



تهیه ی نقشه ی شاخص گرادیان طولی رودخانه مبتنی بر GIS و DEM جهت ارزیابی تکتونیک فعال (مطالعه ی موردی: شمال دامغان)

وحید محمدنژاد آروق^{1*}، علی خدمت زاده²

1- استادیار گروه جغرافیا، دانشکده ی ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه

2- دانش آموخته ی کارشناسی ارشد GIS، دانشگاه تبریز

تأیید نهایی مقاله: 1399/06/02

وصول مقاله: 1399/02/15

چکیده

ژئومورفومتری بر پایه ی استفاده از نرم افزارها و داده های مدل های رقومی ارتفاعی (DEM)، امکان تجزیه و تحلیل های دقیق و سه بعدی از لندفرم های سطح زمین را، به ویژه در مناطقی که تحلیل بصری عوارض قادر به ارزیابی روند تکاملی آنها نیستند، فراهم می کند. در مقاله ی حاضر نقشه ی شاخص گرادیان طولی رودخانه های ارتفاعات شمال دامغان با استفاده از ابزارهای اتوماتیک در محیط GIS تهیه شده است. هدف اصلی این پژوهش، ارائه ی روشی اتوماتیک جهت ترسیم نقشه ی شاخص SL با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی است. بدین منظور از مدل های رقومی ارتفاعی (DEM 12.5m) و نقشه های زمین شناسی 1:100000 استفاده شد. به منظور محاسبه و استخراج این شاخص از داده های رقومی ارتفاعی بجای نیمرخ طولی رودخانه استفاده شده است تا بتوان مقادیر شاخص را به صورت سطحی و برای کل منطقه نشان داد. مقادیر SL، برای نقاط میانی منحنی میزان هایی با فاصله 50 متری محاسبه و سپس با استفاده از روش های درون یابی، برای کل منطقه محاسبه گردید. محاسبات و ترسیم نقشه ها با استفاده از نرم افزار Arc GIS 10.6 انجام گرفت. نتایج نشان می دهد که روش حاضر با توجه به اتوماتیک بودن آن با دقت و سرعت بالایی قادر به تهیه ی نقشه ی شاخص SL است. به طوری که محققان این حوزه قادرند با در اختیار داشتن این ابزار به راحتی اقدام به برآورد شاخص مذکور در مناطق مختلف با صرف زمان و هزینه بسیار پایین بکنند. همچنین مقادیر شاخص SL، در مناطق مرکزی منطقه ی مورد مطالعه و در امتداد گسل های اصلی (روند غربی - شرقی)، بالاست. بنابراین وجود گسل ها و بالآمدگی ناشی از آنها، ارتباط زیادی با مقادیر بالای گرادیان طولی رودخانه دارد. با توجه به کاربرد این شاخص در ارزیابی فعالیت های تکتونیک، می توان از آن در بررسی فعال یا غیرفعال بودن یک منطقه به لحاظ تکتونیک در کنار سایر شاخص ها، استفاده کرد.

کلمات کلیدی: تکتونیک فعال، انتگرال هیپسومتری، شاخص SL، رودخانه های شمال دامغان

1- مقدمه

آثار و شواهد فعالیت‌های تکتونیکی را می‌توان در اغلب بخش‌های کره‌ی زمین مشاهده کرد (گوارنیری و پیروتا¹، 2008: 264). ایران به لحاظ تکتونیکی در موقعیت فعالی قرار داشته و وجود گسل‌های فعال مختلف و زمین لرزه‌های متعدد تاریخی و دستگامی نشان دهنده‌ی این فعالیت‌هاست. از طرف دیگر شواهد مورفوتکتونیکی متعددی در نقاط مختلف آن شناسایی و تحلیل شده که با روش‌های مختلفی صورت گرفته است. یکی از روش‌های پر کاربرد استفاده از شاخص‌های کمی مورفوتکتونیکی است. این شاخص‌ها در حوضه‌ی آبریز سیروان (نگهبان و درتاج، 1398)، حوضه‌ی آبریز قانقلی چای زنجان (جعفری و نوروزی، 1396)، رودخانه‌های جنوبی منطقه‌ی مکران (گورابی و امامی، 1393)، حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی کرج (یمانی و علیزاده، 1395)، حوضه‌ی آبریز رودخانه هوارند چای (اسفندیاری و همکاران، 1394)، بررسی شده‌اند. نتایج این مطالعات نشان‌دهنده‌ی فعال بودن مناطق از نظر تکتونیکی است. بسیاری از مطالعات نیز بر پایه شاخص‌های کمی مورفوتکتونیکی و شواهد مورفوتکتونیکی مثل چند بخش شدگی مخروط‌افکنه‌ها، بالآمدگی رسوبات آنها و تغییرات مسیر شبکه‌ی زهکشی رودخانه‌ها استوار است. (جعفری و عباسی 1397؛ گورابی و محمدنژاد، 1397؛ محمدنژاد و اصغری، 1395 و 1394؛ گورابی و پاریزی، 1395؛ یمانی و همکاران، 1390؛ ادیب، 1382) از طرف دیگر استفاده از داده‌های ثبت شده توسط ایستگاه‌های ژئودینامیک و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و راداری از دیگر روش‌های مطالعه و بررسی شرایط تکتونیکی یک منطقه و اثر آن بر روی رودخانه‌های آن به شمار می‌رود که توسط محققان داخلی و خارجی به طور گسترده به کار گرفته شده است (سلیمانی آزاد و همکاران، 2019؛ سرکاری نژاد و گفتاری، 2019؛ رحیم‌زاده و همکاران، 2019؛ نعمتی، 2019؛ ژوسو و همکاران²، 2019؛ خلیلی و همکاران، 2019). هولینگورث³، 2010؛ ماسون و همکاران⁴، 2007؛ فتاحی، 2006؛ ریگارد⁵ و همکاران،

