



# فصلنامه زمین ساخت

پاییز ۱۴۰۱، سال ششم، شماره ۲۳



10.22077/JT.2023.6593.1161

## بررسی نقش زمین ساخت جنبا در شکل گیری حوضه بسته گراغه، شهرستان زاهدان

افسانه بیجارزهی<sup>۱</sup>، عبدالرضا پرتابیان<sup>۲\*</sup>، محسن جامی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد تکنیک، دانشکده علوم، گروه زمین شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- دانشیار تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳- استادیار تکنیک، دانشکده صنعت و معدن، دانشگاه سیستان و بلوچستان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۱  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰

### چکیده:

حوضه آبریز بسته گراغه در قسمت میانی پهنه زمین درز سیستان و غرب و شمال غرب شهر زاهدان قرار گرفته است. وجود یک حوضه بسته وسیع و فرو افتاده که توسط گسل های جنبا احاطه شده است در پهنه برشی- فشارشی پهنه زمین درز سیستان می تواند فرصت مناسبی را برای مطالعه زمین ساخت جنبا در این گستره را فراهم کند. در این راستا به بررسی ارتباط بین ساختارهای زمین ساختی و نحوه تشکیل و تکامل حوضه بسته گراغه به کمک محاسبه شاخص های ریخت زمین ساختی و شواهد صحرایی پرداخته شده است. شاخص های مورد مطالعه عبارت اند از شاخص شکل حوضه (BS)، شاخص انتگرال فراز نما (HI)، شاخص نسبت بین پهنای کف دره به ارتفاع آن (VF)، شاخص میانگین شیب محوری کانال (MASC)، شاخص عدم تقارن حوضه آبریز (AF)، پیچ و خم پیشانی کوهستان (SMF) و ارزیابی نسبی فعالیت زمین ساختی (Iat). شاخص های ریخت زمین ساختی نشان دهنده فعالیت بالا و عدم تقارن حوضه است. پارامترهای به دست آمده نشان دهنده فعالیت بالای زیر حوضه های مجاور گسل های مرزی حوضه اصلی است به صورتی که زیر حوضه های با فعالیت پایین اغلب در مرکز و با فاصله از گسل های اصلی قرار گرفته اند. این گسل ها با تبعیت از شکل حوضه از شمال و شمال غرب به یکدیگر نزدیک و در جنوب و جنوب شرقی از هم فاصله می گیرند به صورتی که گسل های محدوده کننده حوضه با حرکت به سمت جنوب دچار یک چرخش پاد ساعتگرد شده و در نتیجه آن باعث ایجاد یک پهنه کششی فرو افتاده در این پهنه فشارشی شده است.

**کلمات کلیدی:** شاخص های ریخت زمین ساختی، پهنه زمین درز سیستان، تراکشن، زمین ساخت جنبا، حوضه گراغه

\* ایمیل: partabian\_reza@science.usb.ac.ir

تلفن تماس: ۰۹۱۷۷۸۲۲۶۱۳



## Role of Active tectonics on the formation of Garaghe closed basin, Zahedan

Afsaneh Bijarzahi<sup>1</sup>, Abdolreza Partabian<sup>2\*</sup>, Mohsen Jami<sup>3</sup>

Master's degree in tectonics, Department of Geology, college of science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Associate professor in Tectonics, Department of Geology, college of science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Assistant Professor in Tectonics, Faculty of Industry & Mining (Khash). University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

### Abstract:

Garagheh closed basin is located in the west and northwest of Zahedan city and in the middle of Sistan Suture Zone. The presence of this basin with a large area that located in a shear-compressional Sistan Suture Zone that surrounded by numerous faults can be a subject for study of active tectonics in this area. Based on field study and the relationship between tectonic structures, the development of this basin has been investigated. We applied the geomorphic indices such as mountain-front sinuosity (SMF), asymmetry factor of drainage basin (AF), hypsometric integral (HI), basin shape (BS), mean axial slope of channel (MASC), valley floor width – valley height ratio (VF), relative assessment of tectonic activity (Iat) to evaluate tectonic activity of 378 sub-basins. The results suggest that the main basin is active and asymmetric but the activity of sub-basins are different throughout the study area. High active sub-basins are mainly located around the main basin and associated with active faults but less active basins are mainly located in the center. The relationship between shape of main basin and active faults shows, depending on the shape of the basin, the faults are close to each other in the north and northwest and far apart in the south and southeast. These results suggest a counter clockwise rotation of faults caused a tectonic rotation that creates a transtensional deformation that form a closed Garagheh Basin.

**Keywords:** Active Tectonic, Garaghe Basin, Morphotectonic indices, Sistan Suture Zone, Transtension

\*Email: partabian\_reza@science.usb.ac.ir

Tel: +989177822613

## ۱- مقدمه

است (Stöcklin, 1977). گسل فعال زاهدان از جمله گسل‌های مرز غربی پهنه زمین درز می باشد. باتوجه به موقعیت این حوضه، و وجود گسل‌های امتداد لغز فعال مانند گسل‌های نه و زاهدان در مرزهای آن می توان پتانسیل فعالیت زمین‌ساختی بالایی را برای آن متصور بود، لذا نقش ساختارهای موجود در ایجاد این حوضه و تکامل و توسعه شبکه زهکشی می تواند پررنگ باشد. بدین منظور به بررسی ارتباط بین ساختارهای موجود و نحوه تشکیل و تکامل حوضه مذکور به کمک مشاهدات صحرایی و محاسبه شاخص‌های ریخت زمین ساختی پرداخته شده است.

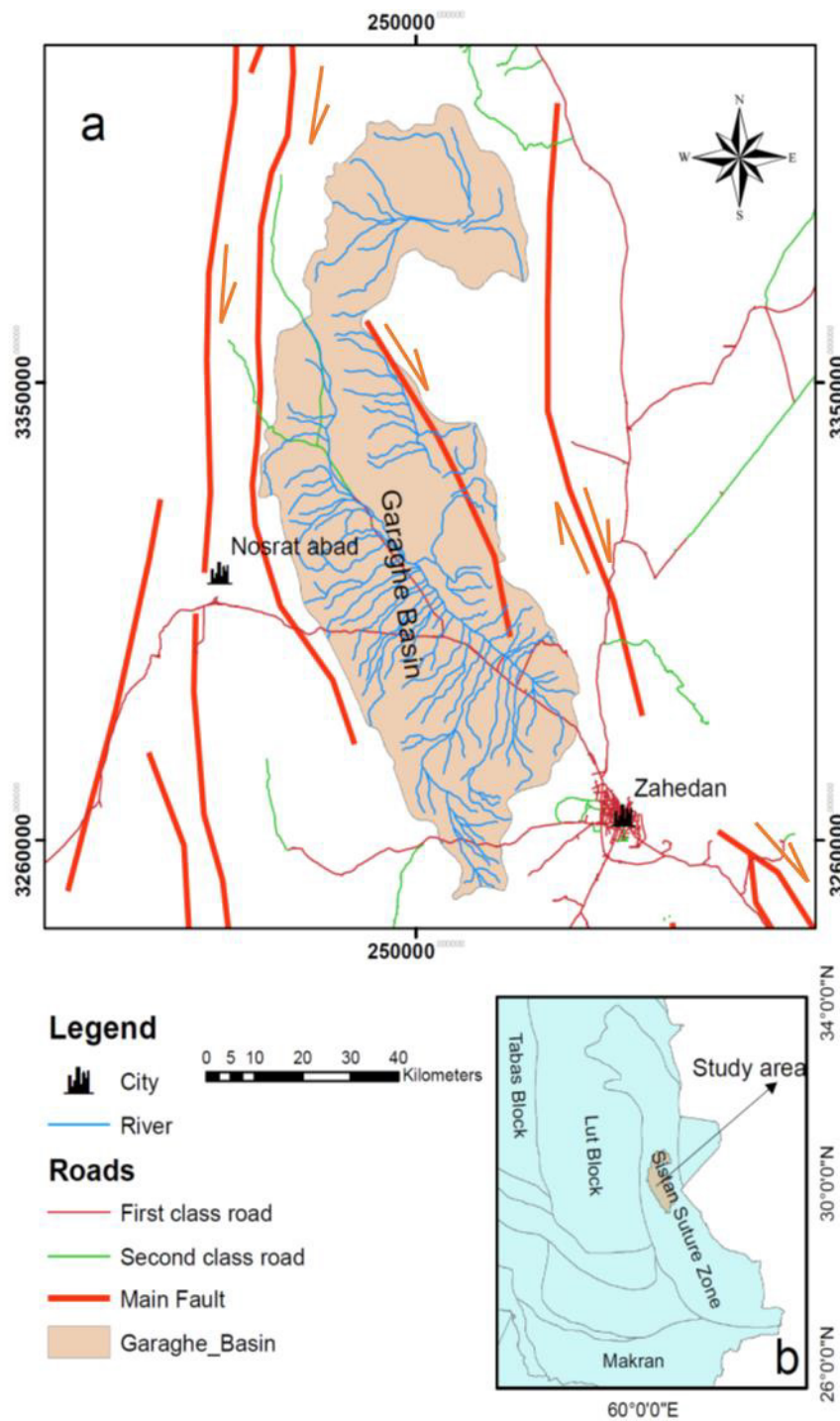
## ۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

حد فاصل گسل‌های نه‌بندان (در غرب) و گسل هریرود (در شرق)، در پهنه‌ای به وسعت ۸۰۰ کیلومتر طول و ۲۰۰ کیلومتر عرض، نهشته‌های ضخیم رسوبات آواری (فیلیش) وجود دارد که بر روی یک پی‌سنگ افیولیتی در ارتباط با پوسته‌های اقیانوسی قرار گرفته اند. این پهنه مراحل تکامل خود را از پوسته اقیانوسی تا قاره‌ای در طول زمان پشت سر گذاشته و یکی از شاخه‌های تیتیس جوان است که از آن با عنوان همچون پهنه فلیش (Eftekharnjad, 1981)، کوه‌های خاور ایران (Alavi, 1981) و پهنه زمین‌درز سیستان Tir-ul et al., 1983 نام برده می شود.

