پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال هشتم، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۸
صص. ۱۹۸-۱۷۹

تحلیل مورفوتکتونیکی حوضه‌های آبریز کوهستان کرکس روی سامانه گسلی قم – زفره

منصور جعفربگلو *– دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
ابراهیم مقیمی– استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
مجتبی یمانی– استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
سید محمد زمانزاده – دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران.
حمید کامرانی دلیر – دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۸ تائید نهایی: ۱۳۹۸/۰۲/۱۹

چکیده

محدوده موردمطالعه شامل حوضه‌های آبریز دامنه‌های کوهستان کرکس واقع در بخش میانی زون گسلی قم-زفره (QZFS) با روند NW-SE می‌باشد که اساساً این ناحیه به دلیل داشتن شرایط ناپایدار و تغییرات زیاد مورفوتکتونیکی برای مطالعه انتخاب گردیده است. شواهد مورفوتکتونیکی موجود حاکی از شدت فعالیت‌های نئوتکتونیکی در حوضه‌های آبریز واقع در دامنه‌های شرقی نسبت به حوضه‌های دامنه‌های غربی کوهستان کرکس می‌باشد. هدف از این پژوهش، ارزیابی تکتونیک فعال و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های ژئومورفیک در قالب برنامه الحاقی TecDEM2.0 و شواهد ژئومورفولوژیکی حوضه و تأثیر آن بر مورفومتری حوضه و شبکه آبراهه‌ای می‌باشد. از متغیرهای اصلی موردبررسی می‌توان به شاخص‌های انتگرال هیپسومتری(Hi)، تندی شیب نرمال(Ksn)، تقعر(θ)، شاخص هَک (SL)، عدم تقارن حوضه (شاخص T) و شاخص طبقه‌بندی نسبی فعالیت تکتونیکی IAT اشاره نمود. مؤلفه‌های موردبررسی در این تحقیق با استفاده از DEM ۱۲/۵ مترِ سنجنده PALSAR، استخراج و با استفاده از رتبه‌بندی آبراهه‌ای، علاوه بر شناسایی میزان فعالیت‌های تکتونیکی ناشی از گسل‌های اصلی هر حوضه، میزان نسبی بالاآمدگی تکتونیکی آن‌ها نیز محاسبه گردیده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، تفاوت در مقادیر شاخص‌های تقعر از ۰/۲تا ۰/۸۹ و مقادیر شاخص حداکثر تندی شیب از ۱۱۲/۱ تا ۱۹۲/۵۷ درصد در بین حوضه‌ها، همین‌طور نرخ‌های متفاوت بالاآمدگی تکتونیکی در حوضه‌های دامنه شرقی (معادل۲/۵mm/y) و در حوضه‌های دامنه غربی (معادل۰/۵۵ mm/y) کوهستان کرکس، دلالت بر وجود فعالیت‌های تکتونیکی غیر همسان در بخش‌های مختلف آن دارد. نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های ژئومورفیک و بررسی شواهد ژئومورفولوژیکی و بر اساس شاخص طبقه‌بندی IAT، کوهستان کرکس جزء مناطق فعال تکتونیکی به‌حساب می‌آید.

واژگان کلیدی: مورفوتکتونیک، زون گسلی قم-زفره، روش مورفومتری، برنامه الحاقی TecDEM2.0.

* نویسنده مسئول: E-mail: Mjbeglou@ut.ac.ir

مقدمه

از دیدگاه ژئومورفولوژی ساختمانی، گسل شاخص فعالیت تکتونیکی و تحول لندفرمی در سطح زمین می‌باشند. آثار و شواهد لندفرمی این تغییر و تحول در آنرمالی پدیده‌های ژئومورفیک، از دوره‌های گذشته (کواترنری) باقیمانده‌اند. با تجزیه‌وتحلیل مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs)، امکان کمّی سازی اثرات فرایندهای تکتونیکی بر روی لندفرمهای تحول‌یافته، فراهم می‌گردد. برنامه‌ریزی در محیط طبیعی بدون فهم مکانیسم‌های طبیعی امکان‌پذیر نیست. ازاین‌رو جهت شناخت ویژگی‌های محیط طبیعی به مطالعه ژئومورفولوژی ساختمانی و تکتونیک نیازمندیم. مطالعات ژئومورفولوژی تکتونیک[1]، ضمن معرفی عوامل شکل زایی فعال در منطقه، تشخیص نقاط پایدار و ناپایدار و بیان علل ناپایداری، تنگناهایی را که از مورفودینامیک ناحیه‌ای سرچشمه می‌گیرند و روند توسعه را به مخاطره می‌اندازد را آشکار نموده و رهنمودهای مناسبی برای پیشگیری از حوادث غیرمترقبه و آمایش سرزمین ارائه می‌نماید. درباره تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی در حوضه‌های آبریز متأثر از تغییرات سطح اساس تاکنون بررسی‌های زیادی انجام‌شده است. هرچند تغییرات سطح اساس برای بررسی حوضه‌های آبریز بسیار مهم‌اند، اما تمام اثرات تحرکات تکتونیکی را در سطح حوضه نشان نمی‌دهند. بنابراین پیشنهاد می‌گردد در مطالعات ژئومورفولوژیکی حوضه‌های آبریز به پارامترهای مورفوتکتونیکی زیر توجه شود (مقیمی، ۲۰۰۹:۱۲۷۰):

- مشخصات هندسی حوضه و سامانه‌های گسلی
- الگوی آبراهه‌ای و گسلی
- تبیین شبکه زهکشی و علل تغییرات آن

این پارامترها در این تحقیق در قالب ارزیابی شاخص‌های ژئومورفیک موردبررسی قرارگرفته‌اند. بنابراین مدل‌های فرایند سطحی و آبراهه‌ای می‌توانند اختلافات توزیع مکانی فرایندهای تکتونیکی را شناسایی و علل و منشأ شکل‌گیری آنان را بیان نمایند. امروزه به‌موازات استفاده از روش‌های مورفومتری و دور سنجی[2] مبتنی بر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاعی[3]، الگوریتم‌های متعددی جهت ارزیابی فعالیت‌های تکتونیکی در قالب برنامه‌هایی بر پایه نرم‌افزارهای علوم زمین ارائه گردیده که از آن جمله می‌توان به برنامه الحاقی TecDEM2.0 اشاره نمود (شهزاد و گلوگوئن،۲۰۱۱،۲۵۰). مسئله تحقیق این است که، با توجه به مؤلفه‌های حرکتی راستالغز راست‌گرد به همراه مؤلفه‌های قائم سامانه گسلی QZFS (عمیدی، ۳۱۷،۱۹۷۵) آیا دینامیک سطحی و دینامیک حوضه‌های آبریز منطقه به‌طور یکنواخت تحت تأثیر فرایندهای تکتونیکی این سامانه گسلی قرارگرفته است یا خیر؟ و تغییرات الگوی فرایندهای تکتونیکی تا چه حدی در الگوی فرایندهای هیدرو ژئومورفولوژی حوضه‌های آبریز تأثیرگذار بوده‌اند؟ به عبارتی، ارتباط متقابل میان فعالیت‌های تکتونیکی و فرایندهای ژئومورفولوژیکی چه ارتباطی با مورفولوژی حوضه‌های آبریز و سامانه‌های زهکشی دارد؟ ازاین‌رو، در این تحقیق سعی شده با استفاده از اصول اولیه تکتونیک ژئومورفولوژی، انطباق تغییرات مناظر سطحی زمین با تغییرات فرایندهای شکل‌دهنده آن‌ها بررسی و ارزیابی گردد تا بدین‌وسیله، مسائل موجود بر سر راه برنامه‌های عمرانی در منطقه تبیین گشته و چراغ راهی برای تصمیم گیران و برنامه ریزان محلی برای موضوعات آمایش سرزمین در آن مناطق باشد.

مبانی نظری

در رابطه با ادبیات تحقیق، مطالعات انجام‌شده توسط پژوهش‌گرانی چون جوردن (۲۰۰۵) ، وُبوس[4] (۲۰۰۶)، شهزاد و گلوگوئن[5] (۲۰۱۱) اطلاعات جامع و دقیقی فراهم نموده‌اند. جوردن و همکاران (۲۰۰۵) پدیده‌های مورفوتکتونیک منطقه

1 - Tectonic Geomorphology
2 - Remote Sensing
3 - Digital Elavation Model
۴ - Wobus
۵ - Shahzad & Gloaguen

موردمطالعه خود را (مجارستان و شمال غرب یونان) از مدل رقومی ارتفاع مربوطه استخراج و با استفاده از آن ویژگی‌های مورفوتکتونیکی منطقه مطالعاتی را به الگوریتم‌های عددی و ریاضی تبدیل کردند. شهزاد و گلوگوئن (۲۰۱۱) در دره کاقان[1] با استفاده از برنامه TecDEM و مدل رقومی ارتفاعی، به تحلیل فعالیت‌های تکتونیکی، تحلیل‌های کمّی آبراهه‌ها، محاسبه نیمرخ طولی، شاخص‌های تقعر و نرخ بالاآمدگی تکتونیکی اقدام نموده‌اند. مومی پور[2] (۲۰۱۲) با به کار بردن برنامه TecDEM و مدل رقومی ارتفاعی در منطقه مطالعاتی (کوه‌های زاگرس) و شاخص‌های ژئومورفیک نظیر سینوسیته جبهه کوهستان، انتگرال هیپسومتری، عدم تقارن حوضه زهکشی و گرادیان طولی رودخانه اقدام به ارزیابی فعالیت تکتونیکی و نرخ بالاآمدگی منطقه دینار کوه نموده است. این محقق، نرخ بالاآمدگی منطقه مطالعاتی را بین ۰/۶ تا ۳/۷ میلی‌متر در سال برآورد نموده است. گورابی و همکار (۱۳۹۴) در حوضه آبریز رودک واقع در شمال شرق تهران، با اجرای الگوی TecDEM و محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک در قالب آن برای حوضه آبریز رودک در شمال شرق تهران، تغییرات مقادیر چولگی، شاخص تقعر و گرادیان طولی رودخانه را بررسی و وجود نئوتکتونیک فعال را در منطقه اثبات نموده‌اند.