1- Guarnieri & Pirrotta

2- Zhe Su et al.,

3- Holinsworth

4- Masson et al.,

5- Regard

2005؛ آمبرسایز و ملویل^۱، 1982، نیز در مناطق مختلف ایران مثل کازرون، سبزواری، آستانه‌ی کپه‌داغ با استفاده از روش‌های سن‌یابی به بررسی تکتونیک فعال این مناطق پرداخته‌اند. فعالیت‌های تکتونیکی را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلفی مثل بررسی شواهد مورفولوژیکی مطالعه کرد. از روش‌های دیگر می‌توان به استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیکی اشاره کرد. تعداد زیادی از این شاخص‌ها به منظور تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی کمی، توسعه پیدا کرده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند (ترویانی و همکاران^۲، 2014؛ پرز و همکاران^۳، 2010؛ دلاستا و همکاران^۴، 2004؛ کِلر و پینتر^۵، 2002؛ کاکس^۶، 1994؛ مایر^۷، 1990؛ استرالر^۸، 1952). تعدادی از این شاخص‌ها، برای مشخص کردن میزان فعالیت‌های تکتونیکی به کار می‌روند. در این بین شاخص گرادیان طولی رودخانه بارها توسط متخصصان مختلف به منظور ارزیابی شرایط تکتونیکی در امتداد رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL)، با استفاده از گرادیان توپوگرافی در امتداد یک رودخانه، مورفولوژی شبکه‌ی زهکشی حوضه‌ی آبریز آن رودخانه را تشریح می‌کند. این شاخص به فعالیت‌های تکتونیکی و سنگ‌شناسی حساس بوده و به عنوان شاخصی برای مناطق بالا آمده تکتونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر SL در مناطقی با بالا آمدگی تکتونیکی کم، پایین بوده و در مناطق فعال بالا آمده، این مقادیر افزایش پیدا می‌کند (فونت و همکاران^۹، 2010: 178). از طرف دیگر با گسترش و تولید نرم‌افزارهای مختلف مثل GIS، و همچنین دسترسی به داده‌های رقمی ارتفاعی با قدرت تفکیک بالا موجب بالا رفتن دقت این شاخص‌ها، کاهش هزینه‌ها و

1- Ambraseys & Melville
2- Troiani et al.,
3- Pérez et al.,
4- Della Seta et al.,
5- Keler & Pinter
6- Cox
7- Mayer
8- Strahler
9- Font et al .

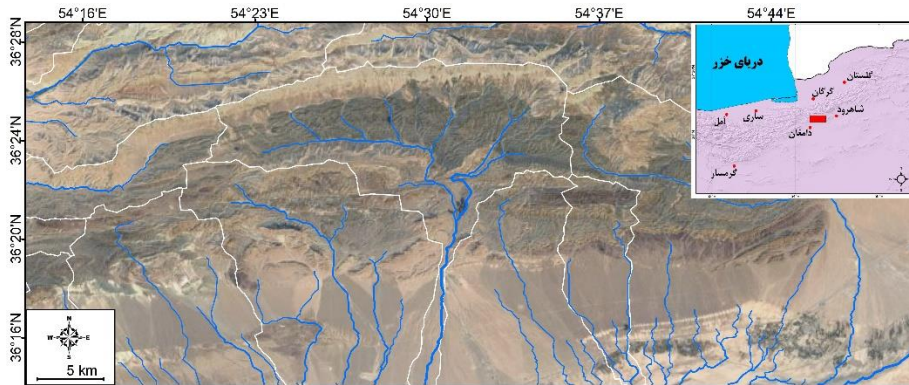
همچنین سرعت عمل بالا در ارزیابی‌های مختلف شده است (هایاکاوا و اوچوچی¹، 2009: 31).

هدف مقاله حاضر ارائه روشی نو به منظور تهیه‌ی اتوماتیک نقشه‌ی شاخص گرادیان طولی رودخانه² (SL)، با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، در رشته کوه‌های شمال دامغان (بخشی از البرز شرقی) است. در واقع در این مطالعه از مدل‌های رقومی ارتفاعی به جای نیمرخ طولی رودخانه جهت تهیه‌ی نقشه‌ی شاخص گرادیان طولی رودخانه استفاده شده است.

2- مواد و روش

منطقه مورد بررسی در شمال کویر دامغان و در رشته کوه‌های البرز شرقی واقع شده است (شکل 1). در محدوده مورد نظر چند حوضه آبریز بزرگ قرار دارد که حوضه آبریز تزاره با مساحت 381.6 کیلومتر مربع، بزرگترین حوضه به شمار می‌رود. جهت اغلب رودخانه‌ها، شمالی - جنوبی است و نوع شبکه‌ی زهکشی به لحاظ شکل، شاخه درختی هستند. تعدادی از حوضه‌ها هم به سمت شرق زهکشی می‌شوند. این رودها در جبهه کوهستان (جایی که شیب به طور ناگهانی کاهش می‌یابد) رسوبگذاری کرده و موجب شکل‌گیری مخروط‌افکنه‌های وسیعی از جمله مخروط تزاره و دامغان شده است. همین رودخانه‌ها از لحاظ ژئومورفولوژیکی در بخش کوهستان دره‌های نسبتاً عمیقی را ایجاد کرده‌اند. در مواردی که جهت رودخانه‌ها شرقی - غربی است، مسیر آنها از امتداد گسل‌ها تبعیت می‌کند. ولی همانطور که ذکر شد مهم‌ترین عوارض موجود در این منطقه مخروط‌افکنه‌های متعددی هستند که در دامنه‌های جنوبی این کوه‌ها قرار دارند و تحت تأثیر تکتونیک به شدت دچار دگرشکلی شده‌اند (یمانی و همکاران، 1390: 180). حداکثر ارتفاع منطقه 3738 متر در شمال و حداقل آن 1181 متر در بخش‌های جنوبی منطقه قرار دارد. ارتفاع متوسط منطقه هم 2106 متر است.

1- Hayakawa & Oguchi
2- Stream Length-Gradient Index



شکل (1): محدوده‌ی مورد مطالعه

Fig (2): The study area

ماهیت خشک بودن ناحیه به لحاظ اقلیمی، سبب بی‌نظمی در بارندگی شده و در بیشتر موارد بارش‌های سنگین و رگباری اتفاق می‌افتد. متوسط بارندگی سالانه در منطقه (ایستگاه‌های شاهرود، ترود و دامغان) 128 میلی‌متر و بیشتر در اواخر زمستان و اوایل بهار اتفاق می‌افتد (یمانی و همکاران، 1390: 143).

2-2- داده‌ها و تکنیک‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر و به منظور تحلیل‌های مورفومتریکی از داده‌های مدل رقومی ارتفاعی (DEM 12.5m) استفاده شده است. این تصاویر توسط ماهواره ALOS ژاپن تهیه شده و از سایت سازمان فضایی آمریکا (ناسا)، دانلود شد. از این تصاویر برای استخراج اتوماتیک شبکه‌ی زهکشی و همچنین محدوده‌ی حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها، محاسبه‌ی شیب آنها، ترسیم نمودار هیپسومتری و محاسبه شاخص SL استفاده شد. در این بین لایه‌ی مربوط به منحنی میزان‌ها اهمیت زیادی در استخراج مقادیر SL دارد. منحنی میزان‌های منطقه‌ی مورد مطالعه با استفاده از داده‌های DEM استخراج شد و با نقشه‌های توپوگرافی 1:25000 سازمان نقشه‌برداری که برای بخشی از منطقه‌ی مورد مطالعه در دسترس بود مقایسه گردید تا دقت آن مورد ارزیابی قرار بگیرد. در نهایت منحنی میزان‌های استخراج

شده از DEM به عنوان مبنای محاسبه‌ی شاخص SL در نظر گرفته شد. نتیجه اینک به بسیاری از تحلیل‌های صورت گرفته در مقاله‌ی حاضر با استفاده از داده‌های مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، صورت گرفته است. نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس 1:100000 ورقه‌های دامغان و شاهرود نیز جهت تهیه‌ی لایه‌های سنگ‌شناسی، گسل‌ها و سایر مشخصات زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گرفت.