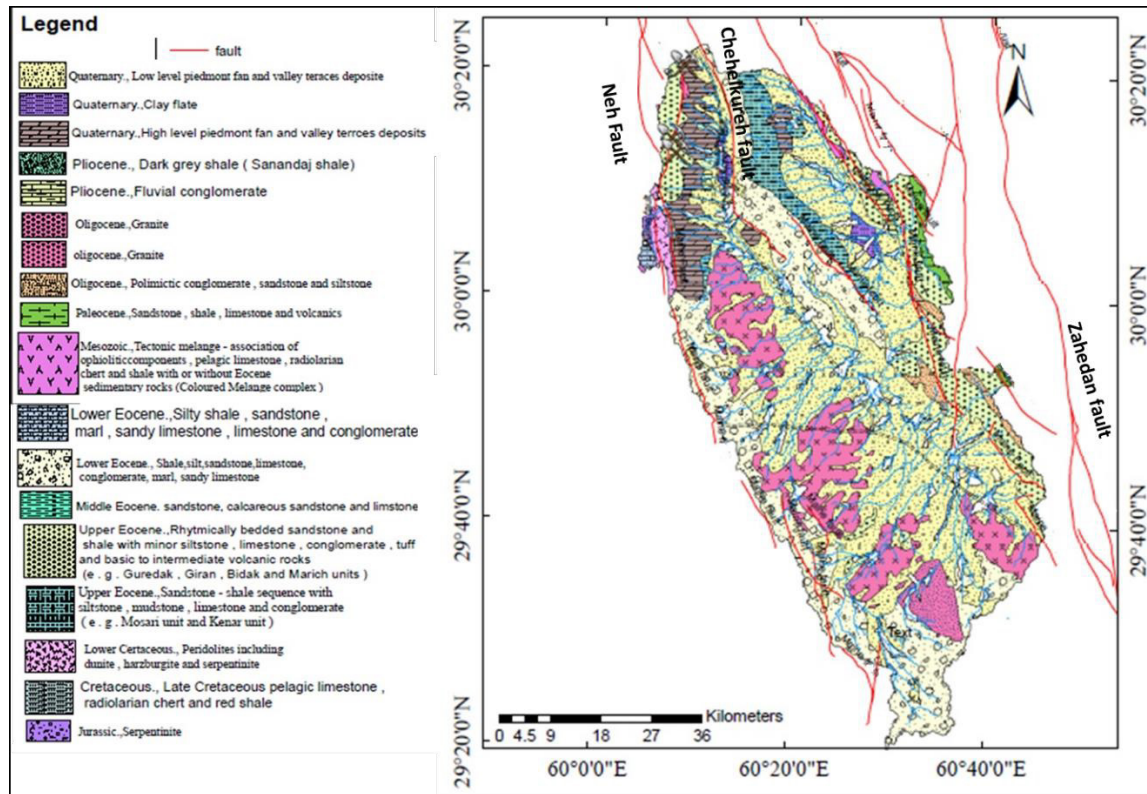
حوضه بسته گراغه در قسمت میانی پهنه زمین درز سیستان و در محلی که روند این پهنه به همراه گسل‌های مرکزی آن دچار تغییر می شود قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه توسط گسل‌ها و ارتفاعات متاثر از آنها احاطه شده است و با ایجاد یک سطح مبنای محلی آب‌های سطحی را به سمت کفه‌های نمکی و گلی درون خود (قسمت شرقی) هدایت می کند. از لحاظ زمین‌شناسی سنگ‌های مزوزویک تا رسوبات عهد حاضر به شرح زیر این محدوده را پوشش می دهند (Eftekharnjad, 1981) (شکل ۲).

شکل‌گیری و تکامل حوضه‌های آبریز در ارتباط تنگاتنگ با عوامل زمین‌ساختی و زمین‌ریختی هستند. شکل‌گیری و تکامل حوضه‌های آبریز در محیط‌های زمین‌ساختی جنبه، تحت تاثیر عوامل ساختاری و تکامل زمین‌ساختی این مناطق قرار دارد. عوارض زمین‌ساختی، با ایجاد توپوگرافی منجر به برهم زدن تعادل و ایجاد رقابت بین فرایندهای زمین‌ساختی و فرسایشی می شوند. برهمکنش این دو فرایند در طول زمان باعث به وجود آمدن چشم اندازهای زمین‌شناسی متفاوتی می شود. بنابراین بررسی حوضه‌های آبریز در محیط‌های زمین‌ساختی جنبه می تواند راهی مناسب جهت پی بردن به مراحل تغییر و تکامل آن‌ها و شناخت پدیده‌های زمین‌ساختی باشد (Champel et al., 2002; Partabian et al., 2016; Kashani et al., 2019). عوامل مختلفی در تشکیل و توسعه ی حوضه‌های آبریز در محیط‌های متفاوت نقش دارند که از جمله آن‌ها می توان به عوامل توپوگرافی، سنگ‌شناختی و ساختاری اشاره کرد (Silva et al., 2003).

حوضه بسته گراغه با مساحت ۳۹۷۵ کیلومتر مربع واقع در غرب و شمال غرب زاهدان و طول جغرافیایی ۵۹/۴۶ تا ۶۱/۰۴ و عرض جغرافیایی ۲۹/۱۳ تا ۵۱/۳۰، تقریباً در قسمت میانی پهنه زمین درز سیستان واقع شده است (شکل ۱). پهنه زمین درز سیستان در شرق ایران یکی از مهمترین شاخه‌های تیتیس جوان می باشد که سرگذشت پیچیده‌ای از پوسته اقیانوسی تا قاره‌ای را پشت سر گذاشته است (Tirul et al., 1983). از مهمترین گسل‌های فعال شرق این پهنه می توان سیستم گسل نه‌بندان (نه) را نام برد که از شمال نه‌بندان تا ناحیه نصرت آباد ادامه دارد. گسل نصرت آباد در واقع پایانه جنوبی گسل نه‌بندان است که با روند شمالی- جنوبی از شمال بخش نصرت آباد تا شمال ایرانشهر و شرق بزمان به طول ۲۵۰ کیلومتر امتداد یافته و در این محدوده دچار چرخش به سمت جنوب شرقی شده



شکل ۱. (a) حوضه بسته گراغه و شبکه زهکشی و گسل‌های اصلی محدود کننده آن (b) موقعیت حوضه گراغه در پهنه زمین درز سیستان