در خصوص ارزیابی فعالیت‌های تکتونیکی مناطق مختلف ایران، تحقیقات انجام‌گرفته، عمدتاً مبتنی بر به‌کارگیری شاخص‌های ژئومورفیک و حاکی از فعالیت تکتونیکی قابل‌توجه مناطق و اثر بارز آن بر لندفرم‌ها است. استفاده از شاخص‌های تکتونیکی نظیر سینوسیته جبهه کوهستان (Smf)، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن (Vf)، تقارن توپوگرافی (T)،گرادیان طولی رودخانه (SL) و انتگرال هیپسومتری (Hi) جهت بررسی تکتونیک فعال توسط پژوهش‌گرانی چون: ده بزرگی و همکاران (۲۰۱۰)، بیاتی خطیبی (۱۳۸۸)،کرمی (۱۳۸۸)، جباری (۱۳۹۱)، رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۲)، همتی و همکاران (۱۳۹۴)، روستایی و همکاران (۱۳۹۴)، مومنی و ده بزرگی (۱۳۹۴)، مقامی مقیم (۱۳۹۵)، ده بزرگی و مومنی طارمسری (۱۳۹۵)، صمدی مقدم و همکاران (۱۳۹۵) و شناسایی شواهد مورفوتکتونیکی مربوط به تکتونیک فعال توسط محمدنژاد آروق (۱۳۹۵) در بخش جنوبی کوهستان میشو داغ، بیانگر حاکمیت تکتونیک فعال و تأثیر آن بر زمین شکل‌های مناطق یادشده است. یمانی و همکاران، ۱۳۸۸ در پژوهشی در دامنه‌های کرکس، با استفاده از روش‌های ژئومورفولوژی، این‌طور نتیجه‌گیری کردند که دامنه‌های کرکس ازنظر تکتونیک همچنان فعال است با این تفاوت که دامنه‌های شمال شرقی بیشتر از دامنه‌های جنوب غربی از فعالیت‌های تکتونیکی متأثر هستند. تحقیقات دیگر در این منطقه عمدتاً مبتنی تشریح ویژگی‌های زمین‌شناسی و ولکانیکی توده کوهستانی کرکس بوده و به‌صورت دقیق سیمای تکتونیکی منطقه ترسیم نگردیده است.

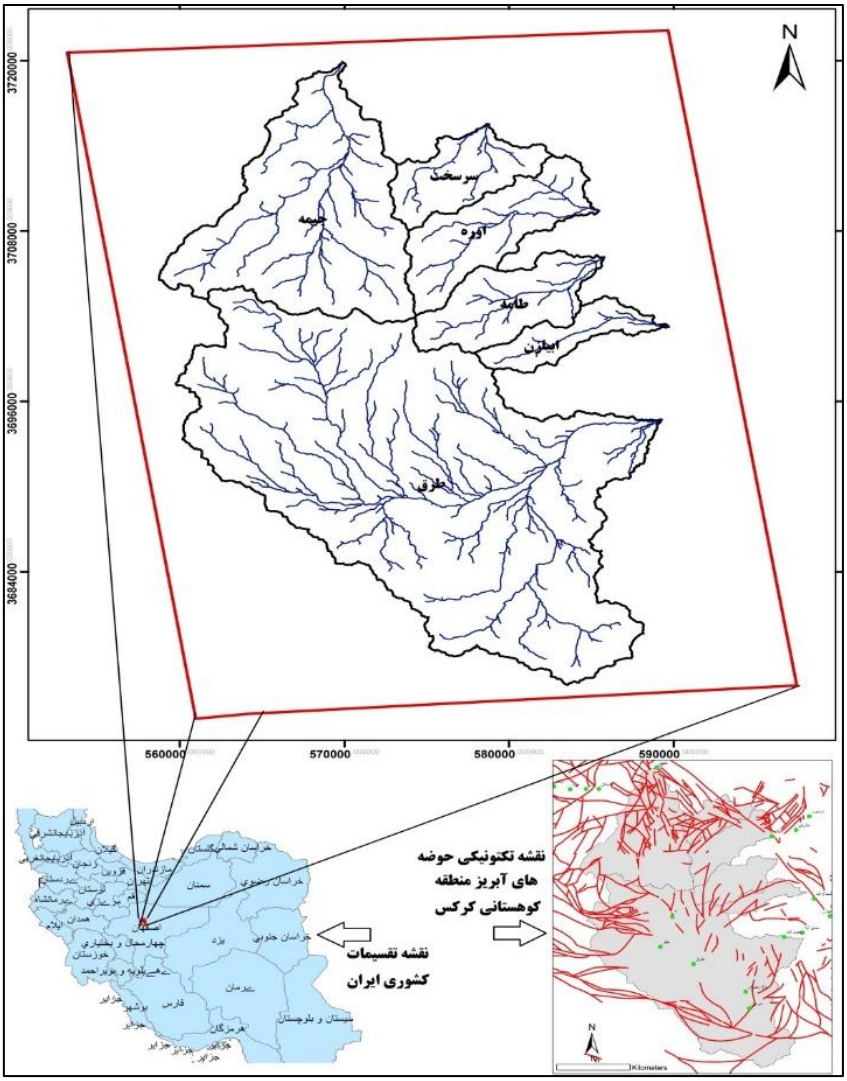
محدوده موردمطالعه

محدوده موردمطالعه در مختصات جغرافیایی: ′۱۳ °۳۳ تا ′۳۷ °۳۳ عرض جغرافیایی و ′۳۸ °۵۱ تا ′۵۵ °۵۱ طول جغرافیایی واقع‌شده است. حوضه‌های آبریز کوهستان کرکس در بخش مرکزی سامانه گسلی QZFS و در استان اصفهان و در غرب شهرستان نطنز واقع گردیده‌اند (شکل ۱). قله‌های کوهستان کرکس به علت ارتفاع زیادی که دارند (۳۸۹۵ متر) تقریباً در نیمی از سال پوشیده از برف بوده و منبع اصلی چشمه‌های متعددی است که در دامنه‌های این کوهستان جریان دارند. دامنه‌های کرکس به دلیل وجود منابع آب کافی و نیز اعتدال شرایط اقلیمی و رویش انواع گیاهان مرتعی، زینتی و تجاری در ردیف مراتع نسبتاً خوب منطقه و کشور است. پوشش گیاهی منطقه بیشتر شامل گیاهان بوته‌ای (انواع گندمیان، درمنه، گون، گیاهان دارویی و ...) و درختچه‌هایی است که به‌صورت پراکنده دیده می‌شود. رشته‌کوه‌های کرکس و کهرود با روند شمال غربی جنوب شرقی، منطقه موردمطالعه را به دو بخش متمایز شرقی و غربی قسمت کرده‌اند. دشت کم ارتفاع شمال شرقی، دارای ارتفاع میانگین ۱۰۰۰ متر و دشت جنوب غربی (رباط سلطان) نزدیک به ۱۶۵۰ متر ارتفاع دارد و کم‌وبیش در آن کشاورزی می‌شود. کوه‌های کهرود و کرکس، آبراهه‌های منطقه را نیز به دو شبکه اصلی آبراهه‌ای متمایز

1 - Kaghan Valley in the Lesser Himalayas of Pakistan

۲ - Mumipour

از یکدیگر بخش می‌کند. آبراهه‌های شرقی به‌سوی شنزارها جریان دارد و آبراهه‌های جنوب غربی به رودخانه زاینده‌رود، در شرق اصفهان می‌پیوندد. شهرستان نطنز، چیمه، طامه و طَرق و روستاهای پیرامون آن بزرگ‌ترین مجتمع مسکونی محدوده موردمطالعه را تشکیل می‌دهند.



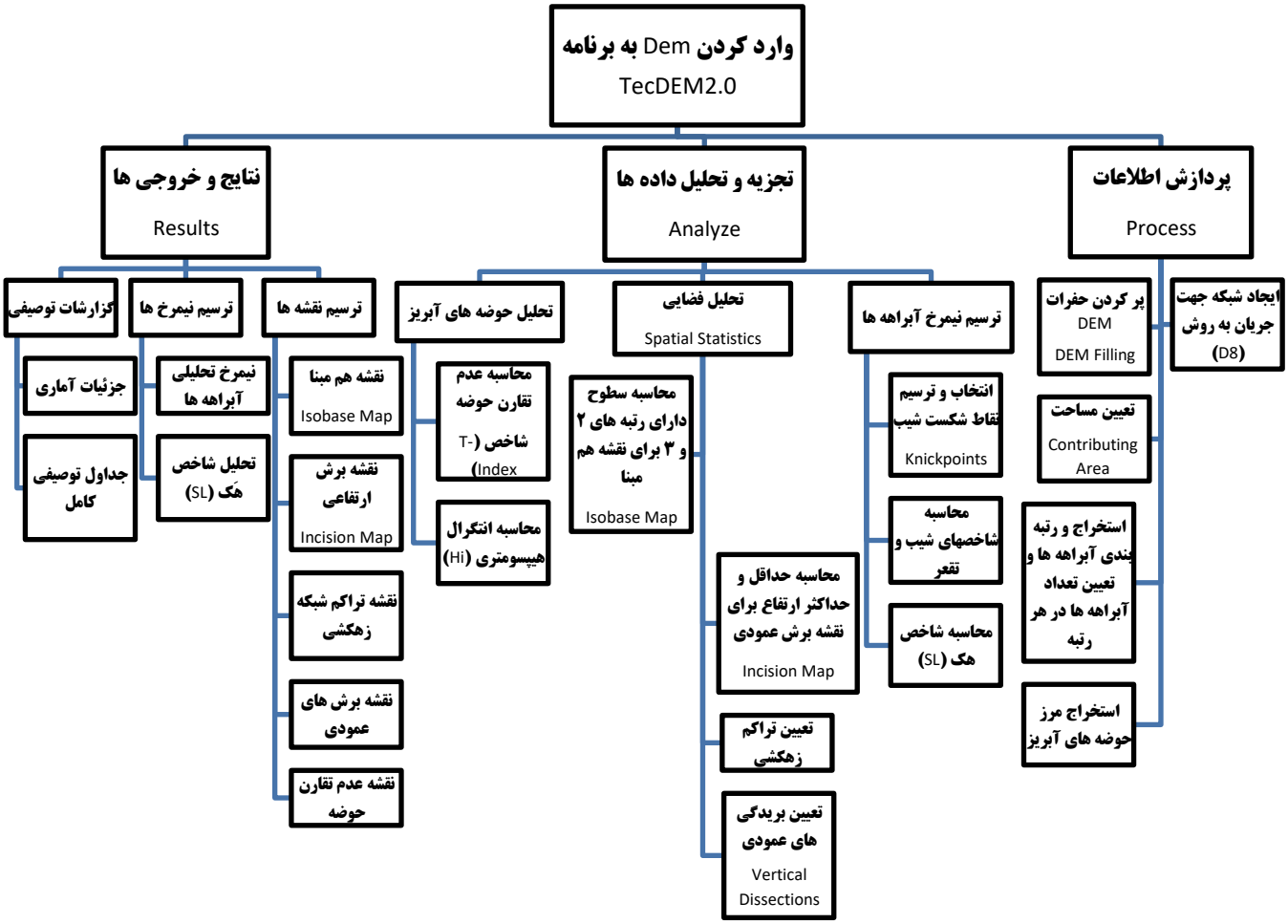
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و تکتونیکی حوضه‌های آبریز در استان اصفهان و ایران

روش تحقیق

این پژوهش مبتنی بر داده‌های کمّی و میدانی است که به روش ژئومورفومتری و قابلیت تحلیلی نرم‌افزار TecDEM استخراج و گردآوری‌شده‌اند (شکل۲). به‌طورکلی مجموعه داده‌های مورداستفاده در این تحقیق از دو پایگاه داده جغرافیایی: ۱) مدل رقومی ارتفاعی (DEM) باقدرت تفکیک ۱۲/۵ متر؛ ۲) شبکه زهکشی مستخرج از آن تشکیل‌شده است. هر دو پایگاه داده‌ای به‌عنوان ابزاری مناسب جهت محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک در قالب الگوریتم الحاقی TecDEM مورداستفاده قرارگرفته است. در این روش به‌منظور تحلیل مورفوتکتونیکی، با استفاده از ویژگی‌های ژئومورفولوژی منطقه، ابتدا مدل رقومی ارتفاعی (DEM) باقدرت تفکیک ۱۲/۵ متر با استفاده از تصاویر راداری سنجنده PALSAR[1] ماهواره

