

ارزیابی زمین‌ساخت حوضه‌های آبریز با استفاده از اختصاصات ژئومورفولوژیک در قالب الگوی TecDEM (مورد مطالعه: حوضه آبریز رودک در شمال شرق تهران)

ابوالقاسم گورابی* - استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران
فاطمه کیارستمی - کارشناس ارشد مخاطرات طبیعی، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۳ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۳/۱۶

چکیده

شناخت نواحی زمین‌ساختی فعال، به‌ویژه در زون‌های ساختاری همگرا به‌سبب قابلیت مخاطره‌آمیز بودن شایان توجه آنها اهمیت زیادی دارد. از سوی دیگر، به‌دلیل محدودیت‌های فیزیکی، بررسی‌های میدانی در این نواحی با توپوگرافی خشن و متعارض، دشوار است. در این پژوهش، با استفاده از روش‌های دورسنجی، ژئومورفومتری و کارهای میدانی، اختصاصات مورفومتری و ژئومورفولوژیک حوضه رودک در شمال شرق تهران در قالب الگوی TecDEM که در نرم‌افزار متلب^۱ اجرا شده، از داده‌های رقومی (الگوی رقومی ارتفاع) استخراج و تجزیه و تحلیل شده است. در این الگو، از شاخص‌های نو مانند چولگی و کشیدگی نمودار هیپسومتری، شاخص فرورفتگی θ ، شیب S و نقشه همپایه IsoBase MAP بهره گرفته شده است. نتایج بررسی و تجزیه و تحلیل عناصر ساختاری مورفوتکتونیک استخراج شده مانند نیمرخ طولی رودخانه، جهت‌های جریان، مورفولوژی حوضه آبریز، نقطه‌های عطف و تغییر شیب، منحنی‌های هیپسومتری و مقدار کشیدگی و چولگی آن که حاصل کنش و واکنش نیروی‌های زمین‌ساختی است، بیان‌کننده تغییرات مورفوتکتونیک فعال حوضه و کنونی آن است. نتایج بررسی‌ها در قالب الگوی TecDEM، پژوهش‌های میدانی و شواهد به‌دست‌آمده از طریق داده‌های ایستگاه ژئودینامیک گرمابدر، درستی الگو را در نشان دادن شرایط نئوتکتونیک مناطق نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: الگوی TecDEM، تکتونیک ژئومورفولوژی، تکتونیک فعال، حوضه رودک، مورفوتکتونیک.

مقدمه

نواحی بسیاری در سطح کره زمین وجود دارد که به‌دلیل محدودیت‌های موجود، نمی‌توانیم تکتونیک فعال و ژئومورفولوژی آنها را بشناسیم. از سوی دیگر، پیشرفت‌های صورت‌گرفته در زمینه دورسنجی و ژئومتری سبب شده است که علاوه بر کارهای میدانی برای بررسی تکتونیک فعال مناطق مختلف، بتوانیم از تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های رقومی به‌ویژه الگوی رقومی ارتفاعی (DEM) برای تحلیل مقدار فعالیت نوزمین‌ساختی مناطق، استفاده زیادی کنیم. از این رهگذر، بررسی‌های زیادی در زمینه تأثیرپذیری شبکه آبراه‌ها از فرایندهای تکتونیک نواحی شده است. فعالیت‌های

* E- mail: goorabi@ut.ac.ir

تکتونیک، شبکه رودخانه‌ها را بی‌نظم می‌کند. بررسی طبیعت این بی‌نظمی، منشأ درک ارتباط با بزرگی و جهت فعالیت‌های تکتونیک مناطق است؛ زیرا الگوی توسعه و تکامل شبکه‌های زهکشی، از جمله شاخص‌هایی است که به تغییرات حاصل از فعالیت‌های زمین‌ساختی بسیار حساس است (کلر و پینتر، ۱۹۹۶: ۱). پژوهش‌های انجام‌گرفته در سال‌های اخیر، حاکی از تأثیر فعالیت‌های نوزمین‌ساختی در شکل‌گیری سامانه‌های رودخانه است (ویرانت، ۲۰۰۳: ۱۵).

امروزه، پژوهشگران از الگوریتم‌های مختلفی در قالب الحاقیه‌ها برای اجرا در نرم‌افزارهای مختلف به‌منظور تجزیه و تحلیل فعالیت‌های تکتونیک استفاده می‌کنند؛ یکی از آنها که به‌تازگی برای تحلیل‌های ژئومورفیک استفاده شده، الحاقیه TecDEM است (گلوئن و شهزاد، ۲۰۱۱: ۲۱۵). در این الحاقیه در گام نخست، به‌منظور تهیه سامانه واحدی برای اجرای روش‌های بیشتری از تحلیل‌های تکتونیک، توجه و تلاش زیادی شده است. الحاقیه TecDEM بر پایه نرم‌افزار متلب، در جهت فهم فعالیت‌های تکتونیک مناطق، از الگوی ارتفاع رقمی DEM استفاده می‌کند. از قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به ایجاد نیم‌رخ طولی رودخانه، محاسبه جهت‌های جریان، استخراج حوضه‌های آبریز، تعیین نقطه‌های تغییر شیب، تهیه نقشه‌های همپایه و محاسبه شاخص‌های تکتونیک اشاره کرد.

در اغلب پژوهش‌ها و بررسی‌های فعالیت‌های نوزمین‌ساختی و تکتونیک از شاخص‌های تکتونیک ژئومورفولوژی استفاده شده است. تقابل بدون توقف بین فرایندهای تکتونیک که متمایل به ایجاد توپوگرافی است، با فرایندهای سطحی که تمایل به از بین بردن آنها دارد، هسته اصلی تکتونیک ژئومورفولوژی را تشکیل می‌دهد (بوربانک و اندرسون، ۲۰۱۱: ۲۰۱). ارزیابی ساختمان‌ها و لندفرم‌های زمین در طول تاریخ پیدایش آنها، موضوع دانش تکتونیک ژئومورفولوژی است (استنلی، ۲۰۰۰: ۳۲). تحلیل‌های مورفومتریک با استفاده از این شاخص‌ها به‌مثابه ابزارهای پایه برای شناخت تغییرات سریع تکتونیک یا تخمین تغییرات نسبی تکتونیک فعال در منطقه‌ای خاص توسعه داده شده است (وریوس و زیگوری، ۲۰۰۴: ۱۷۰). این شاخص‌ها رابطه بین تکتونیک و عوارض سطحی را به‌خوبی نشان می‌دهد و با آگاهی از این ارتباط می‌توان حوادث تکتونیک را از راه بررسی شکل‌ها و ناهمواری‌های سطح زمین تفسیر کرد (موریساوا و هاک، ۱۹۸۵: ۲۰۰). از مهم‌ترین ویژگی‌ها و محاسن این شاخص‌ها، به سادگی نسبی در روش محاسبه، سرعت عمل زیاد در به‌کارگیری آنها برای بررسی مقدار فعالیت تکتونیک مناطق مختلف، ارزیابی فعالیت تکتونیک مناطق در زمان کوتاه، آسان‌تر کردن مقایسه منطقی و معقول لندفرم‌ها در پژوهش‌های ژئومورفولوژی، تعیین مقدار لغزش به‌ویژه مقدار فرایش بر روی مناطق مورد بررسی و به‌کمینه رساندن سلیقه‌ها و نظرهای شخصی در پژوهش‌ها می‌توان اشاره کرد (حبیب‌اللهیان و رامشت، ۱۳۹۱: ۱۰۰).

