

ارزیابی فعالیت‌های زمین ساختی حوضه‌های آبریز دامنه جنوب غرب ارتفاعات سبلان با استفاده از اختصاصات ژئومورفولوژیک

دریافت مقاله: ۹۵/۱۱/۲۶

پذیرش نهایی: ۹۶/۱/۳۰

چکیده

ارزیابی فعالیت‌های تکتونیکی، در زمره موضوعات مورد علاقه محققین علوم زمین، به ویژه دانش ژئومورفولوژی تکتونیک است. در این راستا، روشهای متفاوتی توسط پژوهشگران مختلف، به کار رفته است. این روش‌ها، همواره رو به توسعه بوده و طیف وسیعی از روش‌های ژئومورفومتری، تا روش‌های مبتنی بر استفاده از داده‌های دورسنجی و مدل رقومی ارتفاع را دربرمی‌گیرند. در این پژوهش، از روش‌های دورسنجی، مدل رقومی ارتفاع و شاخص‌های ژئومورفیک در قالب الحاقیه TecDem^۱ بر پایه نرم افزار متلب^۲ جهت ارزیابی فعالیت‌های زمین ساختی حوضه‌های جنوب غرب ارتفاعات سبلان استفاده شده است. برای تعیین محدوده حوضه‌های آبریز، از الحاقیه ArcHydro بر پایه مدل رقومی ارتفاع، بهره برده شده است. مولفه‌های فرورفتگی (Θ)، چولگی، شیب، نقشه همپایه^۳، نیمرخ‌های توزیع شیب و رگرسیون لگاریتمی آبراهه‌ها با استفاده از مدل رقومی ارتفاع، استخراج و با استفاده از مدل نیروی جریان^۴، میزان بالآآمدگی تکتونیکی حوضه‌ها محاسبه گردید. با به کارگیری مولفه‌های مورفومتری حاصل از مدل رقومی ارتفاع و شاخص‌های ژئومورفیک تقارن توپوگرافی عرضی حوضه، گرادیان طولی رودخانه و انتگرال هیپسومتری در قالب الگوی TecDem، فعالیت‌های زمین ساختی منطقه ارزیابی گردید. نتایج حاصل از بررسی مولفه‌های استخراج شده نظیر توزیع شیب و رگرسیون لگاریتمی آبراهه‌ها، مقادیر چولگی، انتگرال هیپسومتری، نقشه همپایه، نقاط عطف و تغییرشیب و نرخ بالآآمدگی، بیانگر وجود تکتونیک فعال در حوضه‌های مورد مطالعه است. به نحوی که نرخ بالآآمدگی تکتونیکی منطقه ۳۳/ تا ۵۱/ میلیمتر در سال بوده و پایین بودن مقادیر شاخص‌های فرو رفتگی (۲۴/ تا ۴۵/.) و بالابودن مقادیر شاخص حداکثر شیب (۸۰/۶ تا ۱۳۲/۲ درصد) دلالت بر وجود فعالیت‌های بالای تکتونیکی منطقه است. بر همین اساس، نتایج حاصل از بررسی‌های میدانی و شواهد مورفوتکتونیکی نظیر وجود دره‌های خطی و پرتگاه خط گسلی معکوس در حوضه تاجیار و آغمیون، پشته‌های مسدود کننده در امتداد آبراهه‌های آغمیون و تاجیار، جابه‌جایی راس مخروط افکنه‌ها و آبراهه‌های منطقه ناشی از فعالیت گسل دامنه جنوب غرب سبلان، وجود تکتونیک فعال و کارایی مناسب الگوی TecDem را در ارزیابی فعالیت زمین ساختی منطقه مورد مطالعه به اثبات می‌رساند.

واژگان کلیدی: مورفوتکتونیک، مدل رقومی ارتفاع، شاخص‌های ژئومورفیک، TecDem، سبلان

*نویسنده مسئول

^۱ A MATLAB Based Tool box from Digital Elevation Model for Tectonic Geomorphology

^۲ MATLAB

^۳ Iso base Map

^۴ Stream Power Model

دانش ژئومورفولوژی تکتونیک، مطالعه و بررسی تغییر شکل‌های ناشی از نیروهای عمودی و افقی زمین ساختی و اثرات آن بر چشم اندازهای سیاره زمین را برعهده دارد (Bull, 2007:5). در علوم زمین، واژه تکتونیک به ساختمان‌های تغییر شکل یافته و معماری خارجی تر بخش زمین و ارزیابی این عارضه‌ها و ساختارها در طول ادوار زمین شناسی اشاره دارد (جباری، ۱۳۹۱:۱۸). تقریباً هیچ مکانی را در سطح زمین نمی‌توان یافت که تحت تاثیر تغییر شکل‌های تکتونیکی در زمان گذشته یا حال قرار نگرفته باشد (Burbank, 2001:1). ارزیابی و رفتارسنجی وقایع تکتونیکی یک منطقه بر اساس روش‌هایی مانند تجزیه و تحلیل رخدادهای تکتونیکی (نوع، شدت، ویژگی‌های ژئوفیزیکی) (Peulvast, 1991:18)، جمع آوری داده‌های محیطی گذشته (Poag, Sevon, 1989:121) ارزیابی میزان فرسایش و ارتباط آن با تاریخچه رسوب گذاری مناطق تحت فرسایش، روش‌های سنجش از دور و تجزیه و تحلیل مورفولوژیک استوار است. با وجود اینکه تجزیه و تحلیل مورفوتکتونیکی مبتنی بر روش‌های سنجش از دور کم هزینه و سریع می‌باشند (گورابی، پاریزی، ۱۳۹۴:۴۶)، در مقابل تجزیه تحلیل مورفولوژیک منعکس کننده ویژگی‌های ساختمانی و توپوگرافی طولانی مدت مناطق بوده (Jordan et al, 2005:159) و تعیین مقدار فرسایش بر روی مناطق مورد بررسی و مقایسه معقول و منطقی لندفرم‌ها را در پژوهش‌های ژئومورفولوژی امکان پذیر می‌سازد (حبیب الهیان، رامشت، ۱۳۹۱:۱۰۰). در این راستا در مطالعات ارزیابی تکتونیک مناطق، علاوه بر روش‌های دور سنجی، از روش‌های تجزیه و تحلیل مورفومتری لندفرم‌ها مبتنی بر شاخص‌های ژئومورفیک نیز استفاده می‌گردد. این شاخص‌ها ابزاری مفید و قابل اطمینان جهت ارزیابی فعالیت‌های تکتونیکی مناطق هستند که از طریق آنها می‌توان نواحی را که در گذشته فعالیت‌های سریع یا کند تکتونیکی داشته اند، شناسایی نمود (Ramirez-Herrera, 1998:317).

امروزه به موازات استفاده از روش‌های مورفومتری و دورسنجی مبتنی بر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاع^۱، الگوریتم‌های متعددی جهت ارزیابی فعالیت‌های تکتونیکی در قالب الحاقیه‌ها بر پایه نرم افزارهای علوم زمین ارائه گردیده است که از جمله آنها می‌توان به الحاقیه TecDem اشاره نمود (Gloaguen, Shahzad, 2011:215). این الحاقیه برپایه الگوریتم ژنتیک D₈ و استفاده از الگوی رقومی ارتفاع جهت ارزیابی و تحلیل فعالیت‌های تکتونیکی مناطق طراحی گردیده و از طریق نرم افزار متلب اجرا می‌گردد که بر اساس آن می‌توان علاوه بر تعیین جهت تجمعی جریان و استخراج حوضه‌های آبریز، به تهیه نيمرخ طولی جریان، تعیین نقاط تغییر شیب، تهیه نقشه همپایه و محاسبه شاخص‌های فعالیت تکتونیکی و نرخ بالآآمدگی حوضه‌ها اقدام نمود. در رابطه با موضوع پژوهش، مطالعات انجام شده توسط پژوهشگرانی چون جردن^۲ (۲۰۰۵)، وبوس^۳ (۲۰۰۶)، شهزاد و گلوگوئن^۴ (۲۰۱۰، ۲۰۰۹) اطلاعات جامع و دقیقی فراهم نموده است. جردن و همکاران (۲۰۰۵) پدیده‌های مورفوتکتونیک منطقه مورد مطالعه خود را از مدل رقومی ارتفاع مربوطه استخراج و با استفاده از آن ویژگی‌های مورفوتکتونیکی منطقه مطالعاتی را به الگوریتم‌های عددی و ریاضی تبدیل کرده‌اند. شهزاد و گلوگوئن (۲۰۰۹) با استفاده از الحاقیه TecDem و الگوی رقومی ارتفاع، به تحلیل فعالیت‌های تکتونیکی، تحلیل‌های کمی آبراهه‌ها، محاسبه نيمرخ طولی، شاخص‌های تقعر و نرخ بالآآمدگی تکتونیکی اقدام نموده‌اند. مومی‌پور^۵ (۲۰۱۲) با به کار بردن الحاقیه TecDem و الگوی رقومی ارتفاع در منطقه مطالعاتی (کوه‌های زاگرس) و شاخص‌های ژئومورفیک نظیر سینوزیته جبهه کوهستان، انتگرال هیپسومتری، عدم تقارن حوضه زهکشی و گرادیان طولی رودخانه اقدام به ارزیابی تکتونیک فعال و نرخ بالآآمدگی تکتونیکی منطقه دینار کوه نموده است. این محقق، نرخ بالآآمدگی منطقه مطالعاتی را بین ۶/۰ تا ۳/۷ میلی متر در سال برآورد نموده است. گورابی، کیارستمی (۱۳۹۴) با اجرای الگوی TecDem و محاسبه شاخص‌های

^۱DEM^۲ Jordan^۳ Wobus^۴ Shahzad & Gloaguen^۵ Mumipour

ژئومورفیک در قالب آن برای حوضه آبریز رودک در شمال شرق تهران، تغییرات مقادیر چولگی، شاخص فرورفتگی و گرادیان طولی رودخانه را بررسی و وجود نئوتکتونیک فعال را در منطقه اثبات نموده اند.