[1] - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar

ALOS منطقه تهیه گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار TecDEM2.0، شبکه زهکشی و مرز حوضه‌های آبریز منطقه استخراج گردید. آبراهه‌های اصلی منطقه که دارای رتبه ۳ استرالر و بزرگ‌تر بودند شناسایی گردیدند. درمجموع پنج آبراهه اصلی به همراه حوضه‌های مربوطه تعیین گردیدند. سپس برای تحلیل *فرایندهای دینامیک عوارض سطحی*، پارامترهای توپوگرافی با شناسایی چگونگی روابط میان حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه، از طریق استخراج نقشه‌های برش عمودی[۱] و هم مبنا[۲] محاسبه و ترسیم گردیدند. برای تحلیل *فرایندهای دینامیکی حوضه‌های آبریز* نیز نقشه ابرهه‌ها و شبکه زهکشی منطقه، استخراج و به روش استرالر (۱۹۷۵) رتبه‌بندی گردیدند. سپس شاخص‌های تقعر[۳]، تندی شیب[۴] و گرادیان طولی آبراهه (SL) محاسبه و نقشه‌های مربوطه ترسیم گردیدند. در مطالعه دینامیک آبراهه‌ها رتبه‌بندی مناسب به روش استرالر بسیار حائز اهمیت است چرا که آبراهه‌ها وضعیت زمین‌شناسی (لیتولوژی) منطقه را به‌خوبی توصیف می‌کنند. تجزیه‌وتحلیل شبکه‌های زهکشی می‌تواند ابزار مناسبی برای تحلیل و تفسیر تکتونیک فعال منطقه که منجر به بی‌ثباتی (ناپایداری) در شبکه زهکشی و مورفولوژی حوضه می‌شود، باشد (گاروته و همکاران، ۱۳۰،۲۰۰۸).



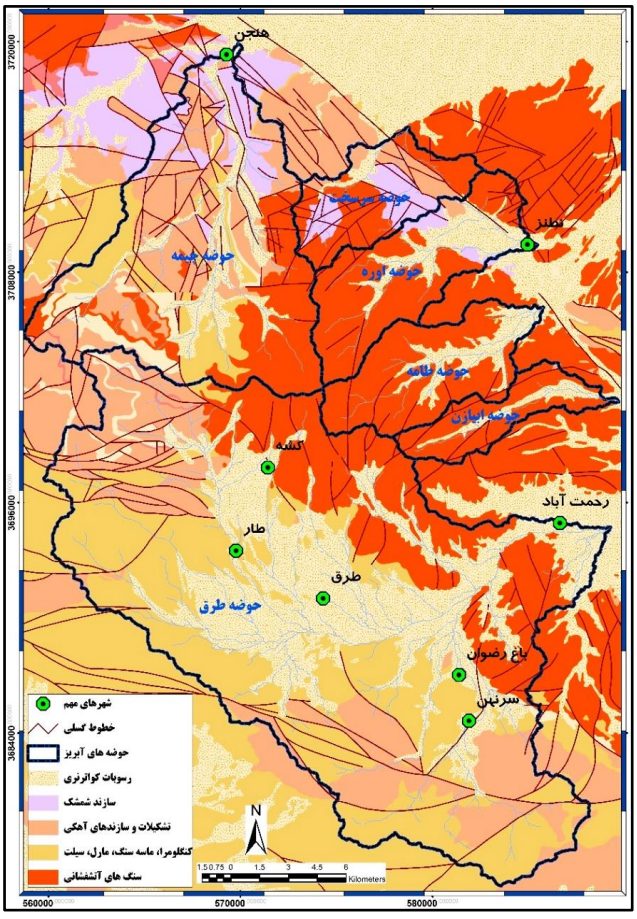
شکل ۲: فلوچارت مراحل انجام محاسبات شاخص‌های ژئومورفیک و تهیه نقشه‌های مربوطه در برنامه الحاقی TecDEM2.0

1 - Incision
2 - Isobase
3 - Concavity index
۴ - Steepness index

در پایان به‌منظور تحلیل نتایج حاصل از یافته‌های پژوهش، با استخراج ویژگی‌های زمین‌شناسی و لیتولوژی منطقه از نقشه‌های رقومی زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه موقعیت گسل‌ها و انطباق داده‌های مذکور با شواهد مورفوتکتونیک حاصل از مطالعات میدانی، صحت داده‌های فوق موردسنجش قرار گرفت. درنهایت ارتباط بین داده‌های کمّی اندازه‌گیری شده و از طریق تطبیق لندفرمی موردبررسی قرارگرفته و از تلفیق کلیه اطلاعات موجود در بانک اطلاعاتی، وجود تکتونیک فعال با شدت و ضعف‌های متفاوت در محدوده موردمطالعه تعیین گردید.

بحث و یافته‌ها

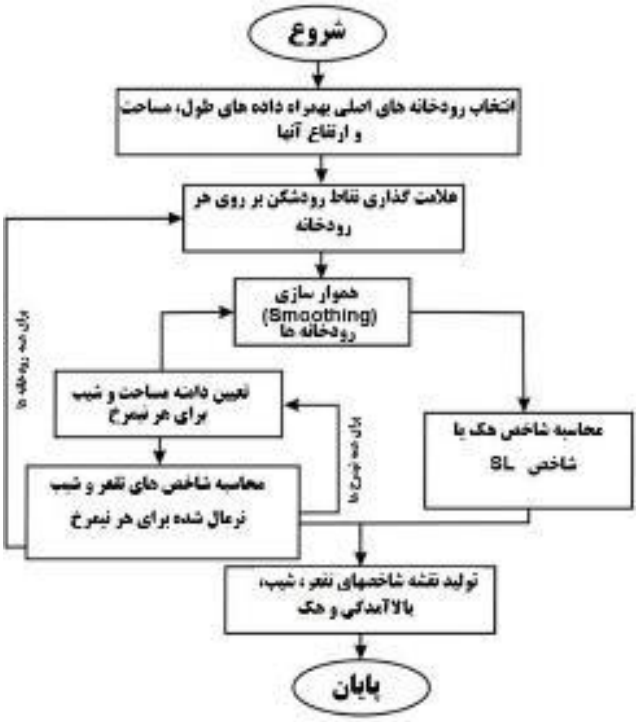
محدوده کوهستان کرکس بیشتر از نهشته‌های دوران سوم (دوره ائوسن) پوشیده شده است. رسوب‌های پهنه مطالعاتی با شیبی بسیار ملایم بر روی سنگ‌های نفوذی جای می‌گیرند (شکل ۳). واحدهای نفوذی شامل توده‌های نفوذی آذرین درونی و گنبد داسیتی پلیوسن می‌باشد. این توده‌ها بیشتر به‌صورت با تولیت‌هایی هستند که بیشترین بیرون‌زدگی و گسترش آن‌ها در باختر شهرستان نطنز و در محدوده بین غرب روستای هنجن تا پیرامون روستای قمصر می‌باشد. در شمال کوه سرسخت و در امتداد گسل نطنز در غرب روستای حسن‌آباد تا پیرامون روستای تتماج، سنگ‌ها به‌شدت دگرسان شده و وجود گسل نطنز در ایجاد این دگرسانی بی‌تأثیر نبوده است (برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نطنز، سازمان زمین‌شناسی). بلندی‌های عمده منطقه در غرب شهرستان نطنز، در شمال دره ابیانه و جنوب روستای ابیانه واقع‌شده‌اند و بیشتر از جنس سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی و دولومیت شتری می‌باشند. بخش شمالی بیشتر از تپه‌های ماسه‌ای و بادی و بخش مرکزی بیشتر از پادگانه‌های آبرفتی کواترنری تشکیل‌شده است. کوه کرکس حاصل گدازه‌هایی است که از راه شکاف‌های موجود در سطح زمین به بیرون راه‌یافته‌اند.



شکل۳: نقشه زمین‌شناسی محدوده موردمطالعه

تجزیه‌وتحلیل نیمرخ طولی آبراهه‌ها به روش هَک Hack

تجزیه‌وتحلیل نیمرخ طولی آبراهه یک رویکرد مورفولوژی جریانی کمّی است که شامل محاسبه شاخص‌هایی نظیر: شاخص هَک (۱۹۷۳) یا گرادیان طولی آبراهه (SL)، شاخص تقعر و شاخص تندی شیب می‌شود (اشنایدر و همکاران، ۲۰۰۰، ۱۲۵۰؛ وبوس، ۲۰۰۶، ۸۶۱). برای این منظور آبراهه‌های اصلی مختلفی را در سطح منطقه که دارای توزیع مکانی متفاوتی بودند شناسایی گردیدند. این آبراهه‌ها با پراکندگی مختلف مکانی خود دارای مشخصات مورفومتری (طول، عرض و ارتفاع) مختلفی هستند که در برنامه TecDem این ویژگی‌ها از طریق پردازش مدل رقومی ارتفاعی و از طریق استخراج شبکه زهکشی محاسبه می‌گردند. مراحل این پردازش در شکل۴ آمده است.



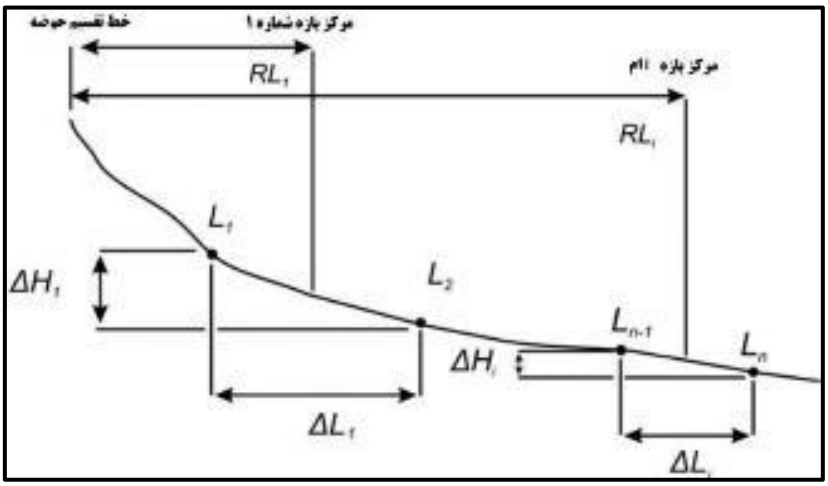
شکل ۴: فلوچارت مراحل تولید نقشه شاخص‌های تقعر، شیب و هک(SL) در برنامه TecDem، (شهزاد و گلوگوئن، ۲۰۱۱).

این شاخص را می‌توان از معادله شماره ۳ که در شکل ۵ نشان داده‌شده است محاسبه کرد. هَک در سال ۱۹۷۳ این روش را بامطالعه تغییرات در طول نیمرخ جریان و شیب کانال با استفاده از توابع لگاریتمی ارائه نمود. وی رابطه ریاضی زیر را پیشنهاد کرد که بعدها توسط دانشمندان دیگر تغییرات جزئی پیدا نمود:

معادله شماره (۳):

$$SL = k = L_n\left(\frac{\Delta H_i}{\Delta L_i}\right)$$

که در آن (H) ارتفاع و (L) طول رودخانه است.