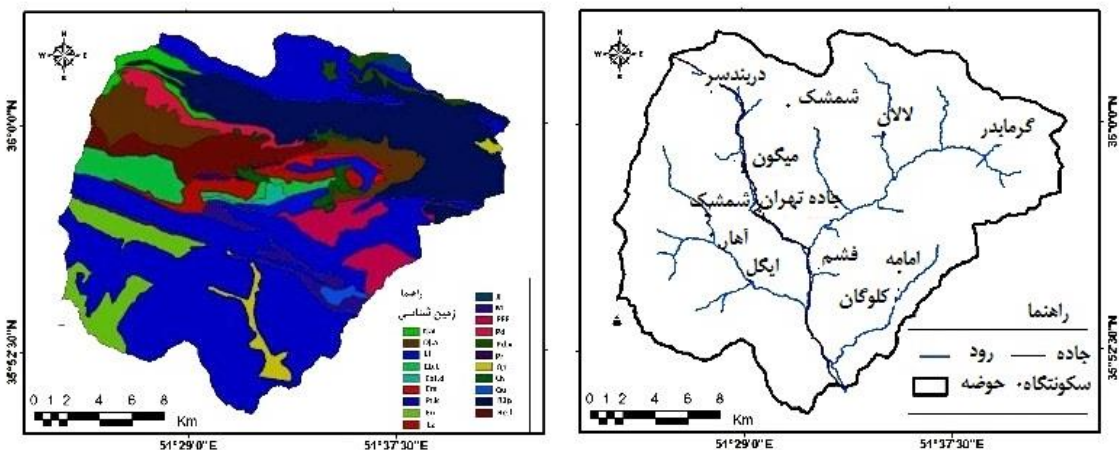
عمده بررسی‌های صورت‌گرفته برای سنجش مقدار فعالیت تکتونیک با استفاده از شاخص‌های تکتونیک ژئومورفولوژی در ایران، بیان‌کننده حاکمیت فرایندهای تکتونیک و تأثیرشان بر لندفرم‌ها و زمین‌شکل‌های مناطق مختلف است. استفاده از شاخص‌های تکتونیک، برای بررسی تکتونیک فعال ناحیه سروستان در زاگرس مرکزی، بیان‌کننده وجود پهنه‌های بسیار فعال منطقه است که عامل اصلی کنترل‌کننده توسعه و تکامل لندفرم‌هاست (ده‌بزرگی و همکاران، ۲۰۱۰: ۱). بررسی مقدار فعالیت تکتونیک دامنه‌های شمال غربی تالش (باغ‌وداغ) با استفاده از شاخص‌های سینوسیته جبهه کوهستان، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع و گرادیان شیب رودخانه، بیان‌کننده وجود نیروهای تکتونیک

در منطقه، به‌ویژه در بخش‌های جنوب شرقی است (مددی و مقدم، ۱۳۸۳: ۱۲۳). در تغییر و تحول مخروطافکنه جاجرود، افزون بر تأثیر فعالیت‌های اقلیمی و مداخله‌های انسانی، عامل تکتونیک نیز تأثیر بسزایی داشته است (مقصودی، ۱۳۸۷: ۷۳). از جمله موارد اثرگذاری تکتونیک بر شکل آبراهه‌ها، به رودخانه تجن در شمال کشور می‌توان اشاره کرد که به‌لحاظ طرح پیچان رودی، گذر از قطعات گسلی و برخی انفصال‌ها و انحراف‌ها در طول مسیر خود و ضرایب به‌دست‌آمده از شاخص‌های تکتونیک، ثابت شده است که در مرحله جوانی به‌سر می‌برد (مقصودی و کامرانی دلیر، ۱۳۸۷: ۳۷). تأثیر حرکات راستالغز راست بر در زاگرس شمال غربی بر کج‌شدگی حوضه آبریز چله واقع در ارتفاعات زاگرس به‌سمت راست، براساس شاخص عامل شکل حوضه به‌دست آمده است (یمانی و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۳).

در این پژوهش، هدف اصلی بررسی مقدار فعالیت نوزمین ساخت و تکتونیک در سطح حوضه آبریز رودک واقع در شمال شرق تهران، براساس محاسبات تحلیلی و گزارش‌های نهایی به‌دست‌آمده از پژوهش‌های میدانی و تحلیل‌های الگوی TecDEM است.

منطقه پژوهش

حوضه آبریز رودک با مساحت ۴۱۷/۵ کیلومترمربع از نظر تقسیمات زمین‌ساختی، جزء ایالت لرزه‌زمین‌ساختی البرز-آذربایجان است؛ ایالت لرزه‌زمین‌ساختی البرز-آذربایجان، پهنه‌ای زلزله‌خیز است که رشته‌کوه البرز، بخش شرقی این ایالت را در برمی‌گیرد (کره‌ای و کیانی، ۱۳۸۳: ۳۲). همچنین، محدوده حوضه آبریز رودک در ارتفاعات جنوبی البرز مرکزی قرار دارد و بخش اعظم این حوضه را توف‌های سبز ضخیم و شیل توف‌دار (سازند کرج) در بر گرفته است (شکل ۱). به‌لحاظ هیدرولوژیکی، این حوضه یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبریز جاجرود است که شاخه شرقی رودخانه جاجرود در آن جریان دارد؛ «این رود از ارتفاعات کلون بستک سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از دربندسر، شمشک، میگون و فشم با شاخه دیگری که از به‌هم پیوستن شاخه‌های فرعی آب نیکا، لالان و روته به‌وجود آمده، متصل گردیده و به‌نام جاجرود خوانده می‌شود. رود آهار از سمت جنوب و امامه از سمت شمال به آن متصل شده و رود به‌سمت مشرق جریان می‌یابد» (آراء و همکاران، ۱۳۹۱: ۴۲).



شکل ۱. محدوده حوضه آبریز رودک و زمین‌شناسی آن

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تکتونیک فعال در محدوده بررسی شده در این پژوهش، ابتدا با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ فشم، بلده، مرزن‌آباد و تهران که محدوده حوضه آبریز در آنها واقع شده است، به بررسی تعداد و نوع گسل‌های منطقه اقدام شد و با حضور در منطقه، آثار و شواهد تکتونیک فعال در سطح حوضه از جمله گسل خوردگی‌ها، جدایی قطعات سنگی بزرگ و کوچک از دامنه‌های پرشیب که احتمال خطر ریزش در منطقه را افزایش می‌دهد، تأثیر سنگ‌های شکسته بر الگوی آبراهه‌ها و نبوده‌های رسوبی بر روی برخی برجستگی‌ها مشاهده و بررسی شد. همچنین، تحلیل داده‌های ژئودینامیکی ایستگاه دایمی گرمابدر در حوضه رودک نیز بر مبنای داده‌های پنج‌ساله (۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰) استفاده شد. سپس با استفاده از تصویر ماهواره‌ای کارتوست با قدرت جداسازی ۲/۵ متر، محدوده تقریبی حوضه آبریز رودک و زیرحوضه‌های موجود در آن مشخص شد و در نهایت، با استفاده از الگوی ارتفاع رقومی DEM و نرم‌افزارهای ArcGis 10.0 و TecDEM 1.0 محدوده کلی حوضه رودک و سپس زیرحوضه‌های آن مشخص شد. به منظور بررسی فعالیت‌های تکتونیک در سطح منطقه، با استفاده از نرم‌افزار TecDEM، ابتدا می‌بایست نقشه DEM منطقه را به صورت Depression less درمی‌آوردیم؛ به این شکل که نقشه ارتفاعی منطقه باید خالی از هرگونه سطوح ناپیوستگی باشد. پس از آماده ساختن نقشه رقومی ارتفاع منطقه، به محاسبه شاخص‌ها و تحلیل وضعیت تکتونیک مطابق مراحل زیر اقدام شد.



