

## ارزیابی فعالیت گسل تبریز با شاخص‌های ژئومورفیک، تکنیک سنجش از دور و GIS

موسی عابدینی<sup>۱\*</sup>

فریبا کرمی<sup>۲</sup>

نادر سرمستی<sup>۲</sup>

### چکیده

کلان‌شهر تبریز در حریم گسل فعال تبریز قرار دارد و از بخش انتهایی حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای در شمال شهر نیز عبور می‌کند. پژوهش حاضر، با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک، تکنیک سنجش از دور و GIS به بررسی فعالیت‌های تکتونیکی این گسل در محدوده‌ی کلان‌شهر تبریز می‌پردازد. بدین منظور شاخص‌های ژئومورفیک شامل تراکم زهکشی، نسبت انشعاب، نسبت شکل حوضه، عدم تقارن حوضه، تقارن توپوگرافی معکوس، انتگرال هیپسومتری، سینوسی جبهه‌ی کوهستان، سینوسی رودخانه، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره، گرادیان طولی رود و شاخص ارزیابی نسبی تکتونیکی فعال به عنوان ابزارهای مدلی و مفهومی استفاده شد. تصویر ماهواره‌ای سنجنده‌ی ASTER، نقشه‌ی زمین‌شناسی، مدل رقومی ارتفاع و نرم‌افزارهای ENVI4.8 و ArcGIS10.2 دیگر ابزارهای فیزیکی این پژوهش است. طبق نتایج، مقادیر کمی شاخص‌های تراکم زهکشی ۰/۵۱ و ۰/۵۷، نسبت انشعاب ۲ و ۲/۱، نسبت شکل حوضه ۲/۲ و ۱/۸، عدم تقارن حوضه ۳۹/۷ و ۲۳/۲، تقارن توپوگرافی معکوس ۰/۳۶ و ۰/۵۹، انتگرال هیپسومتری ۰/۲۸ و ۰/۳۹، سینوسی جبهه کوهستان ۱/۴ و ۰/۹۳، سینوسی رودخانه ۱/۱ و ۱/۳، پهنای کف دره به ارتفاع دره ۱/۰۸ و ۱/۲، گرادیان طولی رود ۱۲۰۲ و ۳۱۸ به ترتیب برای حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای به دست آمد. بر اساس شاخص ارزیابی نسبی تکتونیکی فعال، حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای به ترتیب با مقادیر عددی ۱/۹ و ۱/۷ دارای حرکات تکتونیکی زیاد هستند. نتایج شاخص‌های مورد بررسی، حاکی از تأثیرپذیری مورفولوژی حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای از حرکات تکتونیکی گسل تبریز است. با پردازش داده‌های ماهواره‌ای شواهد تکتونیکی گسل تبریز همچون انحراف آبراهه آجی‌چای، پرتگاه گسل و پدیده‌ی عدسی شکل در محدوده‌ی کلان‌شهر تبریز نیز تفسیر شدند. نتایج به دست آمده با شواهد میدانی منطقه تأیید گردید. بنابراین، کلان‌شهر تبریز از نظر حرکات تکتونیکی در یک منطقه‌ی مخاطره‌آمیز واقع شده است.

**واژه‌های کلیدی:** گسل تبریز؛ شاخص‌های ژئومورفیک؛ سنجش از دور و GIS؛ گماناب‌چای؛ ورکش‌چای.

## مقدمه

تغییرات داده‌های داخلی سبب تغییر مورفولوژی در سیستم ژئومورفیک حوضه‌های آبریز می‌شود. این تغییرات را می‌توان به وسیله شاخص‌های ژئومورفیک توصیف کرد (شریفی نجف‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۲). شاخص‌های ژئومورفیک در ارزیابی اثرات تکتونیکی شبکه‌های زهکشی به طور وسیع استفاده می‌شوند، زیرا حوضه‌های رودخانه‌ای به تغییرات محیطی بسیار حساسند (زهانگ و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۳: ۵۴). از مهم‌ترین محاسن استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک می‌توان به سادگی نسبی در روش محاسبه، سرعت عمل بالا و تعیین درجه‌ی نسبی فعالیت‌های تکتونیکی مناطق مختلف اشاره کرد (روستایی و همکاران، ۱۳۹۱: ۵۶).

فعالیت تکتونیکی در امتداد خطوط گسلی فعال بر روی ویژگی‌های توپوگرافی محیط‌های طبیعی تأثیر مهمی دارد. روش‌های رایج مطالعات گسل به پژوهش‌های میدانی وسیعی نیاز دارد که مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است (ایرینی و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱: ۹). تکنیک سنجش از دور<sup>۳</sup> ماهواره‌ای همراه با روش‌های پردازش تصویر با صرف زمان کم‌تر در ارزیابی فعالیت تکتونیکی گسل‌های فعال و لرزه‌زا در مقیاس ماکروسکوپی بسیار کارآمد است؛ اما، چنین تکنیک‌هایی نه تنها جایگزین پژوهش‌های میدانی نیستند، بلکه مکمل یکدیگرند. پوشش وسیع زمینی و قدرت تفکیک نسبتاً بالا با توجه به مقیاس تصاویر ماهواره‌ای، تحلیل گسل‌های فعال را امکان‌پذیر می‌سازد. هر چند روش‌های مهمی در ارزیابی فعالیت تکتونیکی گسل‌ها از تصاویر ماهواره‌ای وجود داشته است؛ اما، تجربه مفسر هنوز هم در تفسیر گسل اهمیت دارد. سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نیز ابزاری مؤثر برای آنالیز داده‌های مکانی و غیرمکانی می‌باشد (زهانگ و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۳).

کلان‌شهر تبریز با جمعیتی حدود دو میلیون نفر بر روی سیستم پیچیده‌ی گسلی فعال تکتونیکی قرار گرفته است که دگرشکلی و لرزه‌زایی شدیدی را در بر می‌گیرد. قرار گرفتن شهر در حوضه‌ی نزدیک گسل مهم و لرزه‌خیز ناحیه که در تاریخچه‌ی فعالیت خود سابقه‌ی زمین‌لرزه‌های ویران‌گر را دارد و از طرف دیگر امتداد این گسل از جنوب حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای در شمال این شهر، ضرورت ارزیابی فعالیت‌های تکتونیکی آن در تحلیل ریسک لرزه‌زایی منطقه‌ی مورد مطالعه را معلوم می‌کند. این پژوهش به ارزیابی فعالیت‌های تکتونیکی گسل تبریز در محدوده‌ی کلان‌شهر تبریز با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک، تکنیک سنجش از دور و GIS و شواهد میدانی پرداخته است.

مطالعات پیشین که در نقاط مختلف دنیا و ایران با شاخص‌های ژئومورفیک، تکنیک سنجش از دور و GIS

1- Zhang et al.,

2- Eirini et al.,

3- Remote Sensing

صورت گرفته، حکایت از کارآیی آن‌ها در ارزیابی تکتونیک مناطق فعال دارد. تقی‌پور و همکاران (۱۳۸۳)، گسل شمال تبریز در فاصله‌ی بین تبریز و بستان‌آباد را بررسی نموده و به این نتیجه رسیده‌اند که حرکات گسل تبریز از نوع راست‌گرد با مؤلفه‌ی شیب لغز بوده و حرکات بسیار مشخصی در دوران چهارم دارد. رامشت و همکاران (۱۳۹۰)، صحت شاخص‌های ژئومورفولوژیکی را با استفاده از داده‌های ژئودینامیکی در حوضه‌ی آبریز جاجرود ارزیابی نمودند. نتایج حاکی از آن است که این شاخص‌ها در ارزیابی فعالیت‌های تکتونیک بسیار مهم هستند. محمودزاده و همکاران (۱۳۹۰)، ساختار گسل تبریز را با استفاده از داده‌های دورسنجی تحلیل نمودند. نتایج این پژوهش، نشان‌دهنده‌ی اهمیت بالای تصاویر ماهواره‌ای در ارزیابی فعالیت تکتونیک گسل‌های فعال و لرزه‌زا است. عابدینی و شبرنگ (۱۳۹۳)، فعالیت‌های تکتونیک حوضه‌ی آبریز مشکین‌چای را با شاخص‌های ژئومورفولوژی ارزیابی نمودند. نتایج نشان داده است که کل حوضه‌ی مورد مطالعه از لحاظ تکتونیک پویاست. ده‌بزرگی و همکاران (۲۰۱۰)، ناحیه سروستان در بخش زاگرس مرکزی را با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک مطالعه نموده و این ناحیه را به لحاظ فعالیت‌های تکتونیک به صورت بسیار فعال، فعال، نسبتاً فعال و با فعالیت پایین طبقه‌بندی نموده‌اند. آنوپ و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۱)، با محاسبه‌ی شاخص‌های ژئومورفیک نشان دادند که تکتونیک فعال از عوامل مهم حاکم بر چشم‌انداز دره اسپیتی<sup>۲</sup> در شمال غرب هیمالیاست. جایا و ناراجو<sup>۳</sup> (۲۰۱۲)، فعالیت‌های نفوذتکتونیک حوضه‌ی آبریز والاپاتانام<sup>۴</sup> هند را با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و شاخص‌های ژئومورفیک مطالعه نمودند. نتایج نشان می‌دهد بخش جنوبی منطقه از بخش شمالی آن بسیار فعال‌تر است.