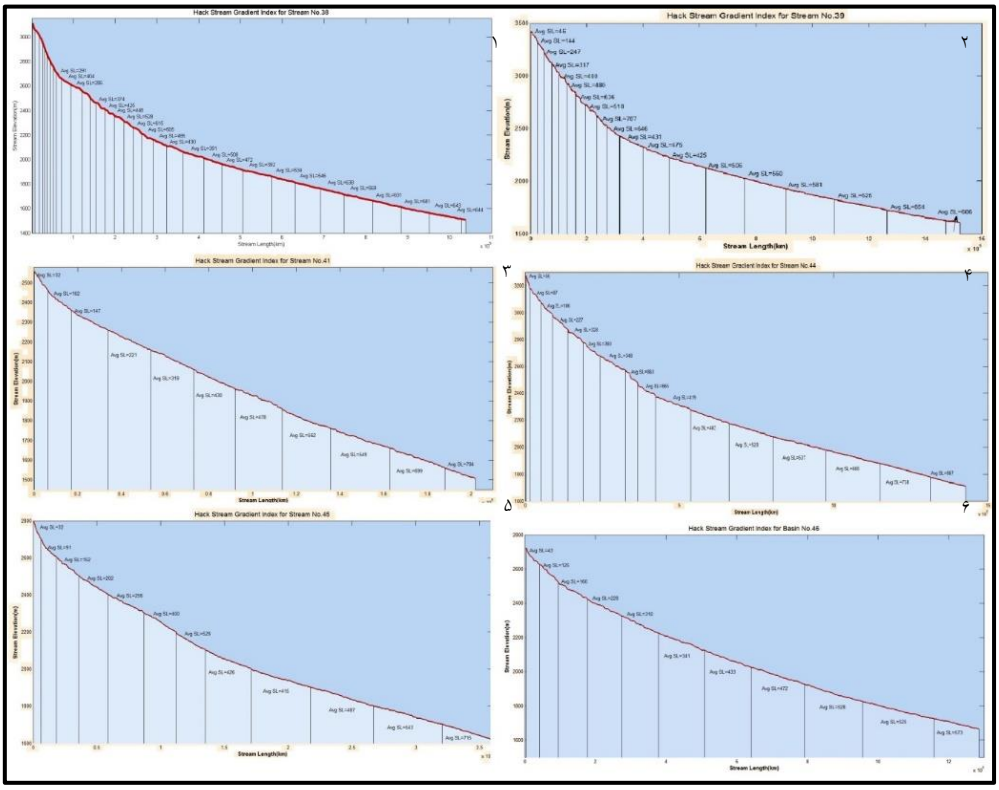


شکل ۵: نمودار گرافیکی نحوه محاسبه شاخص هک با توجه به حدفاصل منحنی‌های تراز در طول نیمرخ آبراهه. هَک، ۱۹۷۳

محاسبه شاخص هَک در برنامه TecDEM ساده است و می‌تواند برای هر آبراهه طولی با استفاده از تعیین فواصل منحنی میزان ارتفاعی تعریف‌شده توسط کاربر، اعمال شود. در نمودار فوق محورهای عمودی خط ارتفاع را نشان می‌دهد درحالی‌که محور لگاریتمی افقی طول جریان را نشان می‌دهد. شیب این نمودار یک خط مستقیم است و به نام شاخص هَک یا شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL) نامیده می‌شود (شکل ۵). تغییر در مقادیر SL در امتداد جریان مربوط به تغییرات لیتولوژیکی و وجود گسل در منطقه می‌باشد (شهزاد و گلوگوئن، ۲۵۵، ۲۰۱۱). به‌عبارت‌دیگر، از طریق تطبیق مقادیر شاخص SL نیمرخ طولی آبراهه، نقشه‌های زمین‌شناسی و موقعیت گسل‌ها، اثر عوامل زمین‌شناسی و تکتونیکی در تغییر شیب طولی آبراهه و نقاط شکست شیب نمایان می‌شود (مومی پور، ۱۲۱۷، ۲۰۱۲). این شاخص برای حوضه‌های موردمطالعه با احتساب منحنی میزان ۵۰ متر محاسبه گردید(جدول۱). برمبنای محاسبات انجام‌گرفته، بیشترین میزان گرادیان طولی رودخانه ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی به ترتیب در حوضه‌های آبریز طامه (۸۰۷) و چیمه (۷۸۴) مشاهده می‌شود(شکل۶) .این مسئله با شواهد مورفوتکتونیکی منطقه از طریق تطبیق نقشه حوضه‌ها با موقعیت گسل‌ها، وجود گسل راست‌گرد امتدادلغز نطنز را در خروجی حوضه‌های مذکور نمایان می‌سازد.

جدول ۱: مقادیر شاخص گرادیان طولی رودخانه‌های حوضه‌های موردمطالعه

شاخص/حوضه آبریز	سرسخت	اوره	چیمه	طامه	طرق	ابیازن
گرادیان طولی رودخانه	۶۹۰	۶۰۶	۷۸۴	۸۰۷	۷۱۵	۵۷۳



شکل ۶: نمودارهای گرادیان طولی رودخانه‌های اصلی حوضه‌های موردمطالعه که در برنامه الحاقی Tecdem به‌دست‌آمده است. ۱) حوضه سرسخت ۲) حوضه اوره ۳) حوضه چیمه ۴) حوضه طامه ۵)حوضه طرق و ۶) حوضه ابیازن.

تحلیل شاخص تندی شیب نرمال شده[۱](Ksn)و شاخص تقعر(θ):

تجزیه‌وتحلیل شاخص‌های فرورفتگی (تقعر) و تندی شیب نرمال شده، اطلاعات ارزشمندی در خصوص ویژگی‌های هیدرولوژیکی و ژئومورفیکی حوضه‌های آبریز نمایان می‌سازد (رجبی و همکار، ۱۳۹۶). پس از تعیین نقاط شکست شیب[۲] و ترسیم بازه موردنظر از طریق رابط کاربر گرافیکی، مقادیر شاخص تقعر (θ) ، شاخص تندی شیب نرمال شده محاسبه گردیدند. مقادیر کم شاخص تقعر و شیب زیاد بیانگر مرحله جوانی و وجود تکتونیک فعال در تحول چشم‌اندازهای ژئومورفیکی است و بالعکس(شهزاد و گلوگوئن،۲۰۱۱). بر اساس محاسبات انجام‌شده(جدول۲) بیشترین مقدار شیب مربوط به حوضه آبریز اوره(۱۹۲/۵۷) و کمترین مقدار تقعر (۰/۲) مربوط به حوضه چیمه می‌باشد که بیانگر فعال بودن آن ازنظر تکتونیک نسبت به سایر حوضه‌های آبریز منطقه است .بر همین اساس، بیشترین مقدار تقعر(۰/۸۹) و کمترین میزان شیب(۱۳۱/۷۸) مربوط به حوضه آبریز طَرق بوده که نشان‌دهنده فعالیت اندک تکتونیکی و مرحله پیری چشم‌انداز آن می‌باشد.

۱ - Normalized Steepness Index

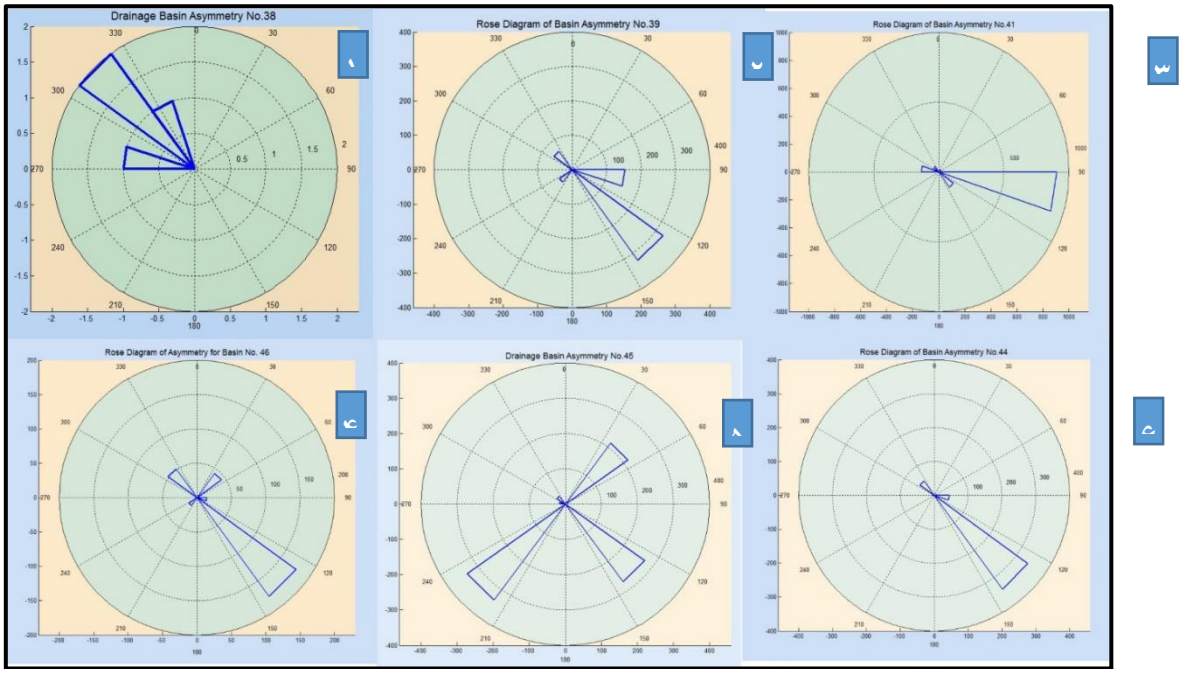
۲ - Knick Points

جدول ۲: مقادیر شاخص‌های تقعر و شیب در حوضه‌های آبریز موردمطالعه

پارامتر/حوضه آبریز	سرسخت	اوره	چیمه	طامه	طرق	ابیازن
مقدار تقعر	۰,۶۳	۰,۸۹	۰,۲	۰,۵۹	۰,۳۴	۰,۳۵
تندی شیب(٪)	۱۸۵,۷۷	۱۹۲,۵۷	۱۸۰,۱	۱۷۵,۶۱	۱۳۱,۷۸	۱۱۲,۱