به منظور ترسیم نقشه‌های مختلف و همچنین محاسبه‌ی اتوماتیک شاخص SL و در نهایت ترسیم نقشه‌ی آن از نرم‌افزارهای ArcGIS استفاده شده است. در واقع تمام مراحل مربوط به شاخص SL و مورفومتری حوضه‌ها و همچنین پیاده‌سازی روش اصلی این مقاله در قالب این نرم‌افزارها انجام شده است.

در ابتدا سیستم تصویر این داده‌ها به UTM تبدیل شد تا نتایج و خروجی مربوط به آنها با سیستم متریک بیان شود. استخراج شبکه زهکشی، حوضه‌های اصلی و زیرحوضه‌ها، محاسبه‌ی شیب حوضه‌ها، محاسبه انتگرال هیپسومتری حوضه‌ها و نهایتاً محاسبه شاخص گرادیان طولی رودخانه با استفاده از داده‌های مدل رقومی ارتفاعی مطروحه در بالا صورت گرفت. در واقع می‌توان گفت که مدل رقومی ارتفاعی، مهم‌ترین داده مورد استفاده در این مقاله به شمار می‌رود.

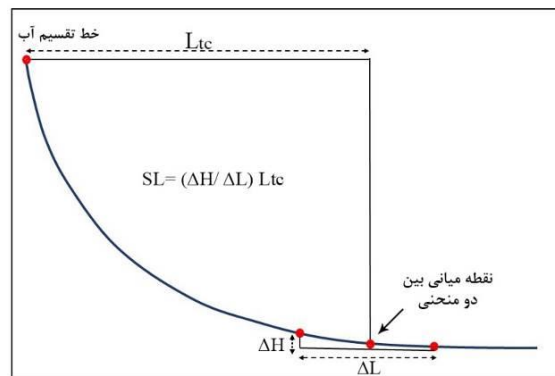
2-3- روش تجزیه و تحلیل

شاخص گرادیان طولی رودخانه یکی از شاخص‌های کمی ژئومورفولوژیکی در مطالعه مورفوتکتونیک به شمار می‌رود. معمولاً از این شاخص در مناطق فعال تکتونیک و در مقیاس‌های منطقه‌ای و ناحیه‌ای استفاده می‌شود. شاخص مذکور قادر است تا ناهنجاری‌های غیرعادی موجود در نیمرخ طولی رودخانه را (به عنوان نقاط شکست)، مشخص کند. در چنین حالتی می‌توان نقاطی از مسیر رودخانه را که از حالت مقعر خارج شده و فرایندهای فرسایشی و رسوبگذاری متفاوتی از سایر قسمت‌ها دارند را شناسایی کرد (فونت و همکاران، 2010: 176).

شاخص گرادیان طولی رودخانه به صورت رابطه‌ی (1)، محاسبه می‌شود (هک، 1973):

$$SL = (\Delta H / \Delta L) L_{tc} \quad (1)$$

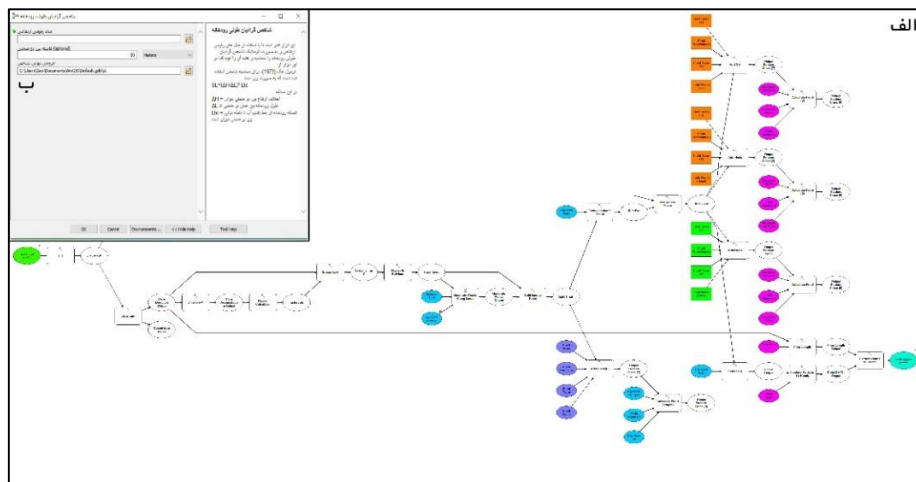
در این معادله‌ی ΔH اختلاف ارتفاع بین دو منحنی میزان، در امتداد رودخانه که در اینجا به عنوان بخش (Segment)، نامیده می‌شود، ΔL طول همان بخش و L_{tc} طول کانال رودخانه از خط تقسیم آب تا نقطه‌ی میانی بخش یا همان نقطه‌ی میانی بین دو منحنی میزان است (شکل 3). بخش اول این معادله یعنی $(\Delta H / \Delta L)$ ، در واقع شیب بخش مورد نظر است. همچنین شاخص SL برای نقطه میانی بین دو منحنی میزان محاسبه می‌شود. نکته‌ی مهم در ارتباط با شاخص مذکور این است که با استفاده از آن می‌توان به طور مستقیم رودخانه‌های کوچک با نیمرخ تند را با رودهای بزرگ دارای نیمرخ ملایم مقایسه و ارزیابی کرد.