منطقه‌ی مورد مطالعه در شمال شرقی دریاچه ارومیه و شمال کلان‌شهر تبریز واقع شده است و شامل حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای نیز می‌باشد. حوضه‌ی گماناب‌چای با وسعت حدود ۴۰۷ کیلومتر مربع در شمال کلان‌شهر تبریز بین عرض جغرافیایی  $38^{\circ} 7' 31''$  تا  $38^{\circ} 27' 50''$  شمالی و طول جغرافیایی  $46^{\circ} 15'$  تا  $46^{\circ} 28'$  شرقی واقع شده است و یکی از زیرحوضه‌های شمالی آجی‌چای می‌باشد. بلندترین نقطه‌ی حوضه ۲۸۰۶ متر در ارتفاعات شرقی، پایین‌ترین ارتفاع ۱۳۵۰ متر در محل خروجی و ارتفاع متوسط آن ۲۰۷۸ متر است (رنجبری و همکاران، ۱۳۸۲: ۱۴). حوضه‌ی ورکش‌چای با مساحت ۶۱۳ کیلومتر مربع در شمال غربی کلان‌شهر تبریز بین عرض جغرافیایی  $38^{\circ} 7'$  تا  $38^{\circ} 29' 27''$  شمالی و طول جغرافیایی  $46^{\circ}$  تا  $46^{\circ} 1' 54''$  شرقی واقع شده و یکی از زیرحوضه‌های دریاچه‌ی ارومیه است. بلندترین نقطه‌ی حوضه

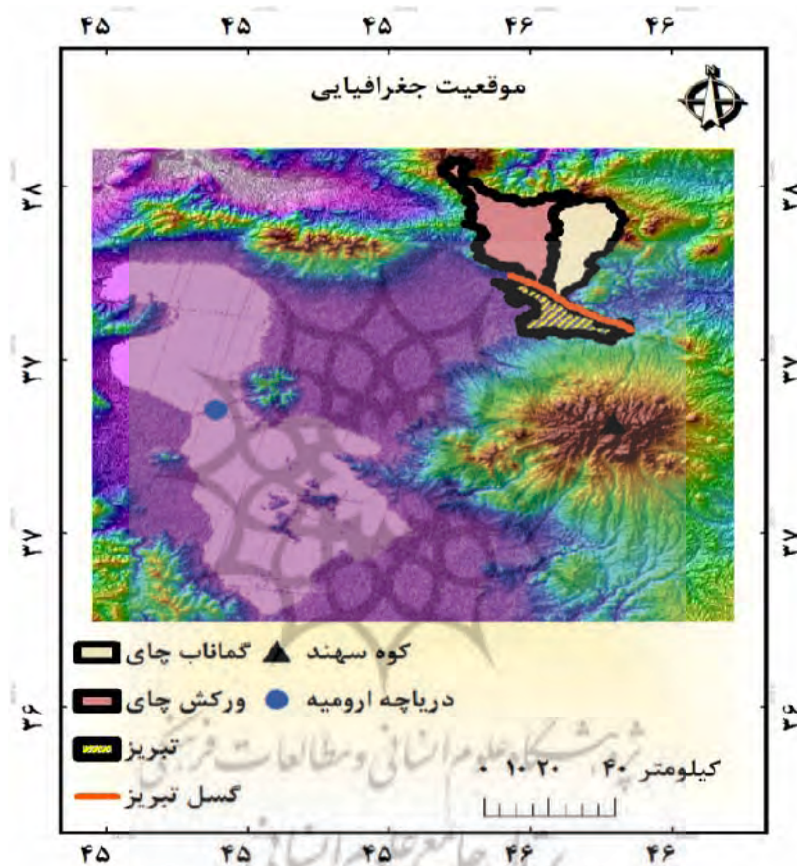
1- Anoop et al.,

2- Spiti

3- Jayappa and Nagaraju

4- Valapattanam

۳۱۵۰ متر در ارتفاعات آق‌داش و پایین‌ترین ارتفاع در محل خروجی آن ۱۳۲۵ متر و ارتفاع متوسط ۲۲۲۸ متر می‌باشد (شیری طرز و همکاران، ۱۳۸۵: ۱۱). کلان‌شهر تبریز به عنوان بزرگ‌ترین پایگاه جمعیتی شمال غرب کشور در جنوب این حوضه‌ها و در دشت تبریز گسترش یافته است. مهم‌ترین گسل منطقه، گسل تبریز است که امتداد آن از جنوب حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای نیز عبور می‌کند. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه

## مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از:

تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌ی ASTER مربوط به ردیف ۸۰ و گذر ۱۶۰ تاریخ ۲۸/۱۲/۲۰۱۲، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری شمال غرب کشور، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی تبریز، مدل رقومی ارتفاع (DEM)<sup>۱</sup> با قدرت تفکیک ۳۰ متری.

1- Digital Elevation Model

در این پژوهش، ابتدا با بهره‌گیری از مدل رقومی ارتفاع منطقه و برنامه‌های جانبی نرم‌افزار ArcGIS10.2، اقدام به استخراج مرز و شبکه‌ی آبراهه‌ی حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای گردید. همچنین، نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه زمین مرجع شده و نقشه‌ی پراکندگی گسل‌های حوضه‌ها تهیه شد. سپس، شاخص‌های ژئومورفیک نظیر تراکم زهکشی، نسبت انشعاب، نسبت شکل حوضه، عدم تقارن حوضه، تقارن توپوگرافی معکوس، انتگرال هیپسومتری، سینوسی جبهه‌ی کوهستان، سینوسی رودخانه‌ی اصلی، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره، گرادیان طولی رود و شاخص ارزیابی نسبی تکتونیکی فعال برای ارزیابی فعالیت تکتونیکی گسل تبریز در حوضه‌های مورد مطالعه محاسبه شدند. به علاوه از نرم‌افزار اکسل برای ترسیم نمودارها نیز استفاده شد. تصاویر ماهواره‌ای سنجنده ASTER نیز در محیط نرم‌افزاری ENVI4.8 برای تفسیر شواهد تکتونیکی گسل تبریز در محدوده‌ی کلان‌شهر تبریز مورد پردازش قرار گرفت. پس از محاسبه‌ی شاخص‌های ژئومورفیک و پردازش تصاویر ماهواره‌ای به کمک سایر داده‌های مورد استفاده، نقاط مهمی که امکان دسترسی به آن‌ها بیش‌تر بود، انتخاب گردیدند و مطالعات صحرایی در بخش‌هایی از گستره‌ی مورد پژوهش به منظور بررسی مهم‌ترین شواهد تکتونیکی گسل تبریز انجام گرفت. با توجه به اینکه مطالعات ذکر شده در بخش پیشینه‌ی پژوهش، عمده حرکات گسل تبریز را از نوع حرکات امتداد لغز معرفی کرده‌اند؛ لذا در مشاهدات میدانی به شناسایی و تهیه عکس از برخی پدیده‌های تکتونیکی ناشی از گسلش امتداد لغز گسل تبریز در محدوده‌ی کلان‌شهر تبریز پرداخته شد.

## بحث و نتایج

### تحلیل شاخص‌های ژئومورفیک در حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای

#### ۱. تراکم زهکشی ( $\mu$ )<sup>۱</sup>

تراکم زهکشی شاخص کمی مفیدی برای ارزیابی تکتونیکی در حوضه‌های آبریز به شمار می‌آید. هر چه ضریب تراکم زهکشی بیش‌تر باشد، بیان‌گر تکتونیک فعال در حوضه است (پارتا<sup>۲</sup>، ۲۰۱۲: ۵۰). این شاخص با رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$\mu = \sum L_i / A \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

در رابطه‌ی (۱)  $\mu$ : تراکم زهکشی به کیلومتر بر کیلومتر مربع،  $L_i$ : طول آبراهه‌ها به کیلومتر،  $A$ : مساحت حوضه به کیلومتر مربع است.

1- Drainage Density

2- Pareta

در این پژوهش، ابتدا آبراهه‌ها به روش استراهلر<sup>۱</sup> با برنامه‌ی جانبی رتبه‌بندی آبراهه<sup>۲</sup> در محیط نرم‌افزاری ArcGIS10.2 رتبه‌بندی شده، سپس طول آبراهه‌ها و مساحت حوضه‌ها اندازه‌گیری و شاخص تراکم زهکشی محاسبه گردید. جدول ۱ مقادیر شاخص تراکم زهکشی برای حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، حوضه‌ها به ترتیب با مقادیر عددی ۰/۵۱ و ۰/۵۷ از نظر فعالیت تکتونیکی نسبتاً فعال هستند.