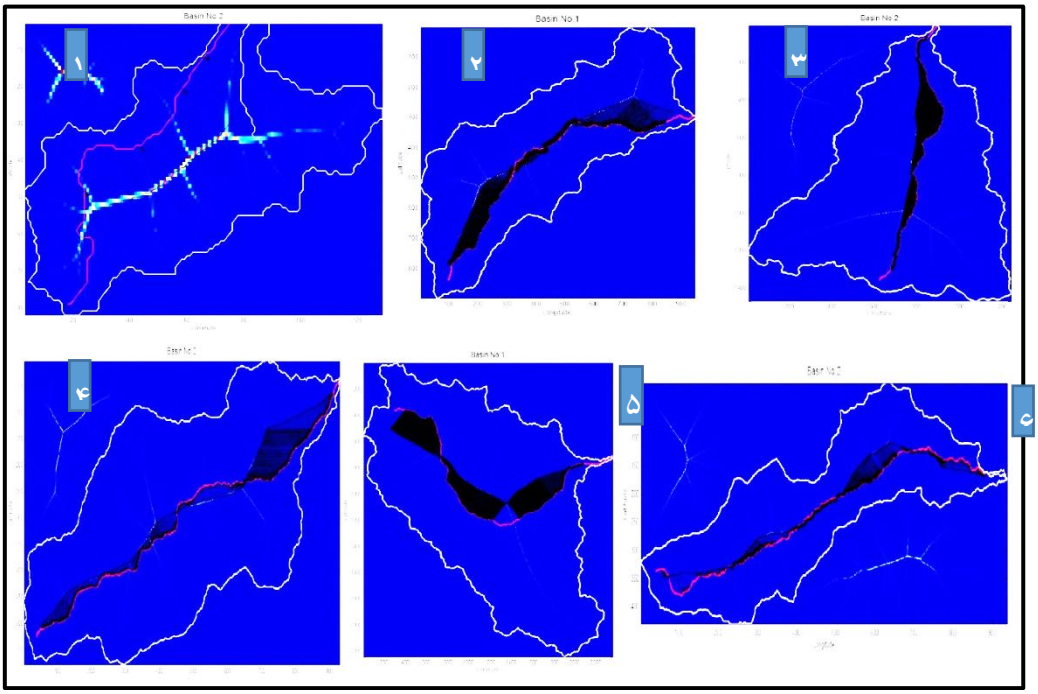
تحلیل شاخص عدم تقارن حوضه

مهاجرت آبراهه‌ها در حوضه‌های آبریز برای مطالعه عامل تقارن عرضی توپوگرافی (T) می‌تواند موردمطالعه قرار گیرد (کوکس، ۵۷۱،۱۹۹۴). این روش، ما را در ارزیابی حرکات سریع حوضه‌های کج شده در مناطق دارای فعالیت تکتونیکی بالا به‌وسیله کمّی سازی تغییرات تقارن حوضه در طول مسیر آبراهه یاری می‌کند (شهزاد و گلوگوئن، ۲۰۱۱). این تغییرات با اندازه‌گیری نسبت فاصله از یک خط فرضی میانی[۱] (Mid Line) در حوضه آبریز با موقعیت واقعی آبراهه و مرز حوضه محاسبه می‌گردد (کوکس، ۵۷۲،۱۹۹۴؛ گاروته و همکاران، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸). در برنامه TecDeM از روش فاصله–انحناء برای دستیابی به خط وسط حوضه استفاده می‌گردد. در این برنامه کاربر ابتدا مسیر واقعی رودخانه را با استفاده از رابط گرافیکی به نرم‌افزار معرفی می‌نماید (خط قرمز در شکل ۸) سپس نرم‌افزار فاصله رودخانه را با خط مشخص‌شده با خطوطی که عمود بر طول رودخانه است فاصله‌یابی می‌نماید و با محاسبه شاخص (T) میزان و جهت کج شدگی حوضه را تعیین نموده و در قالب رز دیاگرام و دیاگرام قطبی نمایش می‌دهد (شکل ۷). 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 (شهزاد و گلوگوئن،۲۶۶،۲۰۱۱).



شکل ۷: رز دیاگرام شاخص عدم تقارن توپوگرافی (T) که جهت و میزان کج شدگی را در هر حوضه به‌صورت جداگانه نشان می‌دهد. ۱=حوضه سرسخت، ۲=حوضه اوره، ۳=حوضه چیمه، ۴=حوضه طامه، ۵=حوضه طرق، ۶=حوضه ابیازن

[۱] - Distance-Curvature



شکل ۸: ترسیم خطوط میانی حوضه‌های موردمطالعه توسط برنامه الحاقی Tecdem

مطابق نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین میزان شاخص تقارن توپوگرافی عرضی متعلق به حوضه سرسخت(۰,۴۳) و کمترین میزان شاخص نیز متعلق به حوضه چیمه (۰,۱۲) است. متوسط شاخص تقارن برای کل منطقه (۰,۲۶) به دست آمد. نتایج مذکور، بیانگر وجود عدم تقارن (کج شدگی) در سطح حوضه‌های آبریز ارتفاعات کرکس در جهت جنوب شرقی است(جدول ۳).

جدول ۳: مقادیر شاخص تقارن توپوگرافی عرضی حوضه‌های آبریز کوهستان کرکس

پارامتر/حوضه آبریز	سرسخت	اوره	چیمه	طامه	طرق	ابیازن
شاخص تقارن توپوگرافی (T)	۰,۴۳	۰,۳۴	۰,۱۲	۰,۱۴	۰,۳۵	۰,۲۱
جهت کج شدگی	NW	SE	SE-E	SE	SW-SE	SE

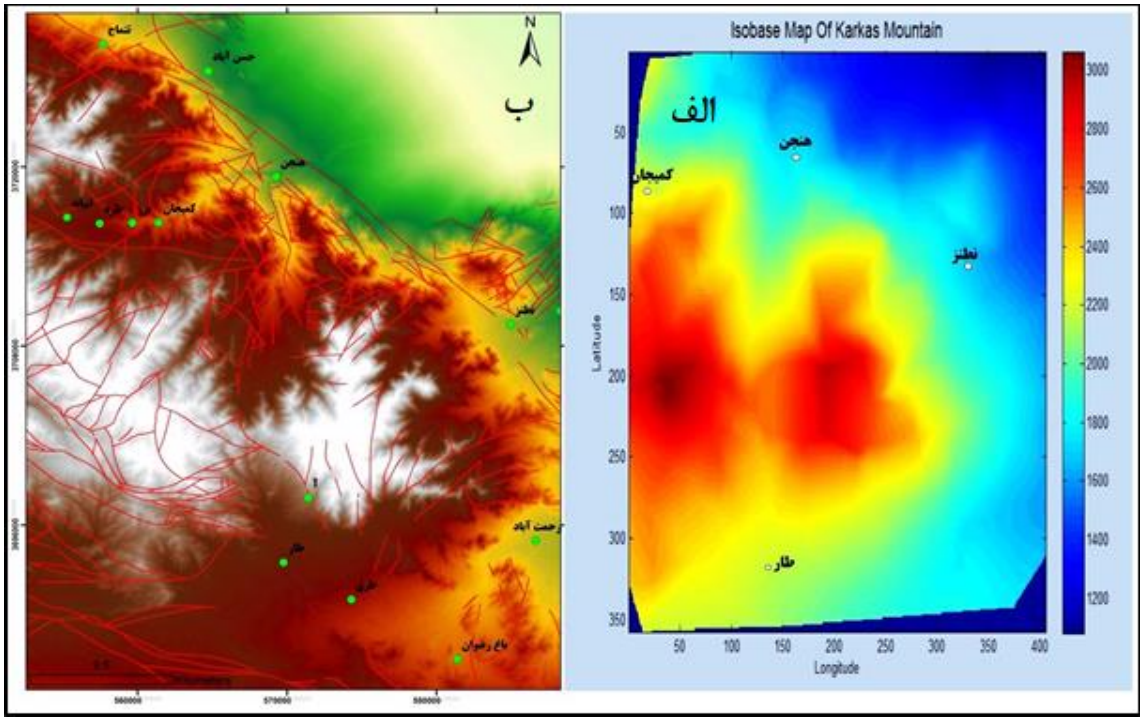
نقشه هم مبنا[1] ؛

الگوی شبکه‌های زهکشی برآیند توزیع نسبی فضایی و مکانی آبراهه‌ها در سطح یک حوضه آبریز است که می‌توان آن را به روش استرالر ساماندهی و رتبه‌بندی نمود. مطالعه تغییرات رتبه‌بندی آبراهه‌ها با روش استرالر، ارتباط قویی با وضعیت توپوگرافی محل دارد. در این روش آبراهه‌ها به لحاظ مقیاس زمانی قابلیت مطالعه داشته و می‌تواند مانند مطالعات وقایع زمین‌شناسی، دارای سن، دوره و عصر باشد. در الگوریتم TecDEM رتبه‌بندی آبراهه‌ها به روش استرالر بوده و با توجه به این‌که آبراهه‌های هم‌رتبه، به وقایع زمین‌شناسی واحدی تعلق دارند، بنابراین به‌احتمال‌زیاد دارای سن همسانی نیز می‌توانند باشند (شهزاد و گلوگوئن، ۲۰۱۱). بررسی توزیع مکانی ارتفاع آبراهه‌ها، طول و زاویه میل[2] آنان کاربرد زیادی در تحقیقات واحدهای زمین‌شناسی دارند (گوتس و رُزنتال، ۵،۱۹۹۲). برای مطالعه دینامیک آبراهه‌ها و تغییرات سطح

[1] - Isobase Map

[2] - Inclination

توپوگرافی منطقه از نقشه‌های هم مبنا (Isobase) استفاده می‌گردد (گاروته و همکاران، ۲۰۰۸؛ گوتس و رُزنتال، ۱۹۹۳؛ گروهمن، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۷). در این نقشه‌ها خطوط هم مبنا، سطوح فرسایشی که در اثر فرایندهای فرسایشی و نئوتکتونیکی به وجود آمده‌اند را نشان می‌دهند (فیلوسوف، ۱۹۶۰). نقشه‌های هم مبنا به‌وسیله عملیات درون‌یابی ارتفاعی در موقعیت مکانی آبراهه‌های با رتبه ۲ و ۳ (بدون در نظر گرفتن رتبه‌های ۱) تولید می‌گردد (گوتس و رُزنتال، ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳؛ گروهمن، ۲۰۰۴). همانند شکل شماره ۱۲ الف، تغییرات تند و تیز در نقشه هم مبنا می‌تواند نشانه‌ای از امکان قرارگیری گسل و یا مغایرت‌های زمین‌شناسی در آن ناحیه باشد. در برنامه الحاقی TecDEM رتبه‌های دوم و سوم آبراهه‌ای به روش استرالر شناسایی گردیده سپس ماتریسی بانام Str_map با پیکسل سایز معادل DEM ساخته می‌شود. ماتریس Str_map شامل آبراهه‌های رتبه ۲ و ۳ به همراه ارتفاعشان هستند که در نقشه هم مبنا به‌وسیله برنامه متلب درون‌یابی می‌شوند.
در نقشه هم مبنا حوضه‌های موردمطالعه، تغییرات توپوگرافی برحسب سطوح ارتفاعی و با تغییرات رنگ نشان داده‌شده است (شکل ۹ الف). انطباق نقشه هم مبنا با نقشه سامانه گسلی منطقه (شکل ۹ب) بیانگر نقش گسل‌ها به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر بر تغییرات ارتفاعی و اختلاف ارتفاع زیاد (۱۶۵۴ – ۴۰۴۴) در سطح حوضه‌هاست .در اغلب موارد تغییرات سریع در سطح نقشه هم مبنا منطقه، منطبق بر خطوط گسلی است و رتبه‌بندی شبکه‌های آبراهه‌ای تأثیرپذیری آن‌ها از حرکات راست‌گرد گسل‌ها را نمایان می‌سازد .بر اساس نتایج تحقیق، تغییرات ناگهانی ناشی از وجود خطوط گسلی در نقشه هم مبنا اغلب در سطوح ارتفاع۲۴۰۰–۲۶۰۰ متر مشاهده می‌شود.