شکل ۲. گسل خوردگی بر روی سنگ‌های مقاوم (سمت چپ) و سنگ‌های خردشده و گسل خورده بر روی دامنه همراه با سازه‌های محافظتی ژئوتکستال (سمت راست)

محاسبه جهت جریان به روش الگوریتم D8

برای هر الگوی ارتفاع رقومی، جهت جریان نشان‌دهنده حرکت سطحی آب به پیکسل‌های همسایه است. از الگوهای متداول برای تعیین جهت جریان، روش الگوریتم D8 یا جهت جریان منفرد SFD را می‌توان نام برد. در الحاقیه TecDEM بر پایه نرم‌افزار متلب از روش الگوریتم D8 برای محاسبه جهت جریان استفاده می‌شود؛ در این روش، مسیرهای جریان هر پیکسل که بر روی پیکسل پایین‌تر با شیب کمتر می‌ریزد، محاسبه و جهت‌های جریان تعیین

می‌شود. برای این منظور، ابتدا به تهیه یک نقشه ارتفاعی با کمترین ناهماهنگی نیاز است. این روش بر استخراج جریان‌های مرکزی روی دره‌ها و کاهش جریان‌های موازی تمرکز می‌کند.

استخراج آبراهه‌ها و زیرحوضه‌ها به روش استرال

استخراج شبکه آبراهه شامل دو گام اصلی است: ۱. شناسایی تمام آبراهه‌های بالادست؛ ۲. مشخص کردن ترتیب رده استرالی آبراهه‌ها. به این منظور، الحاقیه TecDEM از اطلاعات مربوط به جهت‌های جریان و سرچشمه‌ها بهره می‌گیرد. سرانجام آبراهه‌های استخراج شده توسط خود نرم‌افزار به صورت فایل‌های وکتور درمی‌آید. استخراج حوضه در نرم‌افزار TecDEM نیز این‌گونه است که حوضه‌های محدوده مورد بررسی براساس ترتیب رده‌های استرال رودخانه، استخراج می‌شود؛ این بخش از دو گام اساسی تشکیل شده است: ۱. ترسیم کد جریان واحدی برای هر پیکسل؛ ۲. تعیین کد شناسه واحدی برای تمام پیکسل‌های بالای یک آستانه مورد نیاز.



شکل ۳. تصویر ساده‌ای از رده‌بندی رده‌های آبراهه (چپ) و مساحت (راست) به روش استرال در نرم‌افزار TecDEM، در زیرحوضه آهار.

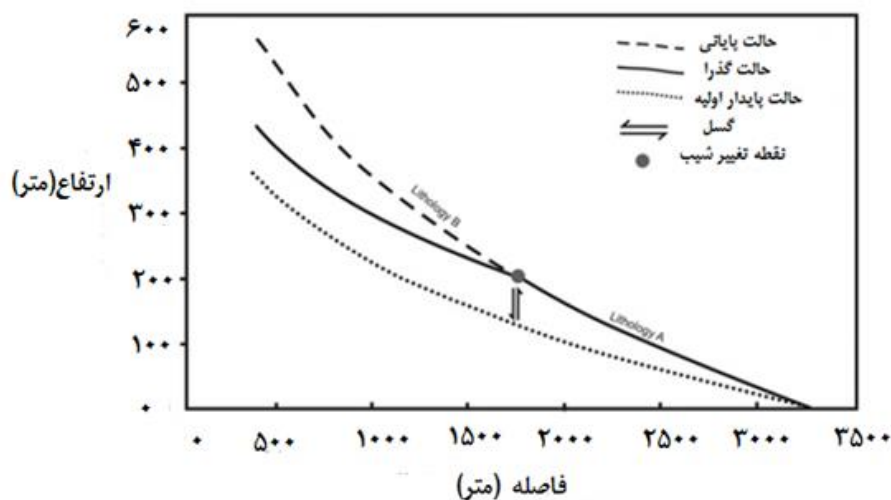
(A) آبراهه و مساحت رده ۱؛ (B) آبراهه و مساحت رده ۲؛ (C) آبراهه و مساحت رده ۳؛ (D) آبراهه و مساحت رده ۴؛ (E) آبراهه و مساحت رده ۵؛ (F) آبراهه و مساحت رده ۶؛ (G) آبراهه و مساحت رده ۷.

پس از مشخص کردن آبراهه‌ها و رده‌بندی آنها و استخراج حوضه‌های آبریز محدوده، عملیات تجزیه و تحلیل آغاز می‌شود که به ترتیب زیر است.

تعیین عطف نقطه‌های شیب و محاسبه شاخص‌های شیب و فرورفتگی

تعیین نقطه‌های شیب، ابزار قدرتمندی برای درک کنش و واکنش لندفرم‌ها به کاهش سطح پایه و جریان رسوب‌های

مربوط به حوضه‌های آبریز است. تجزیه و تحلیل فرورفتگی و شیب از شاخص‌های قدرتمند برای بررسی نوزمین‌ساخت به‌وسیله تجزیه و تحلیل جریان‌های رودخانه‌ای است که از مناطق فعال تکتونیکی می‌گذرند. مقادیر فرورفتگی θ و شیب K_s به مورفولوژی حوضه، نوع سنگ بستر و ویژگی‌های هیدرولیکی آن بستگی دارد. در نرم‌افزار TecDEM پس از تعیین نقطه‌های تغییر شیب در آبراهه، مقدار فرورفتگی و شیب با استفاده از تحلیل‌های مربوط به شیب آبراهه محاسبه می‌شود. مقادیر زیاد فرورفتگی و مقادیر اندک شیب بیان‌کننده وجود زمین‌های بالغ تا پیر و برعکس، مقادیر اندک فرورفتگی و زیاد شیب بیان‌کننده زمین‌های جوان با مقدار فرایش زیاد و فعال تکتونیکی است. این دو شاخص، سه مرحله را در رابطه با مورفولوژی آبراهه‌ها نشان می‌دهد: الف) حالت پایدار و ثابت اولیه؛ ب) حالت گذرا؛ ج) حالت نهایی. در شکل ۵، این مراحل بر روی آبراهه‌ای فرضی نشان داده شده است (گلوئن و شهزاد، ۲۰۱۱: ۲۶۵).



شکل ۴. همان‌گونه که از شکل پیداست، مقادیر فرورفتگی θ در نیمرخ‌های اولیه و نهایی، به‌طور تقریبی ثابت است؛ اما مقادیر شیب K_s در نیمرخ نهایی بیشتر می‌شود؛ زیرا با گذشت زمان، مقدار فعالیت تکتونیکی افزایش می‌یابد تا در نهایت، بار دیگر آبراهه به حالت پایداری اولیه خود می‌رسد (گلوئن و شهزاد، ۲۰۱۱: ۲۶۵).