شکل (3): نحوه‌ی محاسبه‌ی شاخص SL در امتداد رودخانه‌ی فرضی
Fig (3): SL calculation along a hypothetical river

معمولاً همه بخش‌های معادله فوق را می‌توان با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و نیمرخ توپوگرافی محاسبه کرد. شیب حوضه‌ها نیز از طریق مدل رقومی ارتفاعی محاسبه می‌شود. ولی با توجه به اینکه در مقاله حاضر هدف بدست آوردن شیب هر یک از بخش‌ها است از منحنی میزان‌های مستخرج از DEM استفاده شد تا شیب رودخانه در هریک از

بخش‌ها محاسبه شود. این فرایند با استفاده از ابزار Model Builder در محیط نرم افزار Arc Map صورت گرفت. در واقع یک ابزار جدید در GIS توسعه داده شد تا بتوان بر اساس آن نقشه‌ی نهایی را تهیه کرد (شکل 4). به طور کلی برای محاسبه‌ی اتوماتیک شاخص SL به پنج نوع داده نیاز است. الف: منحنی میزان‌های توپوگرافی، که در این مقاله از مدل رقومی ارتفاعی استخراج شد؛ ب: شبکه‌ی زهکشی رودخانه‌ها؛ پ: محدوده‌ی حوضه‌های آبریز اصلی و فرعی؛ ت: مدل رقومی ارتفاعی؛ و ج: لایه‌ی رستری جهت جریان رودخانه‌ها. همه این لایه‌ها با استفاده از DEM و به صورت اتوماتیک تهیه شد. خروجی نهایی این اطلاعات، داده‌های مربوط به شاخص SL بود که به صورت نقطه‌ای برای نقاطی بین دو منحنی میزان و برای هر یک از حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها محاسبه گردید.



شکل (4): الف) جریان کاری جهت ایجاد ابزار در محیط Model Builder، ب) ابزار تولید شده جهت استخراج شاخص SL

Fig (4): A) Workflow for SL toolbox creation in Model Builder environment, B) the Crated tools for SL index extraction

اختلاف ارتفاع بین منحنی‌ها (ΔH)، 50 متر انتخاب شد. فاصله‌ی بین دو منحنی (ΔL)، نیز در امتداد رودخانه‌ی اصلی برای کل زیر حوضه‌ها و منحنی میزان‌ها محاسبه

گردید. همچنین فاصله بین خط تقسیم آب و نقطه‌ی میانی منحنی میزان‌ها در امتداد جریان اصلی (Ltc)، نیز مشخص شد. این بخش از کار با استفاده از ابزار (Flow Length Tools) موجود در نرم‌افزار ArcGIS مشخص گردید. البته با توجه به اینکه تعداد حوضه‌های مورد بررسی در این مقاله و به تبع آن تعداد جریان‌ات اصلی زیاد است از روش تعریف شرط در محیط Model Builder استفاده شد. این شروط عبارتند از الف: مسیر جریان باید در داخل لایه‌ی پلیگونی حوضه باشد، ب: مسیر جریان باید متناسب با شبکه‌ی زهکشی باشد و ج: طول مسیر جریان باید از عرض حوضه بیشتر باشد تا بتوان طولانی‌ترین مسیر در امتداد رودخانه‌ی اصلی را بدست آورد. با استفاده از رابطه‌ی (1)، شاخص SL برای همه بخش‌ها و زیر حوضه‌ها محاسبه گردید. در نهایت با توجه به هدف مقاله، ارزش‌های نقطه‌ای شاخص SL که برای تک تک حوضه‌ها محاسبه شده بود، با استفاده از روش‌های درونیایی به سطح تبدیل شد تا نقشه‌ی شاخص SL برای کل منطقه و نه بر حسب حوضه‌های آبریز، تهیه شود.

3- یافته‌ها و بحث

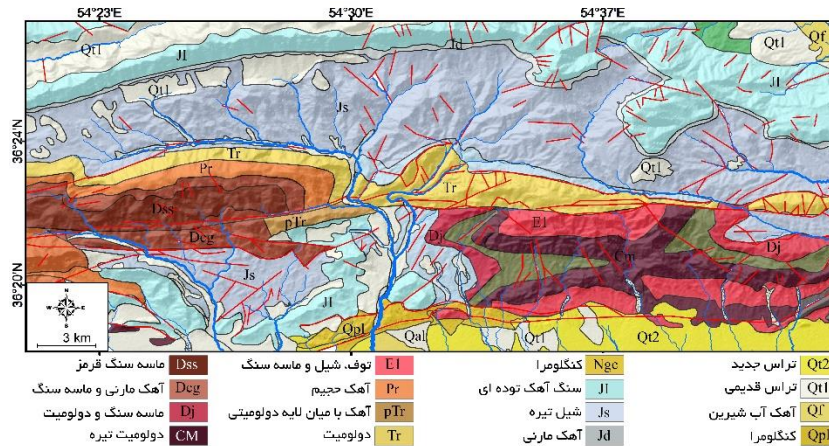
3-1- زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه

به لحاظ زمین‌شناسی، منطقه‌ی مورد مطالعه در دامنه‌های جنوبی البرز شرقی واقع شده است. بخش‌های جنوبی‌تر منطقه بین دو واحد ساختاری البرز و ایران مرکزی قرار گرفته است (آقانباتی، 1383: 17). سازندهای پرمین و دونین بالایی با ضخامت تقریبی 400 متر متشکل از شیل‌های خاکستری، ماسه سنگ و آهک است. این سازندها به صورت نوار ضخیمی در بخش مرکزی - غربی منطقه مشاهده می‌شود. بخش زیادی از منطقه‌ی مورد مطالعه از سازندهای دوران دوم زمین‌شناسی به ویژه ژوراسیک تشکیل شده است. پراکندگی این سازندها عمدتاً در نوار شمالی منطقه و جنوب غربی آن قرار دارند. مارن‌های ژئپس‌دار به همراه ماسه‌سنگ‌های دولومیتی مربوط به دوره‌ی ائوسن نیز به صورت رگه‌های باریکی در بخش جنوب شرق منطقه‌ی برونزد دارند. اما سازندهای مربوط به کواترنری عمدتاً در کف دره‌ها و به طور گسترده در جنوب منطقه‌ی برونزد دارند (شکل 2). همانطور

که قبلاً اشاره شد سازندهای کواترنری در جنوب موجب شکل گیری گستره ی مخروط-افکنه ها شده است. این مخروط افکنه ها تحت تأثیر جابجایی گسل ها قرار گرفته و تحول پیدا کرده اند (یمانی و همکاران، 1390: 182).

از نظر زمین ساخت، منطقه فعال بوده و زمین لرزه های متعددی که در این منطقه و اطراف آن روی داده است بیانگر آن است. زمین لرزه های تاریخی دامغان و شاهرود با بزرگای بیش از 6 ریشتر و زمین لرزه های دستگاهی گرگان، سمنان، شوکان و میامی با بزرگای بیش از 5 ریشتر شواهدی از فعالیت های تکتونیکی منطقه است (هولینگورث و همکاران، 2010: 3). سیستم های اصلی گسل های منطقه را راندگی ها و سپس گسل های امتداد لغز تشکیل داده است. امتداد اغلب راندگی ها غربی - شرقی است و حرکات قابل توجهی را از شمال به سمت جنوب انجام داده است. این راندگی ها در برخی مناطق موجب تشکیل سفره های رورانده شده است.