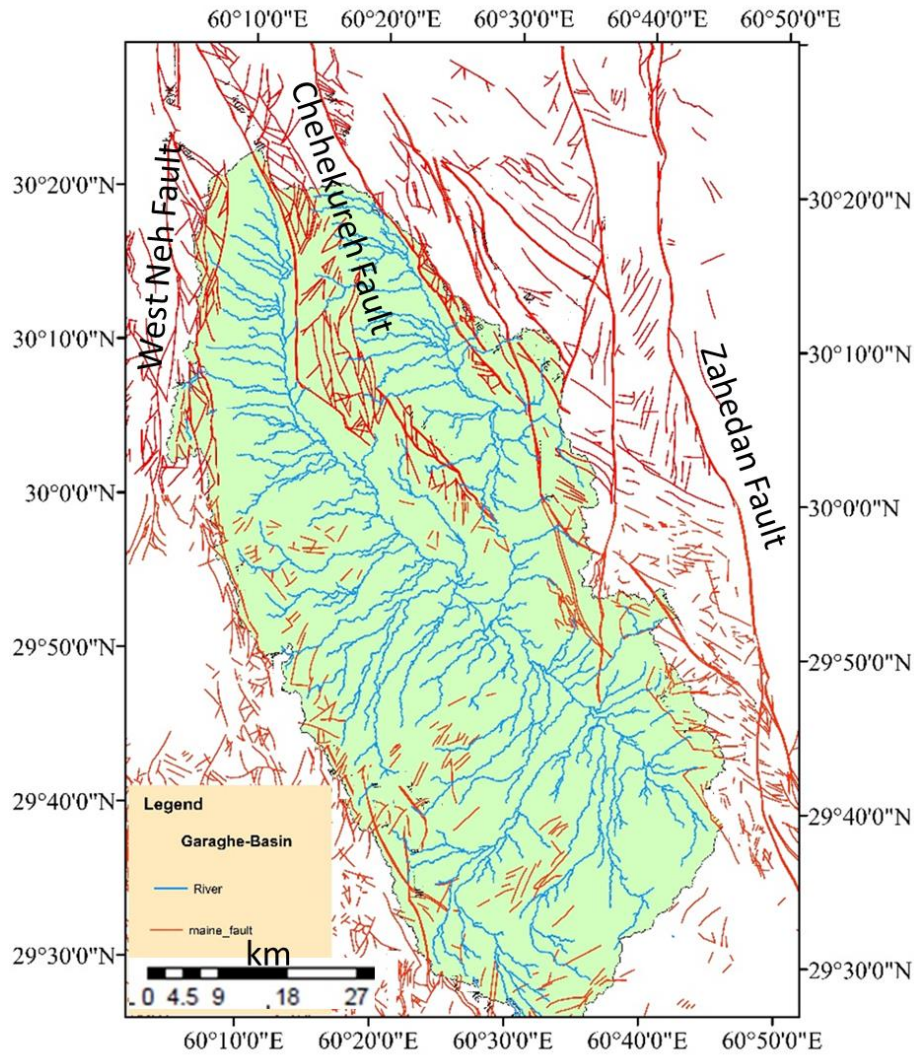


شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی حوضه بسته گراغه

سیستم گسلی منطقه مورد مطالعه عمدتاً تحت تاثیر گسل‌های اصلی امتداد لغز راست‌بر زاهدان با امتداد شمالی جنوبی و شمال غرب- جنوب شرق در شرق و سیستم گسلی نه غربی در غرب با امتداد شمالی- جنوبی می‌باشد. گسل نصرت آباد در امتداد گسل نه قرار گرفته و یک گسل امتداد لغز راست‌بر با مولفه فشارشی با امتداد شمال- جنوب تا شمال غربی- جنوب شرقی می‌باشد. گسل چهل کوره یک گسل امتداد لغز راست‌بر با امتداد شمال- جنوب تا شمال غربی- جنوب شرقی در قسمت شمالی منطقه واقع شده است. علاوه بر این گسل‌ها گسل‌های فرعی مابین این گسل‌ها عمدتاً با روند شمالی- جنوبی و شمال غرب- جنوب شرق منطقه مورد مطالعه را تحت تاثیر قرار داده‌اند (شکل ۳). گسل‌ها از شمال و شمال غرب حوضه به یکدیگر نزدیک و در قسمت جنوب و جنوب شرقی از هم فاصله گرفته و تقریباً مرز حوضه را محدود می‌کنند.

نهشته‌های مزوزوئیک در منطقه مورد مطالعه شامل ملائز تکتونیک، سنگ آهک پلاژیک، چرت و رادیولاریت می‌باشند. سنگ آهک پلاژیک، رادیولاریت، چرت و شیل قرمز، پریدوتیت، دونیت، هارزبورژیت و سرپانتینیت متعلق به کرتاسه و اواخر کرتاسه در این منطقه رخنمون دارند. نهشته‌های ائوسن با تقسیم بندی به دو صورت زیرین و فوقانی به طور کلی شامل توالی ماسه سنگ، شیل اسلیتی، کنگلومرا، سنگ آهک ماسه ای، مارن، گل سنگ، توف و سنگهای آتشفشانی می‌شود. نهشته های الیگوسن محدوده مورد مطالعه شامل کنگلومرای پلی میکتیک، سیلتستون، ماسه سنگ و گرانیت می‌باشد. کنگلومرای رودخانه ایی و شیل خاکستری تیره با سن پلیوسن رخنمون دارند. شامل دو دسته تراسهای دریایی قدیمی مرتفع و تراس های جدید کم ارتفاع و شامل کفه های نمکی و گلی در شرق حوضه اصلی نهشته های کواترنری را شامل می‌شوند.

### گسل‌های منطقه مورد مطالعه



شکل ۳. نقشه گسل های اصلی و فرعی منطقه مورد مطالعه

### ۳- مواد و روش ها

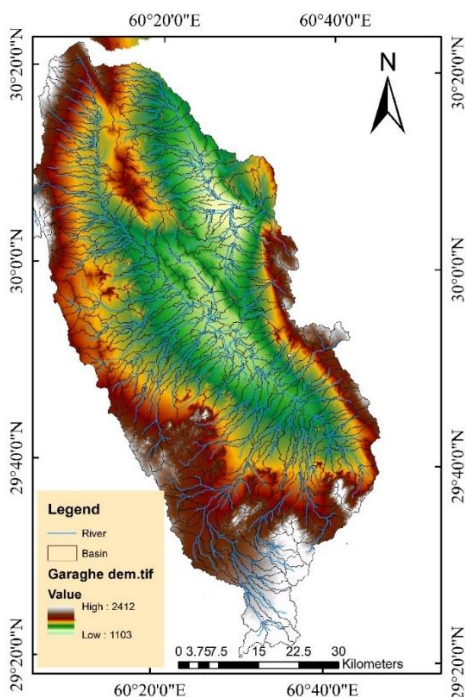
در این پژوهش از روش های ریخت زمین ساختی برای کاوش و بررسی زمین ساخت جنباد در منطقه ی مورد مطالعه استفاده شده است. از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر (DEM)، مربوط به تصاویر ALOS POLSAR سازمان زمین شناسی ایالات متحده<sup>۱</sup> برای محاسبه پارامترهای ریخت زمین ساختی استفاده شده است. بدین منظور ابتدا مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر در محیط ArcMap 10.3 پردازش و پس از آن وارد محیط نرم افزاری TecDEM جهت استخراج زیر حوضه ها و آبراهه ها گردید. این نرم افزار بر پایه MATLAB بنا شده که Shahzad and Gloaguen (2011) ارائه و کد نویسی شده است. با استفاده از این نرم افزار در ابتدا شبکه آبراهه ها استخراج و براساس رتبه دسته بندی

شدند. در مرحله بعد آبراهه به دست آمده از نرم افزار TecDEM به محیط ArcMap منتقل و با استفاده از ابزار Archydro، در این نرم افزار، حوضه ی بسته گراغه به ۳۷۸ زیر حوضه با رده ۳ تقسیم گردید (شکل ۴).

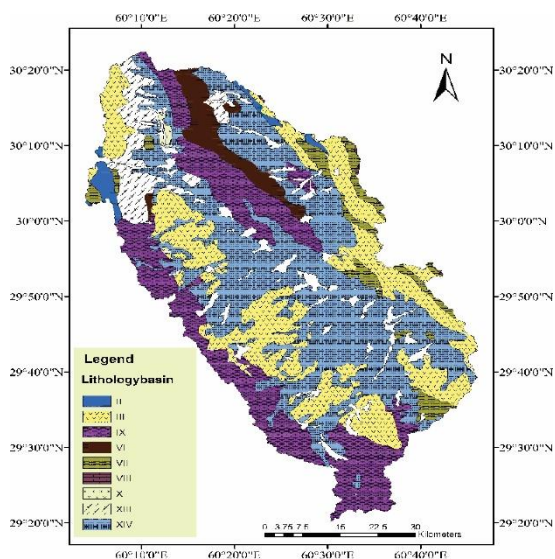
#### ۳-۱- درجه سختی سنگ ها

با توجه به محاسبه شاخص های ریخت زمین ساختی و توجه به این واقعیت که این شاخص ها اثر متقابل زمین ساخت و فرسایش را بازگو می کنند باید به نقش مقاومت سنگ های منطقه در مقابل فرسایش و همچنین نقش گسل ها در فعالیت زمین ساختی آنها پرداخته شود. سنگ های متفاوت دارای رفتاری متفاوتی در برابر هوازدگی و فرسایش می باشند. عمدتاً این رفتارها به ویژگی های ذاتی سنگ وابسته است که شامل خصوصیات اجزا تشکیل دهنده (سیمان، اندازه، بافت، نحوه قرار گیری، جورشدگی و پیوستگی)

<sup>۱</sup> USGS



شکل ۴. نقشه زیر حوضه‌ها و آبراهه‌های بدست آمده از تصویر DEM در منطقه مورد مطالعه



شکل ۵. نقشه طبقه‌بندی سختی منطقه مورد مطالعه.

### ۳-۲-۲- شاخص عدم تقارن حوضه (Af)

این شاخص معرف نسبت کج شدگی جانبی حوضه به مسیر اصلی است که تحت تاثیر نیروهای زمین‌ساختی ایجاد می‌شود (Guarnieri and Pirota 2008). به عبارت دیگر شاخص عدم تقارن معیاری برای تشخیص وجود کج شدگی ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی در حوضه زهکشی می‌باشد. این شاخص از رابطه زیر بدست می‌آید (El-Hamdouni et al., 2008).