محاسبه شاخص گرادیان شیب رودخانه

این شاخص با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود (همدونی، ۲۰۰۸: ۱۳):

$$sl = \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (1)$$

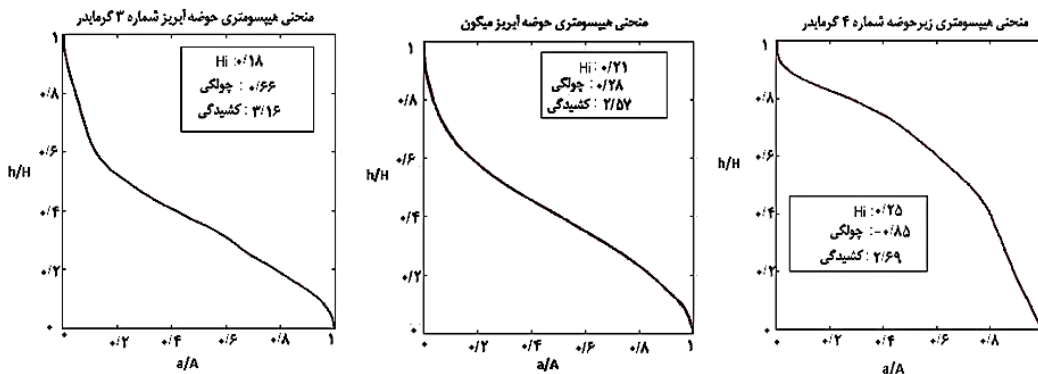
در این رابطه، H ارتفاع و L طول رودخانه است. محاسبه شاخص گرادیان شیب رودخانه آسان است؛ در وهله اول باید جریان مورد نظر را به فاصله‌های مشخص و متوالی تقسیم کرد. تفاوت ارتفاعی و مسافتی بین دو محدوده متوالی و فاصله بین مرکز محدوده برای محاسبه این شاخص استفاده می‌شود. تغییرات مقدار این شاخص با تغییرات سنگ‌شناسی و وجود گسل‌های جوان ارتباط دارد. افزایش مقادیر این شاخص بیان‌کننده افزایش فعالیت تکتونیکی در منطقه است (همدونی، ۲۰۰۸: ۱۳).

نقشه‌های همپایه

شبکه‌های آبراهه‌ای استخراج شده در نرم افزار TecDEM، با شاخص استرالر رده‌بندی می‌شود. در روش استرالر، تغییر در رده آبراهه‌ها با توپوگرافی رابطه‌ای قوی دارد. رودخانه‌های دارای رده استرالری یکسان از رخدادهای زمین‌شناسی برابر و در نتیجه، سن یکسانی برخوردارند. توزیع مکانی رودها، طول کلی و انحراف موجود در آنها نماینده قوی‌ای برای بررسی زمین‌شناسی زیرین است. دینامیک رده‌های استرالری رودخانه و تفاوت‌های توپوگرافی را به وسیله نقشه‌های همپایه می‌توان بررسی کرد. نقشه‌های همپایه، سطوح فرسایشی را نشان می‌دهد که در نتیجه رخدادهای تکتونیکی یا رخدادهای فرسایشی شکل گرفته است. در این پژوهش‌ها، نقشه‌های همپایه از راه درونی‌یابی ارتفاعات در رده‌های دوم و سوم استرالر آماده می‌شود. تغییرات سریع در نقشه‌های همپایه، مکان احتمالی گسل‌ها یا تضادهای زمین‌شناسی را نشان می‌دهد (گلوئن و شهزاد، ۲۰۱۱: ۲۶۲).

شاخص منحنی هیپسومتری

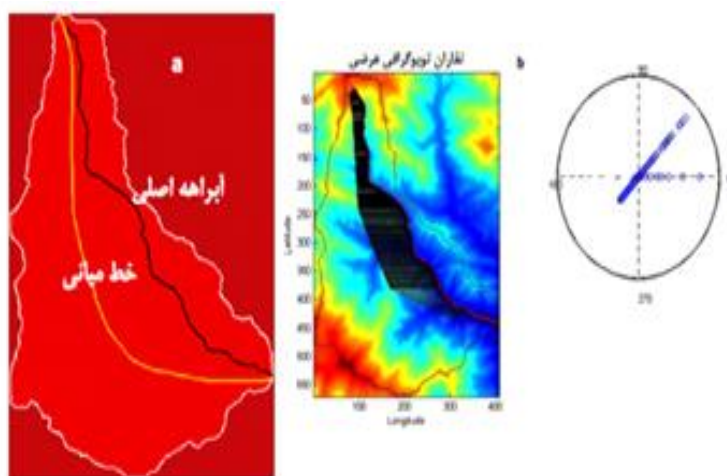
منحنی هیپسومتری از نسبت مساحت نسبی به ارتفاع نسبی حوضه به دست می‌آید؛ این گونه که برای به دست آوردن مساحت نسبی از رابطه $\frac{a}{A}$ استفاده می‌شود که a مساحت جزئی از هر سطح ارتفاعی و A مساحت کل حوضه است. برای به دست آوردن ارتفاع نسبی نیز از رابطه $\frac{\Delta e}{\Delta E}$ استفاده می‌شود؛ در این رابطه، Δe اختلاف ارتفاع مقدار ارتفاعی هر طبقه با کمترین ارتفاع حوضه و ΔE اختلاف ارتفاع کل سطح حوضه است. از جمله کاربردهای فراوان منحنی‌های هیپسومتری، نشان دادن مرحله پیشرفت چشم‌اندازها از جوانی به بلوغ و در نهایت، پیری است. حوضه‌های جوان دارای نیمرخ‌های محدب و حوضه‌های بالغ تا پیر دارای نیمرخ‌های مقعر و فرورفته است (جباری و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۰). نرم افزار TecDEM به صورت خودکار و با توجه به نقشه رقومی ارتفاعی DEM، برای هر منطقه منحنی هیپسومتری ترسیم کرده، مقادیر انتگرال هیپسومتری، چولگی و کشیدگی منحنی را محاسبه می‌کند (گلوئن و شهزاد، ۲۰۱۱: ۲۴۰).



شکل ۵. منحنی هیپسومتری بیان‌کننده شرایط فرسایش یا تکتونیکی حاکم بر حوضه‌ها. از چپ به راست: جوان، بالغ و پیر