در خصوص ارزیابی فعالیت‌های تکتونیکی مناطق مختلف ایران، تحقیقات انجام گرفته، عمدتاً مبتنی بر به کارگیری شاخص‌های ژئومورفیک و حاکی از فعالیت تکتونیکی قابل توجه مناطق و اثر بارز آن بر لندفرم‌هاست. استفاده از شاخص‌های تکتونیکی نظیر سینوسیته جبهه کوهستان، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن، تقارن توپوگرافی، گرادیان طولی رودخانه و انتگرال هیپسومتری جهت بررسی تکتونیک فعال توسط پژوهشگرانی چون ده‌بزرگی و همکاران (۲۰۱۰)، بیاتی خطیبی (۱۳۸۸)، کرمی (۱۳۸۸)، جباری (۱۳۹۱)، رضایی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۲)، همتی و همکاران (۱۳۹۴)، روستایی و همکاران (۱۳۹۴)، مومنی و ده‌بزرگی (۱۳۹۴)، مقامی‌مقیم (۱۳۹۵)، ده‌بزرگی و مومنی‌طارمسری (۱۳۹۵)، صمدی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۵) و شناسایی شواهد مورفوتکتونیکی مربوط به تکتونیک فعال توسط محمدنژاد آروق (۱۳۹۵) در مناطق مطالعاتی مربوطه، بیان‌گر حاکمیت تکتونیک فعال و تاثیر آن بر زمین شکل‌های مناطق یاد شده است.

تحقیقات انجام شده در خصوص منطقه مورد مطالعه، عمدتاً مبتنی تشریح ویژگی‌های زمین شناسی و ولکانیکی توده کوهستانی سبلان بوده و به صورت دقیق سیمای تکتونیکی منطقه ترسیم نگردیده است. دیدون و ژئومن^۱ (۱۹۷۶) ویژگی‌های سنگ‌شناسی، ژئوشیمی و مکانیسم فوران آتشفشان سبلان در طول دوره کواترنر را بررسی نموده‌اند. موحد دانش (۱۳۶۷) در طرح مطالعات سبلان، ویژگی‌های زمین شناسی، ژئومورفولوژی و لیتولوژی دامنه جنوبی سبلان و خیام (۱۳۷۲)، ساختمان زمین‌شناسی توده ولکانیکی سبلان، روانه‌های لاهار و مکانیسم تشکیل آنها را تشریح نموده است. در ادامه همین مطالعات، دلال اوغلی (۱۳۸۱) به فعالیت سیستم‌های مورفوزن دامنه شمالی و نحوه تکوین دشت مشکین شهر، رجائی (۱۳۸۱) به هیدروژئوشیمی چشمه‌های دامنه جنوب شرقی سبلان و اسفندیاری (۱۳۸۵) به سیستم‌های مورفوزن غالب دامنه شرقی توده آتشفشانی سبلان پرداخته‌اند. موید (۱۳۹۱) در تلاش برای مدل سازی نحوه شکل‌گیری مخروط آتشفشانی سبلان، مدل تراکشش را الگویی برای تکوین تاریخی مخروط آتشفشانی سبلان معرفی نموده است. یافته‌های این محقق حاکی از وجود دو خطواره گسلی مشکین‌شهر در شمال و خطواره گرمی‌رود - بالیخلی‌چای در جنوب با راستای شمال شرق - جنوب غرب و با مکانیسم چپ‌گرد می‌باشد. رجبی و سلیمانی (۱۳۹۲) با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و به استناد شواهد مورفوتکتونیک به بررسی فعالیت‌های تکتونیکی چهار حوضه آبریز واقع در دامنه جنوبی سبلان پرداخته‌اند.

نظر به فقدان پژوهشی منسجم درباره میزان و شواهد فعالیت‌های تکتونیکی در حوضه‌های آبریز دامنه جنوب غربی کوهستان سبلان، هدف پژوهش حاضر، ارزیابی فعالیت‌های زمین ساختی حوضه‌های آبریز دامنه جنوب غرب سبلان از طریق به کارگیری شاخص‌های ژئومورفیک مبتنی بر الحاقیه TecDem، محاسبات تحلیلی مدل رقومی ارتفاع و شواهد میدانی حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های مورفوتکتونیکی است.

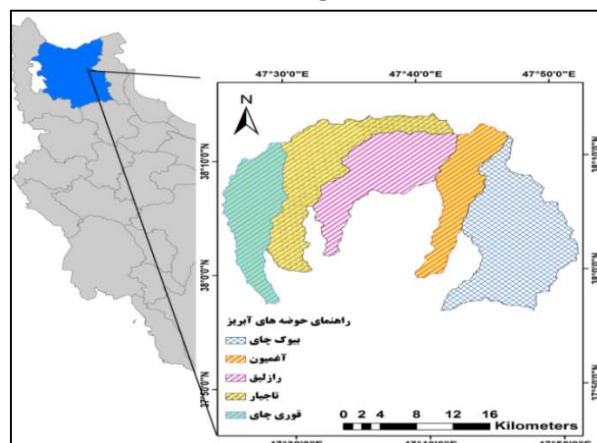
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در محدوده جغرافیایی $37^{\circ} 54' 30''$ تا $38^{\circ} 33' 14''$ عرض شمالی و $47^{\circ} 26' 28''$ تا $47^{\circ} 51' 10''$ طول شرقی قرار گرفته است. این محدوده شامل حوضه‌های آبریز بیوک چای، آغمیون، رازلیق، تاجیار و قوری چای (آقامعلی چای) از زیر حوضه‌های آجی چای می‌شود. جنس سازندهای زمین شناسی منطقه عمدتاً ولکانیکی متعلق به ائوسن بوده که به صورت فوران‌های

¹ Didon & Gemain

ارزیابی زمین ساخت حوضه‌های آبریز دامنه جنوب غرب ارتفاعات سیلان .../۷۹

گسترده ائوسن ظاهر گردیده است. این مواد شامل تراکی آندزیت، داسیت، ایگنمبریت و بازالت می‌باشد که به دلیل ماهیت لیتولوژیکی مقاوم کمتر دستخوش فرسایش گردیده و عمدتاً ستیغ‌ها و ارتفاعات را ساخته است.

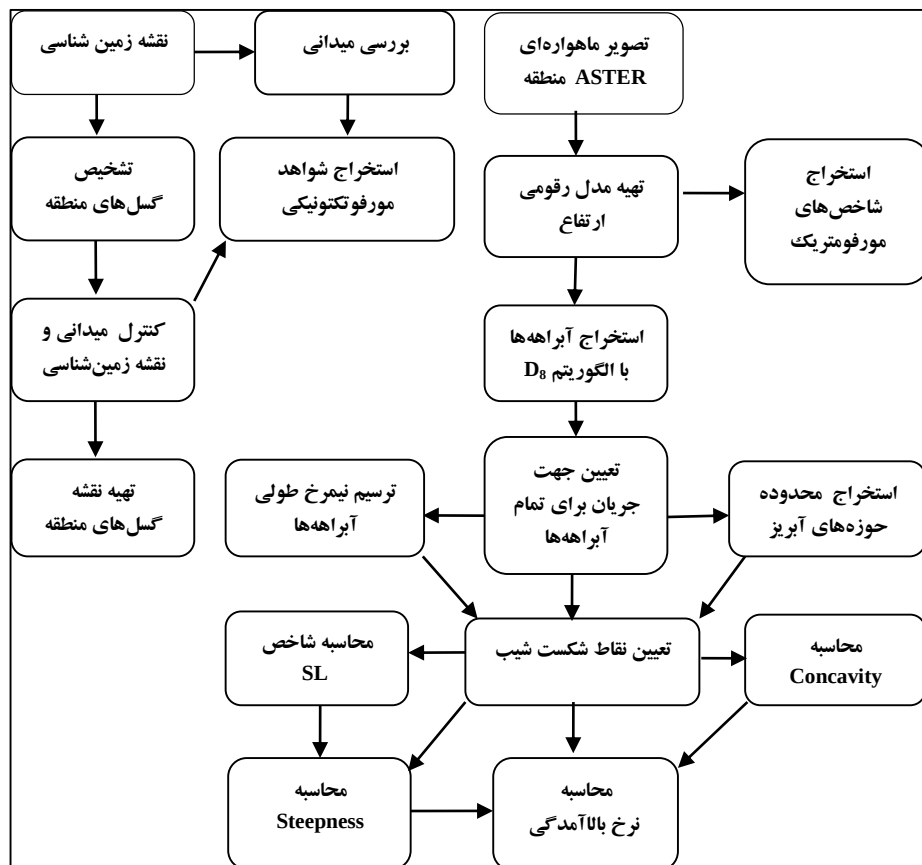


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه‌های آبریز مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

این پژوهش متکی بر داده‌های کمی و میدانی است که به روش‌های مختلفی استخراج و گردآوری شده‌اند. در این پژوهش به منظور ارزیابی فعالیت‌های زمین ساختی منطقه با استفاده از اختصاصات ژئومورفولوژیک، ابتدا اقدام به تهیه الگوی رقومی ارتفاعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER منطقه گردید. سپس با به کارگیری الحاقیه TecDem به روش الگوریتم D8 و برپایه نرم افزار متلب اقدام به تعیین شبکه‌های اصلی رودخانه‌ای و در نهایت استخراج حوضه‌های زهکشی شد. بدین منظور برای ایجاد شبکه زهکشی، الحاقیه TecDem ابتدا حفره‌های موجود در هر پیکسل فایبل رستری (مدل رقومی ارتفاع) را پر نموده و سپس مسیرهای جهت جریان محاسبه می‌نماید و یک خروجی رستری از هر پیکسل نسبت به پرشیب‌ترین پیکسل در جهت پایین شیب ایجاد و جهت جریان هر پیکسل تعیین می‌گردد. در ادامه شبکه جریان زهکشی ایجاد و به منظور تعیین اینکه زهکش‌ها در چه رده‌ای از رتبه‌بندی قرار دارند، از روش رتبه بندی استرالر استفاده شد. جهت تعیین رتبه‌های شبکه‌های زهکشی، الحاقیه TecDem با استفاده از اطلاعات مربوط به محاسبه نسبت همسایگی چاهک‌های پر شده رستری ولایه رستری جهت‌های جریان و تبدیل آن به لایه خطی اقدام به رتبه‌بندی به روش استرالر می‌نماید. این بخش شامل دو گام اساسی است:

- ۱- ترسیم کد جریان‌های واحدی برای هر پیکسل ۲- تعیین کد شناسه واحدی برای تمام پیکسل‌های بالای آستانه مورد نیاز (گورابی، ۱۳۹۴: ۴۶۹). در مرحله بعد به منظور بررسی نتایج حاصل از یافته‌های پژوهش، با استخراج ویژگی‌های زمین شناسی و لیتولوژی منطقه از نقشه‌های زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه موقعیت گسل‌ها و انطباق داده‌های مذکور با شواهد مورفوتکتونیک حاصل از مطالعات میدانی صحت داده‌های فوق مورد سنجش قرار گرفته است. در نهایت ارتباط بین داده‌های کمی اندازه‌گیری شده به وسیله الحاقیه TecDem و شواهد میدانی مورد بررسی، تحلیل و از تلفیق کلیه اطلاعات، وجود زمین ساخت فعال در محدوده مورد مطالعه تعیین گردیده است (شکل ۲).