و کانی شناسی می‌شود و بخشی به توده‌ی سنگ مانند ناپیوستگی وابسته است (Selby, 1980). در رابطه با حساسیت مجموعه‌های سنگی به فرسایش، معیار مشخصی در منابع علمی معرفی نشده است ولی روش‌های مختلفی برای مقاصد مختلف جهت طبقه‌بندی سنگ‌ها مختلف ارائه شده است (Deere and Mill-er, 1996; Broch and Franklin, 1972). به طور مثال یکی از روش‌هایی که سختی خاک و سنگ را در برابر فرسایش طبقه‌بندی کرده است از جدول سختی و فائیان (۱۳۷۱) نام برد که بر اساس آن منطقه مورد مطالعه به ۹ رده تقسیم بندی گردید که رده ۲ سختترین و رده ۱۰ نرم‌ترین هستند (شکل ۵).

### ۳-۲- شاخص‌های مورفومتریک

به کمک تصاویر DEM و آبراهه‌های استخراج شده شاخص‌های مورفومتری را برای زیر حوضه‌های منطقه مورد مطالعه به شرح زیر محاسبه گردید:

۳-۲-۱- شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان (SMF)  
پیچ و خم پیشانی کوه‌ها معیاری است برای انعکاس توازن بین نیروهای فرسایشی که تمایل به ایجاد یک ساختار سینوسیته دارند و زمین‌ساخت که سعی می‌کند پیشانی کوهستان را به صورت یک خط مستقیم در بیاورد، می‌باشد. این شاخص با رابطه زیر تعریف می‌شود (Keller and Pinter 2002).

$$SMF = Lmf/Ls$$

در این رابطه:

Lmf طول جبهه کوهستانی که در محل برخورد کوهستان و دشت قابل اندازه‌گیری است.

Ls عبارت است از طول مستقیم جبهه کوهستان.

در ابتدا با استفاده از مدل رقمی ارتفاعی ۱۲/۵ متر، خطوط ترانز پیشانی کوهستان استخراج شد، سپس این شاخص برای حوضه‌هایی که دارای پیشانی گسل خورده بودند مورد محاسبه قرار گرفت. از ۳۷۸ حوضه ۱۳۶ حوضه برای این شاخص قابل اندازه‌گیری بودند. اطلاعات به دست آمده برای این شاخص بین ۱۱/۰ تا ۲۴/۵ در زیر حوضه‌های مختلف متغیر است. بر اساس تقسیم بندی El-Hamdouni, et al (2008) مقادیر بدست آمده از ۱۳۶ حوضه در سه رده قرار گرفتند (شکل ۶ a) که عبارت است از، ۳ حوضه با رده یک، ۲۷ حوضه با رده دو و ۱۰۶ حوضه با رده سه.

اندازه گیری شده و مطابق با رابطه‌ی بیان شده مقدار این شاخص برای هر یک از زیر حوضه‌ها محاسبه شد. نتایج حاصل از مقادیر به دست آمده شاخص Af به این شرح می‌باشد: زیر حوضه‌های مختلف مقادیر بین ۱۰ تا ۴۷/۶ را نشان می‌دهند که براساس تقسیم بندی (El-Hamdouni et al., 2008) این مقادیر در سه رده قرار می‌گیرند (شکل b ۶). ۱۶۶ حوضه در رده یک، ۱۰۱ حوضه در رده دو و ۱۰۶ حوضه در رده ۳.

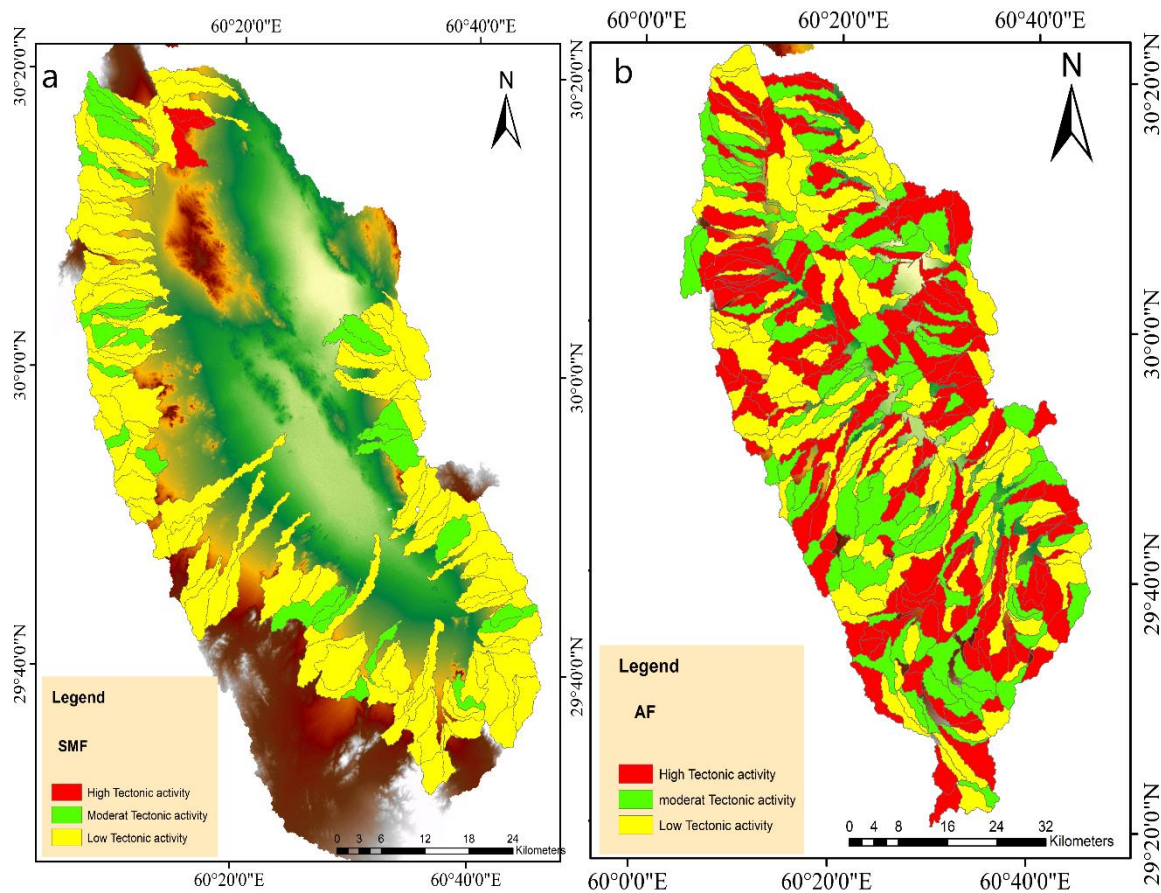
$$Af = \frac{Ar}{At} \times 100$$

که در این رابطه:

Ar: مساحت قسمت راست مسیر رود اصلی

At: مساحت کل حوضه زهکشی

به منظور محاسبه این شاخص برای هر زیر حوضه مسیر رودخانه‌ی اصلی مشخص و توسط آن حوضه به دو قسمت تقسیم می‌شود. و در ادامه مساحت زیر حوضه‌ها و مساحت سمت راست هر یک از آن‌ها



شکل ۶. نقشه بدست آمده محاسبه شاخص های ریخت زمین ساختی با استفاده از ابزار GIS. a. نتایج محاسبه شاخص SMF. b: نتایج محاسبه شاخص AF

Hmax: ارتفاع بیشینه ی حوضه.

در ابتدا با استفاده از تصاویر DEM در محیط ArcGIS، ارتفاع حداکثر، حداقل و میانگین هر حوضه مشخص و سپس با استفاده از رابطه انتگرال فراز نما، شاخص مورد نظر برای ۳۷۸ زیر حوضه مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر کمی به دست آمده بین ۱۱/۰ تا ۵۸/۰ متغییر هستند، که براساس تقسیم بندی El-Hamdouni et al (2008) در دو رده قرار می‌گیرند (شکل av). ۱۰۹ حوضه در رده دو و ۲۶۳ حوضه در رده سه قرار گرفتند.

### ۳-۲-۳- شاخص انتگرال فراز نما (Hi)

این شاخص چگونگی توزیع مساحت ارتفاعات متفاوت را در یک حوضه بیان می‌کند و به عنوان مساحت زیر منحنی هیسومتری تعریف می‌شود و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Keller and Pinter 2002)

$$Hi = (H_{mean} - H_{min}) / (H_{max} - H_{min})$$

که در این رابطه:

Hmean: ارتفاع متوسط.

Hmin: ارتفاع کمینه ی حوضه.



BW: اندازه پهن ترین قسمت حوضه

مقادیر بالای این شاخص نشان دهنده‌ی حوضه‌های کشیده و مقادیر پایین آن نشانگر حوضه‌های دایره ای شکل می‌باشند. مقادیر به دست آمده برای زیر حوضه‌های مختلف از ۰/۳۱ تا ۱۱/۴ متغییر بوده که براساس تقسیم‌بندی El-Hamdouni et al (2008) ۳۷۴ حوضه بررسی شده، در سه رده متفاوت قرار گرفتند (شکل b۷). ۳۹ حوضه در رده یک، ۱۰۳ حوضه در رده دو و ۲۳۲ حوضه در رده سه.