جدول (۱) مقادیر شاخص تراکم زهکشی

نام حوضه	$L_i$ (km)	A (km <sup>2</sup> )	$\mu$ (km/km <sup>2</sup> )	وضعیت تکتونیکی
گماناب‌چای	۲۰۹/۵	۴۰۷	۰/۵۱	نسبتاً فعال
ورکش‌چای	۳۵۲/۹	۶۱۳	۰/۵۷	نسبتاً فعال

## ۲. انشعاب‌پذیری (BR)<sup>۳</sup>

یکی از مواردی که در تحلیل تغییرات تکتونیکی در مسیر رودخانه‌ها بر آن تأکید می‌شود، تغییرات نسبت انشعاب است. هر قدر نسبت انشعاب بزرگ‌تر باشد، بیان‌گر فعالیت‌های تکتونیکی بیش‌تر حوضه است. نسبت انشعاب با استفاده از رابطه‌ی ۲ قابل محاسبه است:

$$BR = \left( \frac{n_2}{n_2} + \frac{n_2}{n_3} + \frac{n_3}{n_4} + \dots + \frac{n_i - 1}{n_i} \right) \frac{1}{i - 1} \quad (۲) \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

در رابطه‌ی (۲)، BR: نسبت انشعاب،  $n_1, n_2, n_3, \dots$  و  $n_i$  به ترتیب تعداد آبراهه‌های رده ۱، ۲، ۳، ... و  $i$ ، شماره‌ی رده‌ی آبراهه‌ی اصلی حوضه است (یمانی و علمیزاده، ۱۳۹۳: ۱۸). با توجه به نتایج جدول ۲، حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای به ترتیب با مقادیر عددی ۲ و ۲/۱ کم‌ترین فعالیت تکتونیکی را نشان می‌دهند.

جدول (۲) مقادیر انشعاب‌پذیری

نام حوضه	BR	وضعیت تکتونیکی
گماناب‌چای	۲	غیر فعال
ورکش‌چای	۲/۱	غیر فعال

## ۳. نسبت شکل حوضه‌ی آبریز (Bs)<sup>۴</sup>

نسبت شکل حوضه‌ی آبریز طبق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

1- Strahler  
2- Stream Order  
3- Bifurcation Ratio  
4- Drainage Basin Shape Ratio

$$Bs = B1/Bw \quad (۳) \text{ رابطه‌ی}$$

در رابطه‌ی (۳)، Bs: نسبت شکل حوضه‌ی آبریز، B1: طول حوضه‌ی آبریز از خروجی حوضه تا انتهایی‌ترین بخش آن و Bw: عرض پهن‌ترین بخش حوضه‌ی آبریز است. حوضه‌های کشیده‌ای که با مقادیر بیش‌تر از ۴ مشخص می‌شوند، از لحاظ تکتونیک فعال هستند. مقادیر بین ۳-۴ بر حوضه‌های نیمه‌فعال دلالت می‌کنند و مقادیر کم‌تر از ۳ حوضه‌های دایره‌ای شکل را نشان می‌دهد که از نظر تکتونیک غیرفعال‌اند (رامشت و همکاران، ۲۰۱۰: ۵۰۸). جدول ۳ مقادیر نسبت شکل حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، حوضه‌ها به ترتیب با مقادیر عددی ۲/۲ و ۱/۸ از نظر تکتونیک وضعیت آرامی دارند.

جدول (۳) مقادیر نسبت شکل حوضه

نام حوضه	B1 (km)	BW (km)	BS	وضعیت تکتونیکی
گماناب‌چای	۳۹/۲	۱۷/۲	۲/۲	غیرفعال
ورکش‌چای	۵۲/۹	۲۸/۹	۱/۸	غیرفعال

#### ۴. منحنی هیپسومتری (HC)<sup>۱</sup> و انتگرال هیپسومتری (HI)<sup>۲</sup>

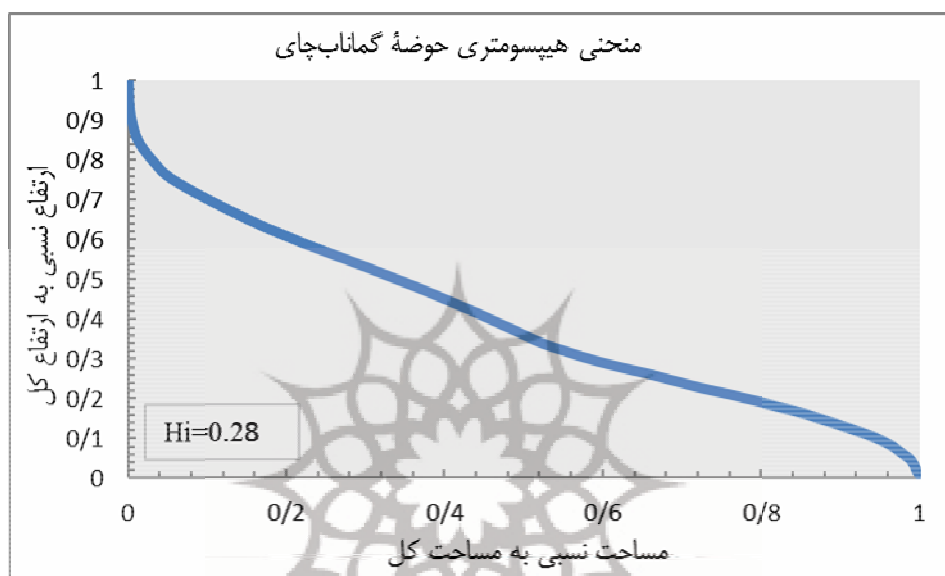
منحنی‌های هیپسومتری عمدتاً در مطالعات تکتونیک‌ی ابزار مفیدی برای ارزیابی مسایل ژئومورفولوژی هستند. منحنی‌های هیپسومتری، توزیع سطوح ارتفاعی حوضه‌های آبریز را توصیف می‌کنند که با ترسیم ارتفاع نسبی در مقابل مساحت نسبی حوضه به دست می‌آید. رابطه‌ی ۴ یک روش برای برآورد انتگرال هیپسومتری است:

$$Hi = (H_{mean} - H_{min}) / (H_{max} - H_{min}) \quad (۴) \text{ رابطه‌ی}$$

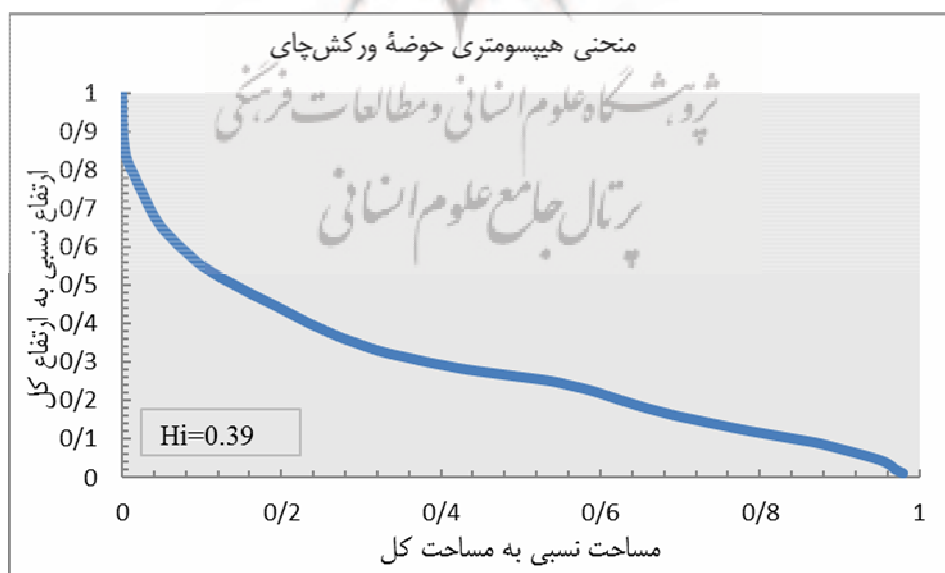
در رابطه‌ی (۴)،  $H_{maen}$ : میانگین ارتفاع و  $H_{min}$  و  $H_{max}$  به ترتیب حداقل و حداکثر ارتفاع حوضه هستند (علیزاده، ۱۳۹۰: ۵۰۲). مقادیر بیش‌تر از ۰/۵ بالا آمدگی‌ها، مقادیر بیش‌تر از ۰/۴ و کم‌تر از ۰/۵ وضعیت تکتونیک‌ی نسبتاً فعال و مقادیر کم‌تر از ۰/۴ حوضه‌های پست با فعالیت‌های تکتونیک‌ی کم را بیان می‌کنند (ده‌بزرگی و همکاران، ۲۰۱۰: ۵). با پیشرفت‌های اخیر سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های رقومی ارتفاع، ترسیم منحنی‌های هیپسومتری آسان‌تر شده است (خاوری و همکاران، ۲۰۱۰: ۹۷۱). برای ترسیم منحنی هیپسومتری حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای با استفاده از مدل رقومی ارتفاع، از جعبه ابزاری<sup>۳</sup> به نام Calhypo<sup>۴</sup> در نرم‌افزار ArcGIS10.2 استفاده شد که مزیت آن، استخراج سریع مقادیر آماری و ترسیم

1- Hypsometric Curve  
2- Hypsometric Integral  
3- Toolbox

منحنی هیپسومتری نسبتاً دقیق است (شکل ۲). بررسی اشکال منحنی‌های هیپسومتری، بیان‌گر آن است که حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای از نظر تحول به مرحله‌ی بلوغ نزدیک‌ترند و انتگرال هیپسومتری با مقادیر عددی به ترتیب ۰/۲۸ و ۰/۳۹، مرحله‌ی میانی را از نظر تحول ژئومورفولوژیکی نشان می‌دهد. قابل ذکر است بالا آمدگی بخش‌های میانی و پایین دست در منحنی‌های هیپسومتری، می‌تواند دلیلی بر فعالیت‌های تکتونیکی در منطقه باشد.