شکل ۲- روش‌ها و مراحل استخراج و گردآوری داده‌های مورد نیاز پژوهش

نتایج و بحث

تعیین شیب، نقاط عطف شیب و شاخص‌های فرورفتگی

تعیین نقطه‌های شیب، ابزار قدرتمندی برای درک کنش و واکنش لندفرم‌ها به کاهش سطح پایه و جریان رسوب‌های مربوط به حوضه‌های آبریز است (گورابی، ۱۳۹۴: ۴۷۰). در واقع تجزیه و تحلیل شاخص‌های فرو رفتگی (تقعر) و شیب اطلاعات ارزشمندی در خصوص ویژگی‌های هیدرولیکی و ژئومورفیکی حوضه‌های آبریز نمایان می‌سازد. در الحاقیه TecDem، پس از تعیین نقاط تغییر شیب و ترسیم بازه مورد بررسی بر روی آبراهه توسط کاربر گرافیکی، مقادیر شاخص فرورفتگی (θ)، شاخص شیب نرمال K_{SN} توسط نرم افزار محاسبه می‌گردد. مقادیر کم شاخص فرو رفتگی و شیب زیاد بیان‌گر مرحله جوانی و وجود تکتونیک فعال در تحول چشم اندازهای ژئومورفیکی است و بالعکس (Gloaguen, Shahzad, 2011:254). بر اساس محاسبات انجام شده (جدول ۱) بیشترین مقدار شیب مربوط به حوضه آبریز آغمیون (۱۳۲/۲) و کمترین مقدار فرورفتگی (۱/۱۸) مربوط به همان حوضه می‌باشد که بیانگر فعال بودن آن از نظر تکتونیک نسبت به سایر حوضه‌های آبریز است. بر همین اساس، بیشترین مقدار فرو رفتگی (۶۲/۰) و کمترین میزان شیب (۴۱/۸) مربوط به حوضه آبریز قوری چای بوده که نشان دهنده فعالیت اندک تکتونیکی و مرحله پیری چشم انداز آن می‌باشد.

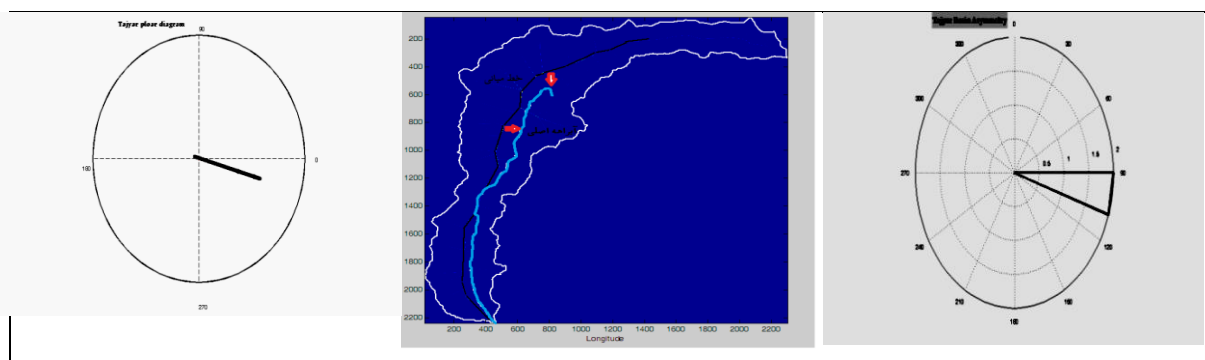
جدول ۱- مقادیر شاخص‌های فرورفتگی و شیب در حوضه‌های آبریز جنوب غرب سبلان

پارامتر/ حوضه آبریز	بیوک چای	آغمیون	رازلیق	تاجیار	قوری چای
بیشترین مقدار فرورفتگی (بی بعد)	۰/۵۰	۰/۳۰	۰/۵۳	۰/۵۰	۰/۶۲
کمترین مقدار فرورفتگی (بی بعد)	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۴۵	۰/۲۱	۰/۴۶
میانگین فرورفتگی شاخص K _{SN} (بی بعد)	۰/۳۷	۰/۲۴	۰/۴۵	۰/۳۵	۰/۴۵
بیشترین مقدار شیب (درصد)	۹۷/۵	۱۳۲/۲	۱۲۴	۱۰۹/۵	۸۰/۶
کمترین مقدار شیب (درصد)	۵۶/۲	۷۹/۷	۸۸	۸۲/۶	۴۱/۸
میانگین شیب (درصد)	۶۸	۱۰۹	۱۰۳	۹۶/۱	۶۴

(منبع: نگارندگان)

شاخص تقارن توپوگرافی عرضی^۱

در الحاقیه TecDem، شاخص دیگر ارزیابی میزان فعالیت‌های زمین ساختی حوضه‌های آبریز، شاخص تقارن توپوگرافی عرضی است که برای نمایش میزان کج‌شدگی تکتونیکی حوضه‌های آبریز به کار می‌رود. این شاخص امکان می‌دهد کج‌شدگی جانبی یک حوضه نسبت به مسیر اصلی رودخانه مشخص گردد. این کج‌شدگی ممکن است با فعالیت گسلی نرمال که موازی با جهت رودخانه اصلی است، در ارتباط باشد (Guarnieri, Pirrotta, 2008:265, Pérez-Peña, 2010:82). نحوه محاسبه این شاخص در الحاقیه TecDem مبتنی بر استفاده از روش انحنای فاصله، جهت محاسبه خط مرکزی حوضه و ترسیم خط میانی حوضه و آبراهه اصلی توسط رابط کاربر گرافیکی استوار است. میزان این شاخص در حوضه‌های متقارن برابر با صفر بوده و هرچه این میزان به عدد یک نزدیک‌تر شود حوضه دارای عدم تقارن بیشتری خواهد بود (Gloaguen, Shahzad, 2011:265). الحاقیه TecDem، علاوه بر محاسبه میزان تقارن توپوگرافی عرضی حوضه‌ها، جهت کج‌شدگی حوضه‌ها را نیز در قالب رزیدیاگرام و دیاگرام قطبی نمایش می‌دهد (شکل ۳).



شکل ۳- نحوه محاسبه شاخص تقارن توپوگرافی عرضی و ترسیم رزیدیاگرام و دیاگرام قطبی مربوطه در الحاقیه TecDem

مطابق نتایج به دست آمده، بیشترین میزان شاخص تقارن توپوگرافی عرضی متعلق به حوضه تاجیار (۰/۶۸) و کمترین میزان شاخص نیز متعلق به حوضه قوری چای (۰/۲۳) است. متوسط شاخص تقارن برای کل منطقه ۰/۵۲ بدست آمد. نتایج مذکور، بیانگر وجود عدم تقارن در سطح حوضه‌های آبریز جنوب غرب سبلان در جهت شمال غربی- جنوب شرقی است (جدول ۲).

^۱Transvers topographic symmetry factor

جدول ۲- مقادیر شاخص تقارن توپوگرافی عرضی حوضه‌های جنوب غرب سبلان

پارامتر/ حوضه آبریز	بیوک چای	آغمیون	رازلیق	تاجیار	قوری چای
شاخص تقارن توپوگرافی عرضی	۰/۵۱	۰/۵۷	۰/۶۴	۰/۶۸	۰/۲۳
جهت کج شدگی	NW-SE	NE-SW	NE-SW	NE-SW	NW-SE

نقشه همپایه

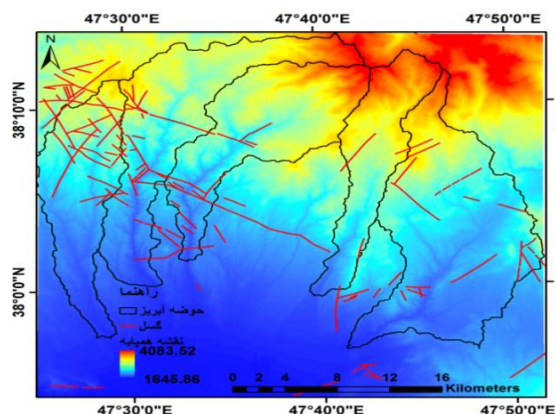
تهیه نقشه‌های مورفوتکتونیک به منظور تجزیه و تحلیل پدیده‌های مورفودینامیکی سطح حوضه‌های آبریز، ابزار مهمی جهت بررسی ژئومورفولوژی تکتونیک نواحی نیز محسوب می‌گردد (Grohmann, 2005:1008). این بررسی‌ها به ویژه برای تحلیل نواحی دارای شبکه زهکشی آنومالی و سطوح ارتفاعی ناپیوسته بسیار مفیدند (Gloaguen, 2007:132). نقشه‌های همپایه، ارتباط بین رتبه‌های آبراهه‌ای و وضعیت توپوگرافی حوضه آبریز را نشان می‌دهند. در واقع، نقشه همپایه را می‌توان نسخه‌ای ساده شده از یک سطح اصیل توپوگرافیک دانست که آثار فرسایشی آبراهه‌های رده اول از آن حذف شده‌اند (Tahmasbi Nejad, 2011:173). هدف اصلی این روش این است که مناطقی را که احتمالاً وقایع تکتونیک در آن‌ها فعال بوده است را بتوان در یک پهنه لیتولوژیکی همگن، تشخیص داد. بنابراین پویایی رده‌های آبراهه‌ای و تغییرات توپوگرافیکی را می‌توان با تهیه نقشه همپایه مطالعه کرد (Garrote et al, 2008:131; Gloaguen, Shahzad, 2011:263). برای تهیه نقشه همپایه باید ارتفاع و مکان آبراهه‌های رده دوم و سوم را درون‌یابی کرد (Grohmann, 2005:1010). در الحاقیه TecDem، رده بندی آبراهه‌ها با استفاده از روش استرالر بوده و با توجه به این که آبراهه‌های دارای رده یکسان به رخداد‌های زمین‌شناسی واحدی تعلق دارند، بنابراین سن یکسانی دارند (Gloaguen, Shahzad, 2011:262). توزیع مکانی الگوی رده بندی آبراهه‌ها شواهدی از واحدهای زمین‌شناسی زیرین را نشان می‌دهد (Rosenthal, Golts, 1992:6). در واقع نقشه‌های همپایه با نمایش توزیع سطوح ارتفاعی و نحوه گسترش مکانی رده‌های آبراهه‌ای در سطح حوضه، میزان ارتباط آن‌ها با پدیده‌های مورفوتکتونیک نظیر گسل‌ها و روراندگی‌ها آشکار می‌سازند (Grohmann, 2007:11). بنابراین این نقشه‌ها، سطوح فرسایشی را نشان می‌دهند که در نتیجه رخداد‌های تکتونیک یا فرسایشی شکل گرفته‌اند (گورابی، ۱۳۹۴: ۴۷۱). تغییرات سریع در نقشه‌های همپایه به مکان احتمالی گسل‌ها یا تغییرات لیتولوژیک اشاره دارد (Gloaguen, Shahzad, 2011:262).