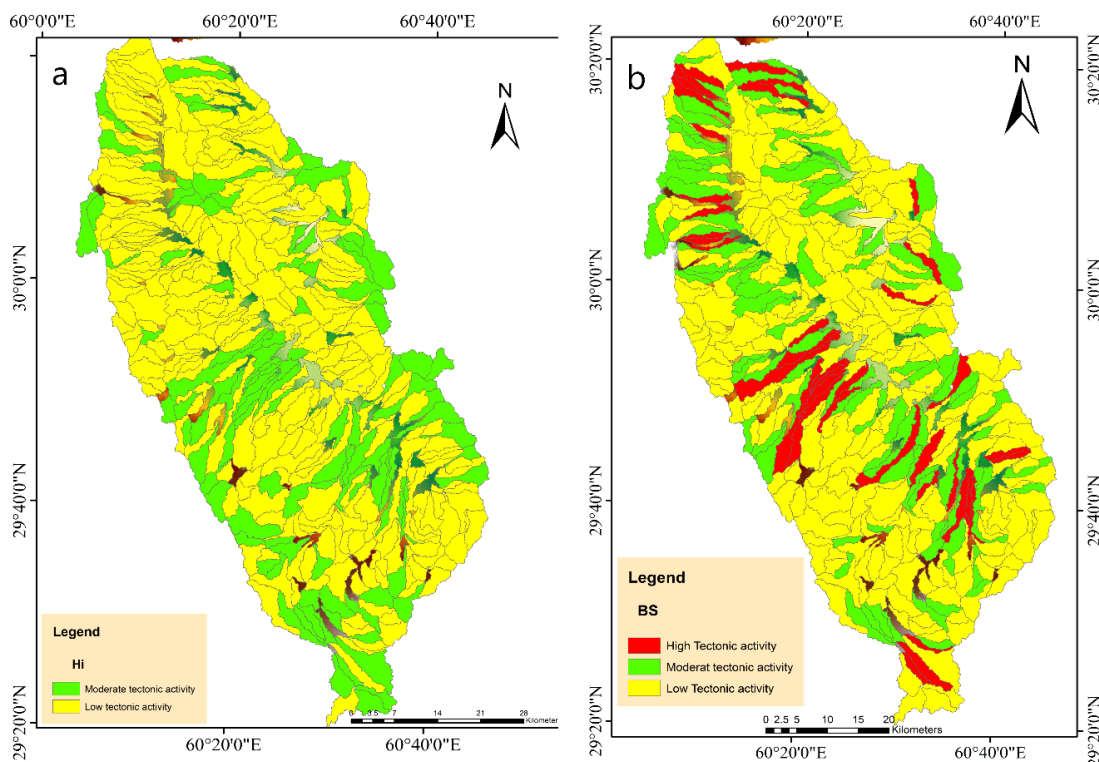
### ۳-۲-۴- شاخص شکل حوضه (Bs)

میزان کشیدگی یک حوضه تحت عنوان شاخص شکل حوضه با اندازه گیری نسبت طول به عرض به دست می‌آید و معیاری برای بررسی سطح فعالیت زمین‌ساختی بشمار می‌آید (Ramirez-Herrera 1998) و با رابطه زیر به دست قابل محاسبه می‌باشد.

$$Bs = Bi/Bw$$

که در این رابطه:

Bi: اندازه طولانی ترین بخش حوضه



شکل ۷. نقشه بدست آمده محاسبه شاخص های ریخت‌زمین‌ساختی با استفاده از ابزار GIS. a. نتایج محاسبه شاخص Hi. b. نتایج محاسبه شاخص BS

(Kirby and Whipple 2001). در مناطقی با ناهمواری حداکثر که دارای دره‌های بریده-بریده شده و طول کوتاه می‌باشد این نسبت افزایش می‌یابد در حالی که در مناطق با ناهمواری کمتر واقع در سطوح جلگه ای و هموار که دره‌ها طولانی تر می‌باشند، مقدار این شاخص کاهش می‌یابد. به و کمترین مقدار آن مربوط با سطوح کاملاً هموار می‌باشد. این شاخص با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است (Faghih and Nourbakhsh 2015).

$$MASC = (Hmax - Hmin) / Ls * 100$$

در این رابطه:

Hmax: مرتفع ترین نقطه حوضه.

### ۳-۲-۵- شاخص میانگین شیب محوری کانال (MASC)

این شاخص نشانگر تعادل بین فعالیت های زمین‌ساختی و فرایندهای فرسایشی است. رودخانه‌ها در نزدیکی دهانه دارای قدرت بیشتری بوده و توانایی حفر بیشتری نسبت به فواصل دورتر دارند. این واقعیت باعث بریده شدن حوضه بدون افزایش طول رودخانه می‌شود، بنابراین باعث افزایش شیب کلی رودخانه می‌شود (Figuroa and Katt 2010). مقادیر بالای این شاخص بیانگر نرخ بالا آمدگی متفاوت در حوضه و نشان دهنده‌ی فعالیت زمین‌ساختی منطقه می‌باشد

Hmin: کم ارتفاع ترین نقطه حوضه.

Ls: طول کانال موازی با خط اصلی زهکشی.

از ۳۷۸ حوضه ۳۷۴ حوضه قابل اندازه گیری بودند و مقادیر به دست آمده بین ۰/۳ تا ۳۷ متغیر هستند . براساس تقسیم بندی (El-Hamdouni et al (2008) زیرحوضه ها از لحاظ فعالیت زمین ساختی در سه رده قرار می گیرند (شکل a۸). که از این بین ۱۴۰ حوضه در رده یک، ۱۵۶ حوضه در رده دو و ۷۸ حوضه در رده سه قرار گرفتند.

### ۳-۲-۶- شاخص نسبت پهنای دره به کف دره (Vf)

این شاخص، یکی از معیارهای موثر در شناسایی مناطق جنبای زمین ساختی است. نسبت پهنای دره به کف دره به ویژه برای فعالیت های زمین ساختی اواخر کواترنر بسیار حساس است (Bull, 2007). این شاخص دره های V شکل را در پاسخ بالا آمدگی و دره های U شکل را از نظر فعالیت زمین ساختی آرام معرفی می کند و

براساس رابطه ی زیر محاسبه می شود (Bull and Mcfad- 1977).  

$$Vf = 2(Vfw) / [(Eld - Esc) + (Erd - Esc)]$$

در این رابطه:

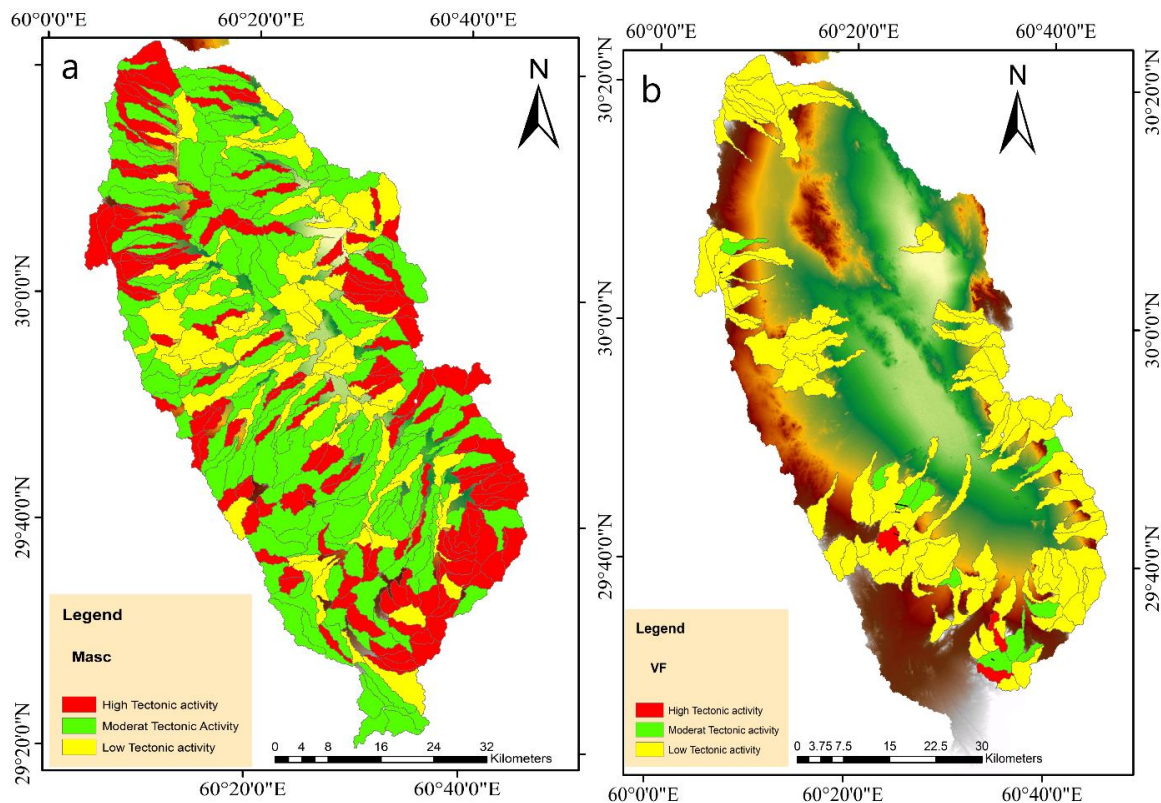
Vfw: پهنای کف دره.