(الف)



(ب)

شکل (۲) منحنی هیپسومتری، (الف) حوضه‌ی گماناب‌چای و (ب) حوضه‌ی ورکش‌چای

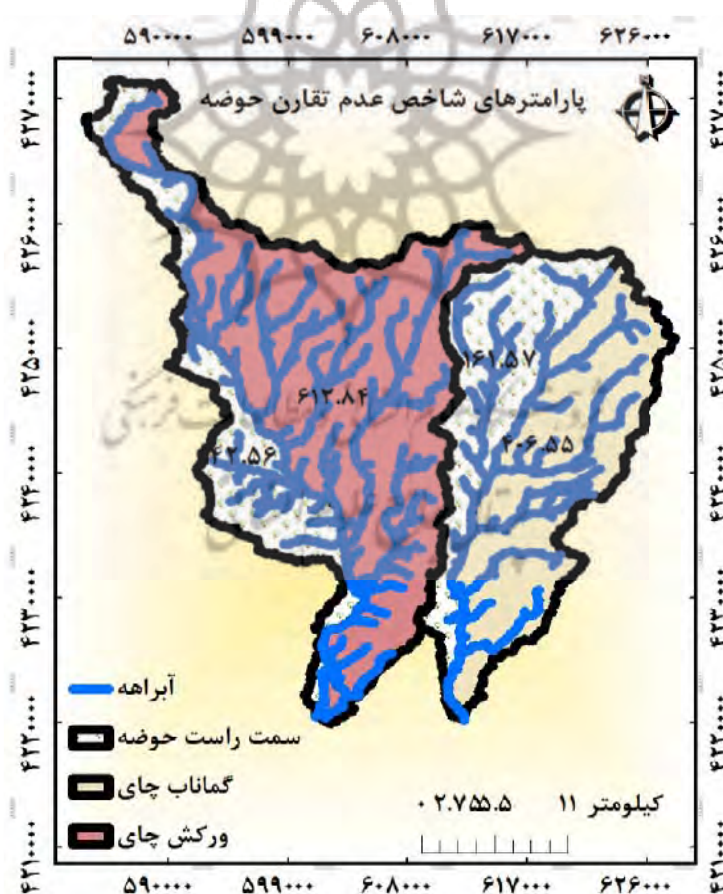


۵. عدم تقارن حوضه‌ی آبریز (AF)<sup>۱</sup>

شاخص عدم تقارن حوضه‌ی آبریز طبق رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود:

$$AF = (Ar / Ar) \times 100 \quad (۶) \quad \text{رابطه‌ی ۶}$$

در رابطه‌ی (۶)،  $Ar$ : مساحت قسمت راست حوضه (در جهت پایین رود) نسبت به رود اصلی و  $At$ : مساحت کل حوضه‌ی زهکشی است. مقادیر بیش‌تر از ۶۵ یا کم‌تر از ۳۵ بیان‌گر کج‌شدگی و ناپایداری حوضه‌ها و مقادیر بین ۶۵ تا ۵۷ یا بین ۴۳ تا ۳۵ حوضه‌های نسبتاً پایدار و مقادیر بین ۵۷ و ۴۳ بیان‌گر حوضه‌های پایدار است (ده‌بزرگی و همکاران، ۲۰۱۰: ۵). شکل ۳ نحوه‌ی اندازه‌گیری و جدول ۴ مقادیر پارامترهای شاخص عدم تقارن حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای را نشان می‌دهد. بر طبق نتایج، حوضه‌ها با مقادیر عددی به ترتیب ۳۹/۷ و ۲۳/۲ از نظر تکتونیک‌ی نسبتاً فعال و فعال بوده و سمت راست حوضه‌ها نسبت به سمت چپ فعال‌تر می‌باشد.



شکل (۳) ارزیابی شاخص عدم تقارن حوضه

جدول (۴) مقادیر شاخص عدم تقارن حوضه

نام حوضه	Ar (km <sup>2</sup> )	At (km <sup>2</sup> )	AF	وضعیت تکتونیکی
گماناب‌چای	۱۶۱/۵	۴۰۶/۵	۳۹/۷	نسبتاً فعال
ورکش‌چای	۱۴۲/۵	۶۱۲/۸	۲۳/۲	فعال

۶. تقارن توپوگرافی معکوس (T)<sup>۱</sup>

دیگر شاخص کمی عامل تقارن توپوگرافی معکوس است که در بررسی حرکات تکتونیک فعال به کار برده می‌شود. شاخص تقارن توپوگرافی معکوس از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

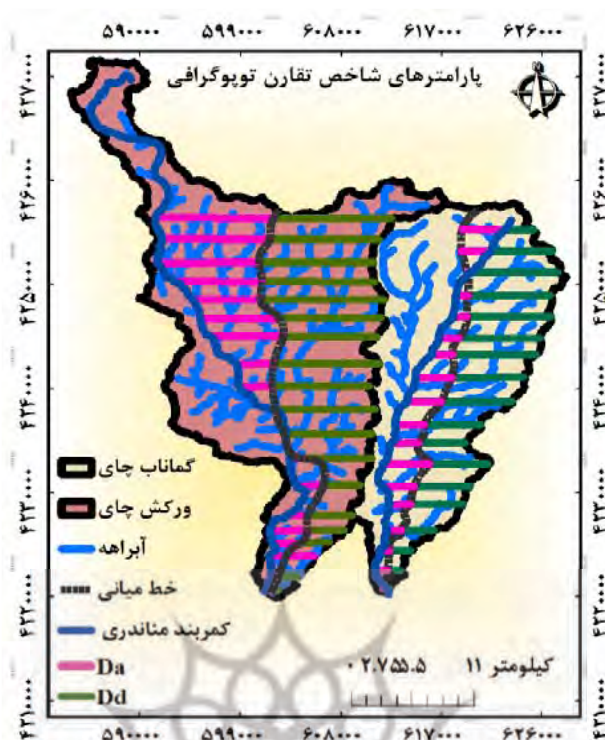
$$T = Da/Dd \quad (7) \text{ رابطه‌ی } (7)$$

در رابطه (۷) T: تقارن توپوگرافی معکوس، Da: فاصله‌ی خط میانی حوضه‌ی زهکشی تا کمربند فعال مئاندری حوضه (مسیر رود اصلی) و Dd: فاصله‌ی خط میانی حوضه تا خط تقسیم آب است. مقدار T بیان‌گر یک بردار با مقادیر عددی بین صفر تا یک می‌باشد که مقادیر عددی نزدیک به یک بیان‌گر تکتونیک فعال است (عزتی و آق‌آتابای، ۲۰۱۳: ۱۸۰).

برای محاسبه‌ی شاخص تقارن توپوگرافی معکوس، ابتدا خط میانی حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای ترسیم شد. سپس پارامترهای Da و Dd در ۲۰ مقطع تعیین و میانگین شاخص محاسبه گردید که نحوه‌ی ارزیابی و مقادیر آن در شکل ۴ و جدول ۵ ارایه شده است. از آن جایی که مقادیر محاسبه شده به عدد یک نزدیک‌تر هستند، از این‌رو از نظر حرکات تکتونیک فعال می‌باشند.

جدول (۵) مقادیر شاخص تقارن توپوگرافی معکوس

نام حوضه	میانگین Da (km)	میانگین Dd (km)	میانگین T	وضعیت تکتونیکی
گماناب‌چای	۱/۹	۵/۳	۰/۳۶	فعال
ورکش‌چای	۴	۶/۲	۰/۵۹	فعال



شکل (۴) ارزیابی شاخص تقارن توپوگرافی معکوس

#### ۷. سینوسی جبهه‌ی کوهستان (Smf)<sup>۱</sup>

یکی از شاخص‌هایی که با ارزیابی مورفومتری، بررسی تغییرات مورفولوژی جبهه‌های کوهستانی و سپس تعیین میزان نسبی فعالیت تکتونیکی را امکان‌پذیر ساخته است، شاخص سینوسی جبهه کوهستان می‌باشد. این شاخص از طریق رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود:

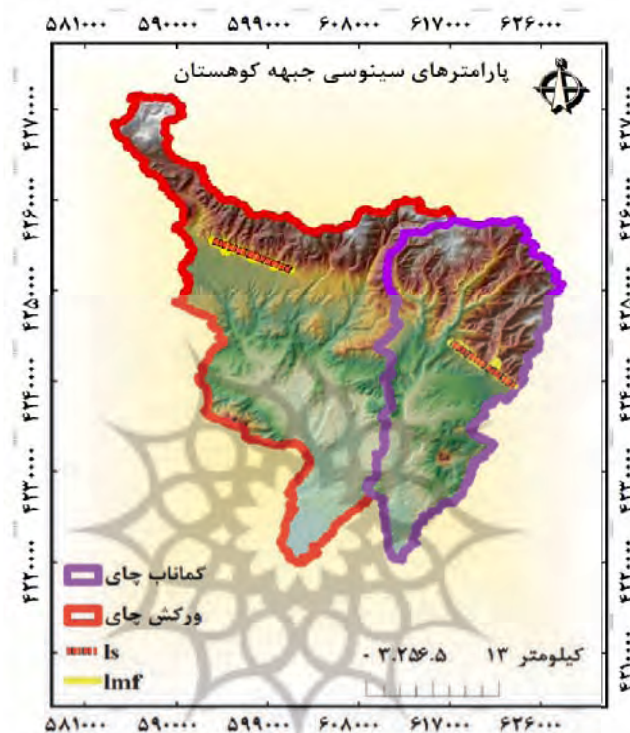
$$\text{Smf} = \text{Lmf} / \text{Ls} \quad (۸)$$