در نقشه همپایه حوضه‌های مورد مطالعه، تغییرات توپوگرافی بر حسب سطوح ارتفاعی و با تغییرات رنگ نشان داده شده است (شکل ۴). انطباق نقشه همپایه با نقشه سیستم گسلی منطقه (شکل ۴) بیانگر نقش گسل‌ها به عنوان یکی از عوامل موثر بر تغییرات ارتفاعی و اختلاف ارتفاع زیاد (۱۶۵۴-۴۰۴۴) در سطح حوضه‌هاست. در اغلب موارد تغییرات سریع در سطح نقشه همپایه منطقه مطالعاتی منطبق بر خطوط گسلی است و رده بندی شبکه‌های آبراهه‌ای تأثیرپذیری آن‌ها از حرکات چپ‌گرد گسل‌ها را نمایان می‌سازد. مطابق نتایج حاصله، تغییرات سریع ناشی از وجود خطوط گسلی در نقشه همپایه عمدتاً در سطوح ارتفاعی ۳۰۰۰-۲۸۰۰ و ۲۱۰۰-۲۰۰۰ متر مشاهده می‌شود.

انتگرال هیپسومتری^۱

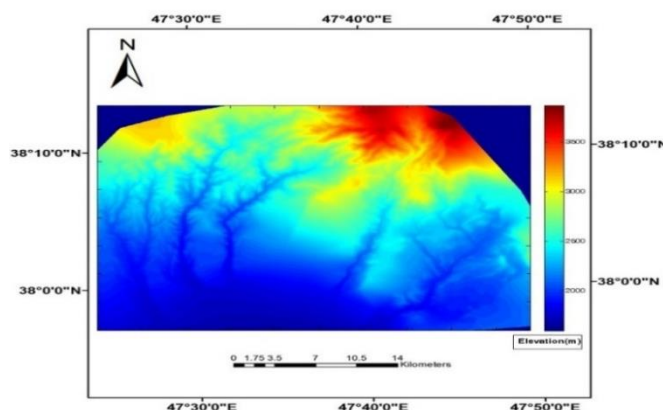
منحنی‌های هیپسومتری توزیع سطوح ارتفاعی یک منطقه معین یا یک حوضه آبخیز را ارزیابی و توصیف می‌کنند. این منحنی با ترسیم ارتفاع نسبی در مقابل مساحت نسبی حوضه ترسیم می‌شوند (علیزاده، ۱۳۸۰: ۸۷). انتگرال هیپسومتری، شاخصی است که

^۱Hi



شکل ۵- انطباق نقشه همپایه و نقشه گسل‌های منطقه

منبع: نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه



شکل ۶- نقشه همپایه منطقه مطالعاتی

به مساحت حوضه وابسته است و به صورت مساحت زیر منحنی تعریف می‌شود. (Pérez-Peña et al,2010:83). انتگرال هیپسومتری به صورت زیر محاسبه می‌گردد (Hamdouni et al,2008:158):

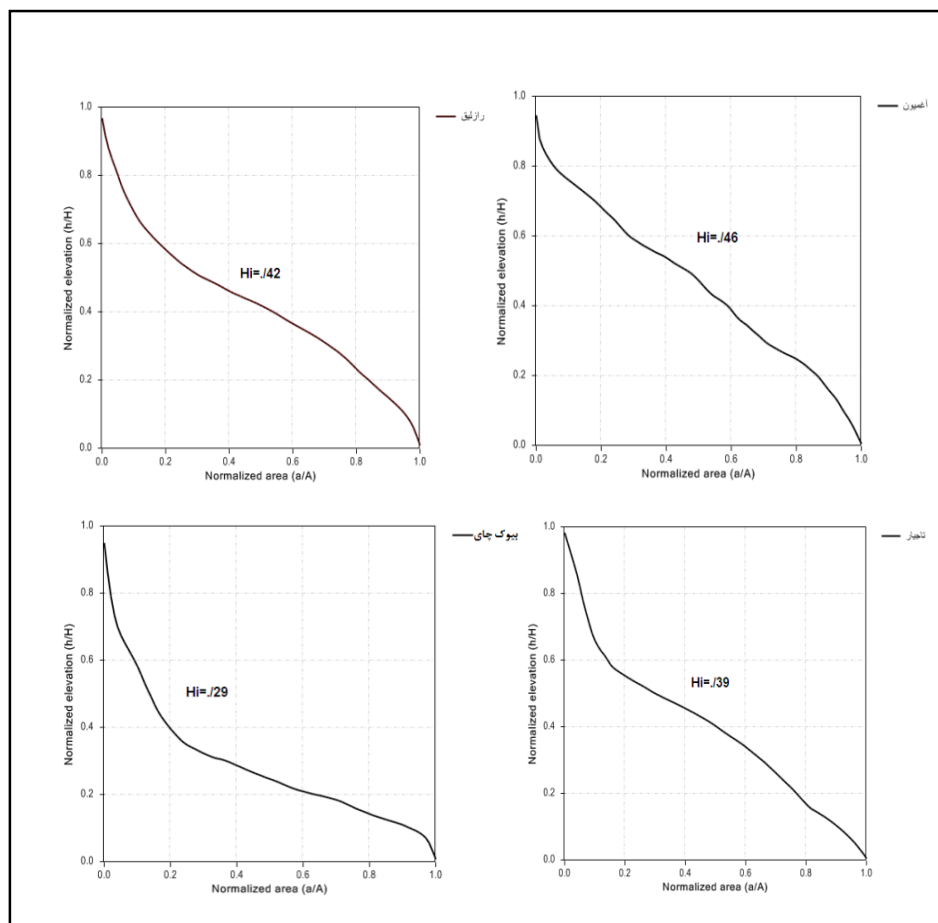
$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{حد اقل ارتفاع - حداکثر ارتفاع} / (\text{حد اقل ارتفاع} - \text{میانگین ارتفاع}) = \text{انتگرال هیپسومتری}$$

که در آن واحد پارامترها بر حسب متر می‌باشد.

مقادیر انتگرال هیپسومتری، توزیع منطقه‌ای ارتفاع ناهمواری و مراحل تحول حوضه زهکشی چشم‌اندازها را در چرخه فرسایشی بیان می‌کند (Pérez-Peña et al,2010:83). به طوری که مقدار انتگرال بزرگتر از ۰/۵ با منحنی محدب به توپوگرافی جوان چشم‌انداز (به صورت زمین‌های مرتفع با دره‌های عمیق) اشاره دارد. مقدار متوسط انتگرال ۰/۵ - ۰/۴ و شکل سیگموئید و پیچ و خم‌دار منحنی، مرحله بلوغ ناهمواری‌ها را نشان می‌دهد و در نهایت مقدار کم این شاخص (کوچکتر از ۰/۴) با منحنی مقعر مرحله پیری حوضه‌های زهکشی را نمایش می‌دهد (Guarnieri et al,2008:267). (گورابی، نوحه گر، ۱۳۸۶:۱۸۱). افزون بر آن، مقادیر انتگرال هیپسومتری به صورت غیر مستقیم میزان فعالیت‌های تکتونیکی را نیز منعکس می‌سازد. مقادیر زیاد (>۰/۵) شاخص Hi بیانگر چشم‌اندازهای جوانی است که ممکن است در اثر حرکات تکتونیکی جدید بوجود آمده باشند و یا اینکه بیانگر فرسایش کاوشی جدید یک سطح ژئومورفیک جوان نهشته‌گذاری شده باشد (Hamdouni et al,2008:159). الحاقیه TecDEM با استفاده از داده‌های رقومی ارتفاعی برای هر حوضه آبریز، مقادیر انتگرال هیپسومتری، مقادیر چولگی و کشیدگی منحنی را محاسبه و منحنی هیپسومتری را ترسیم می‌کند (Gloaguen,Shahzad,2011:240). طبق نتایج محاسبات، حوضه آبریز آغمیون بیشترین حالت تحدب را دارد (چولگی ۰/۶۲) که بیانگر فعالیت تکتونیکی زیاد در حوضه مذکور است. نتایج شاخص‌های محاسبه شده (جدول ۳)، حاکی از وجود شرایط تکتونیکی فعال و دوره جوانی چشم‌اندازهای ژئومورفیک در سطح حوضه‌های مورد مطالعه است.