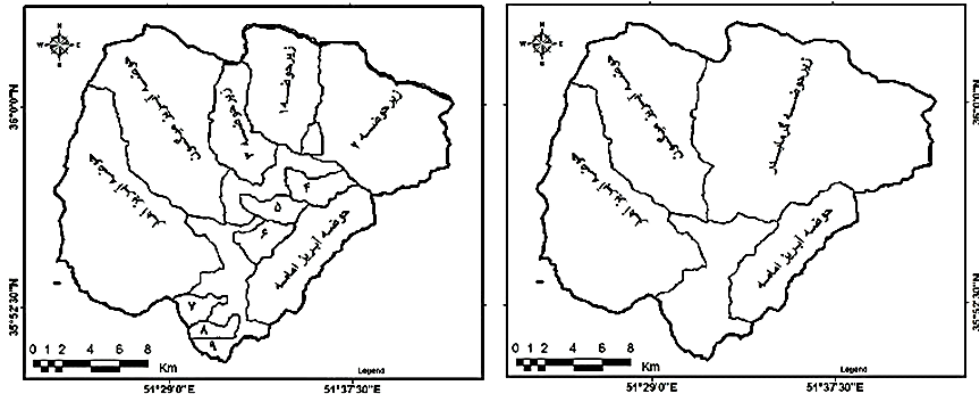
شاخص تقارن توپوگرافی عرضی

شاخص دیگری که در تحلیل‌های TecDEM استفاده می‌شود، شاخص تقارن توپوگرافی عرضی است که کوکس (۱۹۹۴) به منظور بررسی جابه‌جایی آبراهه‌ها در حوضه‌های آبریز پیشنهاد داد. این شاخص، سنجش و ارزیابی سریع مقدار کج‌شدگی حوضه‌ها بر اثر فعالیت‌های زمین‌ساخت را میسر می‌کند. این کج‌شدگی با استفاده از سه شاخص خط مرکزی حوضه، فاصله آن نسبت به خط تقسیم آب و رودخانه اصلی و فاصله آن نسبت به خط مرز حوضه محاسبه می‌شود. برای تعیین خط مرکزی حوضه‌های آبریز، روش‌های مختلفی وجود دارد؛ مانند روش انحنا فاصله، مورفولوژی ریاضی و پلی‌گون‌تی‌سف. در نرم‌افزار اخیر از روش انحنا فاصله برای محاسبه خط مرکزی حوضه استفاده می‌شود. در این روش، تمام پیکسل‌های مرز حوضه یک‌به‌یک و فاصله اقلیدسی آنها تا پیکسل‌های دیگر محاسبه می‌شود. توزیع فضایی بیشترین انحنا، مکان احتمالی خط میانی حوضه را نشان می‌دهد. در نرم‌افزار TecDEM رابط کاربر گرافیکی، خط میانی حوضه و آبراهه اصلی را مشخص می‌کند. شاخص T دارای برداری با جهت‌گیری صفر تا یک است؛ در حوضه‌های متقارن، این شاخص برابر صفر است و هرچه شکل حوضه آبریز به سمت عدم تقارن پیش رود، به یک نزدیک می‌شود. همچنین، می‌توان با توجه به محاسبات انجام‌گرفته در این نرم‌افزار، جهت کج‌شدگی حوضه‌ها را نیز به‌دست آورده، بررسی کرد (گلوئن و شهزاد، ۲۰۱۱: ۲۶۴).



شکل ۶. محاسبه شاخص تقارن توپوگرافی عرضی در نرم‌افزار TecDEM (حوضه آبریز آهار)

به منظور تحلیل مقدار فعالیت تکتونیکی حوضه آبریز رودک، ابتدا مرز زیرحوضه‌های اصلی به وسیله نرم‌افزار ArcGIS 10.0 مشخص شد و سپس با استفاده از نرم‌افزار TecDEM بر پایه نرم‌افزاری متلب، نقشه ارتفاع رقومی هر زیرحوضه به نرم‌افزار انتقال داده شد و بار دیگر، زیرحوضه‌ها برای هر قسمت به وسیله نرم‌افزار بر پایه رده استرالی هر زیرحوضه مشخص شد. حوضه‌های میگون، امامه و آهار به صورت زیرحوضه مستقلی درآمد؛ در حالی که از زیرحوضه گرمابدر، شش زیرحوضه استخراج و با شماره‌گذاری مشخص شد. در قسمت انتهایی حوضه نیز سه زیرحوضه کوچک با نام‌های زیرحوضه‌های ۸، ۷ و ۹ استخراج و نامگذاری شد. سپس محاسبات مربوط به مقدار فعالیت نوزمین‌ساختی در هر حوضه به وسیله الگوریتم TecDEM انجام گرفت.



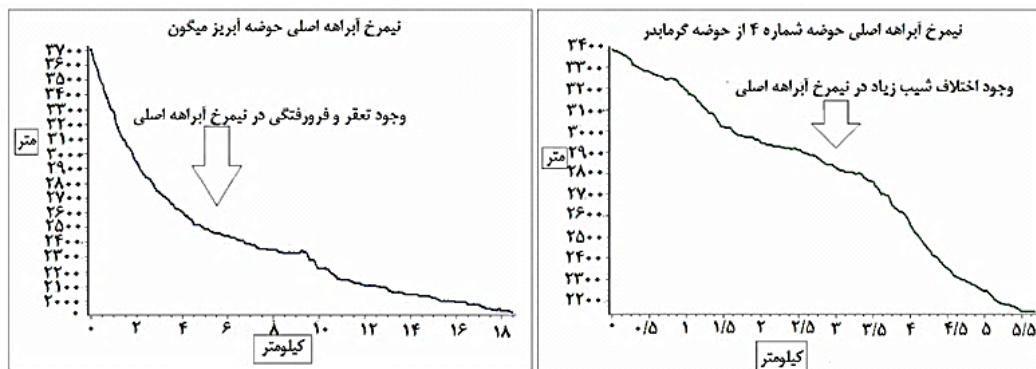
شکل ۷. سمت چپ زیرحوضه‌های اصلی و سمت راست زیرحوضه‌های استخراج شده به وسیله الگوی TecDEM

نیمرخ طولی آبراهه‌های اصلی هر زیرحوضه

گام نخست برای انجام دادن محاسبات مربوط به نرم‌افزار TecDEM ترسیم نیمرخ طولی رودخانه‌هاست تا شاخص‌های ضروری تحلیل از جمله شاخص‌های فرورفتگی، شیب و گرادیان شیب رودخانه محاسبه شود؛ حتی شکل ظاهری نیمرخ آبراهه‌ها هم ممکن است اطلاعات اولیه درباره مقدار فعالیت تکتونیکی مناطق در اختیار ما قرار دهد (گلوئن و شهزاد، ۲۰۱۱: ۲۵۴). برای مثال، نیمرخ طولی رودخانه اصلی زیرحوضه ۴ از حوضه آبریز گرمابدر دارای بیشترین اختلاف شیب است. اختلاف شیب، احتمال وجود تکتونیک فعال در منطقه را افزایش می‌دهد و نیمرخ رودخانه اصلی حوضه آبریز میگون نیز بیان‌کننده وجود تقعر و فرورفتگی بیشتر نسبت به دیگر آبراهه‌هاست که حاکمیت شرایط فرسایشی بیشتر در سطح حوضه را نشان می‌دهد (شکل ۸).

شاخص‌های فرورفتگی و شیب حوضه

براساس ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی نیمرخ آبراهه‌های هر یک از زیرحوضه‌های موجود در حوضه آبریز رودک، مقادیر فرورفتگی و شیب به وسیله نرم‌افزار تحلیلی TecDEM محاسبه شد (جدول ۱). با توجه به جدول ۱، کمترین مقدار فرورفتگی مربوط به زیرحوضه ۴ با $-۰/۴۱$ و بیشترین مقدار شیب نیز مربوط به همان زیرحوضه با $۳۸۷/۱۷$ است. این شواهد مطابق آنچه گفته شد، ممکن است بیان‌کننده وجود فعالیت تکتونیکی بیشتر، نسبت به دیگر زیرحوضه‌ها در این محدوده باشد. بیشترین مقدار فرورفتگی و تقعر نیز مربوط به زیرحوضه میگون با $۰/۸۶$ است.