در رابطه (۸)، Smf: شاخص سینوسی جبهه‌ی کوهستان، Lmf: طول جبهه‌ی کوهستان در امتداد کوهپایه و در محل شکست مشخص شیب و Ls: طول خط مستقیم جبهه‌ی کوهستان است (جوادی موسوی و همکاران، ۱۳۹۱: ۲۲۱). این شاخص برای مناطق فعال مقادیر کم‌تر از ۱/۱، مناطق با فعالیت متوسط بین ۱/۱ تا ۱/۵ و جبهه‌های کوهستانی غیرفعال مقادیر بیش‌تر از ۱/۵ را شامل می‌شود (شاه زیدی و همکاران، ۲۰۱۱: ۳۸۹). در این پژوهش، ابتدا با مدل رقومی ارتفاع تصویر برجسته‌ای<sup>۲</sup> از حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای برای نمایش هر چه بهتر توپوگرافی در نرم‌افزار ArcGIS10.2 ساخته شد و سپس، پارامترهای

1- Mountain-Front Sinuosity

2- Hillshade

Ls و Lmf در امتداد جبهه‌های کوهستانی متمایل به دشت اندازه‌گیری و شاخص سینوسی جبهه‌ی کوهستان محاسبه گردید که نتایج آن در شکل ۵ و جدول ۶ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای با مقادیر عددی به ترتیب  $1/4$  و  $0/93$  دارای وضعیت تکتونیکی نسبتاً فعال و فعال هستند.



شکل (۵) ارزیابی شاخص سینوسی جبهه‌ی کوهستان

جدول (۶) مقادیر شاخص سینوسی جبهه‌ی کوهستان

نام حوضه	Lmf (km)	Ls (km)	Smf	وضعیت تکتونیکی
گماناب‌چای	۱۱/۱	۷/۸	۱/۴	نسبتاً فعال
ورکش‌چای	۷/۸	۸/۳	۰/۹۳	فعال

#### ۸. سینوسی رودخانه اصلی (S)

از دیگر شاخص‌های مورد استفاده برای بررسی فعالیت تکتونیکی حوضه‌های آبریز، شاخص سینوسی رودخانه است. شاخص سینوسی رودخانه‌ی اصلی به صورت رابطه‌ی ۹ تعریف می‌شود:

$$S = C/V \quad (۹)$$

در رابطه (۹)، S: شاخص سینوسی رودخانه‌ی اصلی، C: طول رودخانه، V: طول مستقیم رودخانه است. مقادیر عددی کم‌تر از ۱/۵ شاخص سینوسی رودخانه، نشان‌دهنده‌ی فعالیت تکتونیکی منطقه و بیش‌تر بودن میزان ضریب از عدد ۱/۵ هم بر نزدیک شدن رودخانه به حالت تعادل دلالت می‌کند (عابدینی و شبرنگ، ۱۳۹۳: ۶۱). نتایج شاخص سینوسی رودخانه در جدول ۷ ارائه شده است. بر این اساس، مقادیر عددی به ترتیب ۱/۱ و ۱/۳ شاخص سینوسی رودخانه در حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای، بیان‌گر این نکته است که حوضه‌های منطقه هنوز به حالت تعادل نرسیده‌اند.

جدول (۷) مقادیر شاخص سینوسی رودخانه‌ی اصلی

نام حوضه	C (km)	V (km)	S	وضعیت تکتونیکی
گماناب‌چای	۴۳/۷	۳۷/۶	۱/۱	فعال
ورکش‌چای	۷۰/۱	۵۰/۳	۱/۳	فعال

#### ۹. نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره (Vf)

مقایسه‌ی پهنای کف دره به متوسط ارتفاع آن، شاخصی را فراهم می‌کند که حفر پایین دست رودخانه را نشان می‌دهد. شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$Vf = 2Vfw/[Eld - Esc] + (Erd - Esc) \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، Vf: شاخص پهنای کف دره به ارتفاع دره، Vfw: پهنای کف دره، Eld و Erd: ارتفاع دیواره‌های چپ و راست دره و Esc: ارتفاع کف دره می‌باشد (علایی‌طالقانی، ۲۰۱۳: ۵). مقادیر کم‌تر از ۰/۵ بیان‌گر تکتونیک فعال منطقه، مقادیر بین ۰/۵ و ۱ معرف مناطق با فعالیت تکتونیکی متوسط و مقادیر عددی بیش‌تر از ۱ بیان‌گر عدم فعالیت‌های تکتونیکی است (ده‌بزرگی و همکاران، ۲۰۱۰: ۷). در این پژوهش، ابتدا با مدل رقومی ارتفاع تصویر برجسته‌ای از حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای برای نمایش هرچه بهتر توپوگرافی ساخته شد و سپس با برنامه‌ی جانبی آنالیز سه بعدی<sup>۱</sup> در نرم‌افزار ArcGIS 10.2، پروفیل‌های عرضی دره‌ها عمود بر آبراهه‌های اصلی و فرعی در بالادست جبهه‌ی کوهستانی حوضه‌ها ترسیم و مقادیر پارامترهای شاخص Vf به ترتیب در ۲۰ و ۷ مقطع اندازه‌گیری و شاخص Vf محاسبه گردید که نتایج آن در شکل ۶ و جدول ۸ ارائه شده است. بر اساس نتایج، حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای با مقادیر

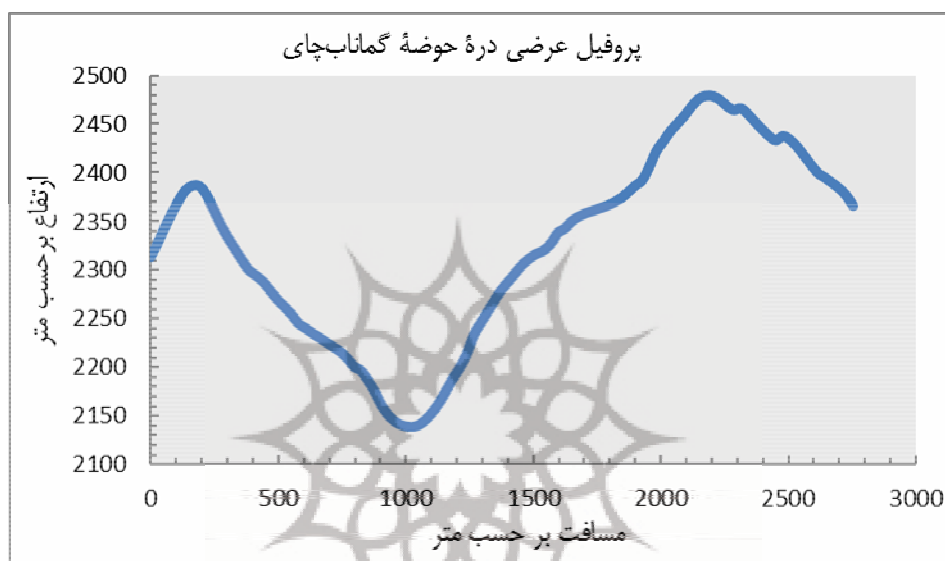
1- Ratio of Valley Floor Width to Valley Height Index

2- 3D Analyst

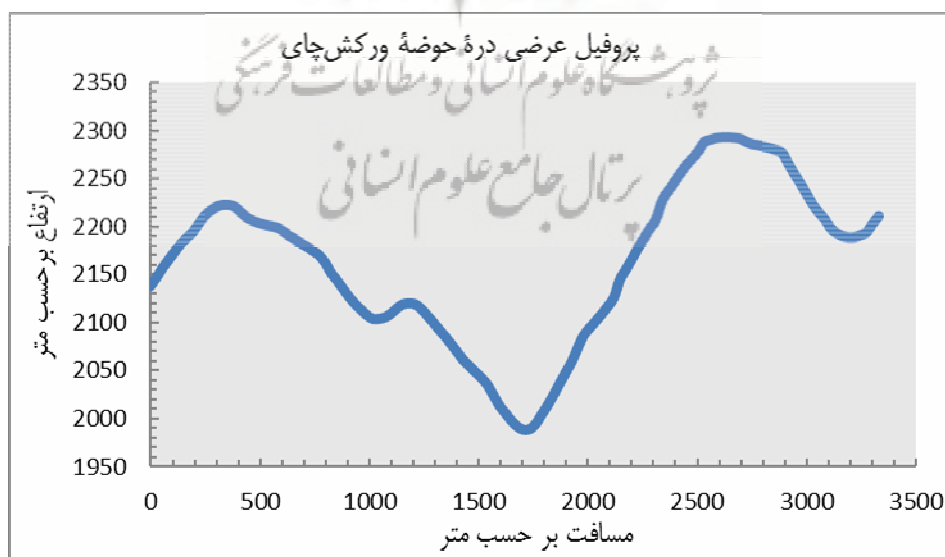
عددی به ترتیب ۱/۰۸ و ۱/۲ این شاخص از نظر فعالیت‌های تکتونیکی فعال هستند. شکل ۷ نمونه‌ای از دره‌های تکتونیکی حوضه‌ی ورکش‌چای را در مشاهدات میدانی نشان می‌دهد.