Esc: ارتفاع کف بستر دره.

Erd: ارتفاع دیواره سمت راست دره یا ارتفاع خط الراس سمت راست رودخانه.

Eld: ارتفاع دیواره سمت چپ دره یا ارتفاع خط الراس سمت چپ رودخانه.

در پهنه مورد مطالعه ۱۸۴ پروفیل عرضی در امتداد دره های موجود ترسیم و این شاخص برای ۱۰۶ زیر حوضه محاسبه شد. مقادیر به دست آمده بین ۰/۴۵ تا ۱۰/۲۶ متغیر است که بر اساس تقسیم بندی El-Ham-douni et al (2008) ۳ حوضه در رده یک، ۱۰ حوضه در رده ۲ و ۹۳ حوضه در رده ۳ قرار می گیرند (شکل b ۸).



شکل ۸. نقشه بدست آمده محاسبه شاخص های ریخت زمین ساختی با استفاده از ابزار GIS. a: نتایج محاسبه شاخص Masc. b: نتایج محاسبه شاخص Vf

### ۳-۲-۶- شاخص زمین ساخت جنبای نسبی

(Iat)

شاخص Iat براساس میانگین مقادیر شاخص‌های بررسی شده، توسط (2008) El-Hamdouni et al محاسبه شده

است که عبارت است از

$$Iat = S/N$$

Iat: زمین ساخت جنبای

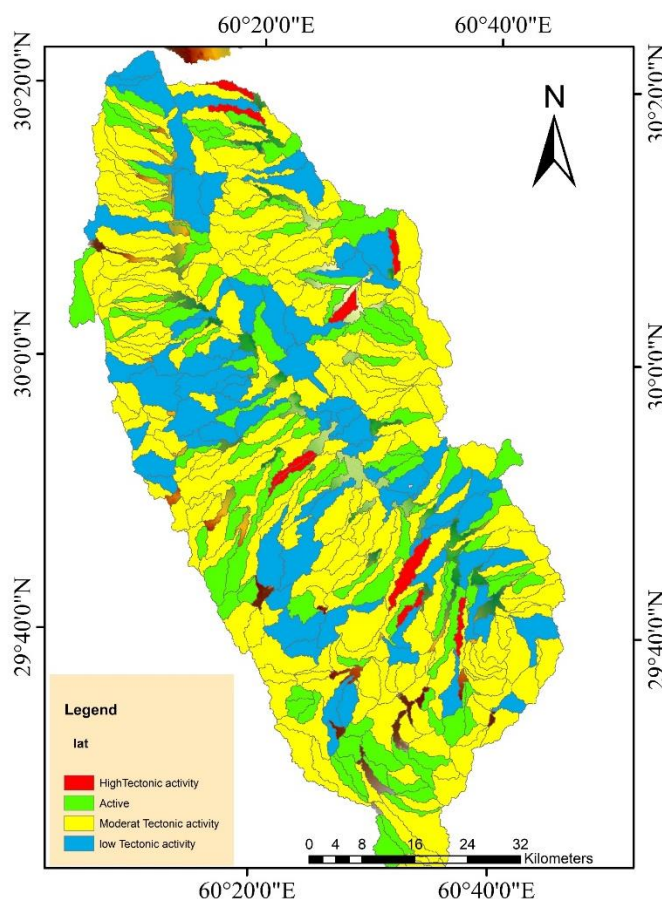
S: مجموع کلاس‌های شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی محاسبه شده

N: تعداد شاخص‌های محاسبه شده

و به عنوان یک کمیته می‌تواند به صورت کلی وضعیت فعالیت زمین‌ساختی یک منطقه را مشخص کند تعریف می‌شود. مقادیر این شاخص در جدول ۱ با توجه به فعالیت زمین‌ساختی طبقه بندی شده است.

جدول ۱. رده بندی زمین‌ساختی شاخص Iat ال-حمدونی و دیگران (۲۰۰۸).

| مناطق     | خیلی فعال         | فعال              | نیمه فعال   | فعالیت کم     |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------|---------------|
| IAT مقدار | $1 < (s/n) < 1/5$ | $1/5 < (s/n) < 2$ | $2 < (s/n)$ | $2/5 < (s/n)$ |



شکل ۹. نتایج بدست آمده از محاسبه شاخص زمین ساخت جنبای نسبی Iat

قسمت‌های مختلف حوضه اصلی و عوامل ایجاد آنها و در نهایت یک مدل زمین‌ساختی برای شکل‌گیری این حوضه ارائه می‌گردد.

نتایج بررسی شاخص SMF دامنه‌متغیری از فعالیت زمین‌ساختی را برای قسمت‌های مختلف حوضه بسته گراغه نشان می‌دهد که، از ۱۳۶ حوضه، ۳ حوضه (۱۴، ۱۸، ۲۹) دارای فعالیت زمین‌ساختی زیاد می‌باشند.

براساس تقسیم‌بندی (2008) El-Hamdouni et al مقادیر محاسبه شده برای این شاخص در منطقه مورد مطالعه در سه رده قرار می‌گیرند (شکل ۹).

### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این قسمت ابتدا به تغییرات شاخص‌های به دست آمده و ارتباط آنها به سختی سنگ‌ها و گسل‌های منطقه پرداخته می‌شود و در ادامه وضعیت فعالیت



این سه حوضه در محدوده شمالی گسل چهل کوره قرار گرفته اند، ۲۷ حوضه دارای فعالیت متوسط و ۱۰۶ حوضه دارای فعالیت کم می باشند. با توجه به اینکه این شاخص در پیشانی کوهستان اندازه گیری می شود، سنگهای این مناطق دارای سختی نزدیک به هم هستند. فعالیت ساختارهای طولی فعال در حوضه آبریز مانند گسل ها باعث کج شدگی حوضه شده و در نتیجه آن مسیر اصلی آبراهه به یک سمت منحرف شده و باعث عدم تقارن حوضه می شود (Keller and Pinter 1996). بررسی حوضه اصلی گراغه نشان دهنده یک حوضه نامتقارن است که سمت چپ (غرب) آن بالا آمده است و در قسمت سمت راست (شرق) حوضه کاهش ارتفاع رخ داده است. از ۳۷۳ حوضه مورد مطالعه که برای آنها شاخص Af محاسبه شده است، ۱۶۶ حوضه فعالیت بالا، ۱۰۱ حوضه فعالیت متوسط و ۱۰۶ حوضه فعالیت کم را نشان می دهند. در مجموع این شاخص فعالیت بالایی را در تمام حوضه به ویژه در مرزهای حوضه را نشان می دهد که این فعالیت را می تواند تحت تاثیر گسل ها دانست. ولی علت حوضه های فعال درونی را می توان به سختی کمتر بستر آنها که عمدتاً تحت تاثیر فرسایش رودخانه ای بوده اند دانست. فقط در مورد دره هایی که تغییرات شاخص نسبت پهنای دره به عمق (Vf) در آنها قابل اندازه گیری بود ویژگی های سنگ شناسی مورد بررسی قرار گرفت. این ویژگی نشانگر این است که حوضه ها در سطح وسیعی پراکنده اند ولی عمدتاً دارای بستر سنگی یکسانی هستند. از ۱۰۶ زیر حوضه مورد مطالعه برای این شاخص ۳ حوضه (۲۹۴،۳۳۸،۳۶۰) واقع در جنوب حوضه اصلی، فعالیت بالای تکتونیک می دهند که می تواند تحت تاثیر بالا آمدگی در این قسمت باشد، ۱۰ حوضه دارای فعالیت متوسط و ۹۳ حوضه دارای فعالیت کم می باشند. به طور کلی این شاخص نشان دهنده فعالیت زمین ساختی متوسط تا کم در مرزهای حوضه اصلی می باشد. مقادیر محاسبه شده شاخص میانگین شیب محوری کانال (Masc) نشانگر فعالیت متوسط تا بالای پهنه حوضه اصلی است. این مقادیر براساس سنگ شناسی (میزان فرسایش پذیری)، طول دره و یا تحت تاثیر بریدگی زمین ساختی می توانند دچار تغییر

شوند (Prasad, 1968). بررسی سختی سنگها نشان می دهد که در بخش هایی که شاخص Masc دارای مقدار بالایی است، حوضه دارای سنگ شناسی مقاوم و در حوضه های ی که دارای رسوبات کواترنری هستند مقدار این شاخص پایین می باشد. از ۳۷۴ زیر حوضه بررسی شده ۱۴۰ حوضه با فعالیت زمین ساختی بالا، ۱۵۶ حوضه فعالیت متوسط و ۷۸ حوضه دارای فعالیت کم می باشند.