شکل ۸. تفاوت نیمرخ آبراهه‌های اصلی زیرحوضه ۴ حوضه آبریز گرمابدر و حوضه آبریز میگون

جدول ۱. مقادیر شاخص های فرورفتگی و شیب زیرحوضه ها

زیرحوضه ها															
زیرحوضه های انتهایی			زیرحوضه های گرمابدر									حوضه میگون	حوضه امامه	حوضه آهار	
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱							
-۰/۲۴	-۰/۴۰	-۰/۰۹	-۰/۰۲	-۰/۲۰	-۰/۴۱	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۳۲	-۰/۰۸	۰/۲۳	۰/۲۳	کمترین مقدار فرورفتگی		
-۰/۱۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۰۶	۰/۰۵	-۰/۲۱	۰/۴۳	۰/۲۶	۰/۶۹	۰/۸۶	۰/۳۰	۰/۳۵	۰/۳۵	بیشترین مقدار فرورفتگی		
۸۴/۳۹	۷۳/۳	۱۱۶/۸	۹۷/۱۵	۹۲/۲۹	۷۳/۱۴	۱۰۱/۶۳	۱۳۸/۳۹	۲۱۶/۸۸	۱۹۷/۳۲	۲۲۷/۷۱	۱۹۵/۵	۱۹۵/۵	کمترین مقدار شیب		
۱۷۱/۶۹	۱۸۶/۴۳	۲۳۱/۳۹	۱۳۹/۸۹	۲۴۱/۶۸	۳۸۷/۱۷	۲۷۱/۲۹	۲۲۱/۰۵	۳۱۹/۰۸	۲۷۹/۲۸	۲۴۰/۸	۲۳۶/۳	۲۳۶/۳	بیشترین مقدار شیب		

جدول ۲. مقادیر شاخص گرادیان شیب رودخانه زیرحوضه ها

زیرحوضه ها															
زیرحوضه های انتهایی			زیرحوضه های گرمابدر									حوضه میگون	حوضه امامه	حوضه آهار	
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱							
۳۴۳/۳۲	۴۱۲/۹۳	۵۲۸/۵۱	۴۷۵/۷۸	۵۰۰/۴۸	۷۴۰/۳۹	۵۷۰/۲۱	۳۹۰/۱۶	۵۵۰/۲۸	۴۷۰/۷۸	۶۹۰/۲۲	۳۹۹/۸	۳۹۹/۸	شاخص گرادیان شیب رودخانه		

شاخص گرادیان شیب رودخانه

این شاخص در نرم‌افزار TecDEM برای تمام آبراهه‌های اصلی دوازده زیرحوضه موجود در منطقه محاسبه شد. برای محاسبه این شاخص، فاصله‌های پانصدمتری در تمام زیرحوضه‌ها انتخاب شد. متوسط هر شاخص برای هر آبراهه، در جدول ۲ آورده شده است. مطابق مقادیر به دست آمده، بیشترین مقدار شاخص برابر با $714/39$ برای زیرحوضه ۴ و کمترین مقدار نیز برابر با $390/6$ متعلق به زیرحوضه ۲ است. متوسط این شاخص برای کل حوضه، برابر با $506/10$ و بیان‌کننده مقدار فعالیت تکتونیکی زیاد در سطح حوضه است.

شاخص تقارن توپوگرافی عرضی

مطابق با مقادیر به دست آمده، بیشترین مقدار این شاخص متعلق به زیرحوضه ۱ و ۳ برابر با $0/67$ و کمترین مقدار این شاخص نیز متعلق به زیرحوضه ۴ و برابر با $0/15$ است. متوسط شاخص تقارن توپوگرافی عرضی برای کل سطح حوضه نیز برابر با $0/36$ به دست آمد که بیشتر از صفر است و بیان‌کننده عدم تقارن در سطح حوضه رودک در جهت شمال غربی - جنوب شرقی است.

جدول ۳. مقادیر شاخص تقارن توپوگرافی عرضی زیرحوضه‌ها

زیرحوضه‌ها												شاخص تقارن توپوگرافی عرضی	
زیرحوضه‌های گرمابدر									حوضه امامه		حوضه آهار		
زیرحوضه‌های انتهایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	میگون	۰/۳۵	۰/۲۰	۰/۲۲
	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۶۷	۰/۲۹	۰/۶۷	۰/۳۵	۰/۲۰	۰/۲۲	
جهت کج‌شدگی	NW-SE	NW-SE	NW-SE	NW-SE	NW-SE	NW-SE	NW-SE	NE-SW	NW-SE	NW-SE	NE-SW	NW-SE	

منحنی هیپسومتری

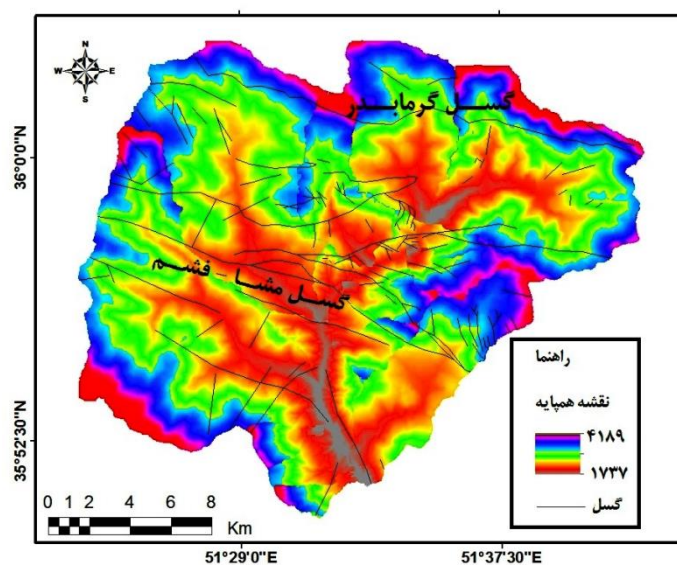
با توجه به منحنی هیپسومتری حوضه‌های بررسی شده، زیرحوضه ۴ بیشترین حالت تحدب را دارد (چولگی $-0/85$) که بیان‌کننده فعالیت زیاد تکتونیکی در منطقه است؛ اما به صورت کلی، شاخص‌های محاسبه شده منحنی هیپسومتری تمام زیرحوضه، نشان‌دهنده حاکمیت شرایط تکتونیکی فعال و دوره جوانی در سطح حوضه است.