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های منحنی هیپسومتری زیر حوضه‌های مورد مطالعه

پارامتر/ حوضه آبریز	بیوک چای	آغمیون	رازلیق	تاجیار	قوری چای
چولگی	۰/۴۸	۰/۶۲	۰/۵۵	۰/۴۵	۰/۵۰
کشیدگی	۲/۲۳	۲/۲۲	۲/۱۰	۲/۲۷	۲/۱۷
انتگرال هیپسومتری	۰/۲۹	۰/۴۶	۰/۴۲	۰/۳۹	۰/۴۰



شکل ۶- نمودار انتگرال هیپسومتری حوضه‌های آبریز جنوب غرب سبلان

محاسبه شاخص SL^۱

شاخص شیب طولی رودخانه به تغییرات شیب آبراهه حساس است و هرگونه بی‌نظمی را که در اثر فعالیت‌های تکتونیکی یا مقاومت سنگ در شیب آبراهه طولی ایجاد شده است، نشان می‌دهد (کرمی، ۱۳۸۸: ۷۰). این شاخص به صورت زیر تعریف می‌گردد: (Keller, Pinter, 2002: 126)

$$SL = (\Delta H / \Delta L) L$$

رابطه (۲)

SL = شاخص شیب طولی رودخانه

$\Delta H / \Delta L$ = شیب آبراهه یا گرادیان یک قطعه

ΔH = اختلاف ارتفاع قطعه موردنظر (متر)

ΔL = طول آبراهه قطعه موردنظر (متر)

L = مجموع طول مجرای رود از نقطه میانی قطعه موردنظر تا بلندترین نقطه مجرا در بالادست رود (متر)

شاخص SL به تغییرات ساختارهای زمین‌شناسی مجرا حساس است، این حساسیت اجازه می‌دهد برآوردی از ارتباط میان پویایی زمین‌ساختی، مقاومت سنگ بستر و توپوگرافی آن به دست آید. در بخش‌هایی که مقادیر شاخص SL تغییر می‌کند، نشانه‌ای از

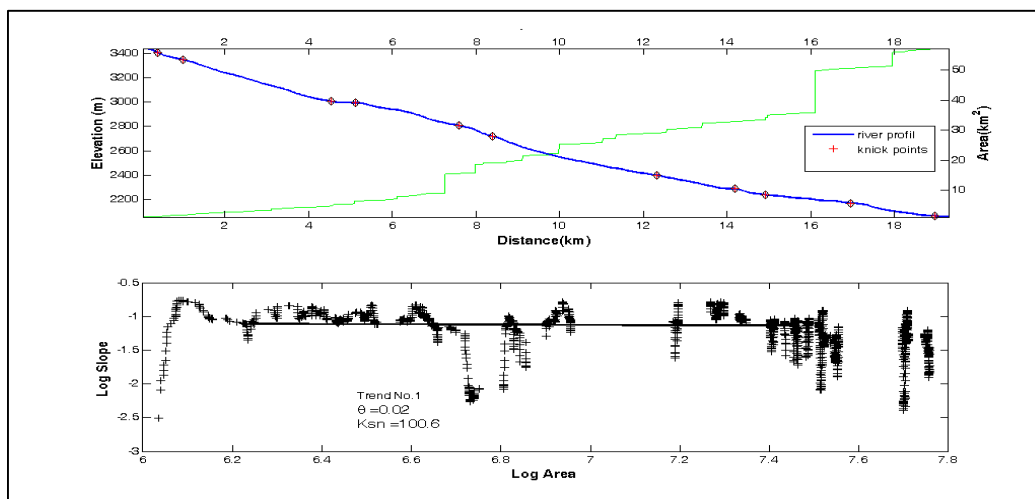
۱- شاخص گرادیان طولی رودخانه: این شاخص به منظور بررسی تاثیر متغیرهای محیطی بر نیمرخ طولی رودخانه و تعیین وضعیت تعادل یا عدم تعادل رودها استفاده می‌شود.

تغییر وضعیت تکتونیکی یا لیتولوژیکی رودخانه است. از طریق تطبیق مقادیر شاخص SL، نیمرخ طولی رودخانه، نقشه‌های لیتولوژی و موقعیت گسل‌ها، اثر عوامل لیتولوژی و تکتونیکی در تغییر شیب طولی رودخانه و نقاط شکست شیب نمایان می‌شود. با وجود این، بی‌نظمی‌های موجود در نیمرخ طولی رودها، اغلب به وسیله عامل تکتونیک و واحدهای لیتولوژی با مقاومت‌های متفاوت که در بستر رودخانه برونزد دارند، تغییر می‌کند (Mumipour, 2012: 65). مقادیر شاخص SL، می‌تواند برای ارزیابی نسبی فعالیت‌های تکتونیکی به کار رود، مقادیر این شاخص در قسمتهایی از مجرای رودخانه که با بالا آمدگی تکتونیکی توام بوده، افزایش می‌یابد (Hamdouni et al, 2008: 154). این شاخص از طریق الحاقیه TecDEM برای حوضه‌های مورد مطالعه با احتساب منحنی میزان ۱۰۰ متری محاسبه گردیده است (جدول ۴). بر مبنای محاسبات انجام گرفته، بیشترین میزان گرادیان طولی رودخانه ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی به ترتیب در حوضه‌های آبریز آغمیون (۶۱۴/۸) و بیوک چای (۵۷۶/۲)، مشاهده می‌شود. این مسئله با شواهد مورفوتکتونیکی منطقه از طریق تطبیق نقشه حوضه‌ها با موقعیت گسل‌ها، وجود گسل چپ‌گرد تراکشی را در خروجی حوضه‌های مذکور نمایان می‌سازد (شکل ۵).

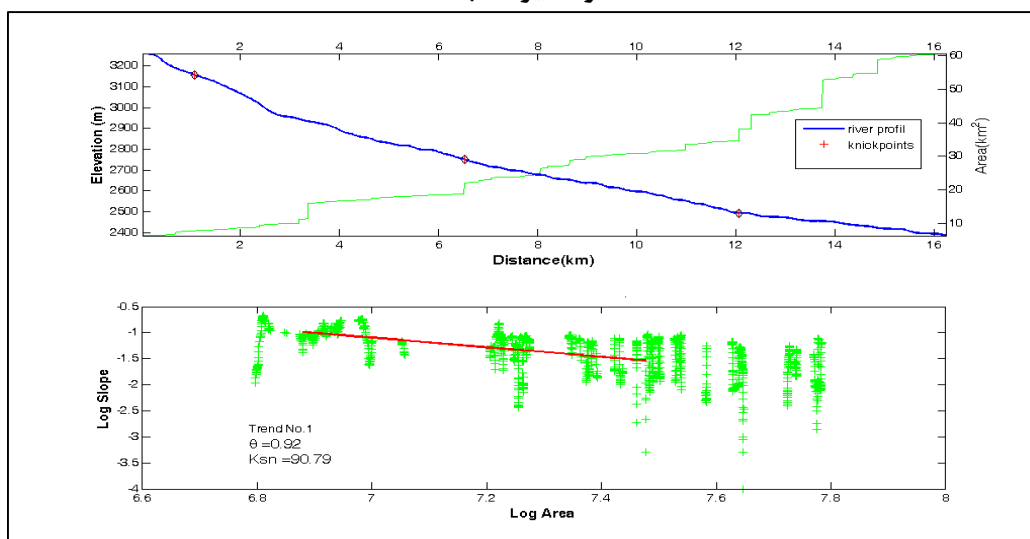
جدول ۴- مقادیر شاخص گرادیان طولی رودخانه حوضه‌های مورد مطالعه

شاخص / حوضه آبریز	بیوک چای	آغمیون	رازلیق	تاجیار	قوری چای
گرادیان طولی رودخانه	۵۷۶/۲	۶۱۴/۸	۴۶۸	۵۱۵/۲	۳۱۶/۲

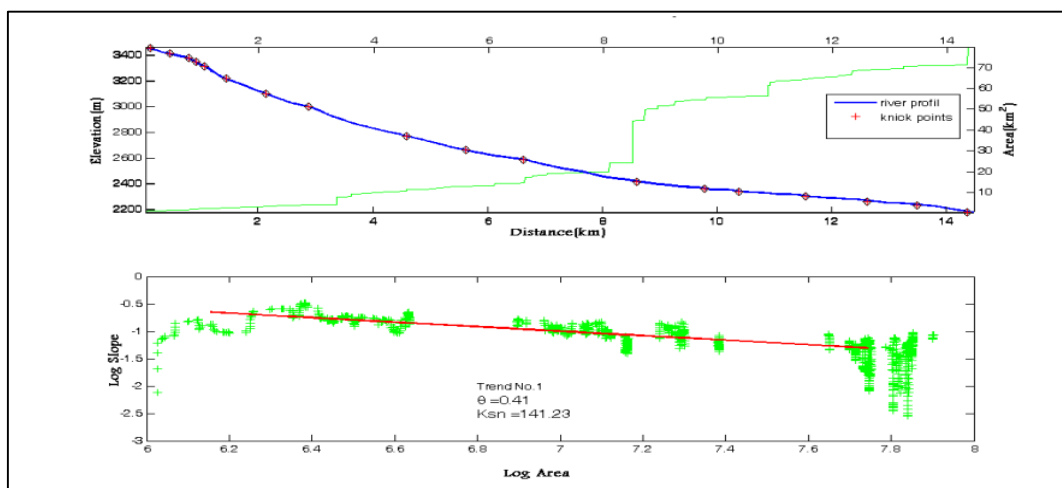
با استفاده از الحاقیه TecDEM، می‌توان روند تغییرات نیمرخ طولی رودخانه‌ها را نیز ترسیم و اثر حرکات زمین ساختی را بر روی هریک از آبراهه‌ها بررسی نمود. در این روش، پس از انتخاب تعداد نقاط لازم و ترسیم بازه مسیر مورد بررسی بر روی پروفیل طولی آبراهه توسط کاربرگرافیکی، تغییرات روند پروفیل طولی آبراهه، میزان شیب و میزان فرورفتگی (تقعر)، توسط نرم افزار محاسبه و نقاط عطف ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی بر روی پروفیل مربوطه مشخص می‌گردد. تند بودن شیب نقاط عطف، اطلاعات ارزشمندی در باره فعالیت‌های تکتونیکی ارائه می‌دهد. عموماً، تند بودن شیب نقاط عطف به جدید بودن فعالیت‌های تکتونیکی اشاره دارد (Wobus, 2006: 60). نتایج مربوط به تحلیل نیمرخ طولی آبراهه‌های اصلی حوضه‌های مطالعاتی، حاکی از وجود چندین نقطه عطف مربوط به فعالیت تکتونیکی ناشی از وجود گسل‌های محلی در امتداد هریک از آبراهه‌هاست. مطابق نتایج بدست آمده، حوضه قوری چای (واقع در قسمت غربی منطقه مطالعاتی)، دارای سه نقطه عطف مشخص ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی است. میزان فرورفتگی و شاخص شیب نرمال در بازه بالادست آبراهه موردنظر به ترتیب ۰/۴۱ و ۱۰۶/۴ و در بازه پایین دست آن به ترتیب ۱ و ۷۷/۹ می‌باشد. مقادیر شاخص تقعر و شیب نرمال برای حوضه بیوک چای (واقع در شرق منطقه مطالعاتی) به ترتیب برابر ۰/۲ و ۱۰۰/۶ می‌باشد، که مبین غلبه فعالیت‌های تکتونیکی بر شرایط فرسایشی در بازه‌های مورد اشاره است. به هر حال مقادیر کم فرو رفتگی و شیب زیاد در پروفیل طولی تمامی آبراهه‌های مورد بررسی، بیانگر مرحله جوانی و اثر بارز تکتونیک فعال در تحول چشم اندازهای ژئومورفیکی دامنه جنوب غرب سبلان است (شکل ۷ تا ۱۱).