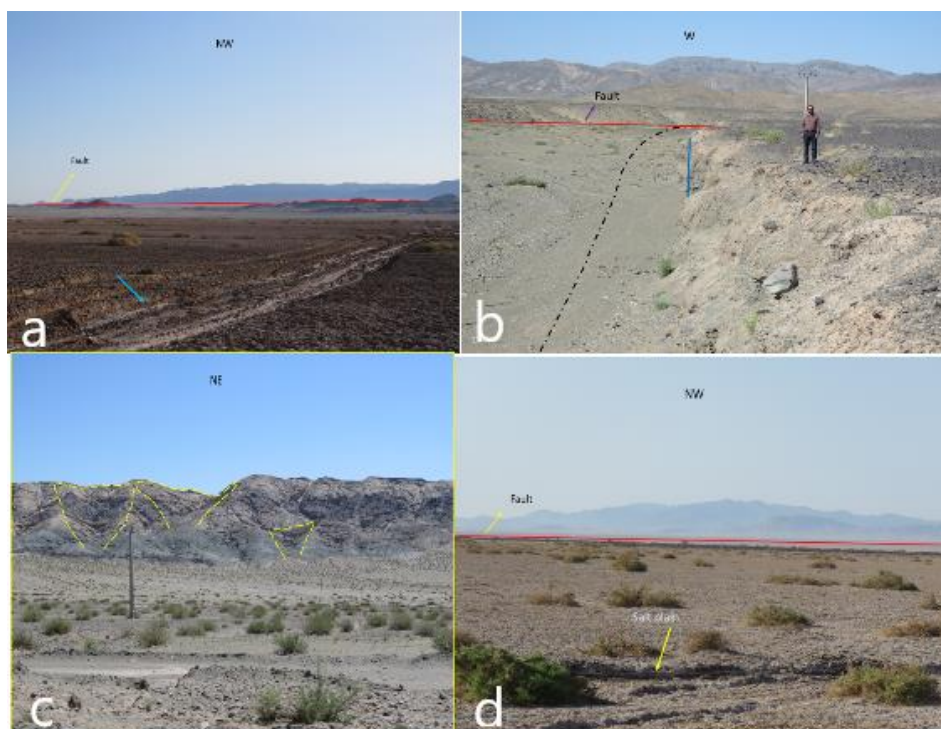
کاهش نرخ فعالیت های زمین ساختی و به دنبال آن توقف میزان بالا آمدگی، باعث غلبه فرآیندهای فرسایشی و شکل حوضه را به تدریج طی زمان به شکل دایره در می آورد (El-Hamdouni et al 2008) ( از ۳۷۴ زیر حوضه بررسی شده برای شاخص Bs، ۳۹ حوضه فعالیت زمین ساختی بالا، ۱۰۳ حوضه با فعالیت متوسط و ۲۳۲ حوضه با فعالیت کم می باشند که بیانگر نسبت کشیدگی حوضه ها است. عمدتاً حوضه های با پوشش سنگی و رسوبی نرم تر کشیده تر و در قسمت هایی که سنگهای کف حوضه سخت تر هستند حوضه ها پهن تر هستند. به نظر می رسد این شاخص به تنهایی نمی تواند پاسخگوی وضعیت زمین ساختی این حوضه باشد.

محاسبه شاخص Hi برای حوضه گراغه غالباً مقادیر پایینی را نشان می دهد. مقادیر این شاخص برای زیر حوضه ها، دو رده فعالیت زمین ساختی متوسط و کم قرار را نشان می دهد. از ۳۷۸ زیر حوضه ۱۰۹ حوضه دارای فعالیت زمین ساختی متوسط و ۲۶۳ حوضه دارای فعالیت کم می باشند.

شاخص Iat به عنوان برآیند شاخص ها نشان دهنده حوضه های فعال تا فعالیت نسبی متوسط در مرزهای حوضه اصلی می باشد. چند زیر حوضه با فعالیت بالا در قسمت شمال و شمال شرق و در محل تغییر روند گسل های اصلی قرار گرفته و نشان از فعالیت بالایی این قسمت دارد. تعدادی دیگر از این زیر حوضه های فعال در امتداد آبراهه اصلی که حوضه را به دو قسمت به صورت نامتقارن جدا می کند قرار گرفته اند که می توان وجود آنها را بیشتر تحت تاثیر فرسایش های رودخانه ای که عمدتاً در اثر جریان های تند فصلی در یک بستر نرم ایجاد می شود، نسبت داد. مطالعات صحرائی:

بر خلاف قسمت شرقی طبق شواهد صحرایی در قسمت غرب حوضه گراغه بالا آمدگی مشاهده می‌شود که شواهد آن به خوبی در تراس‌های آبرفتی که به صورت عمودی بریده شده‌اند دیده می‌شود (شکل ۱۰b). شاخص‌های مورفومتریک محاسبه شده برای این قسمت نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی می‌باشد. برداشت‌های صحرایی از دره‌ها به طور مثال حوضه ۶۷ که نشان‌دهنده ساختارهای گیلانی<sup>۱</sup> است، حکایت از فعالیت زمین‌ساختی که در تطابق با شاخص‌های مورفومتری استخراج شده می‌باشد، دارد (شکل ۱۰c). شواهد صحرایی حوضه‌های ۱۲۰ و ۱۳۵ نشان‌دهنده ساختارهای مثلی<sup>۲</sup> در پیشانی کوهستان دارد. این ساختارها به همراه شاخص‌های مورفومتری استخراج شده برای این زیر حوضه‌ها نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی می‌باشد (شکل ۱۰e).

مطالعات صحرایی و برداشت ساختارهای معرف فعالیت زمین‌ساختی، نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی در امتداد گسل‌های اصلی در منطقه و مرزهای حوضه می‌باشند و حکایت از تطابق مناسب شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی با اطلاعات میدانی دارد. از جمله این شواهد، زمین‌های پست و شوره‌زار در قسمت شرقی حوضه اصلی قرار گرفته‌اند که توسط ارتفاعاتی که با دشت دارای مرز گسله هستند احاطه شده است (شکل ۱۰d و a). شاخص‌های مورفومتریک برای این مناطق فعالیت پایینی را نشان می‌دهند و در مواردی که فعالیت بالاتری را نشان می‌دهند به علت سختی کم پوشش این مناطق عمدتاً تحت تأثیر فرسایش می‌باشد تا فعالیت زمین‌ساختی. این پهنه‌ها به عنوان سطح مبنای محلی عمل کرده و تمام آب‌های سطحی به این مناطق زهکش می‌شوند.



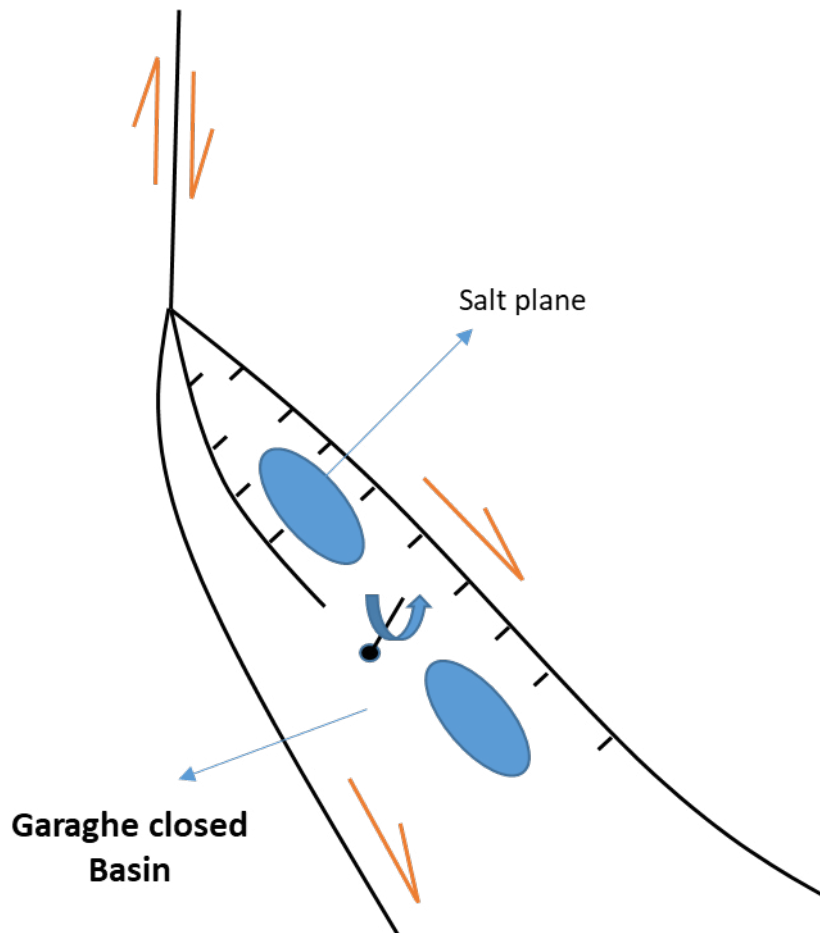
شکل ۱۰. شواهد صحرایی از ساختارهای زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه. (a) زمین‌های پست و شوره‌زار در قسمت شرقی حوضه اصلی در مجاورت یکی از شاخه‌های گسل زاهدان. (b) بالا آمدگی تراس‌های آبرفتی در قسمت غرب حوضه اصلی در مجاورت گسل نه. (c) ساختارهای گیلانی مربوط در امتداد گسل چهل کوره. (d) کفه نمکی و گلی در قسمت شرق منطقه در مجاورت یکی از شاخه‌های گسل زاهدان.

