشتر ناشی

و این موضوع سبب فعالیت زمین‌ساختی کمتر این بخش‌ها شده است. همچنین وجود گسل حصار در غرب منطقه می‌تواند در بالا رفتن مقدار این شاخص در زیرحوضه ۱ تاثیرگذار باشد. علاوه بر گسل و تاثیر آن در تغییر شیب توپوگرافی کانال بر اثر بالآمدگی زمین‌ساختی، تغییر سنگ‌شناسی و مقاومت سنگ در برابر فرسایش نیز می‌تواند با تغییر دادن شیب توپوگرافی بر روی مقادیر شاخص‌های مورد استفاده در حوضه‌های مختلف، اثرگذار باشد. جهت بررسی این موضوع در منطقه مورد مطالعه با رسم نمودار مقایسه شاخص SL و سنگ‌شناسی در زیرحوضه‌های منطقه در هشت نیمرخ توپوگرافی طولی استخراج شده (شکل ۴)، و بررسی ناهنجاری‌های مشاهده شده در نمودار SL، فعالیت زمین‌ساختی منطقه بهتر استنباط می‌شود. ناهنجاری ناشی از افزایش مقدار SL می‌تواند در اثر تغییر جنس بستر که با افزایش مقاومت سنگ در برابر فرسایش همراه است، و یا تغییر شیب توپوگرافی در اثر فرآیندهای ساختاری و بالآمدگی ناشی از گسل باشد. هر چند ممکن است با وجود گسل مقدار SL تغییری نکند چرا که به علت قدیمی بودن گسل، آبراهه ناهنجاری‌های توپوگرافی را از بین می‌برد. با توجه به تشابه جنس سنگها در طول بستر آبراهه‌ها و عدم تنوع مقاومت سنگ‌های منطقه، عامل تاثیرگذار اصلی در تغییرات شاخص زیرحوضه‌ها را می‌توان ناشی از فعالیت زمین‌ساختی و گسلها دانست. در زیرحوضه‌های ۱، ۲ و ۳ مقدار شاخص SL بالاتر است و در نیمرخ زیرحوضه‌های ۲ و ۳ انطباق پیک‌های ناهنجاری با گسل‌های اصلی منطقه به ویژه گسل شمال قزوین و گسل آقابابا مشهود است. این خود تایید کننده نتایج حاصل از شاخص Iat است. شاخص Vf بیانگر بیشترین فعالیت در زیرحوضه‌های ۱، ۲ و ۳ است. این موضوع می‌تواند با فعالیت زمین‌ساختی گسل‌های شمال قزوین، آقابابا، حصار و آشنا در بخش شمال و شمال شرق منطقه مرتبط باشد که سبب ایجاد پیشانی‌های بلند در طرفین دره‌های جوان ۷ شکل شده است. در مقابل، کمترین فعالیت مربوط به زیرحوضه‌های شماره ۶، ۷ و ۸ می‌باشد که نشان می‌دهد این زیرحوضه‌ها از لحاظ فعالیت زمین‌ساختی به تعادل رسیده‌اند. نتایج شاخص شکل حوضه (BS) حاکی از بیشترین فعالیت در زیرحوضه‌های کشیده ۳، ۶ و ۸ است. همچنین کمترین فعالیت مربوط به زیرحوضه‌های ۴، ۵ و ۷ می‌باشد. مقدار شاخص

منطقه به علت تشابه جنس سنگها در طول بستر رودخانه، عامل اصلی تغییرات شاخص در زیرحوضه‌های منطقه را می‌توان مربوط به فعالیت‌های زمین‌ساختی دانست.

- نتایج شاخص فعالیت نسبی زمین‌ساختی که خود برآوردی از نتایج هشت شاخص اندازه‌گیری شده در زیرحوضه‌های منطقه است، در قسمت‌های میانی منطقه (زیرحوضه‌های ۱، ۲ و ۳ واقع در قسمت شرقی خمش تاکستان) فعالیت زمین‌ساختی بالا را نشان می‌دهد. در حالی که در قسمت‌های حاشیه‌ای و دور از خمیدگی (زیرحوضه‌های شرق و جنوب منطقه) فعالیت زمین‌ساختی متوسط تعیین گردید.

- میزان تراکم بالای گسل‌ها در زیرحوضه‌های میانی ۱، ۲ و ۳ نسبت به دیگر زیرحوضه‌ها، سبب بالا رفتن فعالیت زمین‌ساختی در شمال و شمال غرب منطقه شده است که خود نشان می‌دهد گسل‌های مهم منطقه شامل گسل‌های شمال قزوین، آشنا، آقابابا و حصار از جمله گسل‌های فعال هستند. همچنین مجاورت با گسل فعال پی‌سنگی تاکستان-پلرود که عامل خمش کوهزاد البرز تحلیل می‌شود نیز می‌تواند سبب بالا رفتن فعالیت زمین‌ساختی در این مناطق گردد. گسل‌های دیگر مانند گسل شنین به نسبت از فعالیت کمتری برخوردار است.