جدول ۴. مقادیر شاخص‌های منحنی هیپسومتری زیرحوضه‌ها

زیرحوضه‌ها												
حوضه آهار	حوضه امامه	حوضه میگون	زیرحوضه‌های گرمابدر									
			۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	
چولگی	۰/۴۸	۰/۵۰	۰/۲۱	۰/۲۹	۰/۲۴	۰/۶۶	-۰/۸۵	۰/۰۹	۰/۴۶	۰/۲۶	۰/۱۰	-۰/۱۱
کشیدگی	۲/۶۷	۲/۰۷	۲/۵۷	۲/۰۴	۲/۵۰	۳/۱۶	۲/۶۹	۲/۱۳	۲/۷۵	۲/۱۱	۱/۸۲	۲/۱۵
انترگرال هیپسومتری	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۲۰	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۲۵	۰/۰۹	۰/۱۶	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۲۱

نقشه‌های همپایه

در نقشه‌های همپایه سطح حوضه، تغییرات توپوگرافی با تغییرات رنگ نشان داده شده است که در بسیاری از موارد، با توجه به نقشه گسل‌های موجود در منطقه می‌توان گفت وجود گسل‌ها در سطح حوضه، یکی از عوامل مؤثر بر تغییرات ارتفاعی حوضه و اختلاف زیاد ارتفاع (۱۷۳۷-۴۱۸۹) در سطح آن است. این نقشه‌ها به‌تنهایی و بدون وجود نقشه سامانه‌های گسلی منطقه نیز اطلاعاتی را درباره تأثیر ایجاد گسل در منطقه به‌دست می‌دهد. تغییرات سریع در نقشه‌های همپایه، مکان احتمالی گسل‌ها یا تضادهای زمین‌شناسی را نشان می‌دهد که این امر در سطح حوضه رودک نیز دیده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در محل برخورد گسل‌ها، تغییرات سریع در سطح نقشه همپایه محدوده مشاهده می‌شود. این تغییرات در بیشتر موارد، منطبق بر خطوط گسلی منطقه است.

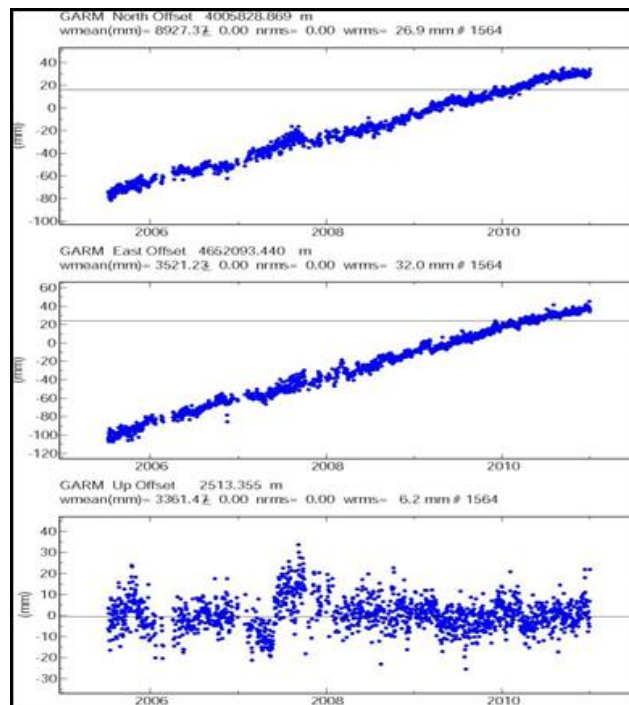


شکل ۹. نقشه همپایه منطقه

تجزیه و تحلیل داده‌های ژئودینامیک ایستگاه گرمابدر

سری‌های زمانی پاسخ‌های روزانه حرکات گسل‌های اصلی منطقه در ایستگاه گرمابدر، برای هر یک از سه مؤلفه مختصات E (مؤلفه شرقی-غربی)، N (مؤلفه شمالی-جنوبی) و مؤلفه H (ارتفاع) به دست آمد. هر نمودار سری زمانی دارای یک محور عمودی است که نشان‌دهنده مقدار جابه‌جایی برحسب میلی‌متر است و یک محور افقی که نشان‌دهنده زمان برحسب سال میلادی است. براساس محاسباتی که کارشناسان سازمان نقشه‌برداری کشور انجام دادند، سرعت تغییرات مؤلفه‌های یادشده نسبت به صفحه اوراسیا در ایستگاه گرمابدر، برای مؤلفه شمالی-جنوبی ۱۰/۸۶ و برای مؤلفه شرقی-غربی ۰/۶۱ میلی‌متر در سال است. با توجه به نمودار سری‌های زمانی می‌توان بیان داشت که حرکت مؤلفه شمالی-جنوبی در طول مدت پنج سال با سرعت و روند منظم و به صورت صعودی به سمت شمال و جهت حرکت مؤلفه شرقی-غربی با سرعت و روند منظم به سمت شرق بوده است. «جهت تغییرات در منطقه مورد مطالعه به صورت کلی، شمال شرقی است که دلیل عمده آن را می‌توان راندگی مورب پوسته اقیانوسی دریای خزر به زیر بخش شمالی کشور (البرز) دانست که نقش مهمی در تغییرات پوسته زمین و تحریک گسل‌های مهم منطقه داشته است.» (آراء و همکاران،

(۱۳۹۱: ۴۳)



شکل ۱۰. نمودار سری زمانی ایستگاه دائمی GPS شکل ۹ گرمابدر در حوضه بررسی شده. از بالا به پایین: مؤلفه شمالی-جنوبی، مؤلفه شرقی-غربی و مؤلفه ارتفاع (براساس داده‌های ژئودینامیکی سازمان نقشه‌برداری ایران)

نتیجه‌گیری

با توجه به مقادیر شاخص‌های به دست آمده و تحلیل‌های انجام گرفته به روش‌های میدانی و پژوهش‌های تحلیلی به کمک شاخص‌های تکتونیک ژئومورفولوژی و نقشه همپایه مقادیر به دست آمده از شاخص‌های فرورفتگی θ ، شیب K_s (جدول

۱)، شاخص گرادیان شیب رودخانه (جدول ۲)، شاخص تقارن توپوگرافی عرضی T (جدول ۳)، نقشه همپایه (شکل ۹)، منحنی هیپسومتری (شکل‌های ۲ تا ۸ و جدول ۴)، پژوهش‌های میدانی صورت گرفته در سطح ناحیه و شواهد تکتونیکی موجود در آن و تحلیل سری‌های زمانی داده‌های ژئودینامیکی ایستگاه گرمابدر، وجود تکتونیک فعال در سطح حوضه اثبات می‌شود. در این میان، زیرحوضه ۴ از حوضه گرمابدر، بیشترین فعالیت و حوضه میگون، کمترین فعالیت تکتونیکی را براساس شاخص‌های مبتنی بر مقدار تقعر، شیب و شاخص گرادیان شیب رودخانه دارد؛ در حالی که به لحاظ مقدار فعالیت تکتونیکی براساس شاخص تقارن توپوگرافی عرضی، زیرحوضه‌های ۱ و ۳ بیشترین کج‌شدگی را نشان می‌دهند. همچنین، نقشه همپایه منطقه تأثیر تکتونیک بر تغییرات توپوگرافی و در نتیجه، تغییر رده‌بندی آبراهه‌های حوضه را تأیید می‌کند. منحنی‌های هیپسومتری تمام زیرحوضه‌ها نیز وجود شرایط جوانی را در سطح حوضه آبریز رودک نشان می‌دهد و تأیید می‌کند که زیرحوضه ۴، بیشترین مقدار تحدب را دارد. با وجود اختلاف در مقادیر شاخص‌های بررسی شده، میانگین‌ها بیان‌کننده حاکمیت تکتونیک فعال در سطح این ناحیه و قرارگیری حوضه در شرایط جوانی است. تطابق پژوهش‌های میدانی انجام گرفته و مطالعات کتابخانه‌ای صورت گرفته درباره نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه و داده‌های ژئودینامیک حوضه با بررسی‌های انجام گرفته به وسیله TecDEM، نشان‌دهنده کاربرد مناسب این الگو در تحلیل‌های تکتونیکی مناطق است؛ به ویژه برای ناحیه‌هایی که شاید امکان پژوهش میدانی آنها میسر نیست.