جدول (۸) مقادیر شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع

نام حوضه	میانگین Vfw	میانگین Eld	میانگین Erd	میانگین Esc	میانگین Vf	وضعیت تکتونیکی
گماناب‌چای	۲۹۷/۸	۲۲۴۳/۹	۲۲۶۳/۶	۱۹۶۵/۶	۱/۰۸	فعال
ورکش‌چای	۳۱۰/۲	۲۳۱۶/۶	۲۳۵۳/۸	۲۱۱۰/۵	۱/۲	فعال



(الف)



(ب)

شکل (۶) پروفیل عرضی نمونه‌ای از دره‌ها، (الف) حوضه‌ی گماناب‌چای، (ب) حوضه‌ی ورکش‌چای



شکل (۷) نمونه‌ای از دره‌ی تکتونیک‌ی حوضه‌ی ورکش‌چای

#### ۱۰. گرادیان طولی رود (SL)<sup>۱</sup>

شاخص گرادیان طولی رود ابزاری کاربردی در اندازه‌گیری بی‌نظمی‌های پروفیل طولی رودخانه است که به تغییرات شیب کانال حساس است (جایپا و ناراجو، ۲۰۱۲: ۲۱۶). شاخص گرادیان طولی رود بر اساس رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$SL = \Delta H / \Delta L \times L \quad (۱۱) \text{ رابطه‌ی}$$

در رابطه (۱۱)، SL: شاخص گرادیان طولی رود،  $\Delta H$ : اختلاف ارتفاع،  $\Delta L$ : فاصله‌ی افقی،  $\Delta H/\Delta L$ : شیب کانال یا گرادیان مسیر رود در مقطع مشخص و L: طول رودخانه از نقطه‌ی مرکزی مقطع اندازه‌گیری شده تا سرچشمه‌ی رودخانه است. مقادیر عددی بیش‌تر از ۵۰۰ این شاخص بیان‌گر تکتونیک فعال، مقادیر بین ۵۰۰ تا ۳۰۰ با فعالیت متوسط و مقادیر کم‌تر از ۳۰۰ بیان‌گر عدم فعالیت تکتونیک در منطقه است (ده‌بزرگی و همکاران، ۲۰۱۰: ۳). در این پژوهش، ابتدا خطوط منحنی میزان در فاصله‌های صد متری با استفاده از مدل رقومی ارتفاع در محیط نرم‌افزاری ArcGIS10.2 ترسیم و با تابع تحلیلی اشتراک<sup>۲</sup>، نقاط اشتراکی خطوط منحنی میزان با شبکه‌ی آبراهه تعیین و مقادیر پارامترهای شاخص SL به ترتیب در ۴۸ و ۶۳ مقطع آبراهه‌های اصلی و فرعی برای حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای اندازه‌گیری و نقشه‌ی پهنه‌بندی آن

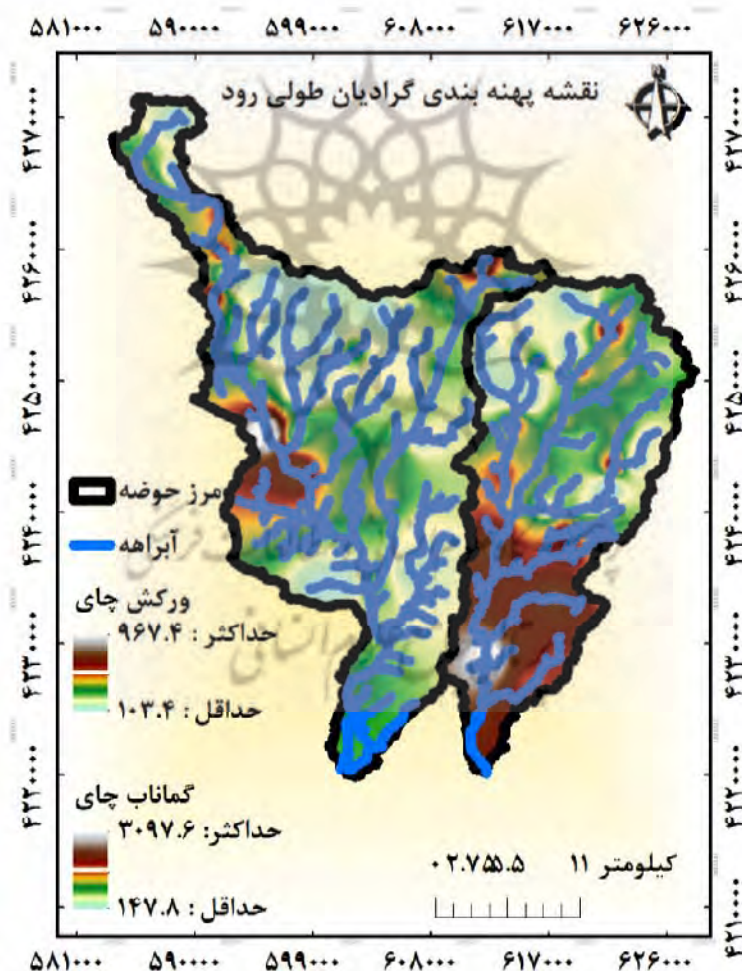
1- Stream Length-Gradient Index

2- Intersect

به روش درون‌یابی فاصله‌ی وزنی معکوس (IDW)<sup>۱</sup> تهیه شد. بر اساس نتایج شکل ۸ و جدول ۹، میانگین شاخص SL به دست آمده در حوضه‌ی آبریز گماناب‌چای، ۱۲۰۲ است که نشانگر فعال بودن تکتونیکی آن است. اما، حوضه‌ی آبریز ورکش‌چای با میانگین مقدار عددی ۳۱۸ از نظر فعالیت‌های تکتونیکی نسبتاً فعال است. در حوضه‌ی آبریز گماناب‌چای، عملکرد اصلی گسل تبریز در مسیر آبراهه‌ی اصلی بخش انتهایی حوضه با افزایش مقادیر شاخص SL دیده می‌شود که با مشاهدات میدانی نیز تأیید شد (شکل ۹).

جدول (۹) مقادیر شاخص گرادیان طولی رود

نام حوضه	میانگین SL	وضعیت نوزمین‌ساختی
گماناب‌چای	۱۲۰۲	فعال
ورکش‌چای	۳۱۸	نسبتاً فعال



شکل (۸) پهله‌بندی شاخص گرادیان طولی رود به روش درون‌یابی

1- Inverse Distance Weight





(الف)



(ب)

شکل (۹) (الف) حفر بستر سنگی، (ب) تراس‌های رودخانه‌ای در پایین دست حوضه‌ی گماناب‌چای

۱۱. طبقه‌بندی شاخص‌ها بر اساس شاخص نسبی تکتونیکی فعال (Iat)<sup>۱</sup>

شاخص نسبی تکتونیکی فعال به وسیله‌ی میانگین کلاس‌های مختلف شاخص‌های ژئومورفیک (S/n) به دست می‌آید و بر اساس مقادیر به دست آمده به چهار کلاس تقسیم می‌گردد که در این تقسیم‌بندی کلاس ۱ با فعالیت شدید تکتونیکی، کلاس ۲ با فعالیت بالا، کلاس ۳ با فعالیت متوسط و کلاس ۴ با فعالیت کمی فعال مشخص می‌شود (همدونی<sup>۲</sup>، ۲۰۰۸: ۱۶۶). این شاخص طبق رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید:

$$\text{Iat} = S/n \quad (12) \text{ رابطه‌ی (۱۲)}$$

در رابطه (۱۲)، Iat: شاخص نسبی تکتونیکی فعال، S: مجموع کلاس‌های شاخص‌های ژئومورفیک محاسبه شده، n: تعداد شاخص‌های محاسبه شده است. مقادیر شاخص Iat ما بین ۱ تا ۱/۵ نشانگر فعالیت‌های تکتونیکی شدید، بیش‌تر از ۱/۵ و کم‌تر از ۲ فعالیت‌های تکتونیکی زیاد، بیش‌تر از ۲ و کم‌تر از ۲/۵ بیان‌گر فعالیت‌های تکتونیکی متوسط و بیش‌تر از ۲/۵ فعالیت‌های کم و ناچیز است (ده‌بزرگی و همکاران، ۲۰۱۰: ۸). بر اساس نتایج جدول ۱۰، حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای با مقادیر عددی به ترتیب ۱/۹ و ۱/۷ دارای فعالیت تکتونیکی زیاد هستند.