گسل راندگی تزاره نیز شاخه ای از گسل شاهرود است که درست در امتداد جبهه ی کوهستان قرار دارد. در امتداد این گسل، قاعده ی مخروط افکنه ها قرار دارد که به سمت جنوب گسترش پیدا کرده اند. بر اساس مطالعات یمانی و همکاران (1390: 206)، این گسل دارای حرکات امتداد لغز نیز است. شواهد بسیار جدید آن را می توان از جابجایی چاه های قنات ها مشاهده کرد. این گسل نهایتاً در به سمت غرب به گسل عطاری وصل می شود. علاوه بر این گسل های اصلی، تعداد زیادی گسل فرعی و ریز نیز با جهات مختلف در بخش های مختلف منطقه پراکنده شده اند.



شکل (2): زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه

Fig (2): Geology map of study area

3-2- مورفومتری زیرحوضه‌ها

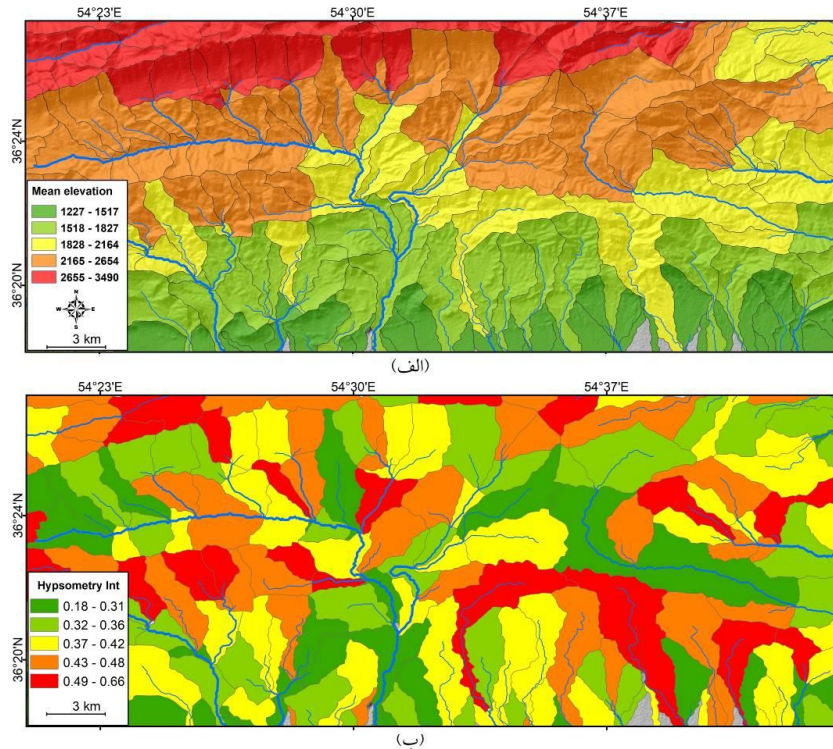
با توجه به اینکه مبنای محاسبات اولیه بر پایه‌ی زیرحوضه‌هاست، بنابراین حوضه‌های آبریز و زیر حوضه‌های آنها به همراه شبکه‌ی زهکشی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی استخراج شد. در مقاله‌ی حاضر و به منظور بررسی ویژگی‌های توپوگرافیکی منطقه، شاخص‌های ارتفاع متوسط، شیب و انتگرال هیپسومتری زیرحوضه‌ها محاسبه گردیده است. اگر چه این شاخص‌ها به‌طور مستقیم منعکس‌کننده‌ی شرایط تکتونیکی منطقه نیستند، اما با استفاده از آنها تا حد زیادی می‌توان توپوگرافی یک ناحیه را بر پایه‌ی زمین‌شناسی همان منطقه‌ی شناسایی کرد. شکل 5- الف، نشان‌دهنده‌ی ارتفاع متوسط زیرحوضه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه است. با توجه به ویژگی‌های کلی منطقه، متوسط ارتفاع زیر حوضه‌ها از شمال به سمت جنوب کاهش پیدا می‌کند. نکته‌ی مهم در ارتباط با ارتفاع متوسط حوضه‌ها این است که سطوح ارتفاعی از روند کلی چین خوردگی البرز پیروی می‌کند. یعنی در بخش‌های نزدیک به محور البرز، ارتفاع بیشتر و به سمت جنوب ارتفاع کاهش پیدا می‌کند.

هیپسومتری، توزیع مساحت یک منطقه در سطوح ارتفاعی معین را نشان می‌دهد. معمولاً این شاخص با استفاده از منحنی هیپسومتری نشان داده می‌شود. در واقع منحنی

هیپسومتری نشان‌دهنده‌ی توزیع نسبی مساحت حوضه‌ی آبریز در زیر یا بالای یک ارتفاع معین است. اما انتگرال هیپسومتری نشان‌دهنده مساحت زیرمنحنی هیپسومتری است. انتگرال هیپسومتری بر اساس درجه‌ی تکامل زیرحوضه‌ها متفاوت خواهد بود. حوضه‌های جوان دارای منحنی هیپسومتری محدب و مقادیر انتگرال هیپسومتری بالا هستند. در حوضه‌های بالغ، منحنی مقعر بوده و مقادیر انتگرال هیپسومتری کمتر از مورد بالا خواهد بود. همچنین با توجه به اینکه حوضه‌های جوان دارای ناهمواری‌های زیادی است، شیب این حوضه‌ها بالاست. بنابراین نتیجه اینک اگر حوضه‌ای جوان باشد، یا تحت تأثیر فرایندهای تکتونیکی دچار بالآمدگی شده باشد، دارای مقادیر بالای شیب و انتگرال هیپسومتری زیاد بوده و همچنین منحنی هیپسومتری آن حالت محدب خواهد داشت. در شکل 5- ب، انتگرال هیپسومتری زیر حوضه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه نشان داده شده است. این شاخص با استفاده از داده‌های حاصل از مدل رقومی ارتفاعی و نرم‌افزار ArcGIS محاسبه و ترسیم شده است. انتگرال هیپسومتری با استفاده از رابطه‌ی (2)، محاسبه می‌شود.

$$\text{HI} = (\text{E}_{\text{mean}} - \text{E}_{\text{min}}) / (\text{E}_{\text{max}} - \text{E}_{\text{min}}) \quad \text{رابطه‌ی (2)}$$