شکل ۹: الف)نقشه هم مبنا مستخرج از DEM منطقه ب)نقشه DEM راداری باقدرت تفکیک ۱۲,۵ متر با لایه خطوط گسلی منطقه کوهستانی کرکس

تحلیل انتگرال هیپسومتری (Hi)

هیپسومتری، پارامتر مناسبی برای تشخیص مراحل توسعه‌یافتگی حوضه محسوب می‌شود (پِرز–پنا، ۲۰۰۹؛ استرالر، ۱۹۵۲). منحنی هیپسومتری توصیف توزیع ارتفاعات در سراسر منطقه موردمطالعه می‌باشد، که می‌توان یک حوضه تا کل سیاره زمین تغییر باشد. منحنی هیپسومتری (فراز نما یا بی‌بعد) توزیع ارتفاعات را در راستای عمود بر یک ناحیه از زمین توصیف می‌کند. این منحنی با پیاده نمودن نسبت ارتفاع کل حوضه (ارتفاع نسبی) در مقابل نسبت مساحت کل حوضه (مساحت

نسبی) ترسیم می‌گردد (کلر و پین‌تر، ۱۹۹۶). در الگوریتم TecDEM هیپسومتری حوضه‌ها به‌صورت خودکار پردازش و استخراج می‌گردد. این منحنی با ترسیم ارتفاع نسبی در مقابل مساحت نسبی حوضه ترسیم می‌شوند(علیزاده،۱۳۸۰). اختلافات و تفاوت‌های حوضه‌های آبریز را می‌توان با ویژگی ارتفاعی‌شان مانند: منحنی مساحت–ارتفاع (شکل ۱۰) مقایسه کرد (گاروته و همکاران،، ۲۰۰۸؛ پرز–پنا و همکاران، ۲۰۰۹، استرالر، ۱۹۵۲). انتگرال هیپسومتری (Hi) و منحنی هیپسومتری از مدل‌های مفهومی ژئومورفولوژیکی کلاسیک است که تحول لندفرمی یک ناحیه را نشان می‌دهد. یک روش ساده برای تعیین شکل منحنی فراز نما در یک حوضه آبریز، محاسبه انتگرال هیپسومتری (فراز نما) برای آن حوضه می‌باشد. این انتگرال به‌صورت مساحتِ زیر منحنی هیپسومتری تعریف‌شده است .فرمول محاسبه انتگرال هیپسومتری برای یک منحنی در زیر ارائه‌شده است (کلر و پینتر، ۱۹۹۶).

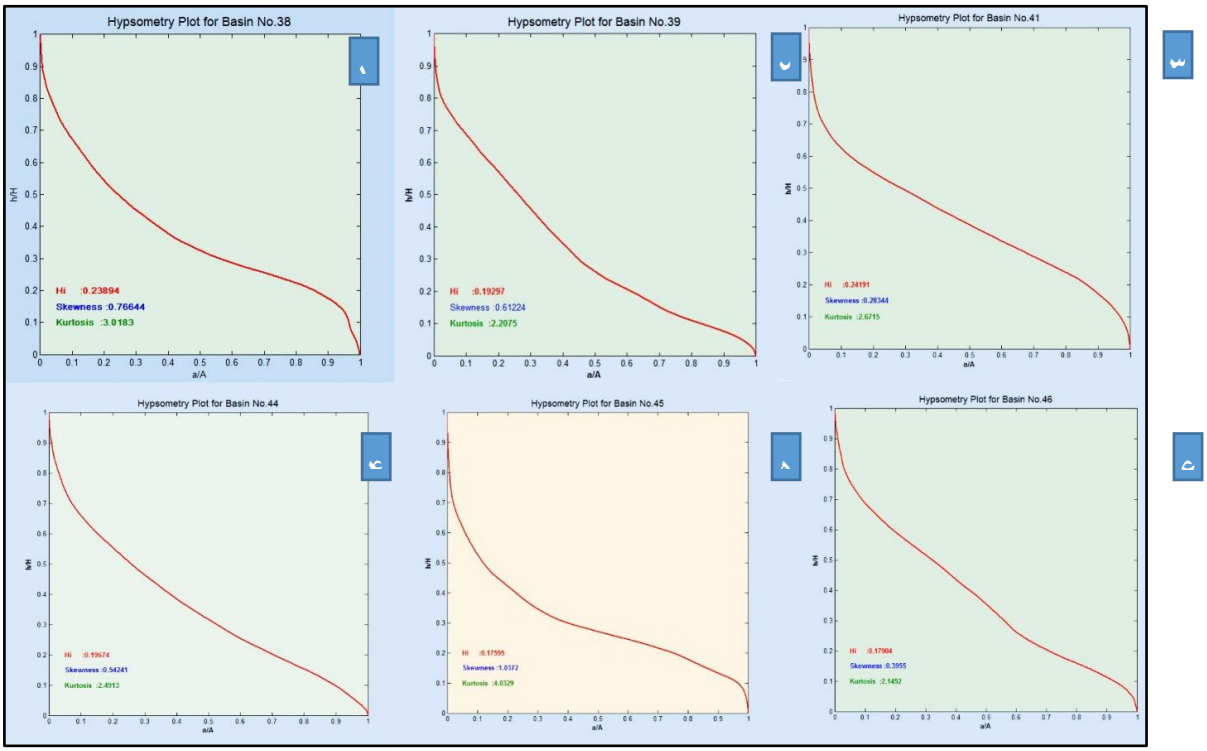
معادله۴، که در آن واحد پارامترها برحسب متر می‌باشد.

$$Hi = \frac{\text{ارتفاع حداقل} - \text{ارتفاع میانگین}}{\text{ارتفاع حداقل} - \text{ارتفاع حداکثر}}$$

این رابطه گرچه ارتباط مستقیمی با حرکات تکتونیکی نداشته اما به‌گونه‌ای غیرمستقیم وضعیت توزیع سطوح مختلف حوضه را نشان می‌دهد . مقادیر بالای این شاخص بیانگر مناطق مرتفع با بریدگی‌های عمیق‌اند و مقادیر پایین آن بیانگر مناطق کم ارتفاع و فرسوده می‌باشند. به‌طوری‌که مقدار انتگرال بزرگ‌تر از ۰/۶ با منحنی محدب ناحیه است که در مرحله جوانی است. مقدار متوسط انتگرال در دامنه بین ۰/۶تا ۰/۳۵ ناحیه ایست که در مرحله تعادل (بلوغ) قرار دارد و درنهایت مقدار کم این شاخص(کمتر از ۰/۳۵ با منحنی مقعر ویژگی مناطقی در مرحله پیری(یا مونادنوک) حوضه‌های آبریز است (استرالر، ۱۹۵۲). انتگرال هیپسومتری می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای سنجش میزان نسبت ارتفاع خروجی حوضه تا خط تقسیم حوضه باشد که به‌وسیله فرایندهای فرسایشی از بین رفته‌اند (مانند هوازدگی). مؤلفه‌های آماری مانند: میانگین، انحراف معیار، چولگی و کشیدگی حوضه‌های آبریز به‌عنوان داده‌های آماری منحنی‌های هیپسومتری توسط الگوریتم الحاقی TecDEM در محیط نرم‌افزاری متلب، محاسبه می‌گردند و می‌تواند برای تجزیه‌وتحلیل مورفوتکتونیکی حوضه‌های آبریز به کار رود (هرلین، ۱۹۷۸؛ لو، ۱۹۹۸، پرز–پنا و همکاران، ۲۰۰۹). برنامه 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(شهزاد و گلوگوئن،۲۰۱۱). بر اساس نتایج محاسبات به‌دست‌آمده در حوضه‌های موردبررسی، حوضه آبریز چیمه بیشترین حالت تحدب را دارد چولگی(۰/۲۸) که بیانگر فعالیت تکتونیکی زیاد در حوضه مذکور است . نتایج شاخص‌های محاسبه‌شده(جدول۴)، حاکی از وجود شرایط تکتونیکی فعال و دوره جوانی چشم‌اندازهای ژئومورفیک در سطح حوضه‌های موردمطالعه است(شکل ۱۰).

جدول ۴: مقادیر شاخص‌های منحنی هیپسومتری زیر حوضه‌های موردمطالعه

پارامتر/حوضه آبریز	سرسخت	اوره	چیمه	طامه	طرق	ابیازن
چولگی	۰,۸۵	۰,۶۱	۰,۲۸	۰,۵۴	۱,۰۴	۰,۴
کشیدگی	۲,۹۳	۲,۲	۲,۶۷	۲,۴۹	۴,۰۳	۲,۱۵
انتگرال هیپسومتری	۰,۱۸	۰,۱۹	۰,۲۴	۰,۱۲	۰,۱۸	۰,۱۸

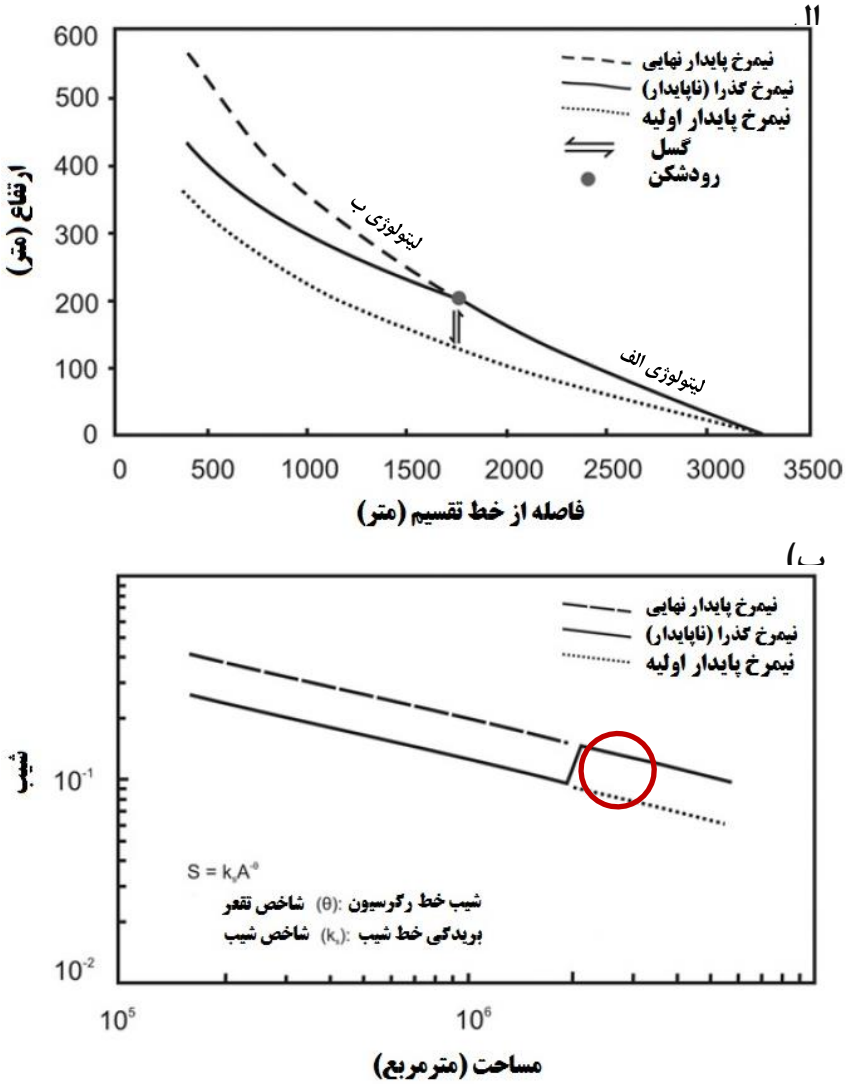


شکل ۱۰:نمودار انتگرال هیپسومتری حوضه‌های آبریز کوهستان کرکس

تعیین نرخ بالاآمدگی[۱]

در تحقیقات شهزاد و گلوگوئن، ۲۰۱۱، اسنایدر و همکاران، ۲۰۰۰، وبوس و همکاران، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۶ از طریق بررسی و اندازه‌گیری میزان فرسایش منطقه و تغییرات شیب و تقعر نیمرخ طولی آبراهه توانستند با ارائه فرمول، نرخ بالاآمدگی حوضه آبریز را تعیین کنند. بر اساس این تحقیقات، مورفولوژی جریان آبراهه به سه حالت مختلف بر روی نیمرخ طولی آبراهه تعیین می‌گردد: ۱- حالت پایدار اولیه[۲] ۲- حالت گذرا [۳](ناپایدار) و ۳- حالت پایدار نهایی[۴] (شکل۱۱).