<sup>۱</sup> Wineglass

<sup>۲</sup> Flatiron

جنوبی بوده ولی در ادامه که حوضه بسته گراغه را احاطه می کنند تغییر روند داده و تحت تاثیر پهنه مکران شروع به چرخش به سمت شرق میکنند (Carter et al 2010; Walker 2004) به عبارت دیگر این محدوده از یک سو تحت تاثیر تنش شمال شرق- جنوب غربی پهنه زمین درز و از سوی دیگر تحت تاثیر تنش شمالی- جنوبی مکران قرار دارد. این تغییر تنش باعث چرخش پادساعتگرد گسلهای امتداد لغز راستگرد شده است (Kashani et al., 2019; Penny et al., 2017). همانطور که مشاهده می شود چرخش گسلهای شرق محدود به بیشتر از گسلهای غربی می باشد و این اختلاف چرخش باعث ایجاد یک محدوده تراکشن شده (به طور مثال منطقه سوماترا (Noda, 2013) که نتیجه آن ایجاد حوضه بسته گراغه و کفه های نمکی فرافتاده در منطقه می باشد (شکل ۱۱) (Wu et al., 2009; Golk et al., 1994).

با توجه به اطلاعات به دست آمده و با در نظر گرفتن تاثیر سختی سنگها و مقایسه آنها با شاخص های مورفومتری به دست آمده می توان چنین پیشنهاد کرد که: اطراف حوضه اصلی و قسمت هایی که توسط گسلها بریده شده اند فعالیت زمین ساختی متوسط تا بالایی را نشان می دهند. این همخوانی گسلها با مرز حوضه اصلی و فعالیت در امتداد آنها را می توان به نقش اخیر این ساختارها در شکل گیری این حوضه دانست. علاوه بر آن شاهد یک عدم تقارن در حوضه اصلی هستیم به صورتی که سطح مبنای محلی در قسمت شرقی قرار گرفته و باعث شده این قسمت نسبت به سمت غربی ارتفاع کمتری داشته باشد (شکل ۳). با توجه به روند گسلها در منطقه مورد مطالعه و توجه به این واقعیت که روند این گسلها متأثر از روند کلی پهنه زمین درزیستان، تا شمال منطقه مورد مطالعه به صورت گسلهای امتداد لغز راستبر شمالی-



شکل ۱۱. مدل شماتیک شکل گیری حوضه بسته گراغه بر اثر چرخش گسلهای امتداد لغز راستبر.



- of orogenesis in western Himalaya: Evidence from Paleogene sediments in the Iranian Makran region and Pakistan Katawaz basin. *Geology* 38(9):807-810.
- Champel, B., Van der, B.P., Mugnier, J.L. and Leturmy, P., 2002. Growth and lateral propagation of fault-related folds in the Siwaliks of western Nepal: Rates, mechanisms, and geomorphic signature. *Journal of Geophysical Research* 107 (2111), 2-1-2-18.
- Deere, D.U. and Miller, R.P., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. Illinois Univ At Urbana Dept Of Civil Engineering.
- Eftekharnjad, J., 1981. Tectonic division of Iran with respect to sedimentary basins. *Journal of Iranian Petroleum Society*, 82, pp.19-28.
- Eftekharnjad, J., 1993. Geological Map of Zahedan: Tehran, Geological Survey of Iran, scale 1:250,000.
- El-Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernández, T., Chacón, J., and Keller, E. A., 2008. Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1-2), 150-173.
- Faghih, A. and Nourbakhsh, A., 2015. Implication of surface fractal analysis to evaluate the relative sensitivity of topography to active tectonics, Zagros Mountains, Iran. *Journal of Mountain Science*, 12(1), pp.177-185.
- Figuroa, A. M. and Katt, J. R., 2010. Tectonic Geomorphology of the southern Sierra Nevada Mountains (California): Evidence for uplift and basin formation, *Geomorphology*, vol 123, pp, 34-45.
- Golke, M., Cloetingh, S. and Fuchs, K., 1994. Finite-element modeling of pull-apart basin formation. *Tectonophysics* 240, 45-57.
- Guarnieri, P. and Pirrotta, C., 2008. The response of drainage basins to the late Quaternary tectonics in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily).
- Kashani, R., Partabian, A., and Nourbakhsh, A., 2019. Tectonic implication of geomorphometric analyses along the Saravan Fault: evidence of a difference in tectonic movements between the Sistan Suture Zone and Makran Mountain Belt. *Journal of Mountain Science*, 16(5), 1023-1034.
- بنابراین می‌توان بر اساس نتایج به دست آمده موارد زیر را به عنوان نتیجه‌گیری پیشنهاد داد.
- ۱- اطلاعات به دست آمده نشانگر فعالیت نسبی زمین‌ساختی متوسط تا بالای حوضه بسته گراغه است که عمدتاً در امتداد گسل‌های محدود کننده مرز حوضه دارای فعالیت بیشتری می‌باشند.
- ۲- تغییر روند و چرخش گسل‌ها از شمال به جنوب به صورت شمالی - جنوبی به شمال غرب - جنوب شرق نتیجه می‌شود. این تغییر روند با تبعیت کلی از پهنه زمین درز در این محدوده صورت گرفته که خود می‌تواند ناشی از نزدیک شدن به پهنه مکران با جهت تنش‌های متفاوت رخ داده باشد.
- ۳- چرخش متفاوت گسل‌های امتداد لغز در این قسمت از پهنه زمین درز باعث ایجاد یک حوضه کششی شده است.
- ### منابع
- وفائیان، م.، ۱۳۷۱. مکانیک خاک، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان. ۴۵۵ ص.
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletins*. 103, 983-992.
- Liu, Q.S., Roux, B., Velarde, M.G., Thermocapillary Convection in Two-Layer Systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 11, pp. 1499-1511, 1998.
- Broch, E. and Franklin, J.A., 1972. November. The point-load strength test. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 9, No. 6, pp. 669-676). Pergamon.
- Bull, W. B., 2007. *Tectonic Geomorphology of Mountain A New Approach to paleoseismology*. Blackwell: 319
- Bull, W.B. and MacFadden, L.D., 1977. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California. In: Doehring, D. o. (ed), *Geomorphology in Arid Regions*, Proceedings of Eighth Annual Geomorphology Symposium, State University of New York, Binghamton: 115-138
- Carter A, Najman Y, Bahroudi A, Bown P, Garzanti E and Lawrence RD., 2010. Locating earliest records



- Keller, E.A. and Pinter, N., 1996. Active tectonics (Vol. 19). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall
- Kirby, E. and Whipple, K., 2001. Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. *Geology*, 29(5), pp.415-418.
- Partabian, A., Nourbakhsh, A., and Ameri, S., 2016. GIS-based evaluation of geomorphic response to tectonic activity in Makran Mountain Range, SE of Iran. *Geosciences Journal*, 20(6), 921-934.
- Prasad, G., 1986. Modelling, simulation and environmental controls in the morphometric determination of drainage texture (Dt) between the Kaimur highland and Trans-Yamuna Plain. Vol, 7., PP: 14-32.
- 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.
- Selby, M.J., 1982. Rock mass strength and the form of some inselbergs in the central Namib Desert. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7(5), pp.489-497.
- Shahzad, F., and Gloaguen, R., 2011. TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 1: Drainage network preprocessing and stream profile analysis. *Computers & Geosciences*, 37(2), 250-260.
- Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C. and Bardaji, T., ۲۰۰۳. Fault-generated Mountain fronts in south-east Spain: geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity. *Geomorphology* 50, 203–225.
- Tirrul, R., Bell, L., Griffis, R., et al., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geol. Soc. Amer. Bull*, 84, 134-150.
- Walker R, Jackson J and Baker C., 2004 Active faulting and seismicity of the Dasht-e-Bayaz region, eastern Iran. *Geophysical Journal International* 157(1):265-282.
- Wu, J. E., McClay, K., Whitehouse, P., and Dooley, T. 2009. 4D analogue modelling of transtensional pull-apart basins. *Marine and Petroleum Geology*, 26, 1608–1623.