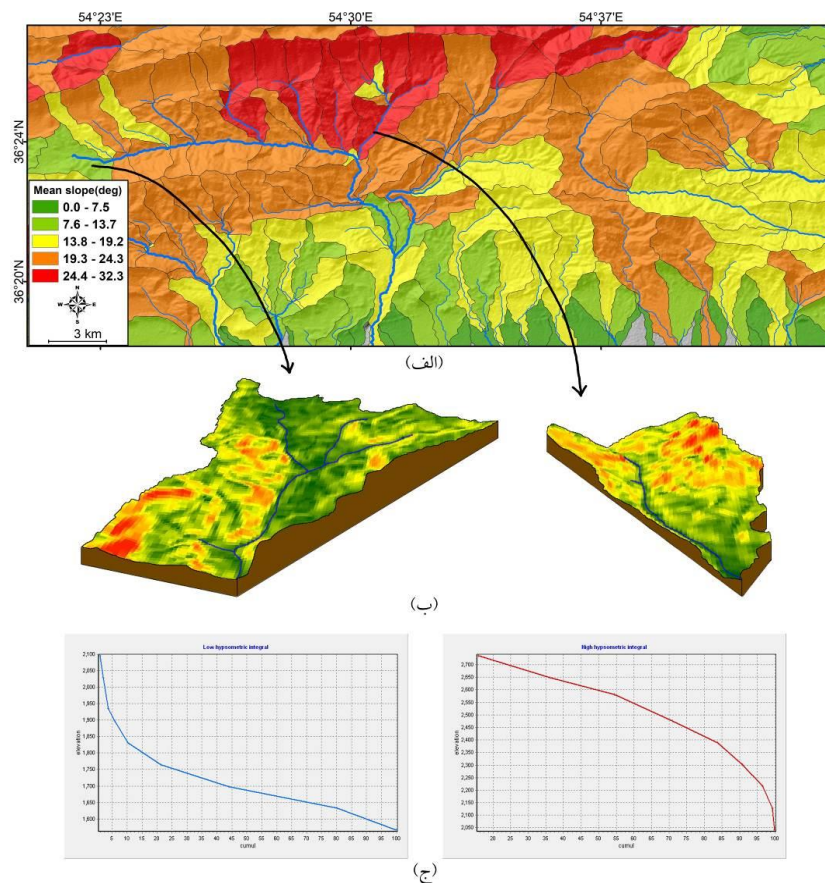
نتایج این معادله بین صفر و یک است. مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده‌ی انتگرال بالا و مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده‌ی ارزش انتگرال پایین است. در زیرحوضه‌های مورد بررسی، مقادیر انتگرال هیپسومتری از 0/18 تا 0/66 را شامل می‌شود. برخلاف متوسط ارتفاع زیرحوضه‌ها که از یک روند طبیعی برخوردار است، انتگرال هیپسومتری زیر حوضه‌ها در منطقه ناهمگن بوده و به صورت پراکنده توزیع شده‌اند. حداکثر این شاخص در یک خط افقی و در مرکز منطقه مشاهده می‌شود. این بخش هم به لحاظ سنگ‌شناسی متغیر است و هم گسل‌های اصلی و فرعی فراوانی در آن وجود دارد. بنابراین می‌توان گفت که دو عامل سنگ‌شناسی و گسل‌های فعال در بالا بودن مقادیر انتگرال هیپسومتری در زیر حوضه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه نقش اصلی را دارند.



شکل (5): متوسط ارتفاع زیر حوضه‌ها (الف) و نقشه‌ی انتگرال هیپسومتری زیر حوضه‌ها (ب)
Fig (5): Mean elevation of sub basins (A), and Hypsometry Integral map of sub basins

در شکل 6-الف، متوسط شیب حوضه‌ها نشان داده شده است. شیب متوسط زیر حوضه‌ها 18 درجه و حداکثر آن 33 درجه است. با توجه به شکل مذکور، حوضه‌های پرشیب در بخش شمالی منطقه قرار دارند. به منظور بررسی ارتباط بین مقادیر انتگرال هیپسومتری و شیب حوضه‌ها و همچنین نمودار هیپسومتری حوضه‌ها، دو زیرحوضه به عنوان نمونه انتخاب شد تا نمودار هیپسومتری آنها ترسیم شود. حوضه‌ی واقع در غرب منطقه دارای شیب متوسط 25 درجه، و حوضه‌ی مرکزی 10 درجه است (شکل 6-ب). نمودار هیپسومتری این دو حوضه نیز ترسیم شده است. با مقایسه‌ی شیب این حوضه‌ها با انتگرال هیپسومتری آنها (شکل 3-ب)، مشاهده می‌شود که حوضه پر شیب دارای مقادیر

انتگرال هیپسومتری بالایی (0/5 تا 0/66)، است. نمودار هیپسومتری آن نیز شکل محدب دارد. برعکس، نمودار هیپسومتری حوضه‌ی کم‌شیب، حالت مقعر داشته و مقادیر شاخص انتگرال هیپسومتری آن 0/18 تا 0/31 است (شکل 6-ج).



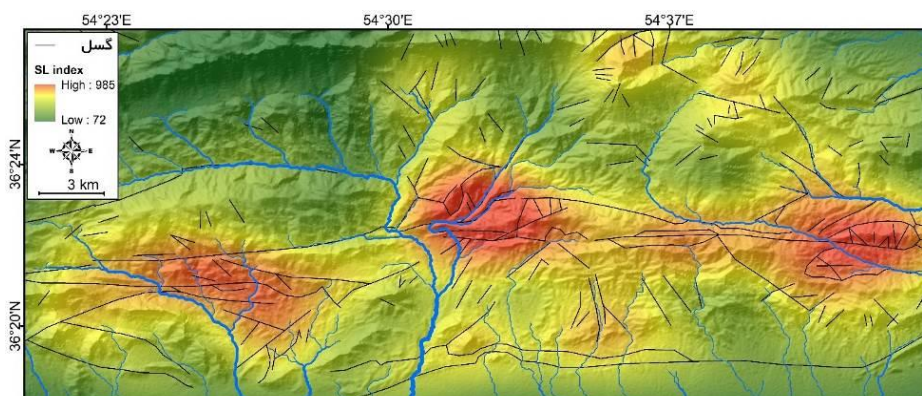
شکل (6): متوسط شیب حوضه‌ها (الف)، مدل‌های سه بعدی از دو حوضه با انتگرال هیپسومتری

متفاوت (ب). نمودار هیپسومتری دو حوضه‌ی مورد نظر (ج)

Fig (6): Mean slope of sub basins (A), 3D models of example basins with different hypsometry integral (B), Hypsometric diagram of tow samples basins (J)