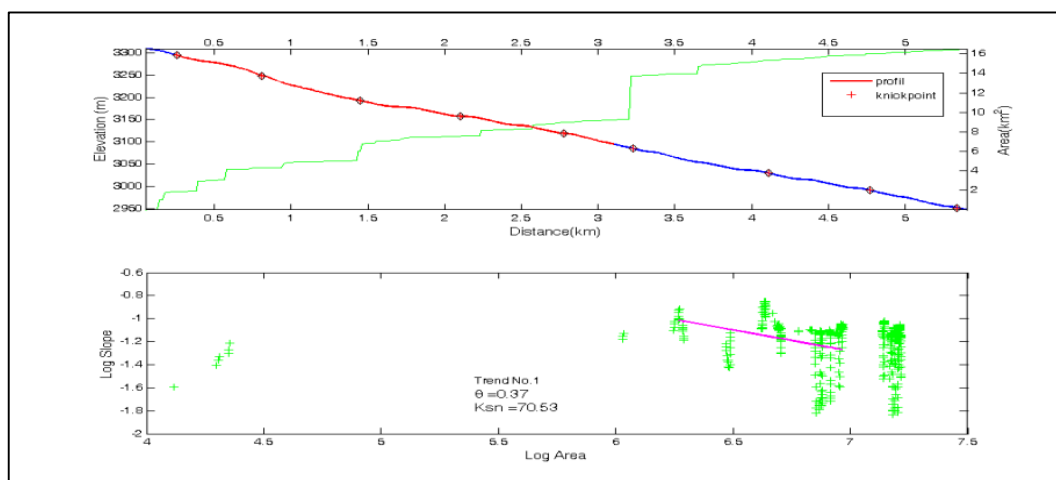
شکل ۷- نمودارهای نیمرخ طولی و نیمرخ توزیع شیب و رگرسیون لگاریتمی آبراهه اصلی حوضه بیوک چای



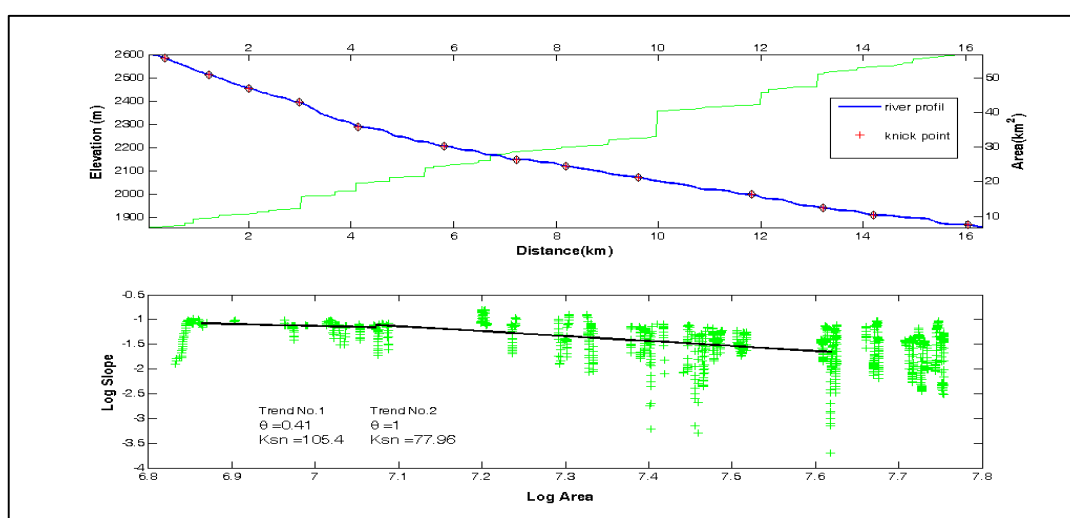
شکل ۸- نمودارهای نیمرخ طولی و نیمرخ توزیع شیب و رگرسیون لگاریتمی آبراهه اصلی حوضه تاجیار



شکل ۹- نمودارهای نیمرخ طولی، نیمرخ توزیع شیب و رگرسیون لگاریتمی آبراهه اصلی حوضه رازلیق



شکل ۱۰- نمودارهای نیمرخ طولی، نیمرخ توزیع شیب و رگرسیون لگاریتمی آبراهه اصلی حوضه آغمیون



شکل ۱۱- نمودارهای نیمرخ طولی، نیمرخ توزیع شیب و رگرسیون لگاریتمی آبراهه اصلی حوضه قوری چای

محاسبه نرخ بالاآمدگی^۱

شرایط ساختمانی و لیتولوژیکی هر حوضه آبریز، تعادل پویایی را برای آن حوضه ایجاد می‌کنند که این شرایط، آبراهه‌های موجود را به ایجاد تعادل جدید سوق می‌دهد. درالحاقیه TecDEM، تعادل مذکور از طریق روابط ذیل محاسبه می‌گردد: (Shahzad, Gloaguen, 2009:17)

$$\frac{dz}{dt} = U - E = U - KA^m S^n$$

رابطه (۳)

در این رابطه، U و E نرخ‌های بالاآمدگی و فرسایش هستند. عامل K به مقاومت سنگ بستگی دارد و ضریب تأثیر فرسایش است. A مساحت بالادست آبراهه و S شیب مجراست. مقادیر m و n به فرآیندهای فرسایشی، هندسه و هیدرولیک حوضه بستگی دارد. این معادله برای حوضه‌ای که در شرایط پایدار است برابر صفر می‌باشد. پس برای شرایط پایدار می‌توان معادله را به این شکل خلاصه کرد:

$$S = K_s A^{-\theta}$$

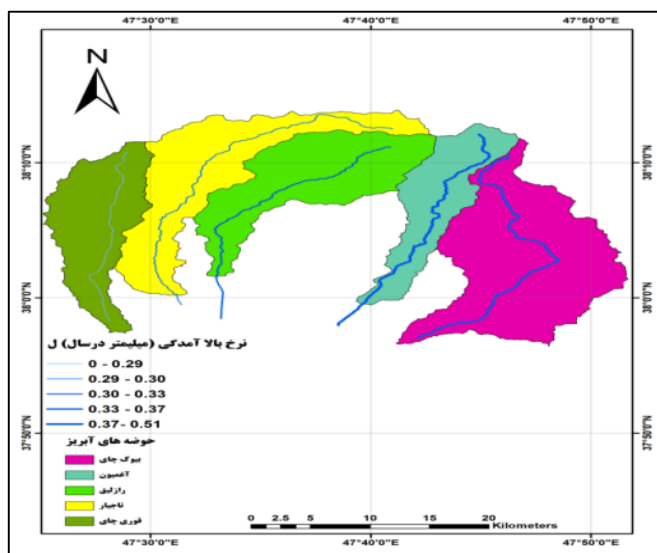
رابطه (۴)

^۱ Uplifts Rate

که در آن θ و K_s شاخص‌های تقعر و شیب هستند. این مقادیر از تحلیل رگرسیونی داده‌ها رابطه ۴ حاصل می‌گردد (Wobuset al, 2006:67). با تلفیق روابط ۳ و ۴ و با فرض ثابت بودن شرایط، می‌توان نرخ بالاآمدگی حوضه آبریز را با رابطه زیر محاسبه کرد که در آن k_{sn} شاخص نرمال شده شیب است (Shahzad, Gloaguen, 2009:18).

$$U = k_{sn}^n K \quad \text{رابطه (۵)}$$

با عنایت به روابط مذکور و انجام محاسبات با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه در محیط نرم افزارهای متلب و ArcGIS، نرخ بالاآمدگی حوضه‌های مورد مطالعه محاسبه گردیده است (شکل ۱۲). نقشه نرخ بالاآمدگی، بیانگر تفاوت نرخ بالاآمدگی در بخش‌های مختلف منطقه است. در بخش غربی منطقه، نرخ بالاآمدگی ۱۵/ میلی‌متر در سال بوده که این رقم در بخش میانی منطقه به ۳۳/ میلی‌متر در سال و در بخش شرقی منطقه به ۵۱/ میلی‌متر در سال می‌رسد. مطابق نتایج، حوضه‌های واقع در بخش‌های شرقی و میانی منطقه به ترتیب بالاترین نرخ بالاآمدگی تکتونیکی را تجربه می‌کنند که عامل اصلی آن، وجود گسل چپ‌گرد تراکشی واقع در خط کنیک کوهستان سبلان با دشت سراب (محدوده رازلیق تا آغمیون و بیوک چای) می‌باشد.