جدول (۱۰) مقادیر شاخص نسبی تکتونیکی فعال

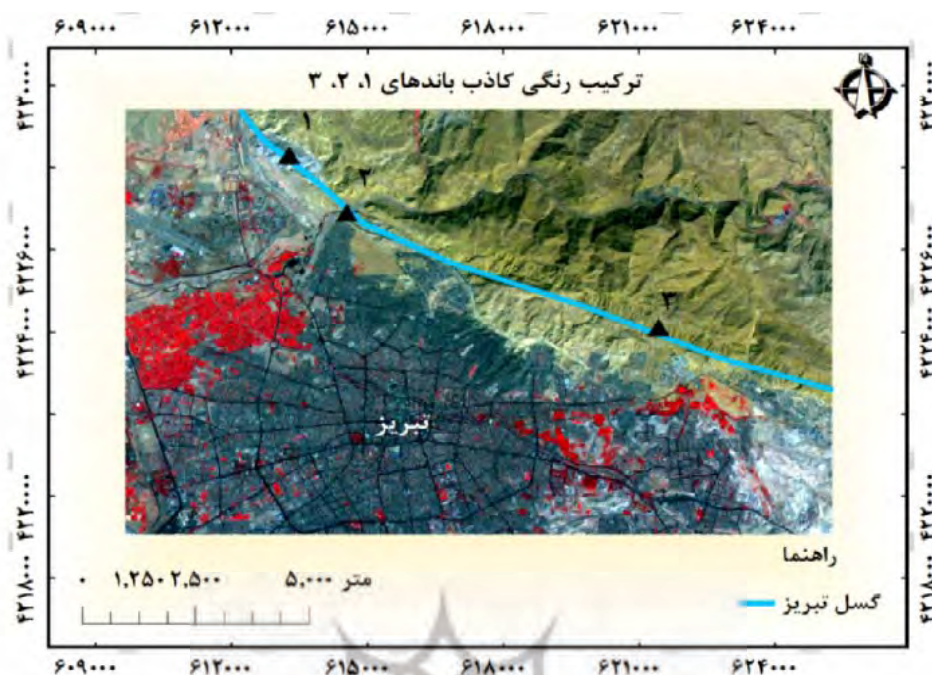
نام حوضه	$\mu$	BR	BS	Hi	AF	T	Smf	S	Vf	SL	Iat	وضعیت تکتونیکی
گماناب‌چای	۲	۳	۳	۳	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۱/۹	زیاد
ورکش‌چای	۲	۳	۳	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۱/۷	زیاد

## بررسی شواهد تکتونیکی گسل تبریز در محدوده‌ی کلان‌شهر تبریز با تکنیک سنجش از دور

با توجه به هدف پژوهش حاضر پس از اعمال مراحل پیش پردازشی و بسط خطی تصاویر، برخی ترکیبات رنگی کاذب از ترکیبات بانندی ASTER ساخته شده و با تفسیر بصری ارزیابی شد. از آن‌جا که در اغلب مطالعات گسل‌ها با تصاویر ماهواره‌ای، تکنیک ترکیب بانندی کارآیی زیادی دارد؛ لذا باندهای مرئی ASTER باهم ترکیب شدند. با تجربه به دست آمده ثابت شد که ترکیب رنگی باندهای مرئی با اختصاص سه رنگ اصلی به ترتیب آبی، سبز و قرمز به باندهای ۱، ۲، ۳ (RGB321) بهترین ترکیب رنگی برای ممیزی بین پدیده‌ها است (شکل ۱۰).

1- Index Active Tectonic

2- Hamdouni



شکل (۱۰) ترکیب رنگی کاذب باندهای مرئی سنجنده ASTER

در تفسیر چشمی تصاویر رنگی کاذب برای تفسیر گسل، بر اساس ساختار موجود در منطقه، شرایط زیر را باید در نظر گرفت (بابااحمدی، ۱۳۸۷: ۱۱۴):

الف. قطع شدگی، جابجایی و کشیدگی ساختارهای زمین‌شناسی مانند آبراهه‌ها و رودخانه‌ها؛

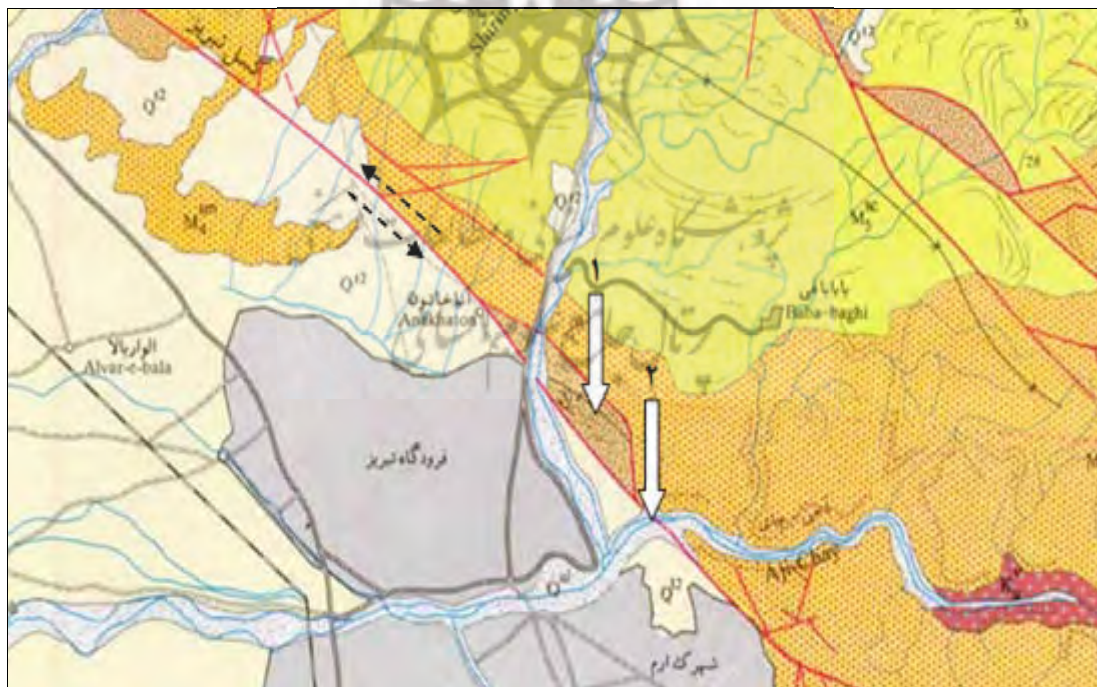
ب. قرار گرفتن دو نوع سازند زمین‌شناسی متفاوت در کنار یکدیگر؛

پ. وجود ساختارهای پلکانی و عدسی‌های تشکیل شده در واحدهای سنگی.

تغییر ناگهانی رنگ واحدهای لیتولوژی در شکل ۱۰ بیان‌گر گذر گسل تبریز است. پس از تعیین مسیر گذر گسل تبریز روی تصویر رنگی، شواهد تکتونیکی در پیرامون گسل با استفاده از عناصر اصلی تفسیر بصری شامل شکل، رنگ و بافت بررسی شدند. با توجه به شکل ۱۰، در امتداد گسل تبریز تغییراتی رخنمون یافته است که نمایان‌گر فعالیت تکتونیکی آن است. شواهد تکتونیکی همچون انحراف آبراهه‌ی آجی‌چای، پرتگاه گسل و پدیده‌ی عدسی شکل مهم‌ترین شاخص‌هایی هستند که در تفسیر عملکرد تکتونیکی گسل تبریز بر روی تصویر ماهواره‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. شکل ۱۱ بزرگ‌نمایی برخی شواهد تکتونیکی گسل تبریز بر روی تصویر ماهواره‌ای را نشان می‌دهد. به منظور کنترل نتایج تفسیری شکل ۱۰، از نقشه‌ی زمین‌شناسی و شواهد میدانی منطقه نیز استفاده شد (شکل‌های ۱۲ و ۱۳).



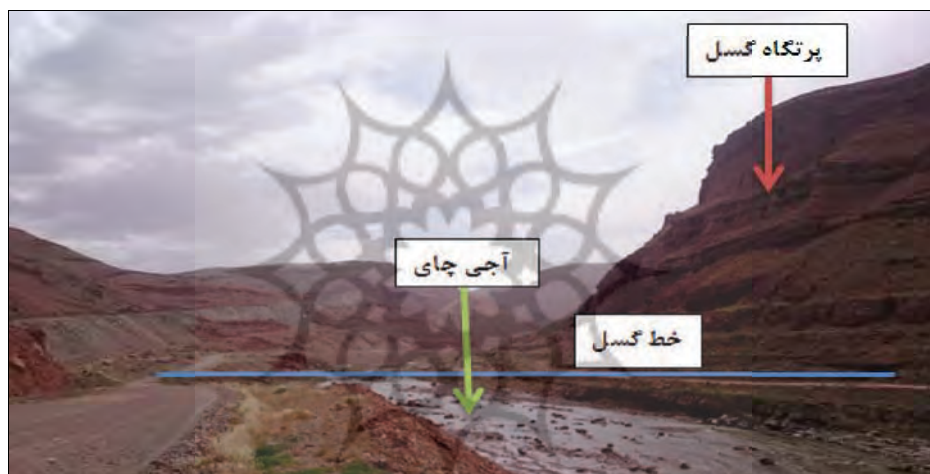
شکل (۱۱) بزرگ‌نمایی برخی شواهد تکتونیکی گسل تبریز بر روی تصویر رنگی؛  
در این شکل، ۱. پدیده‌ی عدسی شکل، ۲. انحراف آبراهه‌ی آجی‌جای، ۳. پرتگاه گسل



شکل (۱۱) بزرگ‌نمایی برخی شواهد تکتونیکی گسل تبریز بر روی نقشه‌ی زمین‌شناسی؛  
در این شکل، ۱. پدیده‌ی عدسی شکل، ۲. انحراف آبراهه‌ی آجی‌جای



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۲) (الف) پرنگاه گسلی در شمال شرق تبریز، در این شکل، (ب) انحراف آبراهه‌ی آجی چای، (ج) پدیده‌های عدسی شکل

## نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک، تکنیک سنجش از دور و GIS به بررسی فعالیت‌های تکتونیکی گسل تبریز در محدوده‌ی کلان‌شهر تبریز پرداخته است. طبق نتایج، مقادیر کمی شاخص‌های تراکم زهکشی ۰/۵۱ و ۰/۵۷، نسبت انشعاب ۲ و ۲/۱، نسبت شکل حوضه ۲/۲ و ۱/۸، عدم تقارن حوضه ۳۹/۷ و ۲۳/۲، تقارن توپوگرافی معکوس ۰/۳۶ و ۰/۵۹، انتگرال هیپسومتری ۰/۲۸ و ۰/۳۹، سینوسی جبهه‌ی کوهستان ۱/۴ و ۰/۹۳، سینوسی رودخانه ۱/۱ و ۱/۳، پهنای کف دره به ارتفاع دره ۱/۰۸ و ۱/۲، گرادیان طولی رود ۱۲۰۲ و ۳۱۸ به ترتیب برای حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای به دست آمد. بر اساس شاخص ارزیابی نسبی تکتونیک فعال، حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای به ترتیب با مقادیر عددی ۱/۹ و ۱/۷ دارای حرکات تکتونیکی زیاد هستند. نتایج شاخص‌های مورد بررسی، حاکی از تأثیرپذیری مورفولوژی حوضه‌های آبریز گماناب‌چای و ورکش‌چای از حرکات تکتونیکی گسل تبریز است. با توجه به تفسیر بصری داده‌های ماهواره‌ای در امتداد گسل تبریز تغییراتی رخنمون یافته است که نمایان‌گر فعالیت تکتونیکی آن در محدوده‌ی کلان‌شهر تبریز می‌باشد. شواهد تکتونیکی همچون انحراف آبراهه‌ی آجی‌چای، پرتگاه گسل و پدیده‌ی عدسی شکل مهم‌ترین شاخص‌هایی هستند که در تفسیر عملکرد تکتونیکی گسل تبریز بر روی تصویر ماهواره‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. نتایج به دست آمده از شاخص‌های ژئومورفیک و پردازش داده‌های ماهواره‌ای توسط برخی شواهد میدانی منطقه تأیید گردید. بنابراین، کلان‌شهر تبریز در منطقه‌ی مخاطره‌آمیزی از نظر حرکات تکتونیکی واقع شده است. این امر می‌بایست در مباحث برنامه‌ریزی شهری و اجرای برنامه‌های عمرانی مورد توجه مسئولان شهری قرار گیرد. این در حالی است که کلان‌شهر تبریز با جمعیتی حدود دو میلیون نفر هر روز به سمت پای‌کوه‌های ارتفاعات عون‌بن‌علی (محل عبور گسل) کشیده می‌شود. این وضعیت، مخاطرات ناشی از وقوع زمین‌لرزه را در این منطقه به شدت افزایش داده است.

## منابع

- بابااحمدی، عباس (۱۳۸۸)، کاربردهای سنجش از دور در زمین‌شناسی، چاپ دوم، تهران: انتشارات آوای قلم.
- تقی‌پور، کریم؛ ستارزاده، یوسف؛ عباسی، محمدرضا؛ مؤید، محسن و طبسی، هادی (۱۳۸۳)، بررسی گسل شمال تبریز در فاصله‌ی بین تبریز و بستان‌آباد، پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد در رشته‌ی زمین‌شناسی - تکتونیک، دانشکده‌ی علوم طبیعی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تبریز.
- جوادی موسوی، الهه؛ آرین، مهران؛ قرشی، منوچهر و ناظمی، محمد (۱۳۹۱)، «اندازه‌گیری شاخص‌های مورفوتکتونیک در منطقه‌ی طبس»، فصلنامه‌ی زمین، شماره‌ی ۲۴، صص ۲۱۳-۲۲۵.
- رامشت، محمدحسین؛ آراء، هایده؛ شایان، سیاوش و یمانی، مجتبی (۱۳۹۱)، «ارزیابی دقت و صحت شاخص‌های ژئومورفولوژیکی با استفاده از داده‌های ژئودینامیکی (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز جاجرد در شمال‌شرق تهران)»، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره‌ی ۲، صص ۳۵-۵۲.
- روستایی، معصومه؛ آق‌آتابای، مریم؛ رقیمی، مصطفی؛ رحیمی‌چاکدل، عزیز و نعمتی، مجید (۱۳۹۱)، «تحلیل فعالیت‌های نوزمین‌ساختی با استفاده از شواهد نوزمین‌ساختی در حوضه‌ی آبریز قره‌سو»، فصلنامه‌ی زمین‌شناسی ایران، شماره‌ی ۲۴، صص ۵۵-۶۵.
- رنجبری، احد؛ رجایی، عبدالحمید و رجبی، معصومه (۱۳۸۲)، مطالعه‌ی ویژگی‌های ژئومورفولوژی حوضه‌ی گماناب چای شمال تبریز، پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد، گروه جغرافیای طبیعی با گرایش ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز.
- شریفی نجف‌آبادی، رسول؛ معیری، مسعود؛ غیور، حسنعلی؛ صفایی، همایون و سیف، عبدالله (۱۳۸۹)، «بررسی و تحلیل شواهد ژئومورفیک زمین‌ساخت فعال در حوضه رودبار»، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره‌ی ۷۳، صص ۲۱-۳۶.
- شیرازی‌طرز، علی؛ رجبی، معصومه و روستایی، شهرام (۱۳۸۵)، پژوهشی در ژئومورفولوژی حوضه‌ی سنخ‌چای، پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد، گروه جغرافیای طبیعی با گرایش ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز.
- عابدینی، موسی و شبرنگ، شنو (۱۳۹۳)، «ارزیابی فعالیت‌های نوزمین‌ساخت در حوضه‌ی آبخیز مشکین‌چای از طریق شاخص‌های ژئومورفولوژی»، جغرافیا و توسعه، شماره‌ی ۳۵، صص ۴۹-۶۶.
- علیزاده، امین (۱۳۹۰)، اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ ۳۲، دانشگاه فردوسی، مشهد.
- محمودزاده، مریم؛ الماسیان، محمود؛ پورکرمانی، محسن و سلطانی، ماهیار (۱۳۹۰)، «تحلیل ساختاری گسل تبریز با استفاده از داده‌های دورسنجی»، فصلنامه‌ی زمین، سال ششم، شماره‌ی ۱۹، صص ۱۱۹-۱۳۱.
- یمانی، مجتبی و علمی‌زاده، هیوا (۱۳۹۳)، «تأثیر نوزمین‌ساخت در مورفولوژی شبکه‌ی زهکشی حوضه‌ی آبخیز نچی با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و مورفومتریک»، فصلنامه‌ی تحقیقات جغرافیایی، شماره‌ی ۱۱۲، صص ۹-۲۲.

- Anoop, A.; Prand, S.; Basavaiah, N.; Brauer, A. & Shahzad, F. (2011), “**Tectonic Versus Climate Influence on Landscape Evolution: A Case Study from the Upper Spiti Valley, NW Himalaya**”, *Geomorphology*, Vol. 14, pp. 145-146.
- Dehbozorgi, M.; Pourkermani, M.; Arian, M.; Matkan, A.A.; Motamedi, H. and Hosseinasl, A. (2010), “**Quantitative Analysis of Relative Tectonic Activity in the Sarvestan Area, Central Zagros, Iran**”, *Geomorphology*, Vol. 03284, No. 13, pp. 1-13.
- Ezati, M. & Agh-Atabai, M. (2013), “**Active Tectonic Analysis of Atrak River Sub-basin Located in NE Iran (East Alborz)**”, *Journal of Tethys*, Vol. 1, pp. 177-188.
- Einini S. & Stelios, P. (2011), “**Identification of Lineaments with Possible Structural Origin Using ASTER Images and DEM Derived Products in Western Crete Greece**”, *Earsele Proceeding*, Vol. 10, pp. 1-18.
- Hamdouni, R.El.; Iriggaray, C.; Fernandez, T.; Chacon, J. & Keller, E.A, (2008), “**Assessment of Relative Active Tectonics, Southwest Border of the Sierra Nevada (Southern Spain)**”, *Geomorphology*, Vol. 96, pp. 157-170.
- Jayappa, K.S. & Nagaraju, M. (2012), “**Identification of Geomorphic Signatures of Neotectonic Activity Using DEM in the Precambrian Terrain of Western Ghats, India, International Archives of the Photogrammetry**”, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIX-B8, pp. 215-221.
- Khavari, R.; Arian, M. & Ghorashi, M. (2010), “**Active Tectonics of the South Central Alborz (North Iran)**”, *Australian Journal of Basin and Applied Acienes*, Vol. 4, No. 6, pp. 969-993.
- Pareta, K. (2012), “**Quantitative Geomorphological Analysis of a Watershed of Ravi River Basin, H.P. India**”, *International journal of Remote Sensing and GIS*, Vol. 1, pp. 41-56.
- Shahzeidi, S.S.; Entezari, M. & Ramesht, M.H. (2011), “**The Effect of Active Tectonic to Morphology of Deakt-Tangan River Fan of Shahdad in Kerman**”, *International on Environmental Science and Technology*. Vol. 6, pp. 388-391.
- Zhang, W.; Oguchi, T.; Hayakawa, S. & Peng, H. (2013), “**Morphometric Analyses of Danxia Landforms in Relation to Bedrock Geology: A Case of Mt. Danxia, Guangdong Province, China**”, *The Open Geology Journal*, Vol. 7, pp. 54-62.
- Zhang, W.; Liu, W.; Yang, J. & Chen, L. (2012), “**Remote Sensing Data Analysis for Structural Information of Active Faults**”, *International Conference on Ecology, Waste Recycling and Environment Advances in Biomedical Engineering*, Vol. 7, pp. 13-18.