3-3- محاسبه‌ی مقادیر SL و تهیه‌ی نقشه‌ی آن

در بخش روش کار این مقاله اشاره شد که شاخص SL با استفاده از داده‌های مدل رقومی ارتفاعی و نقشه‌های توپوگرافی 25000 محاسبه شده است. این شاخص در امتداد شبکه‌ی رودخانه‌ای 187 حوضه کوچک محاسبه شده است. متوسط مساحت حوضه‌ها، 3 کیلومتر مربع است. البته باید عنوان کرد که این شاخص برای نقاط بین منحنی میزان‌ها محاسبه و در مرحله‌ی بعد از طریق روش‌های درون‌یابی، به سطح تبدیل و نقشه‌ی نهایی استخراج شد (شکل 7). مقادیر شاخص گرادیان طولی رودخانه از 72 تا 985 متر متغیر است. نقشه شاخص SL را می‌توان با استفاده از روش‌های متعددی طبقه‌بندی و نشان داد که در مقاله حاضر از روش توزیع انحراف معیار استفاده شده است. با توجه به نقشه‌ی شاخص SL، مقادیر بالای شاخص در مرکز، شرق و جنوب غرب منطقه مشاهده می‌شود. هسته اصلی مقادیر بالا در مرکز منطقه قرار دارد. جایی که گسل‌های اصلی و فرعی فراوانی در آن مشاهده می‌شود. شمال غربی منطقه کمترین مقادیر شاخص گرادیان طولی رودخانه را نشان می‌دهد. همچنین بخش‌هایی شمال شرق و جنوب منطقه دارای مقادیر متوسط شاخص SL هستند. چنین توزیعی می‌تواند ناشی از اختلاف سنگ‌شناسی و بالآمدگی تکتونیکی در بخش‌های مختلف منطقه باشد. جهت بررسی این امر که آیا تکتونیک بر این شاخص تأثیر داشته یا شرایط سنگ‌شناسی، از سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. نتایج بررسی نشان می‌دهد که مقادیر شاخص SL در فاصله 500 متری از گسل‌ها، به طور میانگین برابر با 650 متر است. این مقادیر نشان‌دهنده‌ی نقش بالآمدگی تکتونیکی در اطراف گسل‌ها است. همچنین بررسی توزیع گسل‌ها، مقادیر بالای انتگرال هیپسومتری، مقادیر بالای شیب و همچنین مقادیر شاخص SL تا حد زیادی ارتباط بین این متغیرها با همدیگر را روشن می‌سازد.



شکل (7): نقشه‌ی درونیابی شده شاخص SL در منطقه‌ی مورد مطالعه
Fig (7): Interpolated SL index of study area

4- نتیجه‌گیری

هدف پژوهش حاضر تهیه و ارائه‌ی ابزاری در محیط نرم‌افزار ArcGIS، است که بتوان با استفاده از آن و همچنین مدل‌های رقومی ارتفاعی نقشه‌ی شاخص گرادیان طولی رودخانه‌های یک منطقه را محاسبه و نقشه‌ی آن را تهیه کرد. بدین منظور حوضه‌های آبریز واقع در کوه‌های شمال دامغان انتخاب شد. شاخص گرادیان طولی رودخانه در واقع مورفولوژی شبکه‌ی زهکشی رودخانه‌ها را بر اساس توزیع شیب بستر جریانات محاسبه و آشکار می‌کند. شاخص‌های مورد استفاده در این مقاله از قبیل شیب، انتگرال هیپسومتری، ارتفاع و گرادیان طولی رودخانه، به صورت اتوماتیک با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های رقومی ارتفاعی محاسبه و ترسیم شد. نتایج نشان می‌دهد اختلاف در مقادیر شاخص SL، با خطوط گسلی در ارتباط است. در مکان‌هایی با گسل‌های فعال مقادیر شاخص بالا و در سایر مکان این مقادیر پایین است. این امر نشان‌دهنده‌ی بالا آمدگی تکتونیکی متفاوت در بخش‌های مختلف منطقه است. با این وجود بر اساس مطالعات گذشته (یمانی و همکاران، 1390؛ امید، 1381 و هولینگورث و همکاران، 2010) این منطقه و مناطق اطراف آن به لحاظ تکتونیکی فعال هستند. مقادیر حداکثر شاخص SL، در اطراف گسل‌ها به ویژه در بخش مرکزی منطقه‌ی مورد مطالعه مشاهده می‌شود. همچنین

نتایج نشان می‌دهد که زیرحوضه‌هایی که دارای شیب بالایی هستند، مقادیر انتگرال هیپسومتری بالایی نیز دارند. این امر نیز می‌تواند بیانگر بالا بودن فرایندهای فرسایشی باشد. چرا که در مناطق پر شیب فرایندهای دامنه‌ای و قدرت رودخانه بیشتر بوده و همین امر سبب فرسایش بیشتر خواهد شد. همچنین با توجه به اینکه در این پژوهش اقدام به ارائه یک ابزار در قالب نرم‌افزار ArcGIS به منظور استخراج اتوماتیک مقادیر شاخص SL با استفاده مدل‌های رقومی ارتفاعی شده است، قطعاً در زمان بسیار کمتری و با سرعت و دقت بالایی می‌توان شاخص SL را برای یک منطقه ارزیابی و به دست آورد. در واقع ابزار طراحی شده این امکان را به وجود می‌آورد که محقق مدل رقومی ارتفاعی منطقه مورد مطالعه را وارد نرم‌افزار کرده و به صورت کاملاً اتوماتیک خروجی (نقشه‌ی شاخص SL)، را دریافت کند. در نهایت این ابزار پس از انتشار مقاله، از طریق سایت انجمن ایرانی ژئومورفولوژی در دسترس محققان قرار خواهد گرفت.

5- منابع

- Adib, A. (1382). Active tectonics and earthquake potential risk in Tabas, *Environmental Geology*, No. 2, 27-45
- Ambraseys, N.N.; Melville, C.P. (1982). *A History of Persian Earthquakes*, Cambridge University Press, UK.
- Beaty, C.B. (1963). Origin of alluvial fans, White Mountains, California and Nevada. *Ann. Assoc. Am. Geogr*; 53, 516-535.
- Cox, R.T., (1994). Analysis of drainage-basins symmetry as rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from Mississippi Embayment, *Geol. Soc. Am. Bull*; 106, 571-581.
- Della Seta, M., Del Monte, M., Fredi, P., Lupia Palmieri, E., (2004). Quantitative morphotectonic analysis as a tool for detecting deformation patterns in soft rock terrains: a case study from the southern Marches, Italy, *Géomorphologie*; 4, 267-284.
- Esfandyari, F; Salahi, B; Hasanzade, R. (1394). Evaluation of neotectonic activities in Aliabadchai catchment using tectonic indicators, *Researches in Earth Sciences*, No 22, 84-99
- Fattahi, M. (2006). Holocene slip-rate on the Sabzevar thrust fault, NE Iran, determined using optically stimulated luminescence (OSL), *Earth and Planetary Science Letters*; 245, 20-34.
- Font, M., Amorese, D., Lagarde, J.L., (2010). DEM and GIS analysis of the stream gradient index to evaluate effects of tectonics: the Normandy intraplate area (NW France) *Geomorphology*, No. 119, 172-180.
- 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), *Geomorphology*; 95, 260-273.
- Gorabi, A; Parizi, A. (1394). The effect of active tectonics on the evolution of southwestern slopes of Shirkuh landscapes, *Quantitative Geomorphological Researches*, No. 2, 45-59.
- Gorabi, A; Imami, K. (1396). The effect of active tectonics on the morphologic changes of drainage basins in Makran coastal zone, *Quantitative Geomorphological Researches*, No. 1, 74-89