شکل ۱۲- نقشه نرخ بالا آمدگی حوضه‌های آبریز مورد مطالعه

شواهد صحرایی

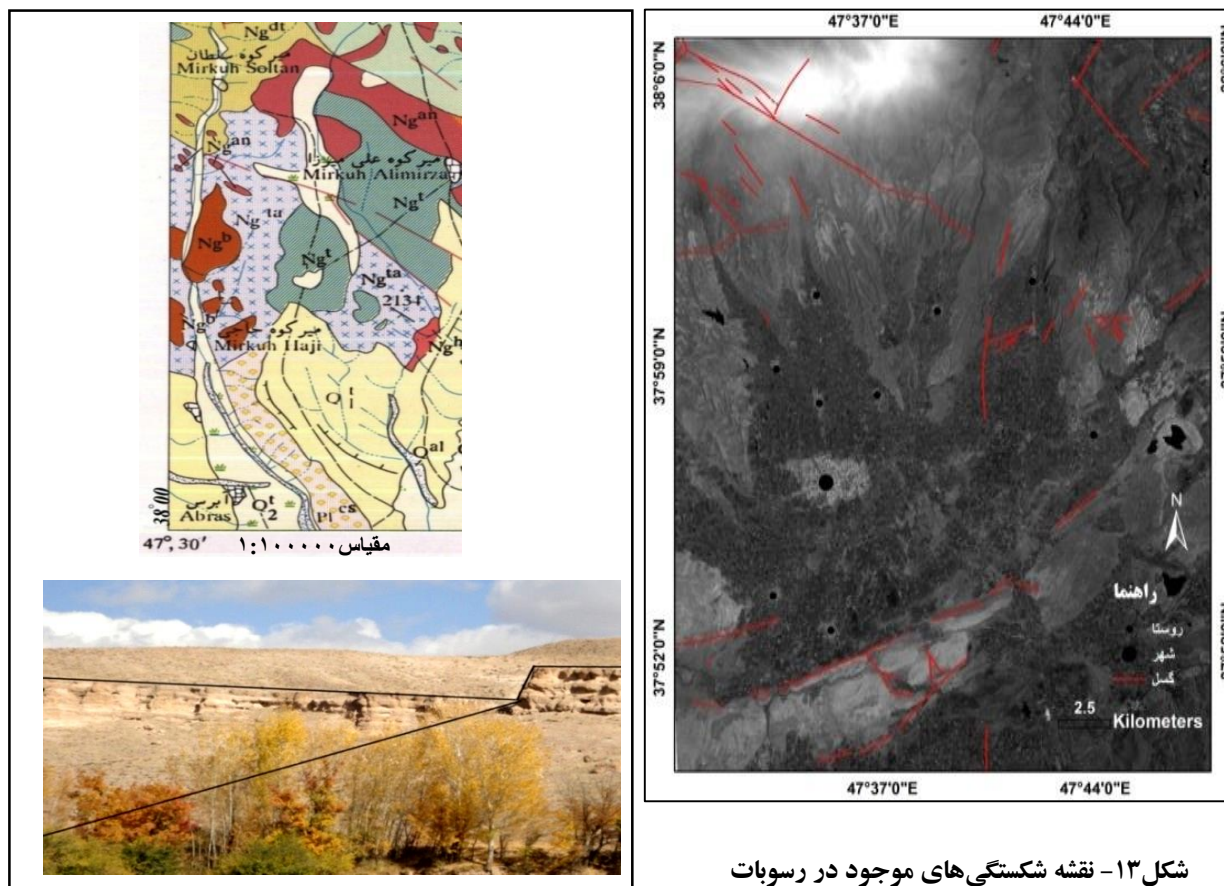
نتیجه ارزیابی فعالیت‌های زمین ساختی در منطقه مطالعاتی با استفاده از اختصاصات ژئومورفولوژیک، حاکی از وجود فعالیت‌های زیاد تکتونیکی در بخش میانی و شرقی منطقه است، اما بخش غربی منطقه از فعالیت تکتونیکی پائینی برخوردار است. به منظور کسب اطمینان از نتایج به دست آمده، بازدید صحرایی از منطقه مطالعاتی به عمل آمد. آثار و شواهد مورفوتکتونیکی در گستره مطالعاتی، وجود خط گسل چپ‌گرد آغمیون در بخش شرقی و میانی منطقه را نشان می‌دهد. وجود شواهد میدانی عملکرد خط گسلی مذکور نظیر؛ حفر و جابه‌جایی راس مخروط افکنه‌های آغمیون، تاجیار و قوری چای، تغییر محل رسوب‌گذاری، برش رسوبات و وجود شکستگی‌های متعدد (شکل ۱۳)، پشته‌های مسدود کننده^۲ و خطی^۳ در امتداد آبراهه‌های آغمیون و تاجیار،

^۱ Replacement of Fan apex

^۲ Shutter rides

^۳ liner rides

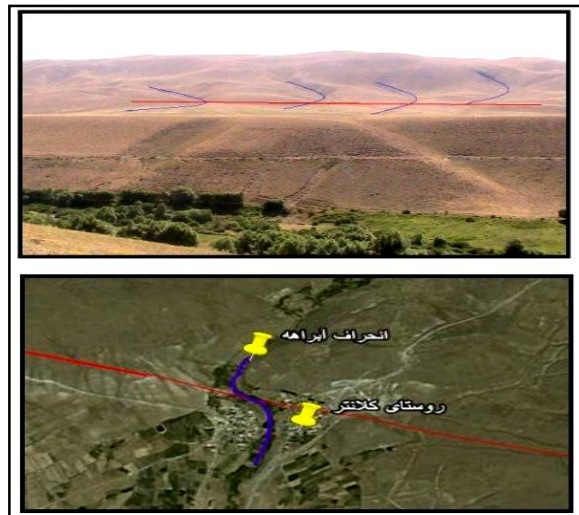
دره‌های خطی^۱ و پرتگاه گسلی معکوس^۲ متعدد به ویژه در حوضه‌های آغمیون و تاجیار (شکل ۱۴)، انحراف شبکه^۳ آبراهه‌ها و حفر عمیق بستر به ویژه در حوضه آغمیون (شکل ۱۵)، وجود پادگانه‌های مرتفع آبرفتی، وجود خط کنیک در محل خروجی آبراهه اصلی از کوهستان (شکل ۱۶)، تطابق خوبی با توزیع نسبی فعالیت تکتونیک و نتایج مقادیر به دست آمده از شاخص‌های ژئومورفیک را نشان می‌دهند.



شکل ۱۳- نقشه شکستگی‌های موجود در رسوبات
کواترنری بر روی تصویر ماهواره‌ای IRSP5

شکل ۱۴- خط گسل در نقشه زمین شناسی مشگین شهر به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و پرتگاه گسلی مربوطه در حوضه تاجیار (تصویر پایین)

³ Diversion of network



شکل ۱۶- خط کنیک در محل تلاقی کوهستان با دشت (حوضه تاجیار)

شکل ۱۵- انحراف آبراهه‌ها در مسیر گسل آغمیون

منبع: (رجبی، ۱۳۹۲: ۱۰۷)

نتیجه گیری

از تلفیق نتایج مقادیر به دست آمده از محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک با استفاده از الحاقیه TecDEM 2.0، تحلیل نقشه همپایه (شکل ۴)، مقادیر به دست آمده از شاخص‌های فرورفتگی H ، فرورفتگی شاخص K_{SN} و شیب (جدول ۱)، شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (جدول ۲)، شاخص منحنی هیپسومتری (جدول ۳)، شاخص گرادیان طولی رودخانه (جدول ۴)، تحلیل رگرسیون لگاریتمی نیمرخ طولی آبراهه‌ها (شکل‌های ۷ تا ۱۱)، نتایج محاسبه نرخ بالاآمدگی (شکل ۱۲)، بررسی تصاویر ماهواره‌ای IRSP5 (شکل ۱۳)، پژوهش‌های صحرایی و شواهد مورفوتکتونیکی منطقه، وجود تکتونیک فعال در سطح حوضه‌های مورد مطالعه اثبات می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از شاخص‌های تقعر، شیب، گرادیان طولی رودخانه و نرخ بالاآمدگی، حوضه‌های آغمیون و بیوک چای بیشترین و حوضه قوری چای کمترین میزان فعالیت تکتونیکی را داراست. به طوری که بیشترین میزان شاخص SL به حوضه‌های آغمیون و بیوک چای تعلق دارد (جدول ۴). در حالی که بر اساس شاخص تقارن توپوگرافی عرضی، بیشترین میزان کج شدگی به ترتیب مربوط به حوضه‌های تاجیار و رازلیق بوده و حوضه قوری چای کمترین میزان کج شدگی را بر اساس فعالیت‌های تکتونیکی داشته است. تحلیل شاخص چولگی حوضه‌ها بیانگر وجود بیشترین مقدار تحدب در حوضه آغمیون و رازلیق بوده و منحنی هیپسومتری تمامی حوضه‌ها به جز بیوک چای در حالت تحدب قرار دارد. الگوی نقشه همپایه حوضه‌ها نیز نشان دهنده تاثیر تکتونیک و تغییرات سریع توپوگرافیک منطبق بر خطوط گسلی است. این تغییرات عمدتاً در سطوح ارتفاعی ۳۰۰۰-۲۸۰۰ و ۲۱۰۰-۲۰۰۰ متر بوده و تاثیرپذیری شبکه‌های آبراهه‌ای از حرکات چپ گرد گسل‌ها را نمایان می‌سازد (شکل‌های ۴ و ۵). نتایج مربوط به روند تحول شبکه آبراهه‌ای (شکل‌های ۷ تا ۱۱) در بخش‌های مختلف منطقه، حاکی از روند متفاوت تحول آبراهه‌هاست. با وجود این که شرایط تکتونیکی برای کل منطقه فعال است، اما در بخش‌های مختلف منطقه، مقادیر فعالیت و نحوه عملکرد آن، یکسان نیست، نتایج مربوط به نقشه نرخ بالاآمدگی تکتونیکی، گسل‌های منطقه، جدول مقادیر شاخص SL و انطباق آنها با هم، موید همین مساله است. نتایج پژوهش، نشان دهنده حاکمیت تکتونیک فعال و دوره جوانی بر چشم اندازهای ژئومورفیک منطقه مطالعاتی است. شایان ذکر است در راستای مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج سایر محققین، این پژوهش هم

ارزیابی زمین ساخت حوضه‌های آبریز دامنه جنوب غرب ارتفاعات سبلان .../۹۱

راستا و تائید کننده نتایج پژوهش‌های خارجی و داخلی به لحاظ ارائه نتایج ملموس، دقیق و کارایی مناسب روش ارزیابی زمین ساخت بر اساس اختصاصات ژئومورفولوژیک در تحلیل‌های تکتونیکی مناطق می‌باشد.