منابع

- آراء، ه.، رامشت، م.، یمانی، م. و شایان، س. (۱۳۹۱). «تحلیل مدیریتی- رفتاری لندفرم‌های آشفته و نرمال حوضه آبریز جاجرود». جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. س ۲۳. ش ۲. ص ۳۵-۵۲.
- جباری، ن.، ثروتی، م. و حسین‌زاده، م. (۱۳۹۱). «مطالعه مورفوتکتونیک فعال حوضه آبریز حصارک (شمال غرب تهران) با استفاده از شاخص‌های مورفومتری». پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. س ۱. ش ۲. ص ۱۷-۳۴.
- حبیب‌اللهیان، م. و رامشت، م. (۱۳۹۱). «کاربرد شاخص‌های ارزیابی تکتونیک جنباً در برآورد وضعیت تکتونیک بخش علیای زاینده‌رود». جغرافیا و توسعه. س ۱۰. ش ۲۶. ص ۹۹-۱۱۲.
- مددی، ع.، رضایی‌مقدم، م. و رجایی، ع. (۱۳۸۳). «تحلیل فعالیت‌های تکتونیک با استفاده از روش‌های ژئومورفولوژی در دامنه‌های شمال غربی تالش (باغ‌وداغ)». پژوهش‌های جغرافیایی. س ۳۶. ش ۴۸. ص ۱۲۳-۱۳۸.
- کره‌ای، م. و کیانی، ط. (۱۳۸۳). «لرزه‌خیزی فلات ایران با نگرشی ویژه بر تهران». گزارشی از وزارت صنایع و معادن و سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. تهیه شده در پایگاه ملی داده‌های علوم زمین. ص ۱-۹۷.
- مقصودی، م. و کامرانی دلیر، ح. (۱۳۸۷). «ارزیابی نقش تکتونیک فعال در تنظیم کانال رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه تجن)». پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. س ۴۰. ش ۶۴. ص ۳۷-۵۵.
- مقصودی، م. (۱۳۸۷). «بررسی عوامل مؤثر در تحول ژئومورفولوژی مخروط‌افکنه‌ها (مطالعه موردی: مخروط‌افکنه جاجرود)». پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. سال ۳۷. ش ۶۵. ص ۷۳-۹۲.
- یمانی، م.، کامرانی، ح. و باقری، س. (۱۳۹۲). «مورفومتری و ارزیابی شاخص‌های ژئومورفیک برای تعیین میزان فعالیت نوزمین‌ساخت در حوضه آبریز چله (زاگرس شمال غربی)». فصلنامه تحقیقات جغرافیایی. س ۲۹. ش ۹۷. ص ۱-۲۶.
- Ara, H., Ramesht, M.h., Yamani, M. and Shayan, S. (2012). "Managerial Analysis- Land behavior disordered and normal forms catchment Jajrood". Geography and Environmental Planning. Vol. 23. No. 2. pp. 35-52. (In Persian).

- Burbank, D. and Anderson, R. (2011). *Tectonic Geomorphology*. Edit2. Blackwell Publishing.
- Cox, R. T. (1994). Analysis of drainage basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi embayment. *Bulletin of Geological Society of America* 106. pp. 571-581.
- Dehbozorgi, M., Pourkermani, M., Arian, M., Motamedi, H. and Hosesini, A. (2010). "Quantitative Analysis of Relative Tectonic Activity in the Sarvestan Area central Zagros". *Iran Geomorphology*. Vol. 13. No. 32. pp. 1-13. (In Persian).
- Gloauen, R. and Shahzad, F. (2011). "Tecdem, A Matlab Based Toolbox for Tectonic Geomorphology (Drainage Network Processing and Stream Profiles Analysis)". Remote Sensing Group, Institute of Geology Freiberg University of Mining & Technology, Computer and Geoscience. Vol. 20. No. 34. pp. 250-260.
- Gloauen, R., Shahzad, F. (2011). "Tecdem, A Matlab Based Toolbox for Tectonic Geomorphology (Surface Dynamics and Basin Analysis)". Remote Sensing Group, Institute of Geology Freiberg University of Mining & Technology, Computer and Geoscience. Vol. 20. No. 34. pp. 261-271.
- Habibolahiyani, M. and Ramesht, M. H. (2012). "The use of indices of active tectonics in the estimation of the upper tectonic Zayanderud". *Geography and Development*. Vol. 10. No. 26. pp. 99-112. (In Persian).
- Hamdouni, R. (2008). "Assessment of relative Active tectonic south border of Sierra Nevada". *Geomorphology*. Vol. 96. No. 32. pp. 1-13.
- Jabari, N., Servati, M., and Hossein-Zadeh, M., (2012). "Active Morphotectonic study catchment Hisarak Using morphometric parameters". *Quantitative Geomorphology Research*. Vol. 1. No. 2. pp. 17-34. (In Persian).
- Karei, M. and Kiani, T. (2004). "Seismicity plateau of Tehran with a particular approach to Tehran". A report from the Ministry of Industries and Mines and the Geological country. Provided in the national data base of Geosciences. pp. 1-97. (In Persian).
- Keller, E. A. and Pinter, N. (1996). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift and Land Escapes*. Prentice Hall Publication. London. pp. 136-145.
- Madadi, A., Rezaei-Moghadam, M. and Rajaei, A. (2004). "Neotectonic activity analysis using geomorphology at the foothills northwest of Talesh (Baghrodagh)". *Geographical research*. Vol. 36. No. 48. pp. 123-138. (In Persian).
- Maghsoodi, M. and Kamrani-Dalir, H. (2008). "Evaluation of active tectonics in the regulation of river channels Case Study: Tajan River". *Geographical research*. Vol. 40. No. 64. pp. 37-54. (In Persian).
- Maghsoodi, M. (2008). "Factors affecting the development of alluvial fans Geomorphology (Case study Jajrood Fans)". *Geographical research*. Vol. 37. No. 65. pp. 73-92. (In Persian).
- Morrisava, M. and Hack, J. (1985). *Tectonic Geomorphology*. Boston: Unwind Hyman Press.
- National Cartographic Survey. 2.5 meter resolution Kartosat satellite image.
- National Cartographic Survey. Specifications Garmabdar permanent Geodynamic station (2006-2010).
- Stanly, E. (2000). *Active Tectonic Alluvial River*. Cambridge University Press.
- State Geological Survey. 1:100000 Maps. Baladeh, MarzanAbad, Fasham, Tehran.
- Verrios, S. V., Zygari, S. and Kokkalas, (2004). "Morphotectonic Analysis in the Eliko Fault Zone (Gulf of Corinth, Greece)". *Bulletin of the Geological Society of Greece*. Vol. 36. No. 25. pp. 1706-1715.
- Virant, J. (2003). "Response of Active tectonics on the Alluvial Baghmati River Himalayan Foreland basin". *Eastern India*. No. 10. pp. 336-359.
- Yamani, M., Kamrani-Dalir, H. and Bagheri, S. (2013). "Morphometric and geomorphic assessment criteria for determining the amount of neotectonic activity in Cheleh Basin (northwestern Zagros)". *Journal of Geographical Research*. Vol. 29. No. 97. pp. 1-26. (In Persian).