- Gorabi, A; Mohammadnejad, V. (1397). Active Tectonics and Its Impact on the Evolution of the Quaternary Landforms in Tabass Region, Iran, *Physical Geography Research*, No. 2, 271-291.
- Hack, J.T., (1973). Stream-profile analysis and stream-gradient index. U. S. Geol. Surv. J. Res; 1, 421-429.
- Hayakawa, Y.S., Oguchi, T., (2009). GIS analysis of fluvial knickzone distribution in Japanese mountain watersheds. *Geomorphology*; 111, 27-37.
- Holinsworth, J. (2010). Active tectonics of the east Alborz mountains, NE Iran: Rupture of the left-lateral Astaneh fault system during the great 856 A.D. Qumis earthquake, *Journal of Geophysical Research*; 115, 1-19.
- Jafari, M.H; Abbasi, M. (1397). Analysis of lithology and tectonic roles topographic evolution of Gezelozan river traces, *Hydrogeomorphology*, No. 14, 1-22.
- Jafari, GH; Norozi, M. (1396). Evaluation of morphotectonic indexes in Qanqli catchment, *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, No. 22, 117-132.
- Keller, E.A., Pinter, N., (2002). Active Tectonics, Earthquakes, Uplift and Landscape, Second edition. *Prentice Hall, Upper Saddle River*, New Jersey.
- Khalili, Marzieh; Seyed Kazem Alavi Panah, Seyed Sabereh Abdollahi Eskandar; (2019). Using Robust Satellite Technique (RST) to determine thermal anomalies before a strong earthquake: A case study of the Saravan earthquake (April 16th, 2013, MW=7.8, Iran), *Journal of Asian Earth Sciences*; 173, 70-78.
- Mohammadnejad, V. (1395). Active faulting and its effects on Quaternary landforms (alluvial fans) deformation in north-east of Lake Urmia, Iran, *Quantitative Geomorphological Researches*, No 1, 86-103.
- Mohammadnejad, V; Asghari, S. (1394). Response of Garmsar east alluvial fans on horizontal and vertical displacement of faults (With emphasis on DehNamak fan), *Quantitative Geomorphological Researches*, No. 2, 1-17.

- Negahban, S; Dortaj, D. (1398). Investigation of active tectonics in Sirvan watershed using morphometric indexes, *Hydrogeomorphology*, No 19, 187-209.
- Masson, F.; Anvari, M.; Djamour, Y.; Walpersdorf, A.; Tavakoli, F.; Daigni`eres, M.; Nankali, H.; van Gorp, S. (2007). Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran, *Geophys. J. Int.*, 170, 436–440.
- Mayer, L., (1990). Introduction to Quantitative Geomorphology. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Nemati, Majid, (2019). Seismotectonic and seismicity of Makran, a bimodal subduction zone, SE Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*; 169, 139–161.
- Omidi, P. (1381). Detailed structural and dynamic analysis of fault zones in the southern margin of east alborz, Semnan-Damghan area, Ph.D Thesis in Tarbiat Modarres University.
- Pérez-Peña, J.V., Azor, A., Azañón, J.M., Keller, E.A., (2010). Active tectonics in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain): insights from geomorphic indexes and drainage pattern analysis. *Geomorphology*; 119, 74–87.
- Rahimzadeh, Bahman; Shahram Bahrami; Mohammad Mohajjel; Hossein Mahmoudi; Farzad Haj-Azizi, (2019). Active strike-slip faulting in the Zagros Mountains: Geological and geomorphological evidence of the pull-apart Zaribar Lake basin, Zagros, NW Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, in press.
- Regard, V., et al. (2005). Cumulative right-lateral fault slip rate across the Zagros-Makran transfer zone: role of the Minab-Zendan fault system in accommodating Arabia-Eurasia convergence in southeast Iran, *Geophys. J. Int.*, 162, 177–203.
- Sarkarinejad, Khalil; Farzane Goftari, (2019). Thick-skinned and thin-skinned tectonics of the Zagros orogen, Iran: Constraints from structural, microstructural and kinematics analyses, *Journal of Asian Earth Sciences*; 170, 249–273.

- Solaymani Azad, Shahryar; Majid Nemati, Mohammad-Reza Abbassi, Mohammad Foroutan, Khaled Hessami, Stephane Dominguez, Mohamad-Javad Bolourchi, Majid Shahpasandzadeh (2019). Active-couple indentation in geodynamics of NNW Iran: Evidence from synchronous left- and right-lateral co-linear seismogenic faults in western Alborz and Iranian Azerbaijan domains, *Journal of tectonophysics*, *Accepted Manuscript*.
- Strahler, A.N., (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geol. Soc. Am. Bull.* 63, 1117–1142.
- Troiani, Francesco; Jorge P. Galve, Daniela Piacentini, Marta Della Seta, Jesús Guerrero, (2014). Spatial analysis of stream length-gradient (SL) index for detecting hillslope processes: A case of the Gállego River headwaters (Central Pyrenees, Spain), *Geomorphology*; 214, 183–197.
- Yamani, M; Alizadeh, SH. (1395). Investigation of Karaj river basin neotectonics using geomorphic indexes, *Physical Geography Research*, No, 31, 1-17.
- Yamani, M; Maghsudi, M; Ghasemi, M.R; Jafarbiglo, M; Mohammadnejad, V. (1390). Comparative analyses of evolution of south slope of eastern Alburz alluvial fans (Damghan to Garmsar), Ph.D. Thesis in geomorphology, Tehran University.
- Zhe Su, Ying-Hui Yang, Yong-Sheng Li, Xi-Wei Xu, Jingfa Zhang, Xin Zhou, Jun-Jie Ren, Er-Chie Wang, Jyr-Ching Hud, Shi-Min Zhang, Morteza Talebian, (2019). Coseismic displacement of the 5 April 2017 Mashhad earthquake (Mw 6.1) in NE Iran through Sentinel-1A TOPS data: New implications for the strain partitioning in the southern Binalud Mountains, *Journal of Asian Earth Sciences*; 169, 244–256.