از فعال بودن پهنه گسله پی‌سنگی تاکستان-پلرود با روند شمال-شرق (Ehteshami-Moinabadi, 2016) می‌داند که سبب خمش کوهزاد البرز در این منطقه شده است. Ghafelehbashi (۲۰۲۱) نیز با تحلیل هندسی-جنبشی گسل شمال قزوین در شرق منطقه مورد مطالعه که بخشی از آن در زیرحوضه‌های ۳ و ۴ ادامه دارد نشان داد که پهنه گسلی شمال قزوین نیز یکی از پهنه‌های گسلی فعال منطقه است که خود تایید کننده نتایج شاخص Iat این زیرحوضه‌ها است. همانند مطالعه حاضر، در سایر نقاط جهان نیز مانند Anoop و همکاران (۲۰۱۲) با محاسبه و تجزیه و تحلیل شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی نشان دادند که زمین‌ساخت فعال از عوامل مهم حاکم بر چشم‌انداز دره اسپیتی در شمال غرب هیمالیا است و تغییرات توپوگرافی آن در ارتباط با زمین‌ساخت فعال و سایر عوامل مؤثر است. همچنین Giaconia و همکاران (۲۰۱۲) نیز از شاخص‌های زمین‌ریخت‌شناسی استنباط کردند که فعالیت‌های زمین‌ساختی مؤثر بر تغییر شکل آبراه‌ها در دامنه‌های سیرا در جنوب شرقی اسپانیا مربوط به دو پهنه گسلی است.

۶- نتیجه‌گیری

- عوامل مهم کنترل‌کننده شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی در زیرحوضه‌های زهکشی که سبب تغییر در شیب توپوگرافی کانال آبراهه می‌شوند، شامل تغییرات جنس سنگ بستر و وجود عناصر ساختاری مانند گسل‌های فعال است. با توجه به عدم تنوع مقاومت سنگ‌های

مراجع

- Anoop, A., Prasad, S., Basavaiah, N., Brauer, A., Shahzad, F., Deenadayalan, K., 2012. Tectonic versus climate influence on landscape evolution: A case study from the upper Spiti valley, NW Himalaya. *Geomorphology* 145, 32-44. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.028>
- 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 September 1977, pp. 115-138.
- Burbank, D.W., Anderson, R.S., 2001. *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science, 1st edition, Australia, p. 160.
- Ehteshami-Moinabadi, M., 2016. Possible Basement Transverse Faults in the Western Alborz, Northern Iran. *Journal of Sciences* 27(4), 329-342.
- El Hamdouni, R.E., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacon, J., Keller, E.A., 2008. Assessment of Relative Active Tectonic, South West Border of the Sierra Nevada (Southern Spain). *Geomorphology* 96, 150-173. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.004>

- Ghafelehbash, M., 2021. Geometric and kinematic analysis of North Qazvin fault zone. MSc. thesis, Imam Khomeini International University.
- Giaconia, F., Booth-Rea, G., Martínez-Martínez, J.M., Azanón, J.M., Pérez-Pena, J.V., Pérez-Romero, J., Villegas, I., 2012. Geomorphic Evidence of Active Tectonics in the Sierra Alhamilla (Eas tern Betics, SE Spain). *Geomorphology* 145, 90-106. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.043>
- Haghipour, A., Aghanabati, A., 1985. Geological Map of Iran (1:2500000). Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Holbrook, J., Schumm, S.A., 1999. Geomorphic and Sedimentary Response of Rivers to Tectonic Deformation: A Brief Review and Critique of a Tool for Recognizing Subtle Epeirogenic Deformation in Modern and Ancient Settings. *Tectonophysics* 305, 287- 306. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00011-6)
- Hoseini, M., 2016. Geological map of Abhar (1:100000). Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Keller, E.A., Pinter, N., 2002. Active Tectonics, Earthquakes, Uplift and Landscape. 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, p. 362.
- Mirtohidi, A., Mohamadi, A., 2000. Geological map of Takestan (1:100000). Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Mohammadpur, F., Davoodi, Z., Sadeghi, S., Razavi-Pash, R., 2024. Assessment of tectonic activity using morphotectonic indices in Abhar-Lushan area, south of Alborz. *Journal of Tectonics* 23, 75-92. <http://doi.org/10.22077/jt.2023.6557.1158>
- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to the geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, p. 109.
- 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, pp. 183-207.
- Seeber, L., Gornitz, V., 1983. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. *Tectonophysics* 92, 335-467. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90201-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90201-9)
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52, 1229-1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Taherkhani, B., 2010. Morphotectonics and activity of the North Qazvin fault. MSc. thesis, Shahid Beheshti University.
- 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](https://doi.org/10.1016/0169-555X(88)90016-5)