[۱] - Uplifts Rate
[2] - initial steady state profile
[3] - transient Steady-State profile
[4] - final steady-state profile



شکل ۱۱: الف) رابطه بین افزایش و کاهش نیمرخ طولی آبراهه و مهاجرت نقطه شکست و ب)رابطه لگاریتمی شیب و مساحت نیمرخ‌های جریان در حالت‌های مختلف. این نمودار نشان می‌دهد که شاخص تقعر در حالت‌های اولیه و نهایی یکسان بوده ولی شاخص شیب تغییر ناگهانی داشته است (شهزاد و گلوگوئن، ۲۰۱۱)

نیمرخ حالت گذرا نشان‌دهنده تضاد لیتولوژیکی یا مرزهای گسلی است که جریان آبراهه‌ای را به سمت شرایط تعادلی جدید سوق می‌دهد (شکل ۱۱ ب). قانون تنش برشی حفر کانال[1]، بیان می‌کند که تحت شرایط حالت پایدار (ایستا)، مساحت بالادست (A) و شیب (S) آبراهه در هر مرحله با فرمول زیر نشان داده شود (شهزاد و گلوگوئن، ۲۰۱۱):

معادله ۵: $$S=K_sA^{-\theta}$$

که در آن θ و k_s به ترتیب شاخص تقعر و شیب می‌باشد. این مقادیر به مورفولوژی حوضه یعنی مقاومت سنگ‌بستر و هندسه هیدرولیکی بستگی دارد. این مؤلفه‌ها را می‌توان به‌طور مستقیم به‌وسیله تجزیه‌وتحلیل رگرسیونی بین مؤلفه‌های A و S اندازه‌گیری کرد (شکل ۱۱ ب) (مونتگموری و همکاران، ۱۹۹۶؛ اسنایدر و همکاران، ۲۰۰۰؛ وبوس و همکاران، ۲۰۰۶). شکل ۱۱ ب نموداری log-log (لگاریتمی) بین مساحت (A) و شیب (S) است که سه مرحله تکوینی نیمرخ

[1] - The shear stress incision law

جریان رودخانه را نشان می‌دهد. در برنامه TecDEM این مراحل را می‌توان با پنجره‌های رابط گرافیکی با تعیین روند[۱] در نمودار لگاریتمی رسم شده، تعیین نمود. در این برنامه، واحدهای آبراهه‌ای دارای کنتراست‌های لیتولوژیکی و مرزهای گسلی توسط شاخص‌های تقعر و شیب مشخص می‌گردند. برای محاسبه نرخ بالاآمدگی نسبی حوضه نیاز است تا شیب به دست آماده را نرمالیزه نماییم. شاخص شیب نرمال شده (k_{sn}) با استفاده از یک ثابت با مقدار مرجع تقعر (θ_{ref}) که معمولاً آن را ۰/۴۵ در نظر می‌گیرند، محاسبه می‌کنند (اشنایدر و همکاران، ۲۰۰۰؛ وبوس و همکاران، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۶). θ_{ref} برای تفسیر مقادیر شیب محاسبه‌شده رابطه ۱ استفاده می‌گردد. شاخص نرمال شده (k_{sn}) را می‌توان برای محاسبه نرخ بالاآمدگی نسبی در رابطه زیر استفاده نمود:

معادله ۶: $$U=k_{sn}{}^{n}k$$

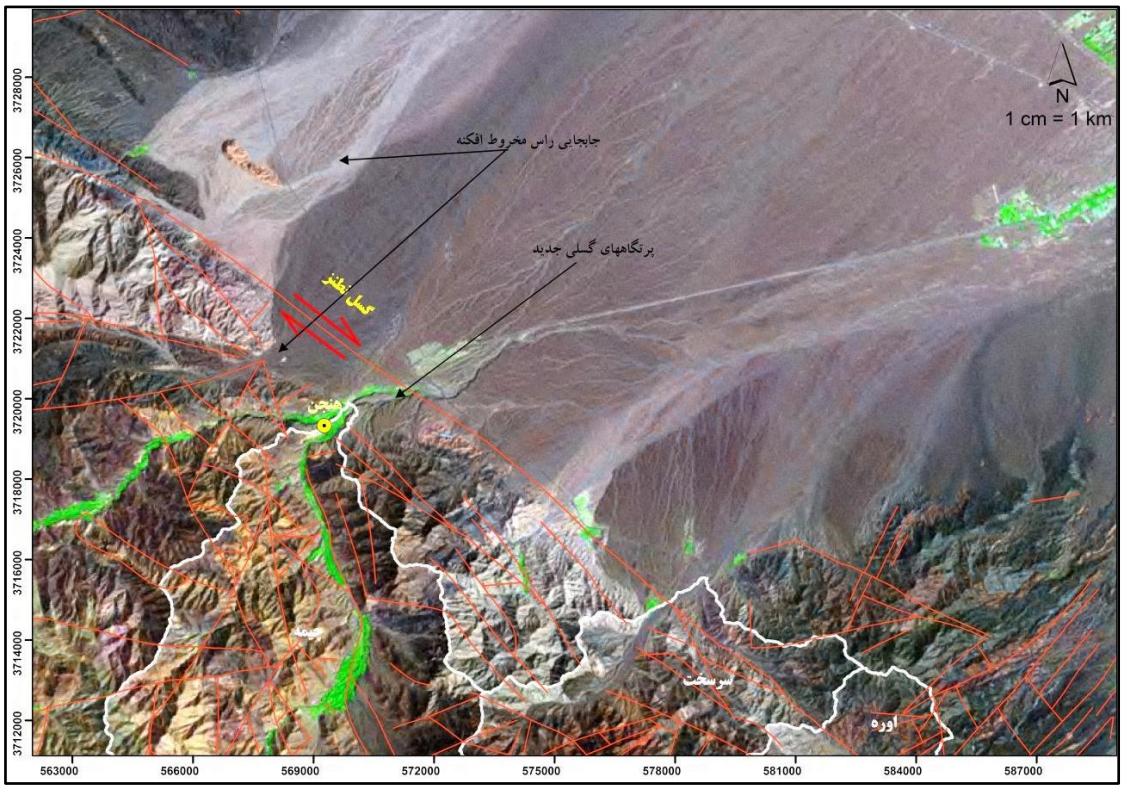
که در آن k ضریب فرسایش منطقه است، n بستگی به مورفولوژی حوضه دارد و U نرخ بالاآمدگی نسبی است. این معادله نرخ بالاآمدگی نسبی را برای منطقه‌ای که در یک‌چشم انداز در حالت پایدار با انتخاب مقادیر مناسب n و k که می‌توان از مطالعات قبلی پیدا کرد، ارائه می‌دهد (اندرسون و همکاران، ۱۹۹۴؛ وبوس و همکاران، ۲۰۰۶). روش محاسبه و مراحل آن در شکل۱۱ توضیح داده‌شده است. با توجه به رابطه فوق، نرخ بالاآمدگی نسبی حوضه‌های موردمطالعه محاسبه گردیدند. مقدار ضریب فرسایش در منطقه کوهستانی موردمطالعه بر اساس مطالعات صورت گرفته پیشین در این منطقه و مناطق مشابه آن، ۰/۷ در نظر گرفته‌شده است. نقشه نرخ بالاآمدگی نسبی منطقه، بیانگر تفاوت نرخ بالاآمدگی در بخش‌های مختلف منطقه است. در بخش دامنه‌های شرقی منطقه، نرخ بالاآمدگی ۲/۳ میلی‌متر در سال بوده که این رقم در بخش دامنه‌های غربی و جنوبی منطقه به ۰/۷ میلی‌متر در سال و در بخش شمالی منطقه به ۰/۱۸ میلی‌متر در سال کاهش می‌یابد. بنابراین، حوضه‌های واقع در دامنه‌های شرقی کوهستان کرکس بالاترین نرخ بالاآمدگی تکتونیکی را تجربه می‌کنند که عامل اصلی آن، وجود گسل معکوس و راست‌گرد نطنز واقع در خط کنیک کوهستان(محدوده حوضه‌های: سرسخت، اوره و نطنز) با دشت بادرود می‌باشد.