منابع و مآخذ

- بیاتی خطیبی، مریم (۱۳۸۸)، تحلیل اثرات فعالیت‌های نئوتکتونیکی در نیمرخ طولی رودخانه‌های حوضه قرنقوچای در دامنه‌های شرقی سهند، نشریه فضای جغرافیایی، شماره ۲۷، صص ۷۹-۱۱۳.
- جباری، ندا، ثروتی، محمدرضا، حسین زاده، محمدمهدی (۱۳۹۱)، مطالعه مورفوتکتونیک فعال حوضه آبخیز حصارک (شمال غرب تهران) با استفاده مورفومتریک، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۲، پاییز، صص ۱۷-۳۴.
- حبیب الهیان، محمود، رامشت، محمدحسین (۱۳۹۱)، کاربرد شاخص‌های ارزیابی تکتونیک جنبه در برآورد وضعیت تکتونیک بخش علیای زاینده رود، جغرافیا و توسعه، سال ۱۰، شماره ۲۶، صص ۹۹-۱۱۲.
- ده بزرگی، مریم، مومنی طارمسری، محمد (۱۳۹۵)، فعالیت زمین ساخت جوان در پهنه گسلی قم- زفره، ایران مرکزی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۲، پاییز، صص ۱۱۰-۱۲۹.
- رجبی، معصومه، سلیمانی، ابوالفضل (۱۳۹۲)، تحلیل و ارزیابی ویژگی‌های مورفوتکتونیک و نئوتکتونیک دامنه جنوبی کوهستان سبلان، جغرافیا و برنامه ریزی، سال ۱۷، شماره ۴۵، صص ۹۷-۱۲۰.
- رضایی مقدم، محمد حسین، سرافروزه، سلیمان، خیری زاده آروق، منصور (۱۳۹۲)، ارزیابی تکتونیک فعال در دامنه جنوبی میشوداغ، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال دوم، شماره ۳، زمستان، صص ۱۴۱-۱۵۸.
- روستایی، شهرام، رجبی، معصومه، سمندر، نسرین (۱۳۹۴)، بررسی نقش عوامل موثر در تحول ژئومورفولوژی مخروط افکنه و بستر اسکوچای، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۲، بهار، صص ۴۱-۶۰.
- صمدی مقدم، رعنا، ده بزرگی، مریم، نورزعی، رضا، محجل، محمد (۱۳۹۵)، ارزیابی نئوتکتونیک گسل کلمرد با استفاده از GIS، منطقه شیرگشت (ایران مرکزی)، جغرافیا و توسعه، شماره ۴۵، زمستان، صص ۱۵۹-۱۸۰.
- علیزاده، امین (۱۳۸۰)، اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد، چاپ پنجم.
- کرمی، فریبا (۱۳۸۸)، ارزیابی ژئومورفیک فعالیت‌های تکتونیک در حوضه زهکشی سعیدآباد چای، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۶۹، صص ۶۷-۸۲.
- کرمی، فریبا (۱۳۸۸)، ارزیابی نسبی فعالیت‌های تکتونیک با استفاده از تحلیل‌های شکل‌سنجی (مورد نمونه: حوضه اوجان‌چای، شمال شرقی کوهستان سهند)، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۳۵، صص ۱۳۵-۱۵۴.
- گورابی، ابوالقاسم، کریمی، مصطفی (۱۳۹۱)، روشی جدید در استخراج مخروط افکنه‌ها از مدل رقومی ارتفاع، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۳، صص ۸۹-۱۰۰.
- گورابی، ابوالقاسم، نوحه‌گر، احمد (۱۳۸۶)، شواهد ژئومورفولوژیک تکتونیک فعال حوضه آبخیز درکه، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۶۰، صص ۱۷۷-۱۹۶.
- گورابی، ابوالقاسم، پاریزی، اسماعیل (۱۳۹۴)، تاثیر نو زمین ساخت بر تحول لندفرم‌های دامنه‌های جنوب غرب شیرکوه، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۲، پاییز، صص ۴۶۵-۴۷۹.
- گورابی، ابوالقاسم، کیارستمی، فاطمه (۱۳۹۴)، ارزیابی زمین ساخت حوضه‌های آبریز با استفاده از اختصاصات ژئومورفولوژیک در قالب الگوی TecDEM (مورد مطالعه: حوضه آبریز رودک در شمال شرق تهران)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۷، شماره ۳، پاییز، صص ۴۵-۵۹.
- محمد نژاد آروق، وحید (۱۳۹۵)، گسل‌های فعال و تاثیر آن‌ها بر تغییر شکل لندفرم‌های کواترنر شمال شرق دریاچه ارومیه، ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۸، شماره ۱، بهار، صص ۸۳-۱۰۶.

- مقامی مقیم، غلامرضا (۱۳۹۵)، تاثیر فعالیتهای تکتونیکی در ریخت شناسی حوضه ی آبریز رودخانه ی روئین در شمال شرق ایران، جغرافیا و توسعه، شماره ۴۳، تابستان، صص ۷۱-۹۰.
- مومنی طارمسری، محمد، ده بزرگی، مریم، یساقی، علی، نوزعیم، رضا (۱۳۹۴)، ارزیابی تکتونیک فعال ازبک کوه در شمال طبرستان، ایران مرکزی، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۳، زمستان، صص ۵۰-۶۹.
- موید، محسن، حسین زاده، قادر، تراکشش مدلی برای شکل گیری مخروط آتشفشانی سبلان، پنجمین کنگره بین المللی جغرافیادانان جهان اسلام، دانشگاه تبریز، (تاریخ برگزاری کنفرانس ۱۳۹۱)، صص ۸.
- همتی، فریبا، بهرامی، شهرام، زنگنه اسدی، محمدعلی (۱۳۹۴)، شواهد ژئومورفولوژیک زمین ساخت فعال در طاق دیس پیکلا، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۳۰، شماره ۳، پاییز، شماره ۱۱۸، صص ۲۰۷-۲۲۲.

- Bull, W.B. (2007), Tectonic Geomorphology of Mountains: A New Approach to Pale seismology, Wiley-Blackwell, Oxford.
- Burbank, D. W., Anderson, R. S. (2001), Tectonic Geomorphology, Blackwell Science, Oxford.
- Didon, J., Gemain, Y.M. (1976), Le Sabalan, Volcan Plio – Quaternaire de L Azerbaijan Oriental (Iran), etude geologique et petrographique de ledifice et de son environnement regional , these de 3esme Cycle, Univ Grenoble .
- Dehbozorgi, M., Pourkermani, M., Arian, M., Hoseini, A. (2010), Quantitative Analysis of Relative Tectonic Activity in the Sarvestan Area central Zagros, Iran Geomorphology, Vol. 13, pp. 1-13, (In Persian).
- Guarnieri, P., Pirrotta, C. (2008), The response of drainage basins to the late Quaternary tectonic in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily), Geomorphology, 95, pp. 260-273.
- Gloaguen, R., Marpu, P.R., Niemeyer, I. (2007), Automatic extraction of Faults and Fractal analysis from remote sensing date, Nonlinear processes Geophys, 14, pp. 131-138.
- Golts, S., Rosenthal, E. (1992), Morphotectonic methods to infer groundwater flow under conditions of scarce hydrogeological data—the case of northern Arva, Applied Hydrogeology, 3, (1) pp. 5-19.
- Grohmann, CH. (2005), Trend-surface analysis of morphometric parameters: a case study in southeastern Brazil, Computers & Geosciences, 31(8), pp. 1007-1014.
- Grohmann, CH., Riccomini, C., Alves, F.M. (2007), SRTM-based morphotectonic analysis of the Pocos de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil, Computers & Geosciences, 33 (1), pp. 10-19.
- Guarnieri, P., Pirrotta, C. (2008), the response of drainage basins to the late Quaternary tectonic in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily), Geomorphology, 95, pp. 260-273.
- Garrote, J., Heydt, G.G., Cox, R.T. (2008), Multi-stream order analyses in basin asymmetry: a tool to discriminate the influence of neotectonics in fluvial landscape development (Madrid Basin, Central Spain), Geomorphology, 102 (1), pp. 130-144.
- Hamdouni, R. E., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacon, J., Keller, E. A. (2008), Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain), Geomorphology, 96, pp. 150-173.
- Jamali, F., Hessami, Kh., Ghorashi, M. (2010), Active tectonics and strain partitioning along dextral fault system in Central Iran: Analysis of geomorphological observations and geophysical data in the Kashan region, Journal of Asian Earth Sciences, in press.
- Jordan, G., Meijninger, B. M. L., van Hinsbergen, D.J.J., Meulenkamp, J.E., van Dijk, P.M. (2005), Extraction of morphotectonic features from DEMs: Development and applications for study areas in Hungary and NW Greece, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 7.
- Keller, E.A., Pinter, N. (2002), Active Tectonics. Earthquakes, Uplift and Landscape, Prentice Hall, pub.
- Mahmood, S. A., Gloaguen, R. (2012), Appraisal of active tectonics in Hindu Kush: Insights from DEM derived geomorphic indices and drainage analysis, Geoscience Frontiers, In Press.
- Mahmood, S.A., Shahzad, F., Gloaguen, R. (2008), Understanding neotectonic induced surface deformation from drainage network using Digital Elevation Models, ICAST, 2008, conference, vol. 2, pp. 98-102.
- Mahmood, S. A., Shahzad, F., Gloaguen, R. (2008), Monitoring landscape response to tectonic forcings in Central Badakhshan-Hindukush-Pamir region using remote sensing data, USEReST, Second Workshop, pp. 1-6.
- Mumipour, M., Tahmasbi-Nejad, H. (2011), Tectonics Geomorphology Setting of Khayiz Anticline derived from GIS processing, Zagros Mountains, Iran, Asian Journal of Earth Sciences, 4, pp. 171-182.
- Mumipour, M. (2012), Active Tectonics Influence on drainage networks in Dinarkooh Region, Zagros Mountains Range, Iran, Geogr. Fis. Dinam. Quat, 35, pp. 61-68.

- 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, pp.74–87.
- Peulvast, J.P. (1991), Structural geomorphology and morphotectonic evolution of an uplifted rifted margin: the Scoresby Sund area, East Greenland, *Z.Geomorph Suppl Bd*, 82, pp.17-34.
- Poag, C.W., Sevon, W.D. (1989), Record of Appalachian denudation in post rift Mesozoic and Cenozoic sedimentary deposits of the U.S.middle Atlantic continental margin, *Geomorphology*, pp.119-157.
- Ramirez-Herrera, M.T. (1998), Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambag graben, Mexican volcanic belt, *Earth Surface processes and landforms*, 23, pp.317-322.
- Shahzad, F., Mahmood, S.A., Gloaguen, R. (2009), Drainage Network and Lineament Analysis: An Approach for Potwar Plateau (Northern Pakistan), *Journal of Mountain Science*, 6, pp.14–24.
- Shahzad,F.,Mahmood,S.A.,Gloaguen,R. (2009), Drainage network and seismological analysis of active tectonics in Nanga Parbat Haramosh massif, Pakistan, *IGARSS, 2009 Conference*,pp.9-12.
- Shahzad,F., Gloaguen,R. (2011), TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part2: Surface dynamics and basin analysis, *Computers & Geosciences*, 37, pp.261-271.
- Wobus, C., Whipple, K.X., Kirby, E., Snyder, N., Johnson, J., Spyropolou, K. B., Crosby, B.T., Sheehan, D. (2006), Tectonics from Topography: Procedures, Promise and Pitfalls, in Willett SD, Hovius N, Brandon MT and Fisher DM (eds.), *Tectonics, Climate and Landscape Evolution*, GSA Special Paper, 398,pp.55-74.