نتیجه‌گیری

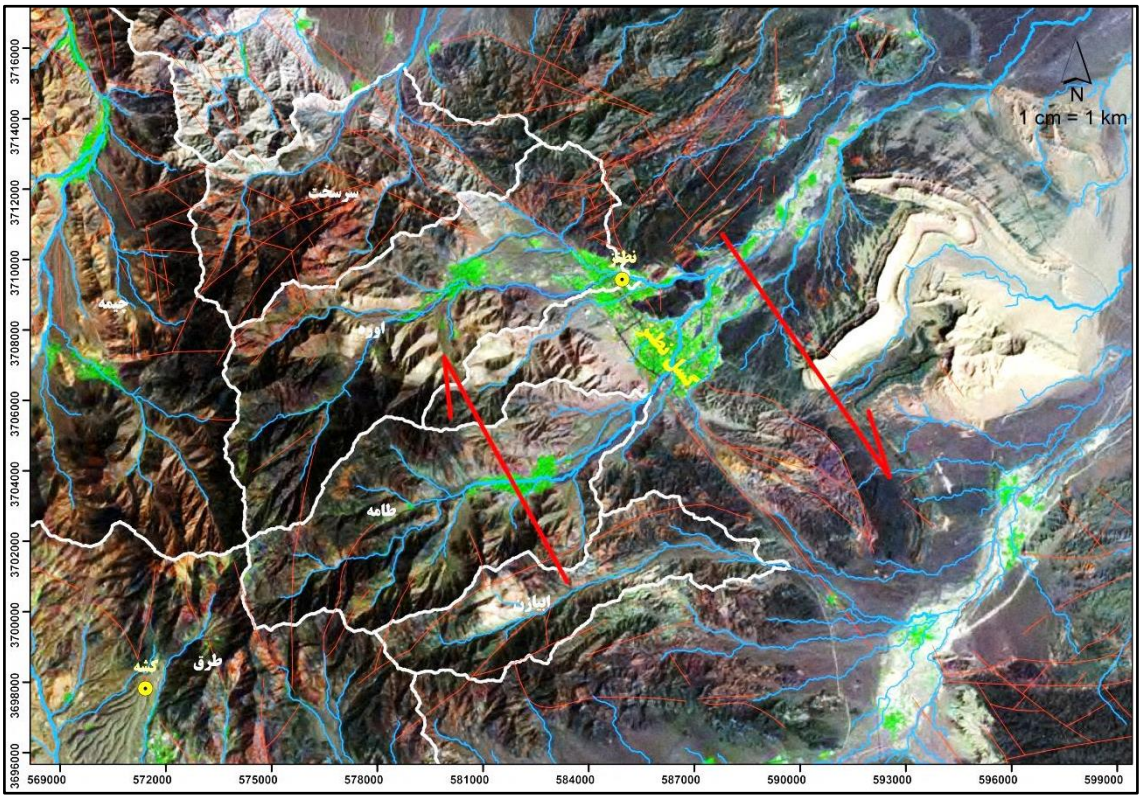
تولید نقشه‌های مورفوتکتونیک برای تحلیل دینامیک سطحی و دینامیک حوضه‌های آبریز، ابزار بسیار مهمی برای تجزیه‌وتحلیل‌های تکتونیک ژئومورفولوژی است (گروهمن، ۲۰۰۵). بررسی اجمالی زمین‌شناسی و تکتونیک حوضه‌های آبریز دامنه‌های ارتفاعات کرکس واقع در بخش مرکزی سامانه گسلی قم-زفره (QZFS) نشان می‌دهد که در این ناحیه حساسیت بر روی فعالیت‌های تکتونیکی وجود دارد و کوهستان کرکس یک عارضه ژئومورفیک فعال محسوب می‌گردد با این تفاوت که شدت فعالیت‌های تکتونیکی در دامنه‌های آن در همه‌جا یکسان نیست. بر اساس نتایج حاصله از تجزیه‌وتحلیل شاخص‌های ژئومورفیک، حوضه‌های آبریز واقع در دامنه‌های شرقی کوهستان کرکس به لحاظ مجاورت و همپوشانی با گسل معکوس و امتدادلغز نطنز، دارای بیشترین تغییرات مورفوتکتونیکی هستند. بر این اساس، حوضه‌های واقع در دامنه‌های شرقی کوهستان کرکس یعنی: چیمه، طامه و اوره بیشترین و حوضه آبریز طَرق (واقع در غرب کوهستان کرکس) کمترین میزان فعالیت تکتونیکی را دارا می‌باشند. به‌طوری‌که بیشترین میزان شاخص SL به حوضه‌های طامه و چیمه تعلق دارد (جدول ۱). درحالی‌که بر اساس شاخص تقارن توپوگرافی عرضی، بیشترین میزان کج شدگی به ترتیب مربوط به حوضه‌های سرسخت و اوره بوده و حوضه چیمه کمترین میزان کج شدگی را بر اساس فعالیت‌های تکتونیکی داشته است. تحلیل شاخص چولگی حوضه‌های آبریز نشان می‌دهد که بیشترین مقدار تحدّب در حوضه‌های طرق و سرسخت بوده و منحنی هیپسومتری تمامی حوضه‌ها به‌جز طامه در حالت تقعر قرار دارند. الگوی نقشه هم مبنا حوضه‌ها نیز نشان‌دهنده تأثیر

[۱] - Terend

تکتونیک و تغییرات سریع توپوگرافی منطبق بر خطوط گسلی است. این تغییرات عمدتاً در سطوح ارتفاعی ۲۴۰۰–۲۶۰۰ متر بوده و تأثیرپذیری شبکه‌های آبراهه‌ای از حرکات راست‌گرد گسل‌ها را نمایان می‌سازد. نتایج مربوط به روند تحول شبکه آبراهه‌ای (اشکال۱۲ و ۱۳) در بخش‌های مختلف منطقه، حاکی از روند متفاوت تحول آبراهه‌هاست. باوجوداینکه شرایط تکتونیکی برای کل منطقه فعال ارزیابی گردید، اما در بخش‌های مختلف منطقه، مقادیر فعالیت و نحوه عملکرد آن، یکسان تشخیص داده نگردید. نتایج مربوط به ارزیابی نرخ بالاآمدگی تکتونیکی منطقه، جدول مقادیر شاخص SL و انطباق آن‌ها باهم، این مسئله تائید می‌نماید. به‌طورکلی نتایج حاصل از این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تغییر شکل تکتونیکی به‌صورت ناهمگونی در ارتفاعات کرکس توزیع‌شده است. ازاین‌رو دو زون متفاوت و تغییر شکل یافته در منطقه شناسایی گردیدند یکی در دامنه‌های شرقی کوهستان کرکس که متأثر از فعالیت‌های تکتونیکی از نوع بالاآمدگی و تراست گسل نطنز است و دیگری در دامنه‌های غربی که دارای فعالیت‌های محدود تکتونیکی است. در پایان لازم است ذکر شود که در این تحقیق از قابلیت‌های نرم‌افزار TecDEM2.0 استفاده گردید و نتایج خوبی که با واقعیت‌های موجود مورفوتکتونیکی در سطح منطقه انطباق داشته به دست آمد.



شکل ۱۲: تغییر مسیر رودخانه و انحراف سطح مخروط حوضه سرسخت (تصویر ماهواره‌ای لندست7 +ETM)



شکل ۱۳: تغییر مسیر رودخانه و انحراف سطح مخروط حوضه اوره (تصویر ماهواره‌ای لندست7 +ETM)

منابع

- 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.
- ده بزرگی، مریم، مؤمنی طارمسری، محمد، (۱۳۹۵)، فعالیت زمین‌ساخت جوان در پهنه گسلی قم – زفره ایران مرکزی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال پنجم، شماره ۲، پاییز ۱۳۹۵، صص ۱۱۰-۱۲۹.
- رجبی، معصومه، هاشمیان، میرابراهیم، (۱۳۹۶)، ارزیابی فعالیت‌های زمین ساختی حوضه‌های آبریز دامنه جنوب غرب ارتفاعات سبلان با استفاده از اختصاصات ژئومورفولوژیک، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال سی و دوم، شماره اول، بهار ۱۳۹۶، شماره پیاپی ۱۲۴، صص۷۶-۹۳.
- گورابی، ابوالقاسم، کیارستمی، فاطمه، (۱۳۹۴)، ارزیابی زمین‌ساخت حوضه‌های آبریز با استفاده از اختصاصات ژئومورفولوژیک در قالب الگوی *TecDEM* موردمطالعه: حوضه آبریز رودک در شمال شرق تهران، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۷ ، شماره ۳ ، پاییز ۱۳۹، ص. ۴۷۹ – ۴۶۵.
- محمدنژاد، وحید، (۱۳۹۵)، گسل‌های فعال و تأثیر آن‌ها بر تغییر شکل لندفرم‌های کواترنر شمال‌شرق دریاچه‌ی ارومیه، ایران، مجله علمی–پژوهشی پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، بهار ۱۳۹۵، دوره چهل و هشتم – شماره ۱ (۲۴ صفحه – از ۸۳ تا ۱۰۶).

- *Amidi, S. M. (1975): Contribution a letude stratigraphique et Petrochimique des roches magmatiques de la region Natanz- Nain- Surk (Iran Central). These, universite Scientifique et Medical de Grenoble, France, 316p.*
- *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 the Geological Society of America 106, 571–581.*
- *Filosofov, V.P., 1960. Brief Guide to Morphometric Methods in Search of Tectonic Features. Saratov University Publishing House, Saratov, Russia (in Russian).*
- *Garrote, J., Cox, R.T., Swann, C., Ellis, M., 2006. Tectonic geomorphology of the southeastern Mississippi Embayment in northern Mississippi, USA. Bulletin of the Geological Society of America 118, 1160–1170.*
- *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), 130–144.*
- *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.*
- *Golts, S., Rosenthal, E., 1992. Morphotectonic methods to infer groundwater flow under conditions of scarce hydrogeological data—the case of northern Arva, Israel. Applied Hydrogeology 3 (1), 5–19.*
- *Golts, S., Rosenthal, E., 1993. A morphotectonic map of the northern Arava in Israel, derived from isobase lines. Geomorphology 7 (4), 305–315.*
- *Grohmann, C.H., 2004. Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R. Computers & Geosciences 30 (9–10), 1055–1067.*
- *Grohmann, C.H., Riccomini, C., Alves, F.M., 2007. SRTM-based morphotectonic analysis of the Pocos de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil. Computers & Geosciences 33 (1), 10–19.*
- *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.*
- *Hack, J.T., 1973. Stream-profile analysis and stream-gradient index. U.S. Geological Survey Journal of Research 1 (4), 421–429.*
- *Jordan, G., Meijninger, B. M. L., van Hinsbergen, D.J.J., Meulenkamp, J.E., van Dijk, P.M. (2005),*
- *Keller, E.A., Pinter, N. (2002), Active Tectonics. Earthquakes, Uplift and Landscape, Prentice Hall, pub.*
- *Luo, W., 1998. Hypsometric analysis with a geographic information system. Computers & Geosciences 24 (8), 815–821.*
- *Moghimi, E.; (2009), Comparative Study of Changing Drainage Basin System with Tectonic Forms, Case Study: Lut Block, Iran, American Journal of Applied Sciences 6 (6): 1270-1276, 2009.*
- *Montgomery, D.R., Abbe, T.B., Buffington, J.M., Peterson, N.P., Schmidt, K.M., Stock, J.D., 1996. Distribution of bedrock and alluvial channels in forested mountain drainage basins. Nature 381, 587–589.*
- *Mountains Range, Iran, Geogr.Fis.Dinam.Quat, 35.pp.61-68.*
- *Mumipour, M. (2012), Active Tectonics Influence on drainage networks in Dinarkooh Region, Zagros*

- *Perez-Pena, J.V., Azanon, J.M., Azor, A., 2009. CalHypso: an ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. Computers & Geosciences 35 (6), 1214–1223.*
- *Shahzad, F.; Gloaguen, R., (2011), TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 1: Drainage network preprocessing and stream profile analysis, Computers & Geosciences 37 (2011) 250–260.*
- *Shahzad, F.; Gloaguen, R., (2011), TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 2: Surface dynamics and basin analysis, Computers & Geosciences 37 (2011) 261–271.*
- *Snyder, N., Whipple, K., Tucker, G., Merritts, D., 2000. Landscape response to tectonic forcing: digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, Northern California. Bulletin of the Geological Society of America 112 (8), 1250–1263.*
- *Strahler, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. Transac- tions of the American Geophysical Union 8 (6), 913–920.*
- *Wobus, C.W., Hodges, K.V., Whipple, K.X., 2003. Has focused denudation sustained active thrusting at the Himalayan topographic front? Geology 31 (10), 861–864.*